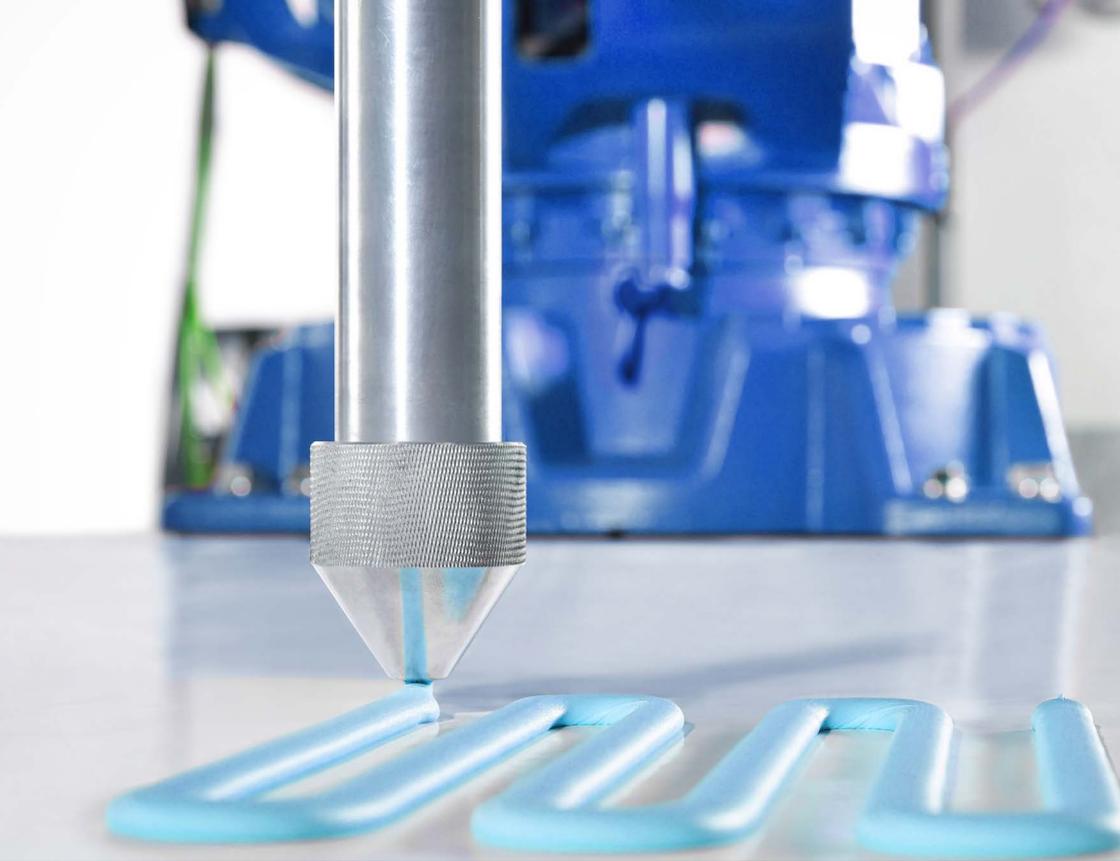


Berger/Kiefer (Hrsg.)

DICHTUNGS TECHNIK

JAHRBUCH 2019

ISGATEC®



Scheugenpflug

Advanced Dispensing Technology



**Vom autonomen Fahren bis zu dezentralen Energiespeichern:
Wir schaffen die Voraussetzungen für die Technologien von morgen.**

- Leistungsstarke Systeme für den Verguss unter Vakuum und Atmosphäre
- Optimale Aufbereitung und Förderung auch schwieriger Vergussmaterialien
- Individuell zugeschnittene Automatisierungslösungen
- Modulare Anlagenkonzepte für hohe Zukunftsfähigkeit

Scheugenpflug AG, +49 9445 9564-0, vertrieb.de@scheugenpflug.de, www.scheugenpflug.de

Berger/Kiefer (Hrsg.)

DICHTUNGS TECHNIK

JAHRBUCH 2019



Überlassen Sie nichts dem Zufall – reproduzierbare Dichtungsmontage



Highlights

- ✓ Umfassendes Know-how und über 30 Jahre Erfahrung bei Zuführung und Montage von Dichtungen
- ✓ Vielfach praxisbewährte Standardlösungen für unterschiedliche Stückzahlenanforderungen
- ✓ Entwicklung von individuellen Lösungen entsprechend ihrer kundenspezifischen Anforderungen
- ✓ Eigenes Labor zur Zuführerprobung

Kernkompetenzen

- ✓ **Dichtungsmontage**
 - » Manuelle Vorrichtungen
 - » Halbautomaten
 - » Vollautomaten
 - » Stationen / Integrationsmodule
- ✓ **Automatisierungstechnik**
 - » Rundtischanlagen
 - » Transferlinien
 - » Verkettete Anlagen
 - » Roboterlösungen



Automation at its best – Sicherheit vom Marktführer



Liebe Leserinnen, liebe Leser,

auch in diesem Jahr gilt den Autoren, Umfrageteilnehmern und vielen regelmäßigen Lesern unser Dank. Mit ihrer Hilfe, ist es wieder gelungen, Raum für vertieftes Wissen mit viel Know-how, Erfahrungen sowie Forschungs-, Projekt- und Umfrageergebnissen für den Bereich Dichten. Kleben. Polymer. zu gestalten.

Alles ist im rasanten Wandel, manches verändert sich nur langsam. So können wir anhand unserer regelmäßigen Umfragen erkennen, dass der Print sich im Mix der Informationskanäle nur langsam ändert. Bei Fachmedien bleiben – Print und Online – weiterhin eine zentrale Informationsquelle. Aber die digitalen Kanäle werden an Bedeutung gewinnen. Seit 2018 bieten wir die DICHT! deshalb in einer digitalen, interaktiven Variante, nutzbar über alle Browser und mobilen Endgeräte an. Nach Auswertung der Erfahrungen steht dieser Schritt in den nächsten Jahren auch beim JAHRBUCH Dichten. Kleben. Polymer. (richtig der Name ändert sich mit der nächsten Ausgabe) auf der Agenda. Wir werden Sie dazu nächstes Jahr noch mal explizit befragen.

Weiter ausgebaut haben wir – auch als Ergänzung zum aktuellen DICHUNGSTECHNIK JAHRBUCH – unser Online-Portal www.isgatec.com. Hier finden Sie im Themenkontext zu Ihren Fragestellungen Produkte, Dichtungs-, Kleb- und Polymerlösungen, Verarbeitungstechniken etc. Mit Services wie Checklisten, unseren regelmäßigen Rubriken, wie z.B. Schadensanalyse, Dichtungskonzepte und ihre technischen Grenzen etc., Kommentaren und Kontakten zu Lösungspartnern, sind wir bemüht Ihnen praxisnahe Impulse zu liefern, die Ihre tägliche Arbeit erleichtern.

Die Beiträge des vorliegenden Jahrbuches gehen – wie gewohnt – in die Tiefe und legen die Basis über alle Stufen der Wertschöpfungskette von Dichtungen und Klebverbindungen. Neben Grundlagenwissen und neuesten Entwicklungen und Erkenntnissen aus der Wissenschaft vermittelt das DICHUNGSTECHNIK JAHRBUCH 2019 in der Praxis erprobte Lösungen. Die Gliederung hat sich bewährt und wurde deshalb beibehalten.

In Summe freue ich mich, dass in intensiver Zusammenarbeit aller Beteiligten wieder eine qualitativ hochwertige, fundierte und lesenswerte Ausgabe entstanden ist, die Sie sicher wieder öfter in die Hand nehmen werden.

Viele wertvolle Impulse und Raum für neue Perspektiven wünscht Ihnen

Sandra Kiefer

ISGATEC® GmbH



REIN VOLUMETRISCHE DOSIERUNG VON KLEINSTMENGEN

- Viskositätsunabhängige Dosierung
- Einfache Reinigung
- Rückzugseffekt
- Druckdicht ohne Ventil
- Wiederholgenauigkeit > 99 %

Inhaltsverzeichnis

Trends/Dienstleistungen

- Das bewegt den Markt** 12
Sandra Kiefer, Karl-Friedrich Berger, Holger Best | ISGATEC GmbH
- Normen richtig anwenden** 68
Peter Thomsen | Lannewehr + Thomsen GmbH & Co. KG
- Beschichtungen lösen Zielkonflikte von Dichtungen** 76
Heiko Friedrich | OVE Plasmatec GmbH
- Die Räder der Produktivität am Laufen halten** 84
Ralf Hellwig | ZITEC-Brammer
- Umfassendes Prozessverständnis für produktive und nachhaltige Lösungen** 89
Udo Mößner | Atlas Copco IAS GmbH

Rohstoffe/Mischungen/Halbzeuge

- Die optimale Elastomerdichtung** 98
Dipl.-Ing. (FH) Michael Krüger | C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG
- Glatte Sache** 106
Alexander Kalawrytinis | Pallas GmbH & Co. KG
- Temperaturgrenzen verschieben** 110
Dr. Christian Anger | Wacker Chemie AG
- Sicher gegen Wasser abdichten** 114
M. Sc. Florian Dresel, Andy Wilson, Dr.-Ing. Thomas Köppl | HEXPOL TPE Ltd.
- Vielfalt auf der richtigen Werkstoffbasis** 122
Von B. A. Florian Schindler | ACTEGA DS GmbH

TPE mit Haftung zu EPDM	130
Josef Neuer, Dr. Frieder Vielsack KRAIBURG TPE GmbH & Co. KG	
Ganzheitlich mit hoher Performance für die Fluidbranche	134
Dipl.-Ing. (FH) Joachim Möschel Fietz-Gruppe	
Biokraftstoffkompatibilität in Balance	141
Dr. Heinz-Christian Rost Parker Hannifin Manufacturing Germany GmbH & Co. KG	
Wirtschaftlichkeit und Sicherheit erhöhen	148
Dr. Michael Schlipf FPS GmbH; Dipl.-Ing. (FH) Detlef Reichl FluorTex GmbH	

Statische Dichtungen/Formteile/Profile

Schwachstellen eliminieren	156
Samuel Steinbach STEINBACH AG	
Das vielseitigste Dichtelement – der O-Ring	161
Dipl.-Ing. Bernhard Richter, Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Blobner O-Ring Prüflabor Richter GmbH	
Das nächste Level	176
Ralf Kulesa, Kerstin Holle Garlock GmbH	
Öffnen, wenn es nötig ist	185
Gerd Schollenberger MIS Berghof Fluoroplastic Technology GmbH (BFT)	
Neues Dichtsystem für kriechende Flansche	190
Dipl.-Ing. Marco Schildknecht, B. Eng. Ilona Wohner Frenzelit GmbH	
Gummi-Stahl-Dichtung ist nicht gleich Gummi-Stahl-Dichtung	196
Dipl.-Ing. Norbert Weimer KLINGER GmbH	

Dynamische Dichtsysteme/Tribologie

- PTFE-Wellendichtungen effizient simulieren** 202
M. Sc. Florian Albrecht, Professor Dr.-Ing. habil. Thomas Kletschkowski | Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Technik + Informatik, Department Fahrzeugbau und Flugzeugbau
- Leckagen zuverlässig verhindern** 208
Dr. Frank Schönberg, Dr. Kristian Müller-Niehuus | Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG
- Effizienzsteigerung bei Schwerlast-Hydraulikzylindern** 213
Emmanuel Pichlmaier, Wolfgang Swete | Sealing Solutions Austria GmbH
- Temperaturverhalten eines Dichtsystems** 221
Dipl.-Ing. Christoph Burkhart, M. Sc. Julia Helmes, M. Sc. Dominik Weyrich, Jun. Professor Dr.-Ing. Balázs Magyar, Professor Dr.-Ing. Bernd Sauer | Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik (MEGT)
- RWDR neu interpretiert** 236
Dr.-Ing Mandy Wilke, Holger Jordan | Trelleborg Sealing Solutions
- Geräusche an Gleitringdichtungen** 244
Professor Dr.-Ing. Peter Waidner | Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW)
- Blasen auf Radialwellendichtringen** 286
Dr.-Ing. Frank Bauer, Professor Dr.-Ing. habil. Werner Haas | Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA)
- Leistungssteigerung bei Dichtsystemen** 300
M. Sc. Claudia Effmert | REIFF Technische Produkte GmbH
- Eigene Dichtungslösungen optimieren Hydraulikzylinder** 305
Dipl.-Ing. Klaus Wagner | Herbert Hänchen GmbH & Co. KG
- Leckage um bis zu 50% verringern** 311
Dr.-Ing. Georg Flade | STASSKOL GmbH

Flüssigdichtsysteme

- Höchste Qualität für Computertomographen & Co.** 320
André Tausche | Fischer & Tausche Capacitors FTCAP GmbH;
Andreas Arlt | WEVO-CHEMIE GmbH; Sebastian Piller | Scheugenpflug AG
- Kontinuierlich abdichten – ohne Zwischenlagerung** 328
Florian Kampf | Sonderhoff Holding GmbH
- Ein Konzept für viele Anwendungen** 334
Dr. Andreas Brück, Dr. Frank Kukla | CeraCon GmbH
- E-Mobility basiert auch auf prozesssicherer Dosiertechnik** 343
Anita Krägeloh | ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH

Klebetchnik

- Mischqualität sicher vorhersagen** 350
Dr. Samira Jafari, Joachim Schoeck | Sulzer Mixpac Ltd.
- Klebstoffe messen und vergleichen** 357
Dipl.-Chem. Gerhard Simon | Fa. Gerhard Simon
- Wissen und verstehen, was man tut** 367
Professor Dr. Andreas Groß, Dr. Erik Meiß | Fraunhofer Institut für
Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)
- Licht richtig einsetzen** 375
Robert Saller | DELO Industrie Klebstoffe
- Elastisch** 380
M.A. Thorsten Krimphove | WEICON GmbH & Co. KG
- Vom Birkenpech zu Hightech-Tapes** 390
Gunnar von der Geest | tesa SE

Beschichtung und Kohäsionsbestimmung von Klebstoffen und Haftklebstoffen	397
Professor Dr. Zbigniew Czech, Dipl.-Ing. Karolina Mozelewska Institut für Chemische Organische Technology, Westpommersche Technische Universität Szczecin	
Ressourcen bei der Klebstoffselektion sparen	405
Dr. Martin Brandtner-Hafner FRACTURE ANALYTICS	
Fertigungskapazitäten einfach skalieren	417
Sascha Bender RAMPF Production Systems GmbH & Co. KG	
Maschinen und Anlagen	
Smarte Elastomerverarbeitung	422
Ing. Leopold Praher, Paul Kapeller ENGEL AUSTRIA	
Nachhaltig Dichtungen fertigen	430
Jürgen Moser STM Stein-Moser GmbH; Sven Anders STM Waterjet GmbH Germany	
Die Mischung macht's	436
Torsten Fuchs Gefran Deutschland GmbH	
Prozesssicherheit durch intelligente Entgasung	440
Udo Tartler TARTLER GmbH; Michael Stöcker Fachjournalist	
Keine Chance für Korrosion	446
Inès A. Melamies Pressebüro Facts4You.de; Edgar Düvel, Leonhard Enneking Plasmatrete GmbH	
In Alternativen denken und die richtige Technik einsetzen	455
Dipl. Betriebswirt (BA) Simon Treiber Berger S2B GmbH	
Neue Potenziale erschließen	461
Lukas Pawelczyk ARBURG GmbH + Co KG	

Kompressible Dichtstoffe in Form gebracht	466
Dipl.-Ing. Urs Roemer Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Stade; Dipl.-Ing. Jens Bölke DOPAG/Hilger & Kern Group	

Mess- und Prüftechnik

Beschichtungsanlagen auf Dichtheit prüfen	474
Dr. Rudolf Konwitschny Pfeiffer Vacuum GmbH	
Dichtheitsprüfung im Fertigungsprozess	485
Dr. Joachim Lapsien CETA Testsysteme GmbH	
Was beim Schnüffeln zu beachten ist	494
Dipl.-Ing. Sandra Seitz INFICON GmbH	
Unternehmen finden	499
LÖSUNGEN FINDEN	500

Trends/Dienstleistungen

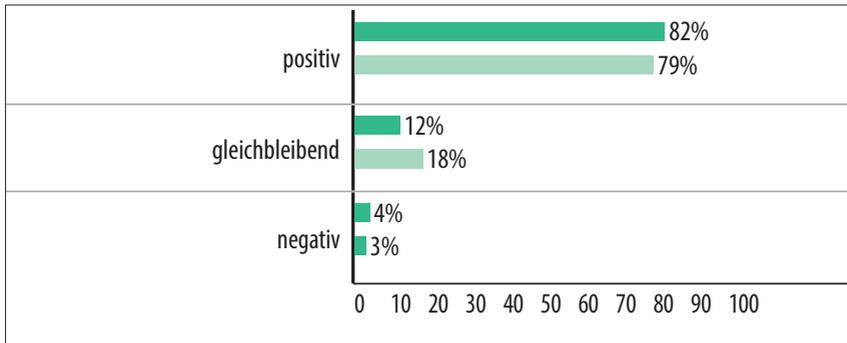


Das bewegt den Markt

Aktuelle Umfrageergebnisse zu den vielschichtigen Fragestellungen im Bereich Dichten. Kleben. Polymer.

Die Zeiten werden nicht ruhiger – seien es die großpolitische Wetterlage bis hin zu drohenden Handelskriegen oder hin zu den steigenden Anforderungen an nahezu alle Produkte – und damit auch an Dichtungen und Verklebungen. Wie jedes Jahr haben wir Experten auf der Anwender- (■) und Herstellerseite (■) zu ihren Einschätzungen befragt. Die Ergebnisse zu den fünf Umfragen seit Herbst 2017 sind hier komprimiert zusammengefasst und ergeben wieder ein umfangreiches und vielschichtiges Bild. An den Umfragen haben in Summe wieder mehr als 600 Personen teilgenommen. Wie üblich mussten nicht alle Fragen beantwortet werden und bei verschiedenen Fragen waren Mehrfachnennungen möglich (mit ¹ gekennzeichnet).

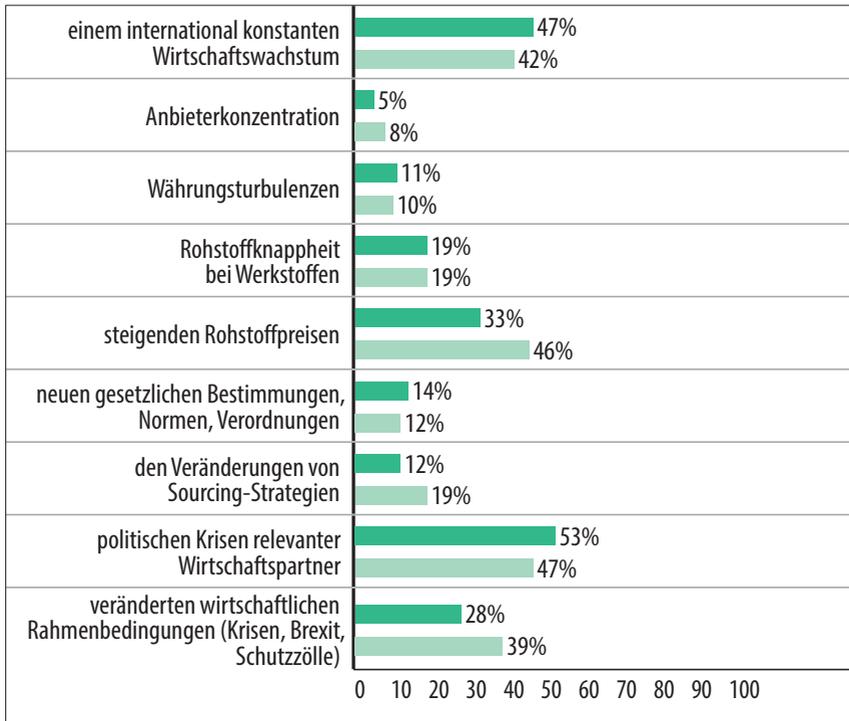
Wie beurteilen Sie die wirtschaftlichen Perspektiven für Ihr Unternehmen?



Das Ergebnis überrascht nicht – angesichts einer brummenden Konjunktur und hoher Beschäftigung sind die Werte im Vergleich zu Vorjahr nochmal leicht gestiegen. Die Bedenken, die man angesichts eines zunehmend angespannten Verhältnisses zu unseren amerikanischen Partnern und dem damit einhergehenden Vertrauensverlust, in Gesprächen zunehmend hört, spiegeln sich hier noch nicht wieder. Zwischen Anwendern und Herstellern gibt es hier kaum Unterschiede.

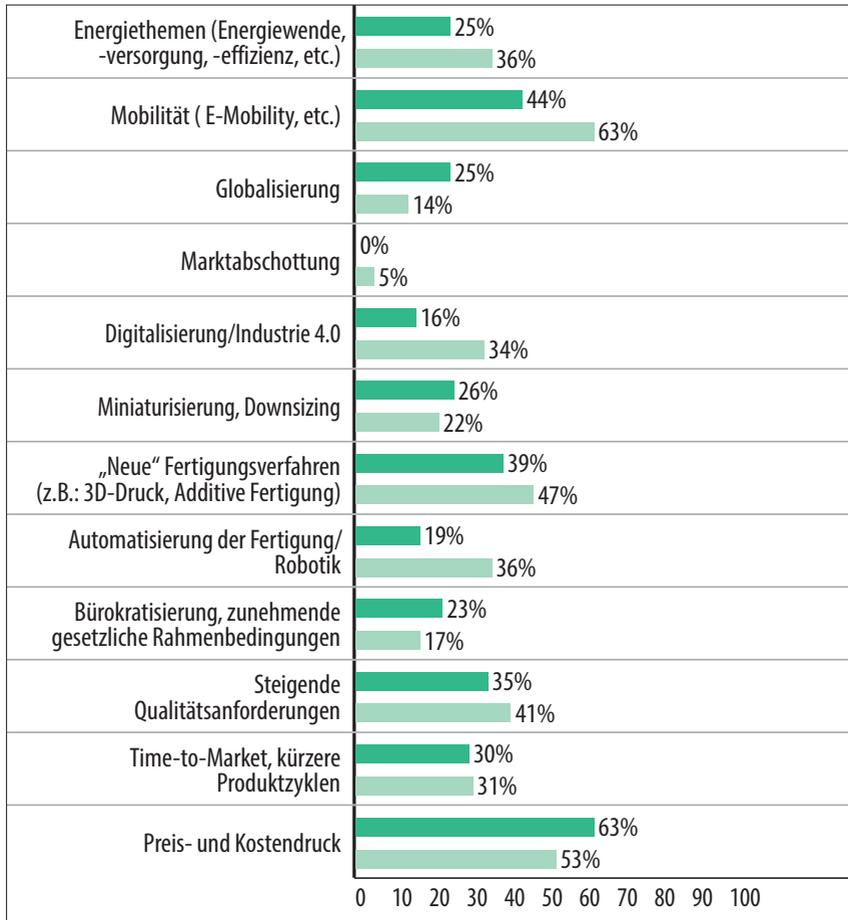
Von Sandra Kiefer, Herausgeberin; Karl-Friedrich Berger, Herausgeber; Holger Best, Content Manager
ISGATEC GmbH | www.isgatec.com

Die Wirtschaftsentwicklung wird in den nächsten 12 Monaten vorwiegend bestimmt von...¹



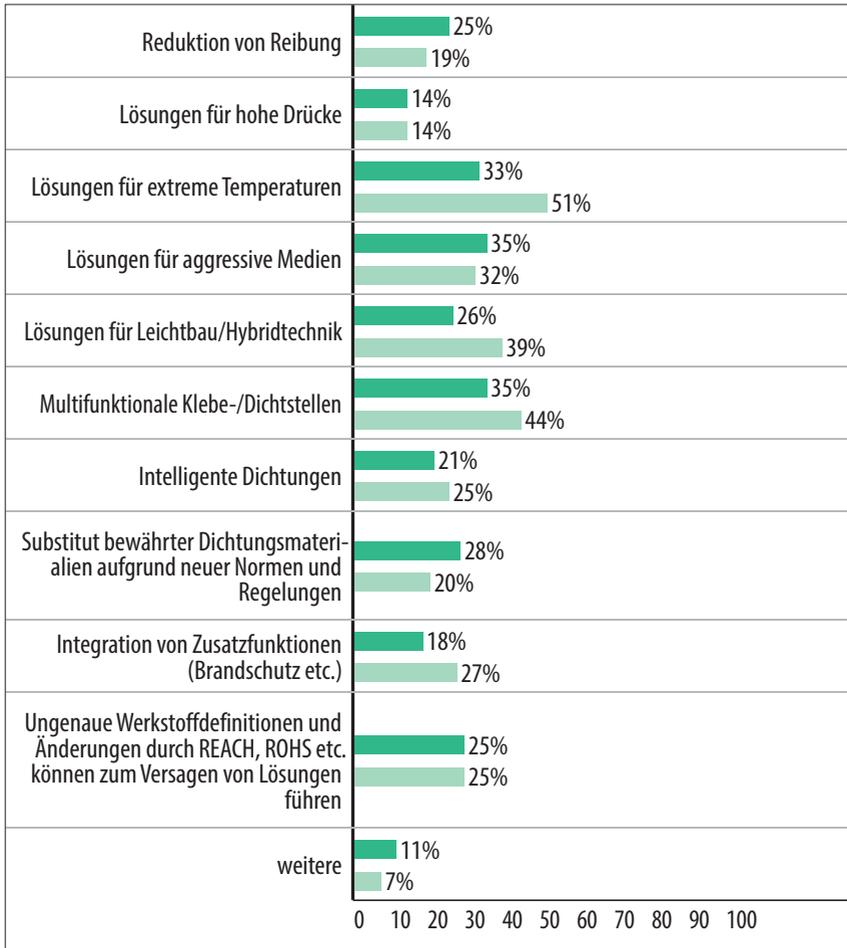
Das Vertrauen in ein konstantes internationales Wirtschaftswachstum hat im Vergleich zum Vorjahr um rd. ein Drittel abgenommen. Demgegenüber wird der Einfluss politischer Krisen relevanter Wirtschaftspartner mehr als doppelt so oft genannt und gilt damit dieses Jahr als größter Einflussfaktor. Auch der Einfluss von wirtschaftliche Krisen durch Brexit und Schutzzölle wird mit 28% (Anwender) und 39% (Hersteller) gerade herstellerseitig deutlich höher (2017 – 11%) eingestuft. Daneben verblissen neue gesetzliche Bestimmungen, Normen und Verordnungen in der Bedeutung, während Rohstoffverfügbarkeit und -preise einen steigenden Einfluss haben. In den freien Nennungen taucht erwartungsgemäß die Datenschutzgrundverordnung mit vielen Nennungen auf. Sie hat dieses Jahr in vielen Unternehmen viel Aufwand bedeutet und jetzt sind alle gespannt, wie die vielen unklaren Regelungen in der Praxis umgesetzt werden und welche Folgen das hat. Rechtssicherheit, die ja eigentlich mit Gesetzen angestrebt werden sollte, sieht anders aus.

Welche generellen Trends und Entwicklungen haben derzeit große Auswirkungen auf die Dichtungs-, Klebe- und Polymertechnik? ¹



Die Ergebnisse spiegeln die aktuellen Trendthemen unserer Gesellschaft wider. Der Preis- und Kostendruck bewegt sich als zentral genanntes Kriterium auf Vorjahresniveau. Die Bewertung der E-Mobility hat nochmals deutlich zugelegt, wobei dies insbesondere bei Herstellern mit + 20% im Vergleich zum Vorjahr interessant ist. Bei dem Thema „steigende Qualitätsanforderungen“ ist es im Vergleich zu Vorjahr zu einer Beruhigung gekommen. Insbesondere bei Anwendern hat dies Thema – im Vergleich zu Vorjahr – um rd. 20% an Bedeutung verloren. Auch nivellieren sich hier die starken Unterschiede des letzten Jahres zwischen Anwendern und Herstellern. Auch neuen Fertigungsverfahren wird dieses Jahr wieder eine große Bedeutung beigemessen, allerdings mit umgedrehter Priorität. Hatte dieses Thema letztes Jahr mit 50% bei Anwendern eine hohe Bedeutung, so liegt diese dieses Jahr bei 39%. Bei Herstellern ist dieser Aspekt jedoch von 29% in 2017 dieses Jahr auf 47% gestiegen. Solche starken Sprünge in der Einschätzung gab es schon länger nicht mehr.

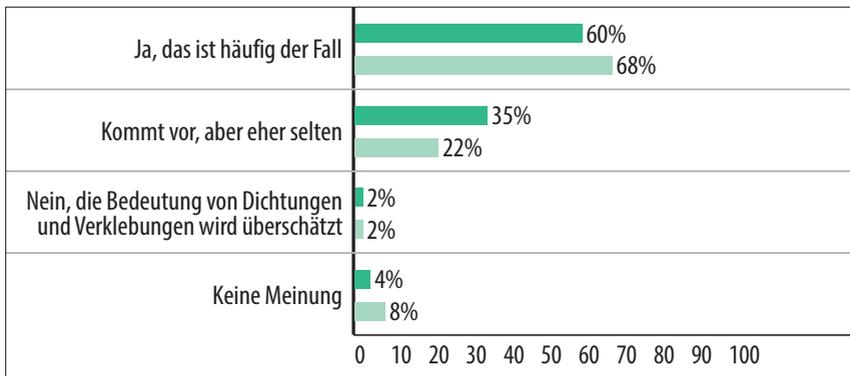
Welche technischen Anforderungen der Anwender sind derzeit die größten Herausforderungen für den Bereich Dichten. Kleben.Polymer.? ¹



Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Vorjahr – nur etwas abgeschwächt. Lösungen für extreme Temperaturen sind nach wie vor die größte Herausforderung – insbesondere für Hersteller. Bei multifunktionalen Klebe-/Dichtstellen gleicht sich die Einschätzung an. Sahn hier die Anwender mit 50% deutlich größere Herausforderungen als die Hersteller mit 25%, liegen die Werte dieses Jahr bei 35% und 44%.

Die Substitution bewährter Dichtungsmaterialien aufgrund neuer Normen und Regelungen wurde erstmals abgefragt und hat mit 28% bei Anwendern und 20% bei Herstellern recht hohe Einstiegswerte. Überraschend ist das Ergebnis allerdings nicht.

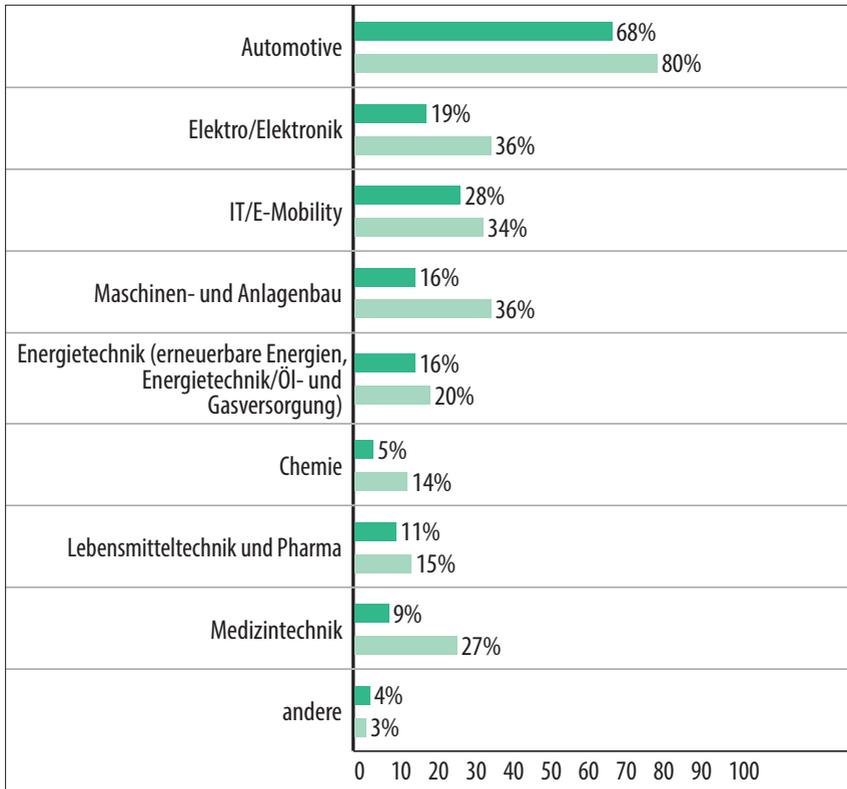
Die gewählte Dichtungs- und Klebelösung kann einen großen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit eines Produktes haben. Welcher Aussage stimmen Sie zu?



Hinter dieser Einschätzung verbirgt sich nichts anderes als das Statement, dass Dichtungen ein systemrelevantes Bauteil sind. Anwender und Hersteller sehen dies in der Tendenz gleich. Damit sollten Dichtungen – auch bei Einkäufern – definitiv keinen C-Teil-Status mehr haben. Bei Verklebungen hat sich diese Frage sowieso nie gestellt.

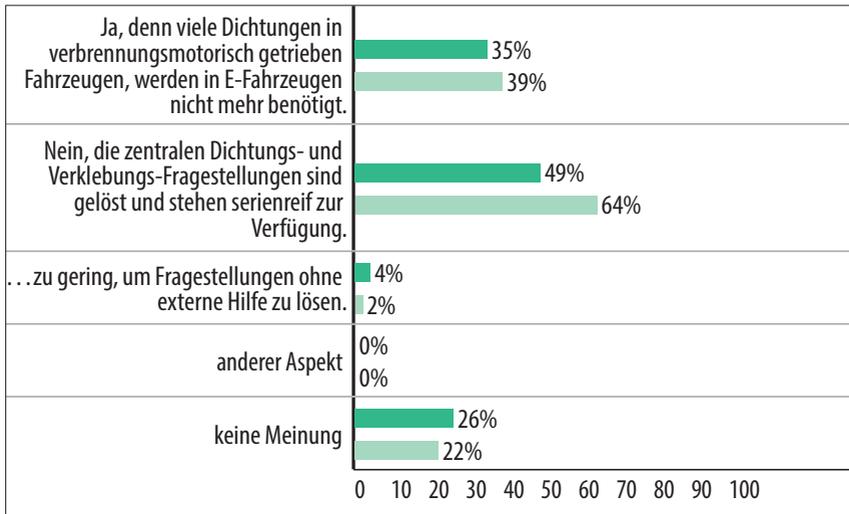
Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „Automotive“ mehr als 280 Treffer und den direkten Kontakt zu 15 Lösungspartnern. Ein Branchen-Dossier – direkt von der Startseite erreichbar – erleichtert den Einstieg zusätzlich.

Die Entwicklungen im Bereich Dichten.Kleben.Polymer. sind je nach Branche sehr unterschiedlich. Welche Branchen sind derzeit der größte Treiber? ¹



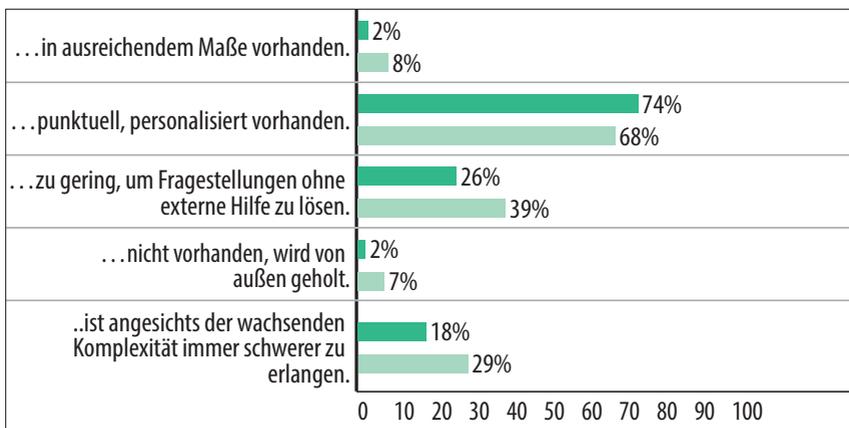
Hier hat sich am Ranking im Vergleich zum Vorjahr wenig geändert. Die Automobilindustrie gilt nach wie vor als der größte Treiber. Die neu aufgenommene Branche IT/E-Mobility, die eng mit der der Elektronik/Elektronik verbunden ist, hat auch ähnliche hohe Werte und beeinflusst natürlich auch die Automobilindustrie. Der Wandel dieser Branche ist auch IT-getrieben. Eine weitere nennenswerte Veränderung gab es – im Vergleich zum Vorjahr – noch im Lebensmittel- und Pharmabereich. Hier schätzen die Hersteller die Treiberbedeutung mit 15% deutlich geringer ein als im Vorjahr mit 26% und nähern sich der Einschätzung der Anwender.

Wird der Wandel in der Automobilindustrie die Lösungsanbieter im Bereich Dichten. Kleben. Polymer. vor große Herausforderungen stellen? ¹



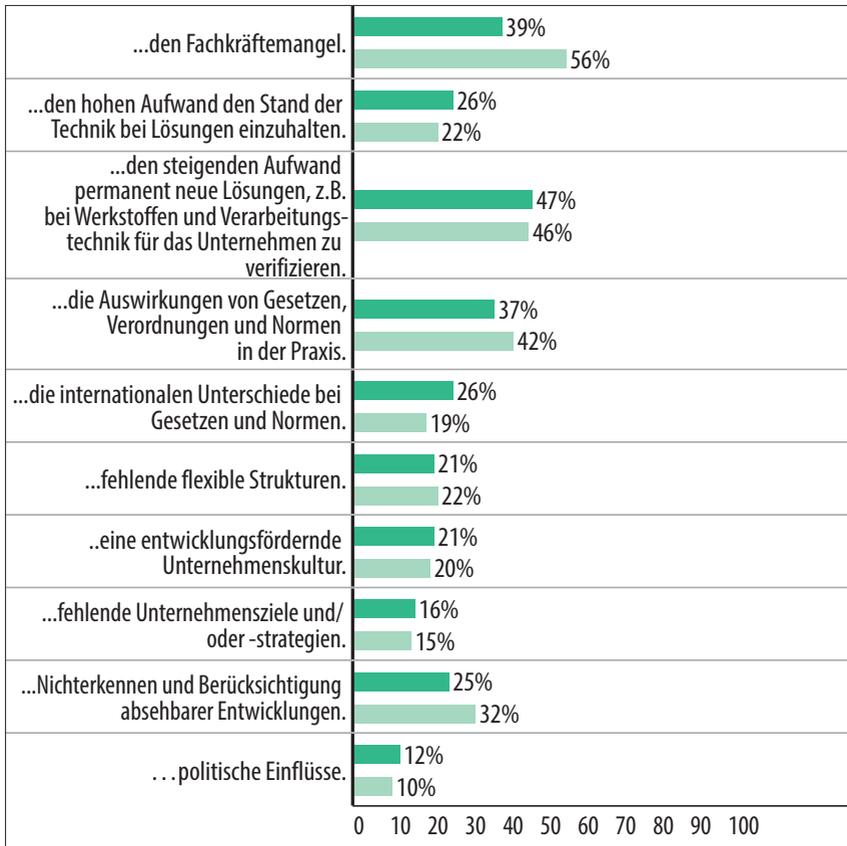
Trotz des großen Hypes um dieses Thema, wird hier eines doch deutlich – aus der Dichten. Kleben. Polymer.-Perspektive ist E-Mobility eine Herausforderung, die von Herstellern mit 64% noch größer als von Anwendern mit 49% eingeschätzt wird. Auffällig ist aber, dass rd. ein Viertel der Antwortenden zu diesem Thema noch keine Meinung hat.

Das vorhandene Dichtungs-, Klebe-, Polymertechnikwissen bei Anwendern wird oft kritisch gesehen. Wie beurteilen Sie den Status quo? ¹ Das notwendige Wissen ist...¹



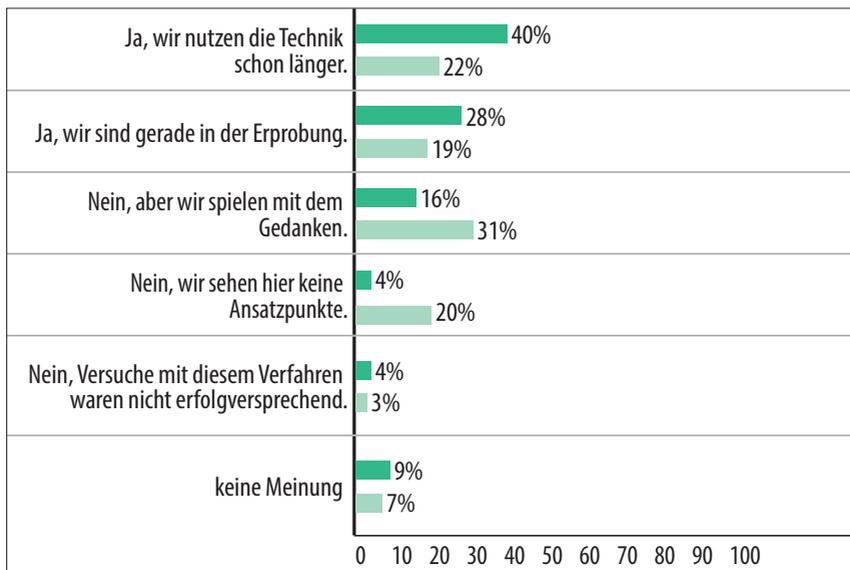
Das vorhandene Wissen wird wie in den Vorjahren eingeschätzt – schade. Es ist nicht ausreichend vorhanden, wird kaum von außen geholt, aber immerhin ist der Anteil der Anwender, die meinen, dass das notwendige Wissen angesichts der wachsenden Komplexität immer schwerer zu erlangen sei, gesunken. Dies sehen 18% (Vorjahr – 43%) so. Bei Herstellern hat sich die Einschätzung nicht geändert. Woher dieser Optimismus angesichts der steigenden Komplexität dichtungs- und klebetechnischer Fragestellungen rührt, ist nicht nachzuvollziehen.

Verschiedenen Unternehmen fällt es schwer, mit der Entwicklung Schritt zu halten, weil die Rahmenbedingungen dies erschweren. Welchen Thesen stimmen Sie zu? Die Unternehmensentwicklung wird behindert durch...¹



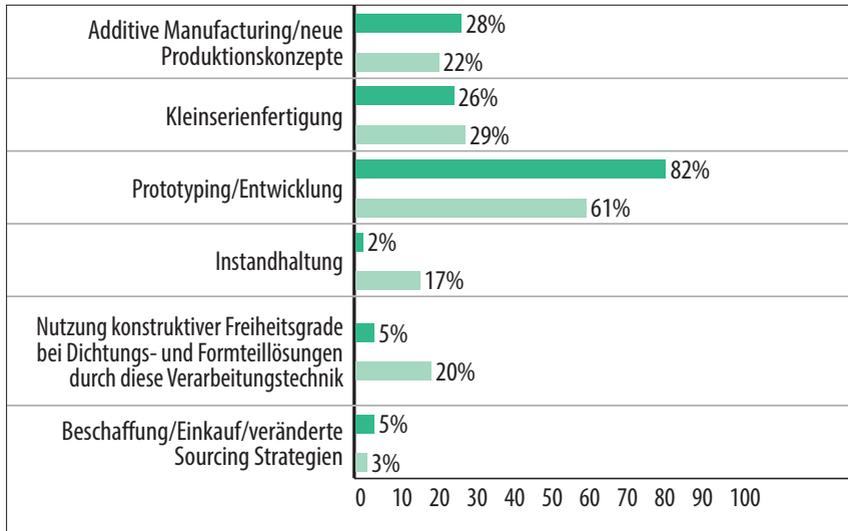
Der Fachkräftemangel ist ein zentrales Thema, dass allerdings Hersteller mit 56% auf Vorjahresniveau einschätzen, die Anwender mit 39% inzwischen deutlich geringer (Vorjahr – 50%). Erstmals abgefragt wurde der steigende Aufwand, permanent neue Lösungen, z.B. bei Werkstoffen und Verarbeitungstechnik für das Unternehmen, zu finden bzw. zu verifizieren. Dem stimmten 47% der Anwender und 46% der Hersteller zu, womit dies ein zentrales Problem für die Unternehmen ist. Alle anderen Aspekte bewegen sich auf Vorjahresniveau. Das macht es nicht einfacher, aber die reine Menge an Möglichkeiten setzt heute Wissen – hier schließt sich der Kreis zur vorhergehenden Frage, aber auch tragfähige Strategien der Unternehmen im Entwicklungsmanagement voraus.

Der 3D-Druck wird immer mehr eingesetzt. Wie sieht das bei Ihnen aus?



Hier gibt es ein ähnliches Bild wie im Vorjahr – nur mit steigender Tendenz. Die Anwender sind schon stärker in der Praxis angekommen. Fast 70% (Vorjahr – 60%) nutzen die Technik oder erproben sie, im Gegensatz zu rd. 25% bei den Herstellern. Hier spielen noch 31% mit diesem Gedanken und 20% sehen keine Ansatzpunkte.

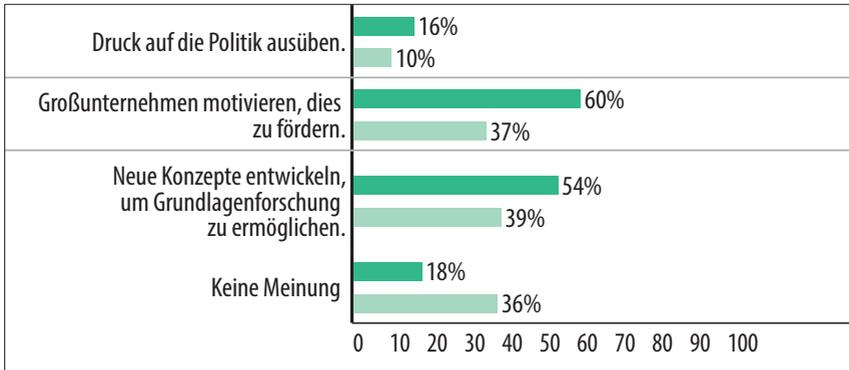
In welchen Bereichen setzen Sie auf 3D-gedruckte Dichtungen und Formteile?¹



Der Fokus beim Einsatz liegt – wie in den Jahren davor – überwiegend auf dem Einsatz in Entwicklung und Prototyping. Hier sind sich Anwender und Hersteller einig. Allerdings geben rd. doppelt so viele Hersteller und Anwender wie 2017 an, die Technik auch im Additive Manufacturing und in der Kleinserienfertigung einzusetzen. Dem Aspekt, die Technik für die Nutzung konstruktiver Freiheitsgrade bei Dichtungs- und Formteillösungen einzusetzen, stimmen 20% der Hersteller zu. Bei Anwendern hat der Aspekt eine geringe Bedeutung.

Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „3D-Druck“ mehr als 90 Treffer und den direkten Kontakt zu 3 Lösungspartnern. Ein Technologie-Dossier erleichtert den Einstieg zusätzlich.

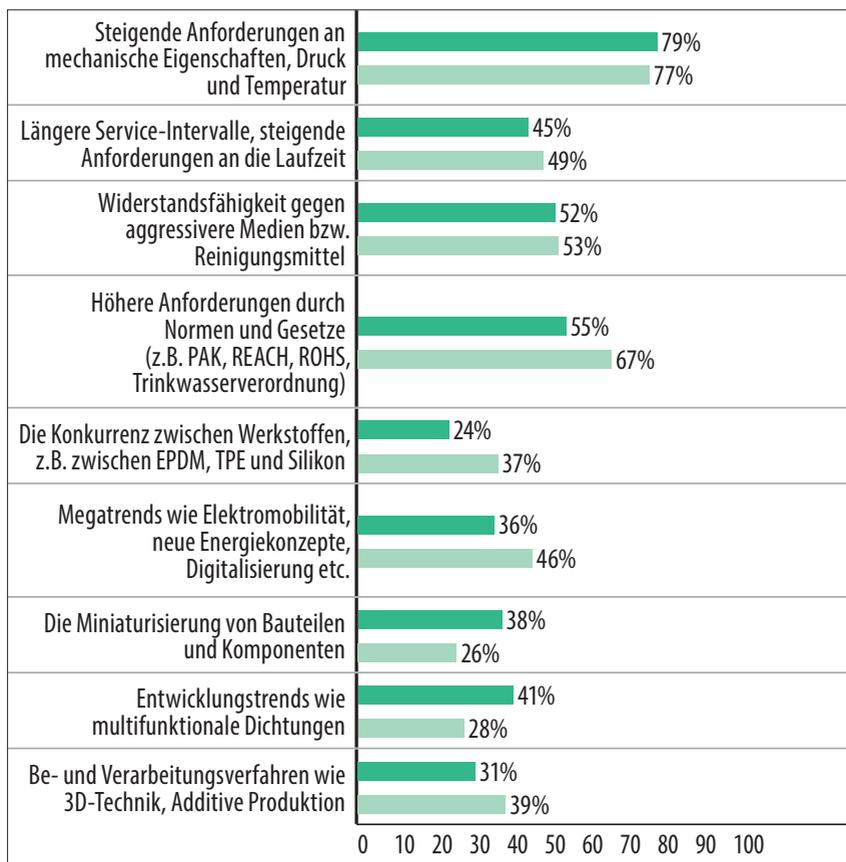
In Deutschland sind die Ressourcen für die institutionelle Dichtungsforschung zu gering und die Grundlagenforschung wird nicht genügend gefördert. Wie sollte man dem entgegenwirken?¹



Hier macht sich etwas Resignation breit – 18% der antwortenden Anwender und 36% der Hersteller haben zu diesem wichtigen Thema keine Meinung. Ansonsten ist die Einschätzung wie im Vorjahr. Viele sehen die Lösung in der Entwicklung neuer Konzepte – wenn auch mit sinkender Tendenz. Dass 60% der Anwender und 47% der Hersteller auf die Motivation von Großunternehmen setzen und nur 16% (Anwender) und 10% (Hersteller) Druck auf die Politik auszuüben, für einen Ansatz halten, ist schade, überrascht aber nicht.

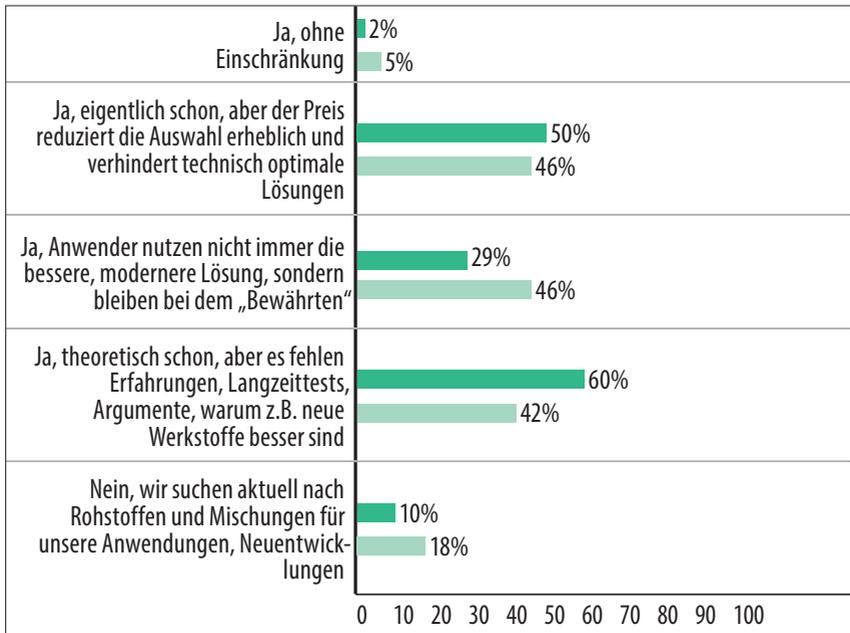
ROHSTOFFE/MISCHUNGEN/HALBZEUGE – Viele technische Anforderungen im Bereich Dichten. Kleben. Polymer. werden über Rohstoffe und Mischungen gelöst. Damit rücken Hochleistungswerkstoffe immer mehr in den Blickpunkt des Interesses. Diese Tendenz bestätigen auch die Antworten. Ein weiterer Treiber sind Normen, die – je nach Branche – eine unterschiedliche, z.T. aber gravierende Rolle spielen. Dabei werden sie immer mehr als Einschränkung betrachtet, auch eine Tendenz, die nicht neu ist.

Welche Trends und Entwicklungen sind Treiber für die Entwicklung neuer Rohstoffe und Mischungen?¹



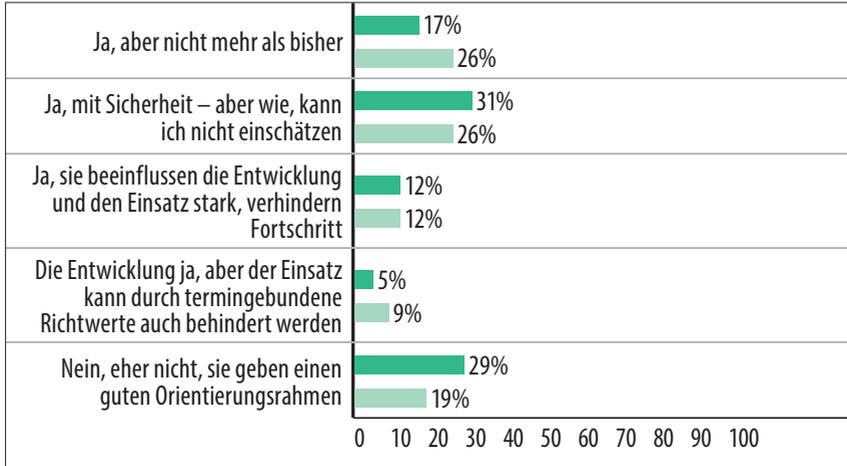
Steigende Anforderungen an mechanische Eigenschaften, Druck und Temperatur sowie höhere Anforderungen durch Normen und Gesetze (z.B. PAK, REACH, ROHS, Trinkwasserverordnung) sind die mehrheitlich genannten Entwicklungstreiber. Im Vergleich zum Vorjahr hat sich wenig am Bild geändert, mit der einzigen Ausnahme, dass Anwender und Hersteller die Situation ähnlich einschätzen.

Stehen für die jeweiligen Aufgabenstellungen die technisch optimalen Rohstoffe und Mischungen zur Verfügung und werden diese eingesetzt?¹



Ein klares Bild: Die richtigen Werkstoffe stehen zur Verfügung. Doch hinsichtlich ihrer Anwendung spielen Preis, fehlende Erfahrungen und Tests, mangelnder Wille zur Veränderung, das Festhalten an Bewährtem eine Rolle. Hinderungsgründe sehen Anwender naturgemäß beim Preis und bei fehlenden Erfahrungen und Tests, die Hersteller beim grundsätzlichen Verhalten der Anwender – ein Ergebnis, das eigentlich nicht überrascht.

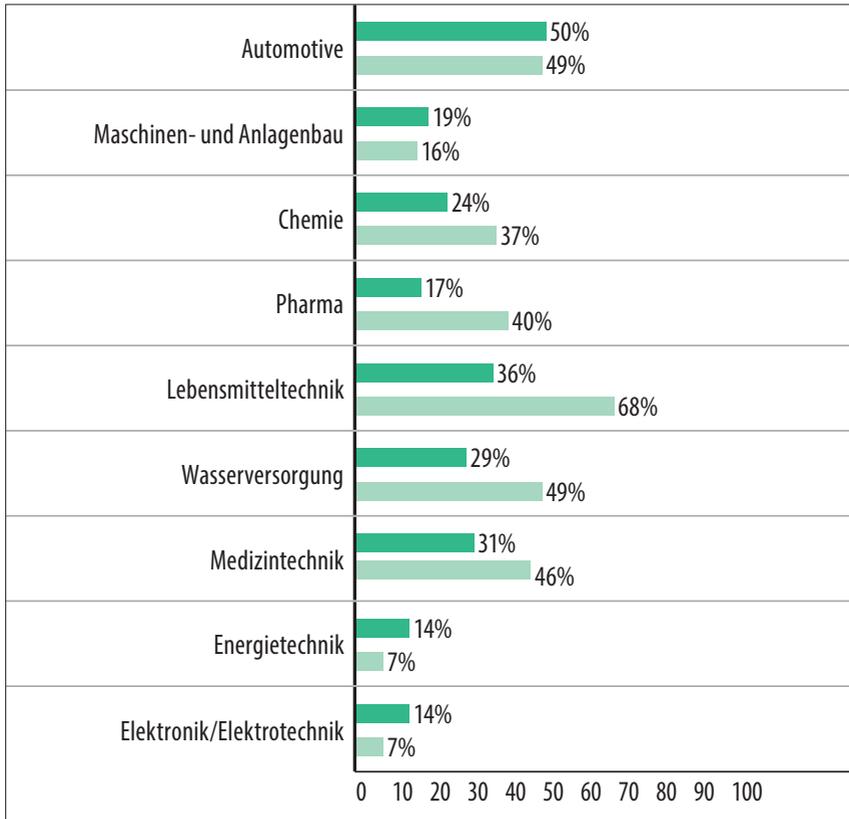
Behindern neue Gesetze, Normen, Verordnungen und Richtwerte die Entwicklung und den Einsatz von Rohstoffen und Mischungen?¹



Das Votum ist klar, Gesetze, Normen, Verordnungen etc. werden kritisch gesehen, da sie behindern. Das sollten sie eigentlich nicht. Das Ergebnis bildet zudem eine veränderte, negativere Grundhaltung im Bereich Dichten. Kleben. Polymer. im Vergleich zum Vorjahr ab und wirft die Frage nach dem grundsätzlichen Umgang mit Regelwerken auf. Dass die meisten Anwender und Hersteller die Behinderung jetzt – im Gegensatz zum Vorjahr – nicht benennen, sie aber empfinden, ist überraschend.

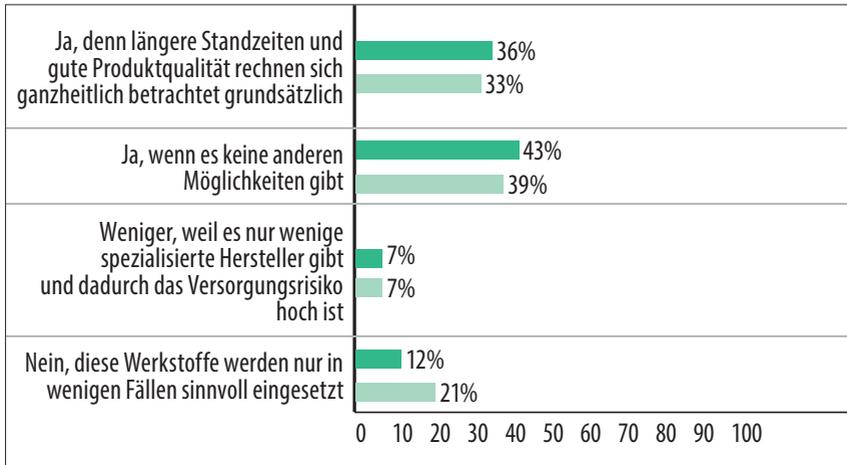
Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „Normen“ mehr als 130 Treffer und den direkten Kontakt zu 1 Lösungspartner.

In welchen Branchen wirken sich Gesetze, Normen und Verordnungen stark aus?¹



Dass die Automobil-Industrie hier unter den Erstgenannten ist, war klar. Auch der hohe Wert im Bereich der Lebensmitteltechnik kann nicht überraschen – im Gegensatz zu der sehr unterschiedlichen Einschätzung zwischen Anwendern und Herstellern. Dies gilt gleichermaßen für die Wasserversorgung und Medizintechnik.

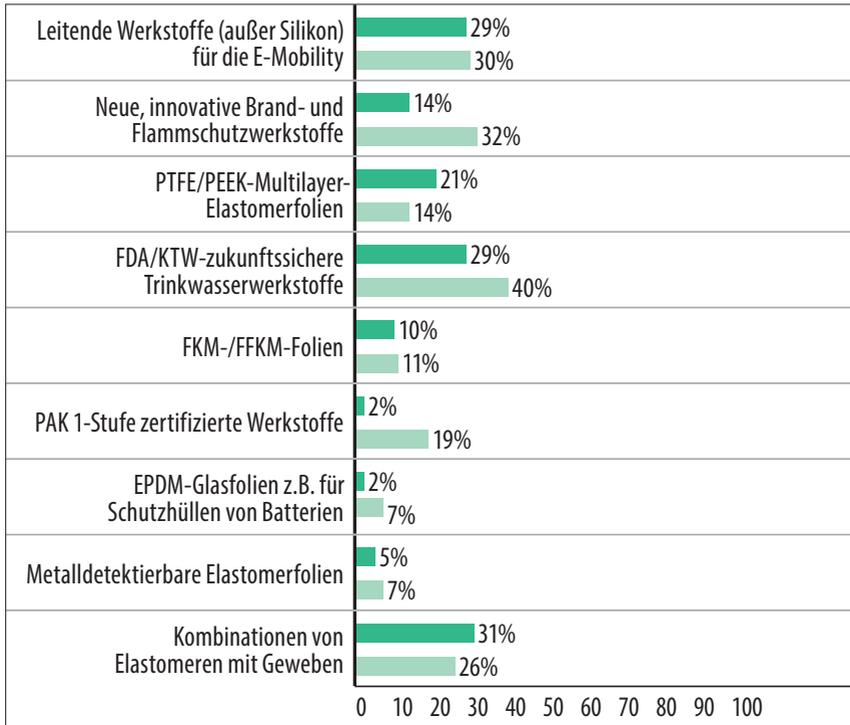
Die Preise für Hochleistungswerkstoffe (z.B. FFKM, PEEK) relativieren sich zunehmend. Werden sie sich angesichts steigender Anforderungen an Dichtungen in immer mehr Anwendungen durchsetzen?¹



Langsam, wenn auch noch nicht mehrheitlich, setzt sich die Erkenntnis durch, dass sich längere Standzeiten und gute Produktqualität – ganzheitlich betrachtet – grundsätzlich rechnen. Ansonsten kommen sie zum Einsatz, wenn es keine andere Möglichkeit gibt. Dass Hochleistungswerkstoffe teilweise nicht sinnvoll eingesetzt werden, sehen Hersteller deutlich kritischer.

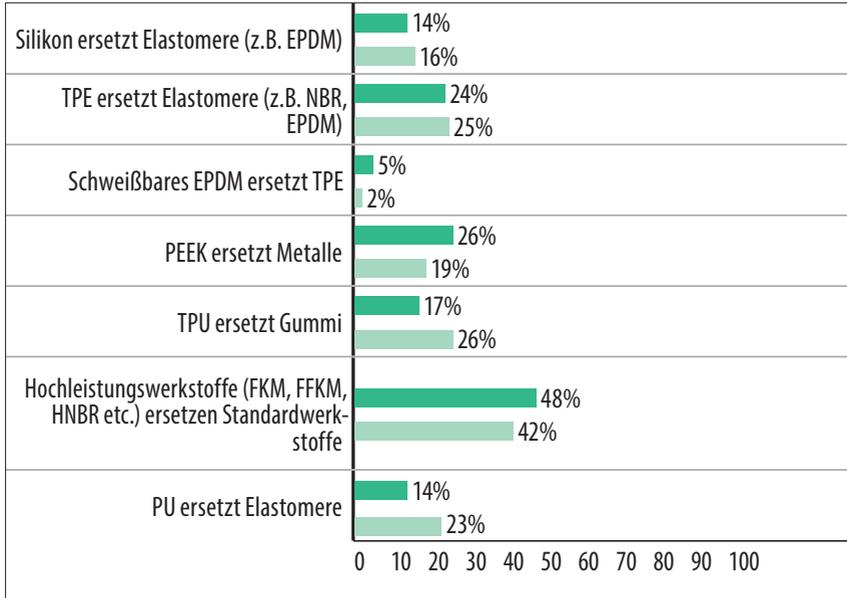
Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „Werkstoffe“ mehr als 460 Treffer und den direkten Kontakt zu 2 Lösungspartnern. Ein weiterer Service ist der Werkstoffkompass.

Welche Werkstoffe benötigen Sie für zukünftige Entwicklungen?¹



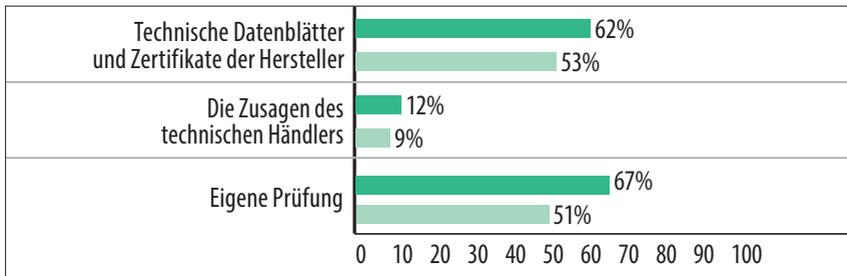
FDA/KTW-zukunftssichere Trinkwasserwerkstoffe, leitende Werkstoffe (außer Silikon) für die E-Mobility und Kombinationen von Elastomeren mit Geweben werden am meisten benötigt. Aber gerade bei ersteren wie auch bei neuen Brand- und Flammenschutzwerkstoffen besteht herstellerseitig anscheinend ein höherer Bedarf.

Welche Werkstoffe verdrängen andere?¹



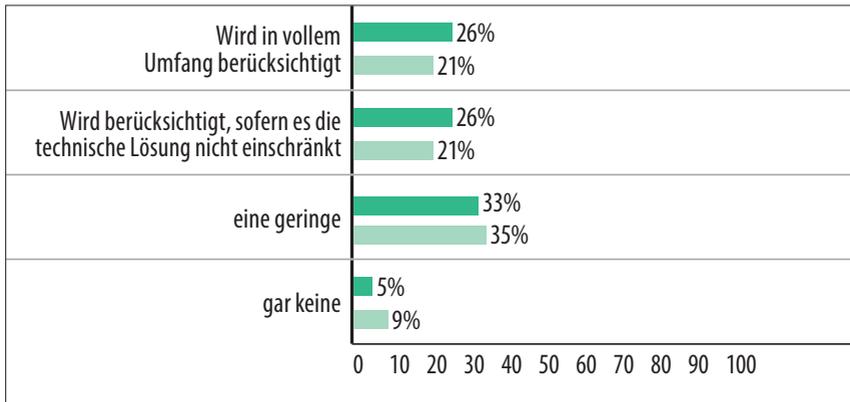
Hier zeichnet sich – wie auf S. 27 – ein Trend zu Hochleistungswerkstoffen ab. Dazu gehört auch die Substitution von Metallen durch PEEK. Alle anderen Einschätzungen spiegeln die Entwicklung der letzten Jahre. Allerdings ist dabei zu beachten, dass diese Aussagen immer im Kontext zur jeweiligen Anwendung betrachtet werden sollten.

Die Qualität und Mischungssicherheitkonstanz bei Compounds ist immer wieder ein Thema – worauf verlassen Sie sich?¹



Eigene Prüfungen sowie die technischen Datenblätter und Zertifikate der Hersteller – darauf vertrauen Anwender und Hersteller in erster Linie. Die Zusagen des technischen Handels schneiden hier eher bescheiden ab und zwar mit Werten, die zu denken geben sollten.

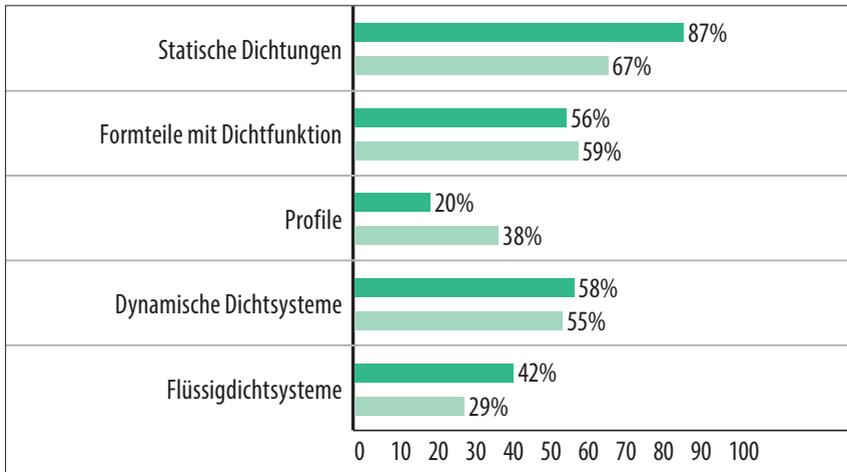
Welche Rolle spielt die Abfall- bzw. Recycling-Thematik bei der Auswahl eines Werkstoffes?



Auch wenn zu dieser Frage nicht alle Stellung bezogen haben, Abfall und Recycling spielen bei Anwendern und Herstellern gleichermaßen eine Rolle. Man darf gespannt sein, wie sich diese Werte in den nächsten Jahren verändern.

DYNAMISCHE DICHTSYSTEME, STATISCHE DICHTUNGEN/FORMTEILE/PROFILE, FLÜSSIGDICHTSYSTEME/VERGUSS – Die Ergebnisse dieser Umfrage zeigen ein paar Tendenzen, aber keine großen Veränderungen. Flüssigdichtungen gewinnen an Bedeutung, die Regelwerke und Normen sind wachsende Hürden, die fachgerechte Montage von statischen Dichtungen, komplexere Aufgabenstellungen verlangen komplexere Lösungen und die intelligente Dichtung steht – hinsichtlich der Akzeptanz – noch am Anfang.

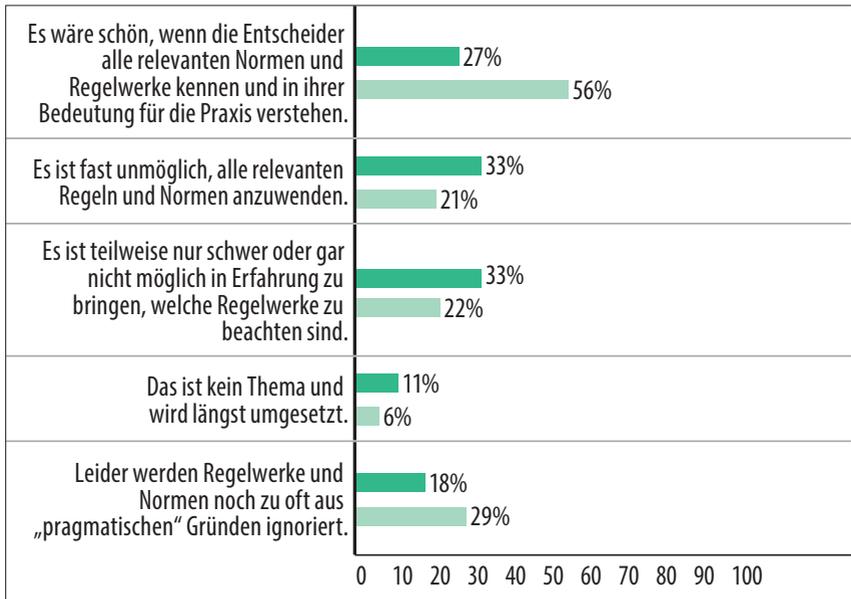
Welche Dichtsysteme setzen Sie ein bzw. bieten Sie an?¹



Die Werte bewegen sich mit leichten Veränderungen auf Vorjahresniveau. Eine Tendenz nach oben gibt es bei Flüssigdichtungen. Mit 42% und 29% gaben im Vergleich zum letzten Jahr jeweils rd. ein Drittel der Anwender und Hersteller mehr an, auf diese Technologie zu setzen. Man darf gespannt sein, wie sich dieses Thema die nächsten Jahre weiterentwickelt.

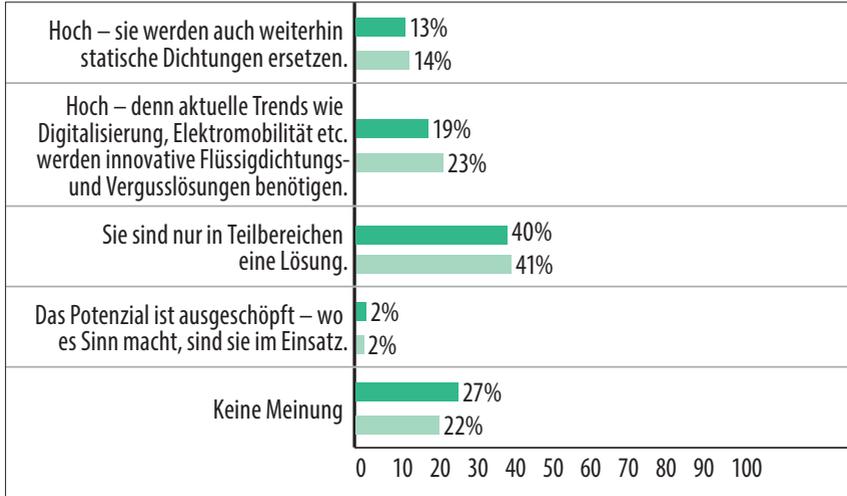
Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „Dynamische Dichtungen“ mehr als 360 Treffer und den direkten Kontakt zu 9 Lösungspartnern.

Dichtungen müssen den für die jeweilige Branche geltenden Regelwerken und Normen entsprechen – wie schätzen Sie hier die aktuelle Situation ein?¹



Die zunehmende Menge an Regelwerken und Normen zeigt Wirkung. Die Antworten drücken – im Vergleich mit dem Vorjahr – eine steigende Unsicherheit aus. Eine deutliche Diskrepanz zwischen Anwendern und Herstellern gibt es inzwischen bei der Frage nach der Bedeutung von Normen und Regelwerken für die Praxis. 56% der Hersteller, aber nur 27% der Anwender wünschen sich hier mehr Know-how bei den Entscheidern.

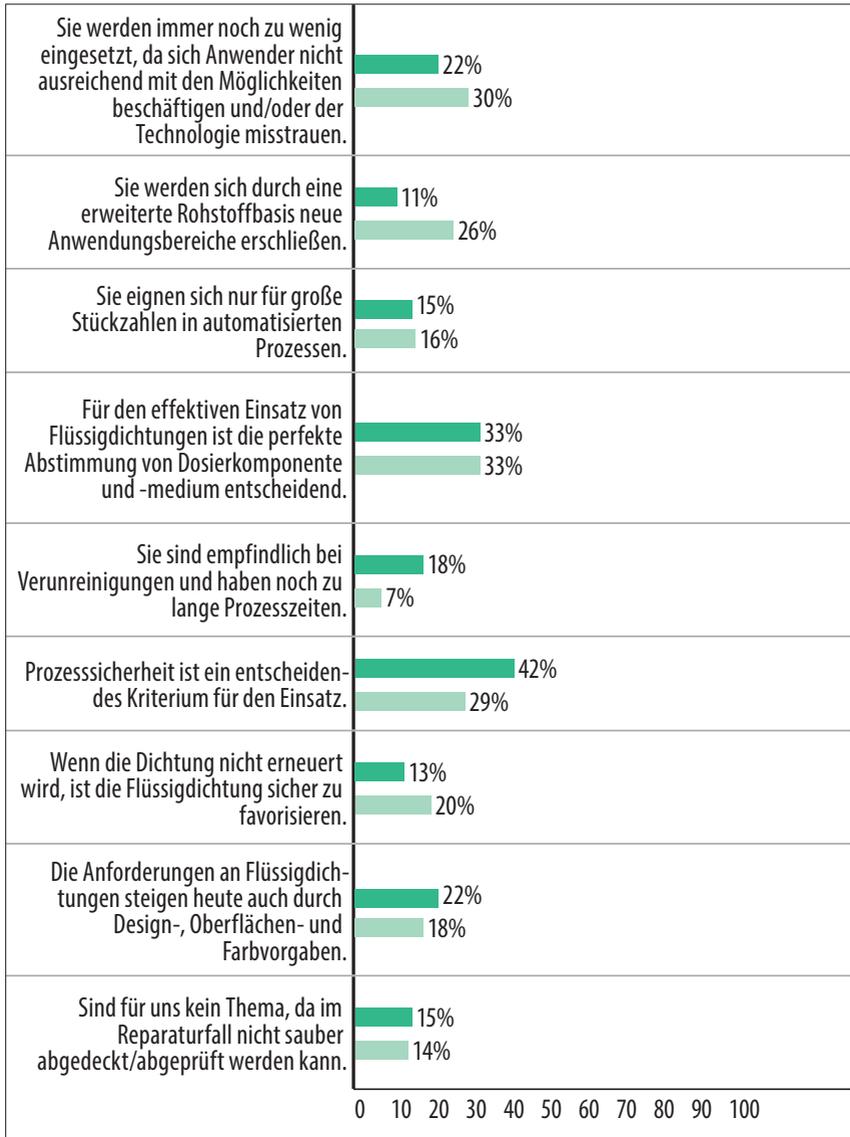
Wie schätzen Sie das Potenzial der Flüssigdichtungen ein?¹



Das Potenzial von Flüssigdichtungen wird – im Vergleich zum Vorjahr – zurückhaltender eingestuft. Auch die aktuellen Trends ändern daran nichts. Das kann aber auch damit zusammenhängen, dass diese Technologie jetzt auch schon häufiger eingesetzt wird – siehe S. 31

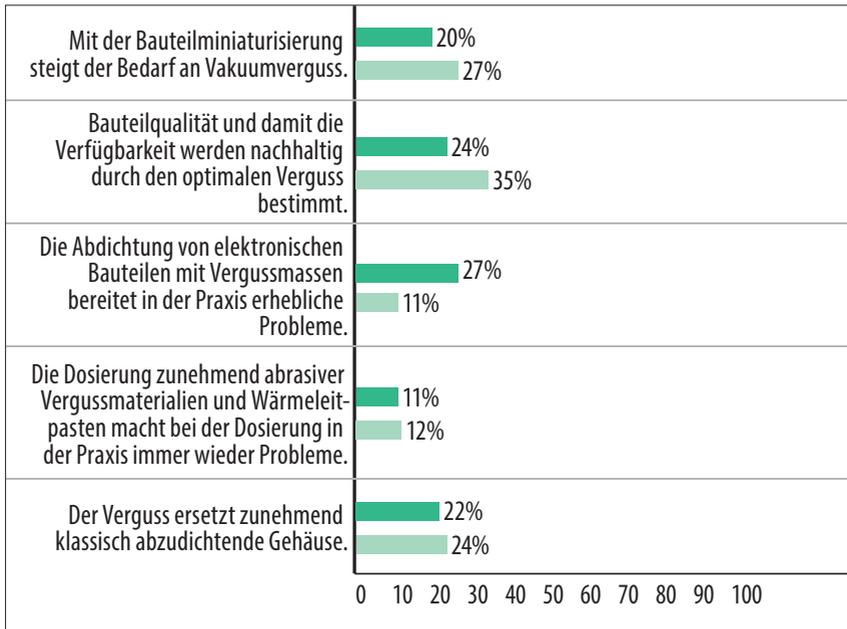
Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „Flüssigdichtungen“ mehr als 220 Treffer und den direkten Kontakt zu 6 Lösungspartnern.

Welchen Thesen zu Flüssigdichtsystemen stimmen Sie zu?¹



Prozesssicherheit ist beim Einsatz von Flüssigdichtungen das zentrale Kriterium. Es wird allerdings von Anwendern mit 42% deutlich stärker gewertet als von Herstellern (29%). Im Vergleich zum Vorjahr sind auch die Werte hinsichtlich des Misstrauens in diese Technologie wieder deutlich gesunken.

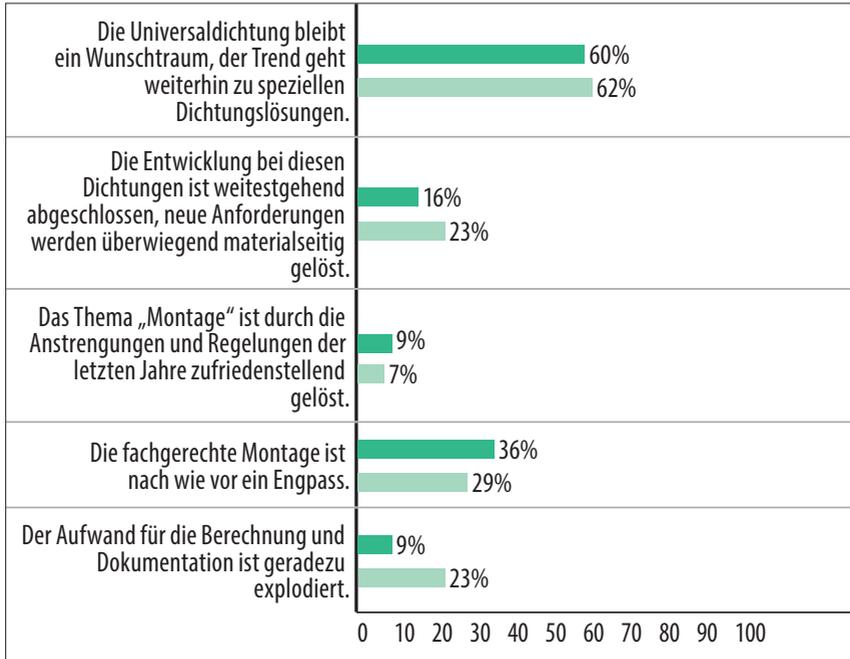
Mit der Zunahme elektronischer Komponenten in allen Bereichen steigen auch die Anforderungen an Verguss. Welchen Thesen stimmen Sie zu?¹



Erstmals explizit zum Verguss befragt, gehen die Meinungen zwischen Anwendern und Herstellern teilweise auseinander. So stufen die Hersteller die Bedeutung des Vergusses für die Bauteilqualität deutlich höher ein. Auf der anderen Seite halten die Hersteller die Probleme der Abdichtungen von elektronischen Bauteilen mit Verguss für gelöst. 27% der Anwender sehen das in dieser Umfrage noch nicht so.

Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „Verguss“ mehr als 250 Treffer und den direkten Kontakt zu 6 Lösungspartnern.

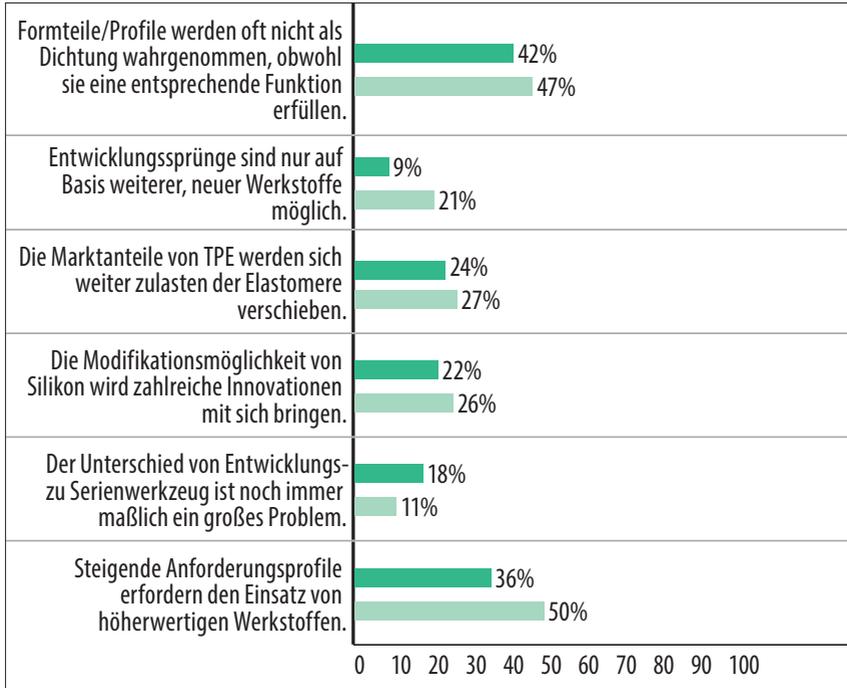
Welchen Thesen zu statischen Dichtungen stimmen Sie zu?¹



Die Werte unterscheiden sich kaum vom Vorjahr. Das ist insofern schade, da sich bei der fachgerechten Montage demgemäß anscheinend wenig zum Guten bewegt hat. Für 36% der Anwender und 29% der Hersteller ist dieses Thema noch nicht gelöst. Der Wert ist eigentlich zu hoch.

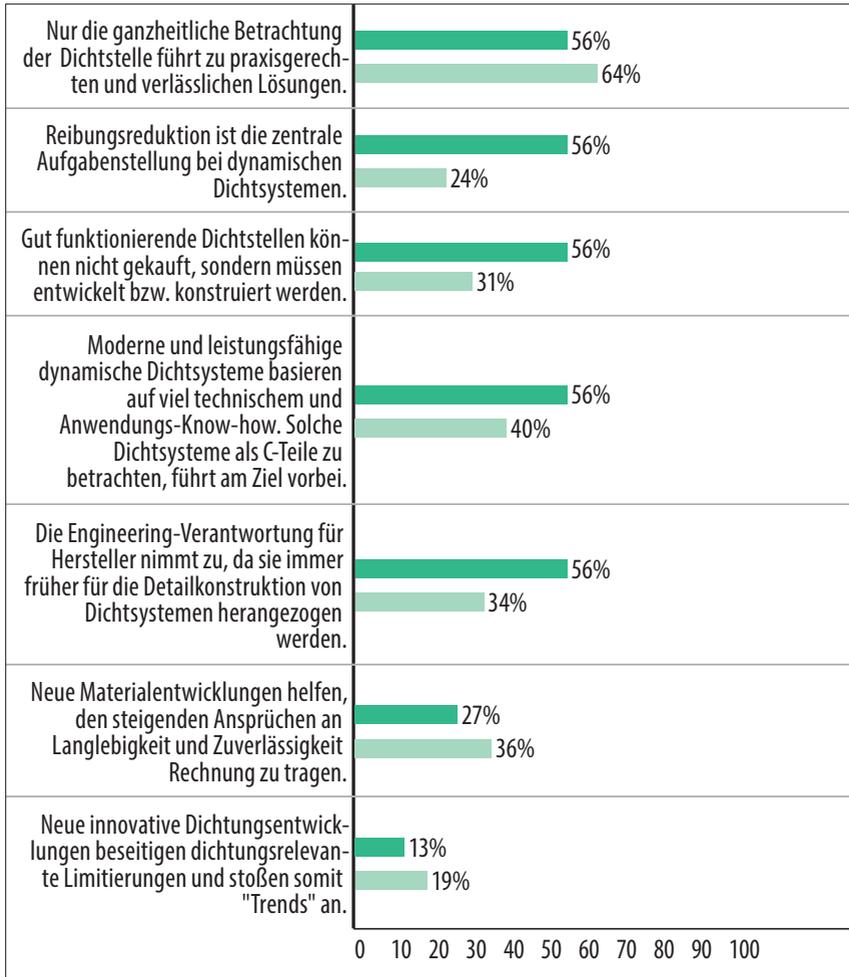
Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „statische Dichtungen“ mehr als 380 Treffer und den direkten Kontakt zu 9 Lösungspartnern.

Welchen Thesen zu Formteilen/Profilen stimmen Sie zu?¹



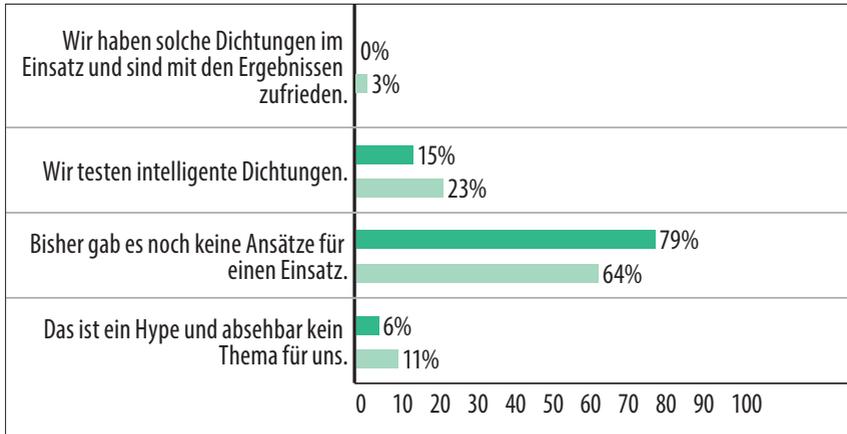
Hier zeichnet sich ein interessantes Bild ab. Einerseits werden die Entwicklungssprünge auf Basis weiterer, neuer Werkstoffe – gerade bei Anwendern (9% zu 30% im Vorjahr) – als deutlich geringer als im Vorjahr eingestuft, andererseits geben 36% der Anwender und 50% der Hersteller in dieser Umfrage an, dass steigende Anforderungsprofile den Einsatz von höherwertigen Werkstoffen erfordern.

Welchen Thesen zu dynamischen Dichtsystemen stimmen Sie zu?¹



Dynamische Dichtungen werden – auch im Vergleich zum Vorjahr – immer weniger als C-Teil gesehen. Die in DICHT! 1.2018 geäußerte Meinung, dass die Engineering-Verantwortung für Hersteller zunimmt, da sie immer früher zur Detailkonstruktion von Dichtssystemen herangezogen werden, bestätigen hier 56% der Anwender und immerhin 40% der Hersteller.

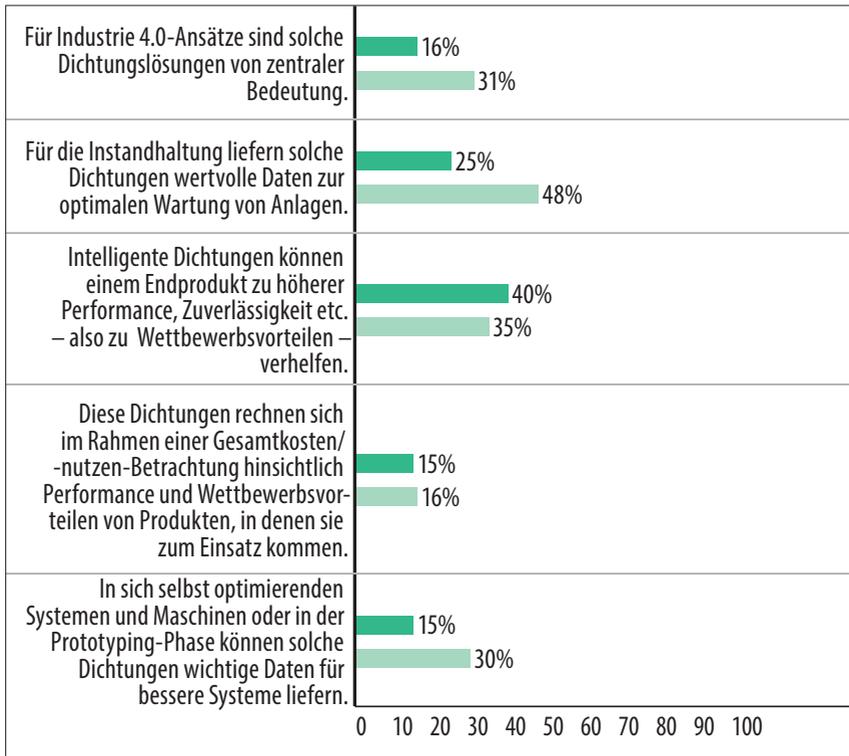
Dichtungen werden intelligent. Wie sind Ihre Erfahrungen mit solchen Dichtungen?



Die Entwicklung ist hier definitiv am Anfang. Die meisten Anwender und Hersteller sehen in der Umfrage keine Ansätze für solche Dichtungen.

Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „dynamische Dichtungen“ mehr als 360 Treffer und den direkten Kontakt zu 9 Lösungspartnern.

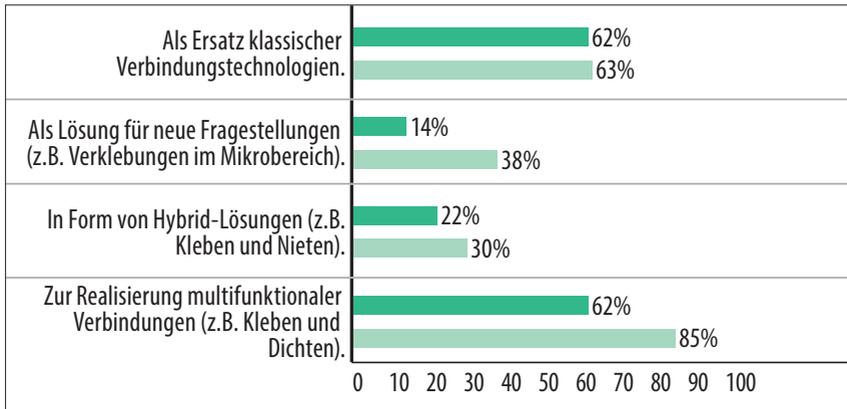
Intelligente Dichtungen haben unter verschiedenen Aspekten Potenzial. Welchen Thesen stimmen Sie zu?¹



Die Annahme, dass intelligente Dichtungen Produkten zu Wettbewerbsvorteilen verhelfen können, unterstrichen die meisten Anwender und Hersteller in dieser Umfrage – gefolgt von der Nennung ihres Potenzials für eine optimierte Instandhaltung.

KLEBETECHNIK – Wie bei allen „Zukunftstechnologien“ sorgen verschiedene Fragestellungen für Bewegung. Qualitätssicherung, Prozesssicherheit, multifunktionale Verbindungen und das notwendige Wissen der Projektbeteiligten über den Stand der Technik sind auch dieses Jahr die zentralen Themen.

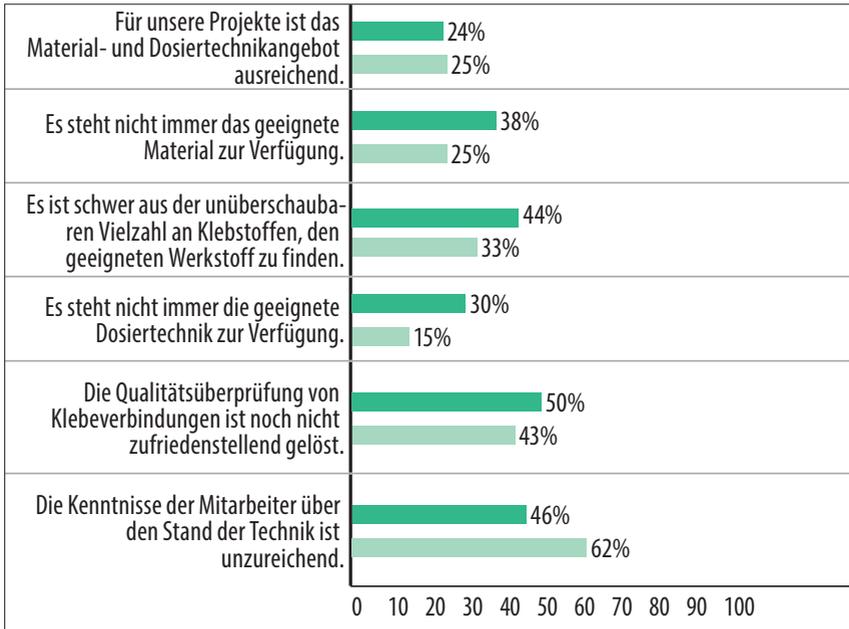
Warum setzen Sie die Klebetechnik ein?¹



Hier bestätigt sich der vielzitierte Trend der letzten Jahre – die Klebetechnik ersetzt klassische Verbindungstechnik. Interessant ist dabei der hohe Anteil von multifunktionalen Verbindungen, z.B. Kleben und Dichten. Gerade bei Herstellern ist dieses Thema aktuell.

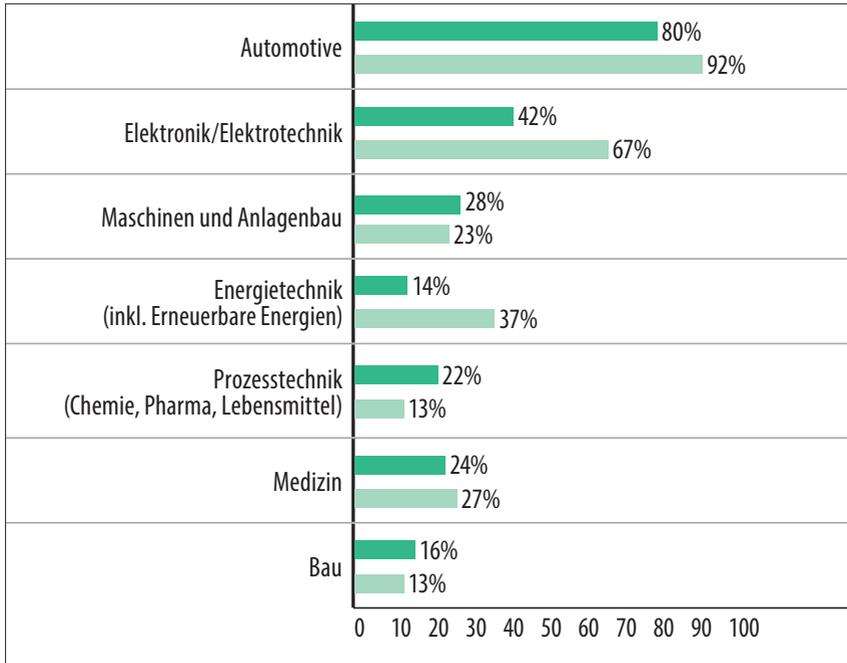
Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „Klebetechnik“ mehr als 650 Treffer und den direkten Kontakt zu rd. 40 Lösungspartnern.

Wie schätzen Sie den derzeitigen Stand der Technik ein?¹



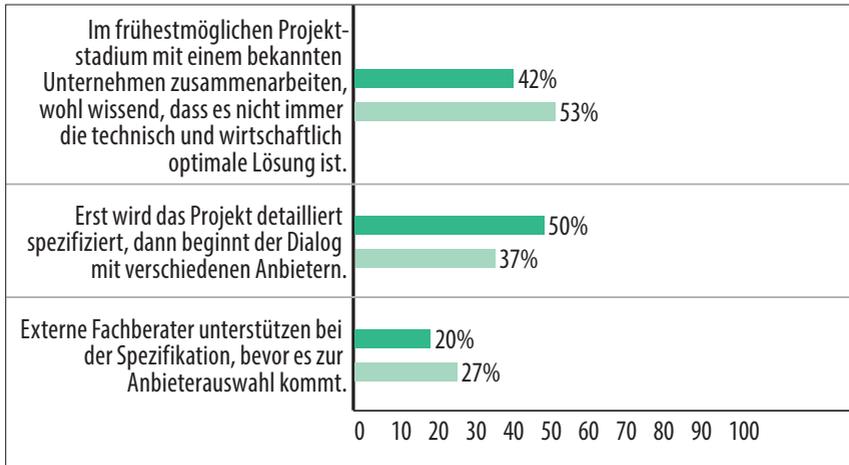
Top 3 bei den Anwenderantworten sind Schwierigkeiten, den richtigen Klebstoff zu identifizieren, die Qualitätsüberprüfung der Klebeverbindung und fehlendes Wissen über den Stand der Technik. Dabei hat das Qualitätsüberprüfungsthema im Vergleich zum Vorjahr nochmals an Bedeutung gewonnen. Hersteller sehen dies ähnlich, aber mit unterschiedlicher Gewichtung – hier wird die unzureichende Kenntnis der Mitarbeiter mit mehr als 60% der Nennungen von den meisten kritisiert.

Folgende Branchen sind die Treiber für die Entwicklung der Klebetechnik.¹



Die Branchen Automotive sowie Elektronik/Elektrotechnik sind die zentralen Treiber für Entwicklungen im Bereich der Klebetechnik. Das ist bei den Herausforderungen, vor denen diese Branchen – ausgelöst durch aktuelle Trends – gerade stehen, nicht überraschend.

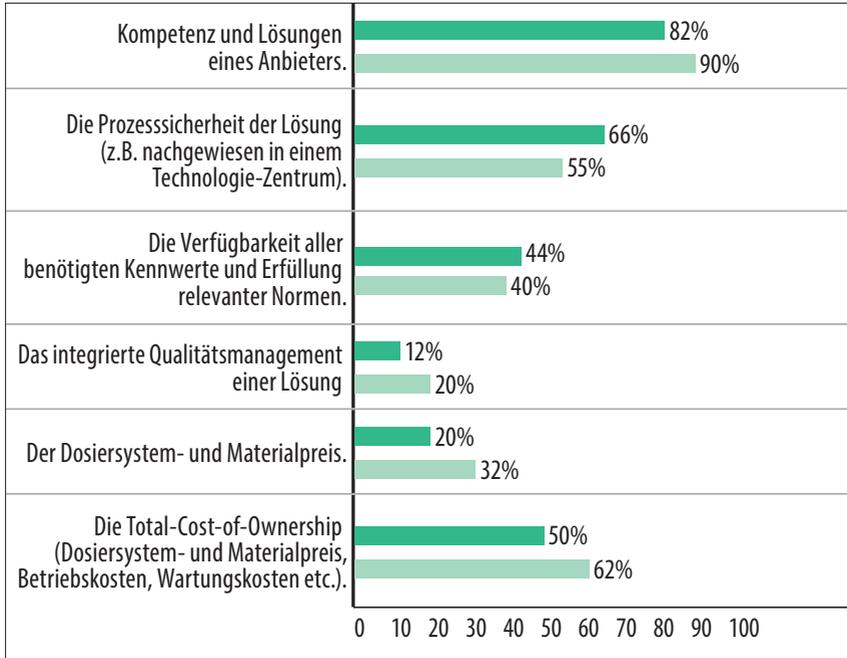
Bei Klebtechnik-Projekten arbeiten mehrere Seiten zusammen. Welche Vorgehensweise ist sinnvoll?



Hier setzt man gleichermaßen auf die Zusammenarbeit mit bekannten Partnern und auf eine projektspezifische Auswahl. Im Vergleich zum Vorjahr hat die Nennung der projektspezifischen Auswahl bei Anwendern aber um rd. 10% zugenommen. Externe Berater werden nach wie vor seltener eingebunden. Dies ist, insbesondere mit Blick auf die Wissensdefizite über den Stand der Technik, ein Aspekt, über den man nachdenken sollte.

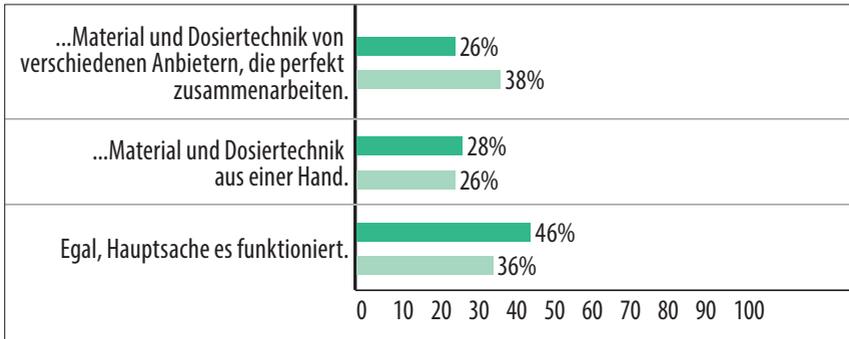
Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „Dosieren“ mehr als 110 Treffer und den direkten Kontakt zu 5 Lösungspartnern.

Welche Kriterien beeinflussen die Entscheidung für eine Zusammenarbeit maßgeblich?¹



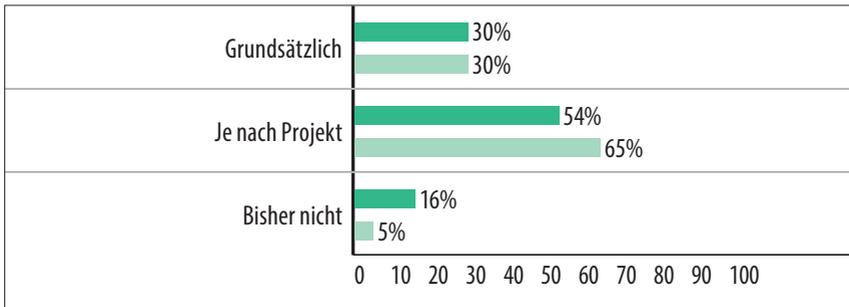
Die Kompetenz des Anbieters ist das zentrale Kriterium – das sehen Anwender und Hersteller mit einer Steigerung von mehr als 20% im Vergleich zum Vorjahr so. Auch die Total-Cost-of-Ownership wird immer wichtiger. Das ist eine gute Nachricht mit Blick auf die Kostenbetrachtung. Natürlich hat auch die Prozesssicherheit – nach wie vor – einen hohen Stellenwert. Ein integriertes Qualitätsmanagement ist dagegen kein großes Thema. Das ist überraschend, da ca. 50% (siehe S. 42) angaben, dass Qualitätsthemen noch nicht zufriedenstellend gelöst sind.

Bei Klebelösungen müssen Material- und Dosiertechnik perfekt aufeinander abgestimmt sein. Deshalb bevorzugen wir...



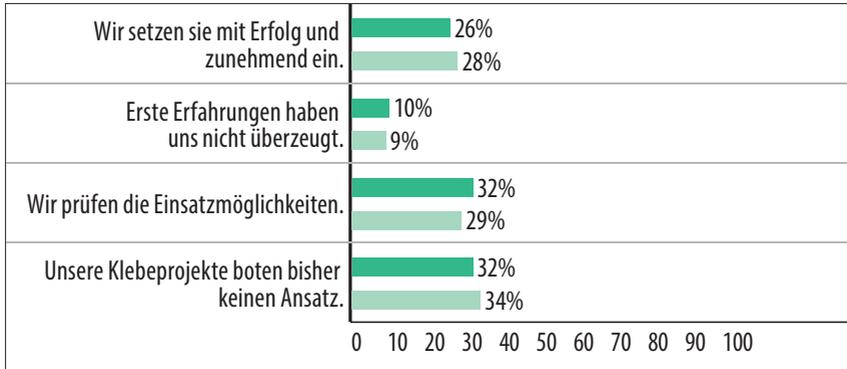
Hier verschieben sich die Präferenzen der letzten Jahre immer mehr in Richtung „Egal, Hauptsache es funktioniert“.

Zunehmend werden Klebeflächen vorbehandelt, auch bei Ihren Projekten?



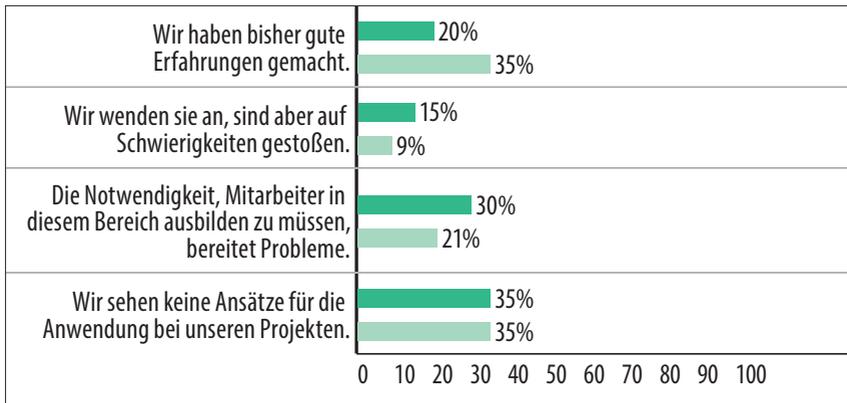
Die Vorbehandlung von Klebeflächen bietet viele Vorteile – darüber wurde schon oft berichtet. Dementsprechend häufig wird sie überwiegend projektbezogen eingesetzt. Aber 30% grundsätzlicher Einsatz sind schon ein beachtlicher Wert.

Es werden immer mehr Klebeband-Lösungen angeboten, wie beurteilen Sie die Entwicklung?



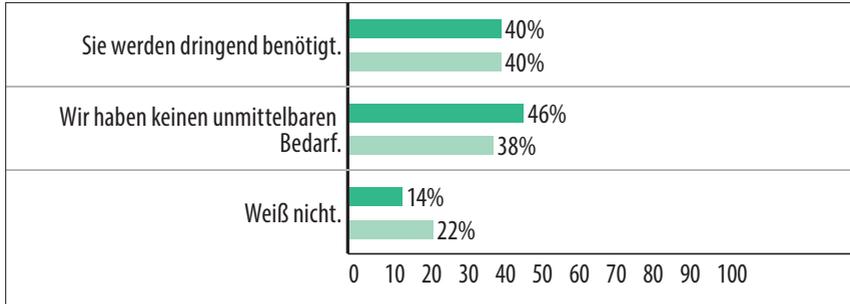
Klebebandlösungen gewinnen langsam an Bedeutung. Jeweils rund ein Drittel der Umfrageteilnehmer nutzen sie und prüfen den Einsatz. Ein weiteres Drittel hat bisher keine Ansatzpunkte für eine Verwendung. Man darf gespannt sein, wie sich Klebeband-Lösungen die nächsten Jahre positionieren.

Die DIN 2304 soll Klebprojekte und -prozesse optimieren. Wie ist Ihre Einschätzung hierzu?



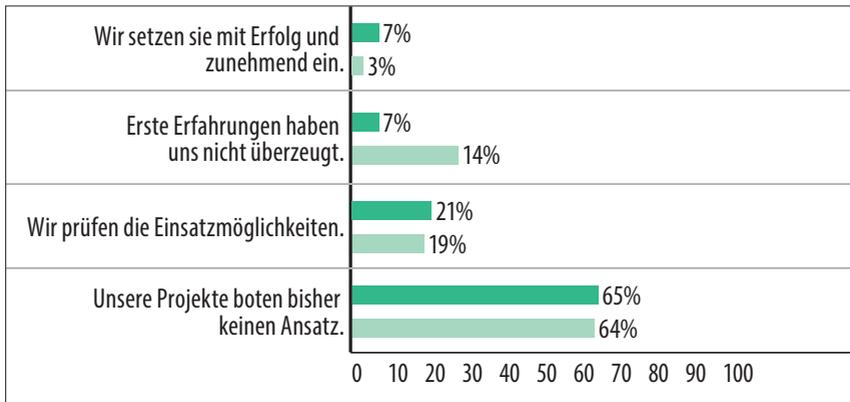
Die Werte zur DIN 2304 haben sich im Vergleich zum Vorjahr kaum verändert. 20% der Anwender und 35% der Hersteller haben bisher gute Erfahrungen gemacht. Das ist nicht viel, denn 35% der Umfrageteilnehmer auf beiden Seiten sehen keine Ansätze für die Anwendung in Projekten. Hier scheint es noch Aufklärungsbedarf im Hinblick auf den Nutzen zu geben.

**Wiederlösbare Verbindungen sind seit Jahren ein Thema.
Wie stehen Sie dazu?**



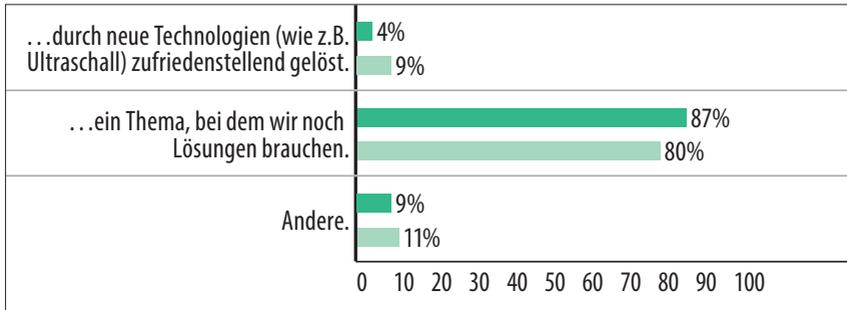
Die Meinung ist – nach wie vor – geteilt. Auch wenn – im Vergleich zum Vorjahr – rd. 10% mehr Anwender und Hersteller angegeben haben, solche Lösungen dringend zu benötigen.

Es werden auch Klettverbindungen als wiederlösbare Verbindungen angeboten, wie beurteilen Sie die Entwicklung?



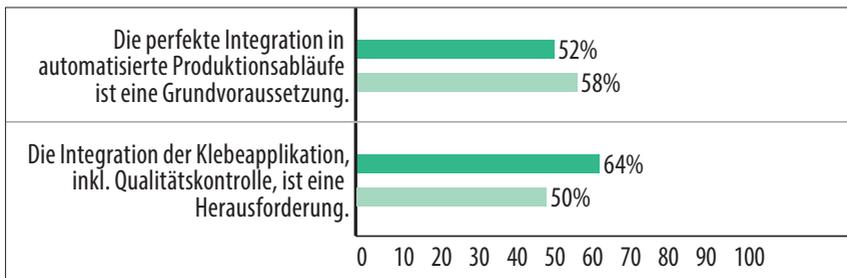
Die wenigsten Umfrageteilnehmer haben sich bisher mit dieser Technik auseinandergesetzt. Mehr als 60% sehen derzeit keine Ansatzpunkte für diese Technik. Hier darf man auf die Entwicklung gespannt sein.

Die zerstörungsfreie Prüfung von Klebeverbindungen ist für uns...



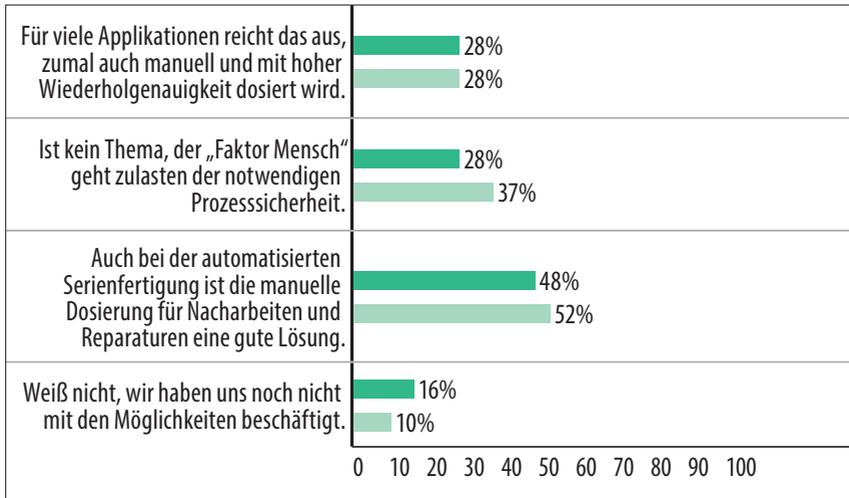
Hier werden dringend Lösungen gebraucht – 87% der Anwender und 80% der Hersteller sind dieser Meinung und damit bewegen sich die Zahlen mit dieser Forderung nochmal über dem Niveau des Vorjahres.

Die Klebetechnik kommt zunehmend in automatisierten Produktionsprozessen zum Einsatz. Wie ist Ihre Meinung zu folgenden Thesen?¹



Für 52% der Anwender und 58% der Hersteller ist die perfekte Integration von Produktionsabläufen eine Grundvoraussetzung. Das ist angesichts der Branchen, die den Einsatz der Klebetechnik vorantreiben, nicht überraschend. Hier wird hochautomatisiert produziert. Dass die Integration der Qualitätskontrolle für die meisten Befragten eine zentrale Herausforderung ist, überrascht auch im Hinblick zu den bisherigen Aussagen zur Qualitätskontrolle nicht. Hier werden Lösungen gebraucht.

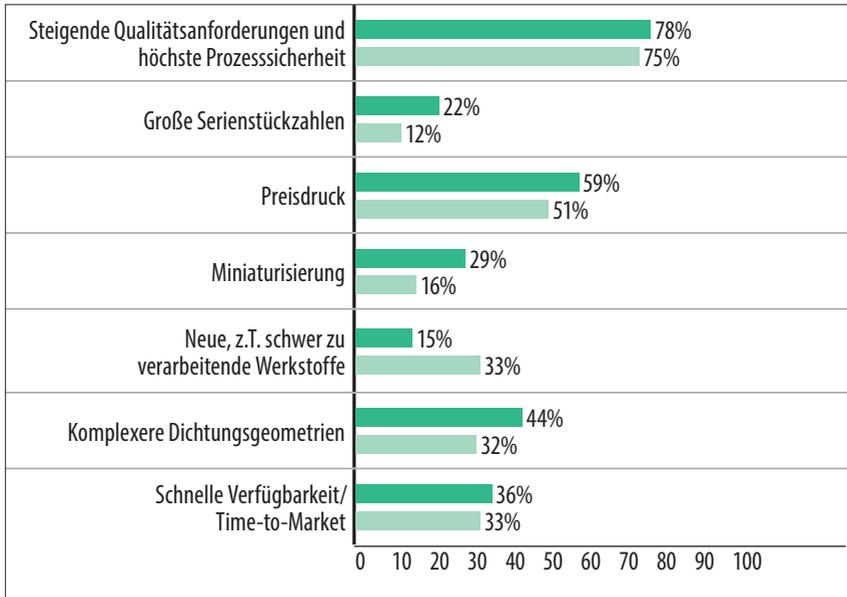
Klebstoffe werden nicht nur automatisiert, sondern auch manuell dosiert. Welcher These stimmen Sie zu?¹



Dies schätzen Anwender und Hersteller relativ gleich ein und im Vergleich zum Vorjahr hat sich die Einschätzung nicht groß geändert. Die manuelle Dosierung wird dort, wo es passt und der Faktor Mensch nicht zulasten von Qualität und Prozesssicherheit geht, eingesetzt. Hier lohnt es sich allerdings, sich regelmäßig über den Stand der Technik der manuellen Auftragstechnik zu informieren. Über einfache Handdosierer, die man aus dem Baumarkt kennt, ist man weit hinaus.

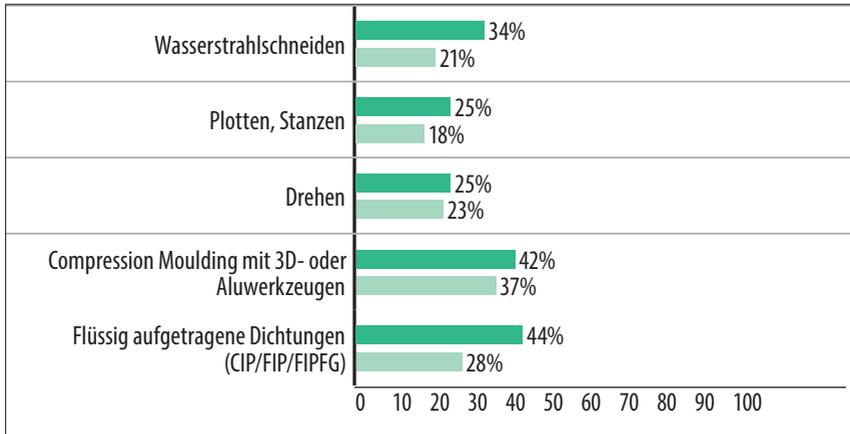
MASCHINEN UND ANLAGEN, MESS- UND PRÜFTECHNIK – Die Herstellung und Montage von Dichtungen sowie die Überprüfung ihrer Qualität vor und während des Betriebes haben hohen Einfluss auf die Funktionalität und Verfügbarkeit von Anlagen und Produkten quer durch alle Branchen. Auch haben die zentralen Themen Qualität und Preis eine hohe Bedeutung.

Welche Trends in der Dichtungstechnik stellen die höchsten Anforderungen an Bearbeitungsverfahren?¹



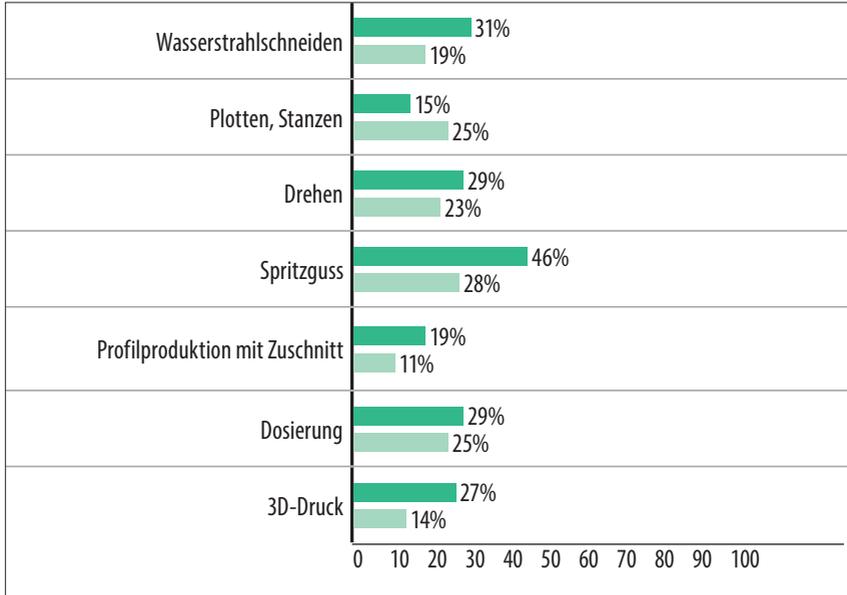
Das Ergebnis ist eindeutig: Steigende Qualitätsanforderungen und höchste Prozesssicherheit, gefolgt von Preisdruck und komplexeren Dichtungsgeometrien, stellen die höchsten Anforderungen an Bearbeitungsverfahren – Anwender und Hersteller sehen dies ähnlich, und die Werte sind im Vergleich zum Vorjahr nochmals gestiegen.

Welche Be- und Verarbeitungsverfahren bieten beim Prototyping von Dichtungen/Formteilen aus Ihrer Sicht die besten Möglichkeiten?¹



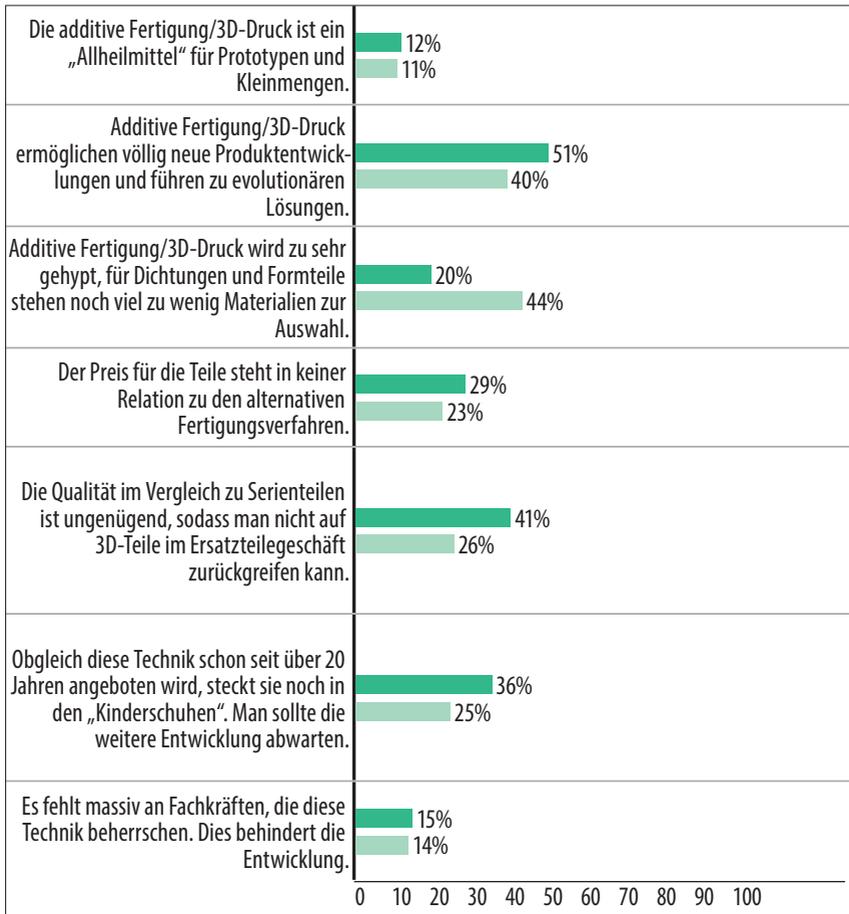
Compression Moulding mit 3D- oder Aluwerkzeugen/Autoklav und flüssig aufgetragene Dichtungen (CIP/FIP/FIPFG) führen hier das Ranking an. Das Wasserstrahlschneiden verdrängt hier – zumindest bei Anwendern – klassische Bearbeitungsverfahren wie Plotten, Stanzen, Drehen. Damit bestätigt sich ein Trend, der sich seit Jahren abzeichnet. Der hohe Wert für flüssig aufgetragene Dichtungen macht den wachsenden Anteil dieser Dichtungen deutlich. Ist dieses Verfahren erst gewählt, macht es natürlich auch Sinn, es beim Prototyping einzusetzen.

Welche Be- und Verarbeitungsverfahren setzen Sie für die Herstellung von Dichtungen und Formteilen ein?¹



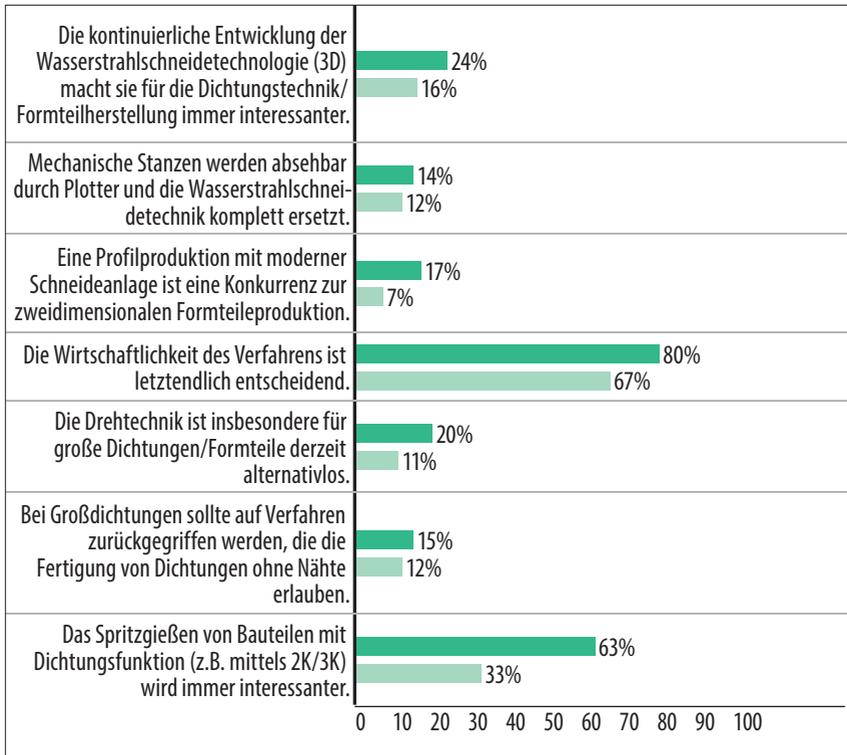
Bei der Herstellung fällt die relativ gleichmäßige Verteilung der Verfahren auf, wobei Spritzguss bei Anwendern dominiert. Auffällig ist zudem der relativ hohe Anteil des 3D-Druckes bei Anwendern – hier wird es sich dann max. um Kleinserien handeln.

„3D-Druck“ ist im Kommen – welchen Thesen stimmen Sie für Dichtungen und Formteile zu?¹



Grundsätzlich wird bei dieser Technik hervorgehoben, dass die additive Fertigung bzw. der 3D-Druck völlig neue Produktentwicklungen ermöglichen und zu evolutionären Lösungen führen. Allerdings finden noch 41% der Anwender im Vergleich zu 26% der Hersteller, dass die Qualität im Vergleich zu Serienteilen, die mit anderen Verfahren hergestellt werden, nicht ausreicht. Hier ist also noch Luft nach oben. Der allgegenwärtige Fachkräftemangel – obwohl immer wieder zitiert – scheint hier kein großes Thema zu sein.

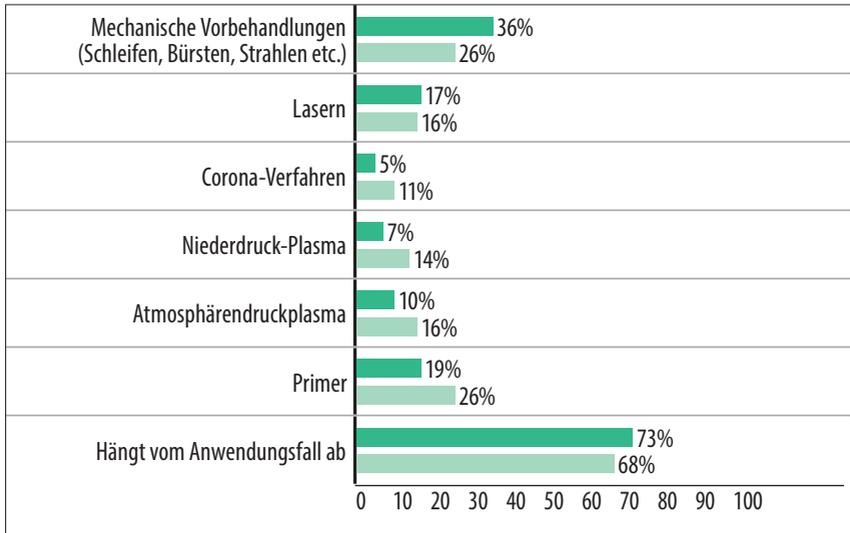
Bei klassischen Be- und Verarbeitungssystemen ist der Markt seit Jahren in Bewegung. Welchen Thesen stimmen Sie zu?¹



Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist das zentrale Kriterium – Anwender sind hier mit 80% (Vorjahr 63%) noch deutlicher als Hersteller mit 63% (Vorjahr 62%). Interessant ist auch, dass das Spritzgießen von Bauteilen mit Dichtungsfunktion (z.B. mittels 2K/3K) – dieses Jahr erstmals aufgenommen – für 63% der Anwender, die hier geantwortet haben, immer interessanter wird. Nur 33% der Hersteller finden dies interessant.

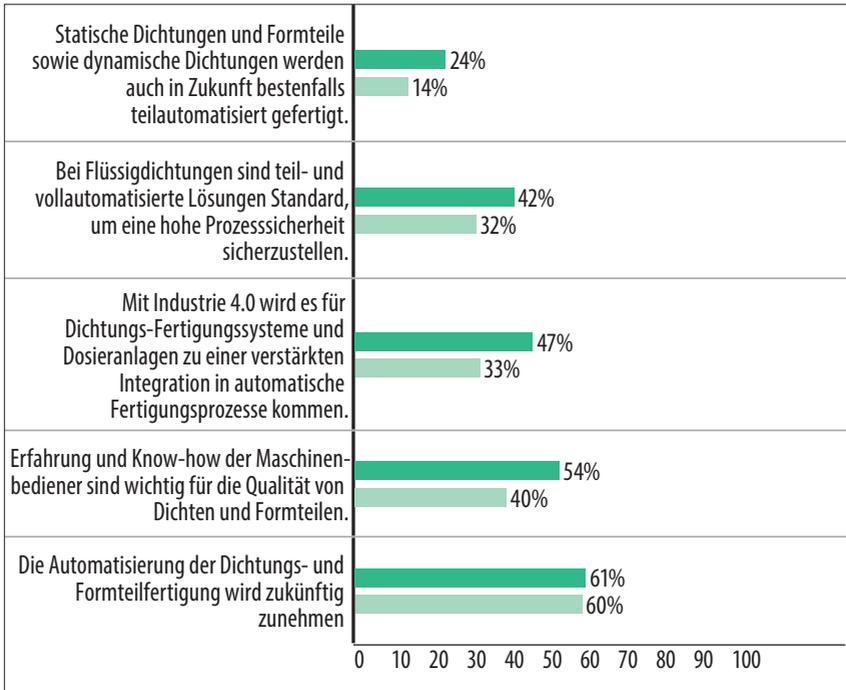
Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „3D-Druck“ 95 Treffer und den direkten Kontakt zu 3 Lösungspartnern. Ein Technologie-Dossier erleichtert den Einstieg zusätzlich.

Dichtungsflächen müssen zunehmend für die Funktion der Dichtungen aufbereitet werden. Welche Verfahren bieten die größten Vorteile in der Praxis?¹



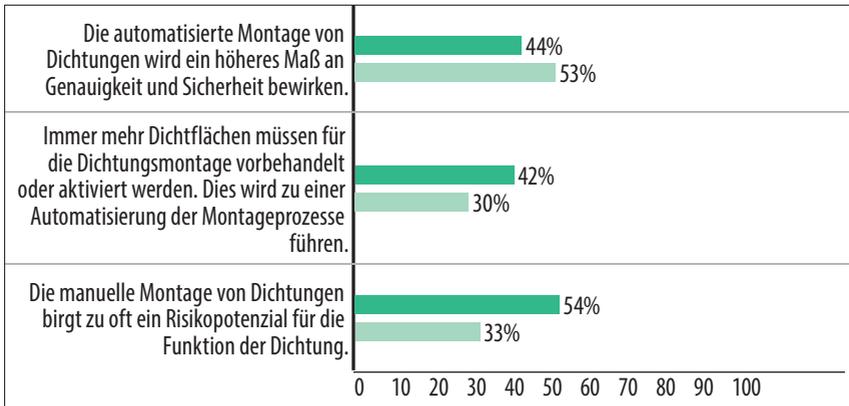
Klar, es hängt von Anwendungsfall ab, aber wenn, dann stehen mechanische Bearbeitungsverfahren im Fokus – im Gegensatz zu modernen Möglichkeiten wie Lasern, Corona- und Plasma-Verfahren. Hier scheinen die vielfältigen Möglichkeiten noch nicht in der Breite des Marktes angekommen zu sein.

Immer mehr Prozesse werden automatisiert. Welchen Thesen zum Thema „Automatisierung/Robotik“ stimmen Sie für die Dichtungsfertigung zu?¹



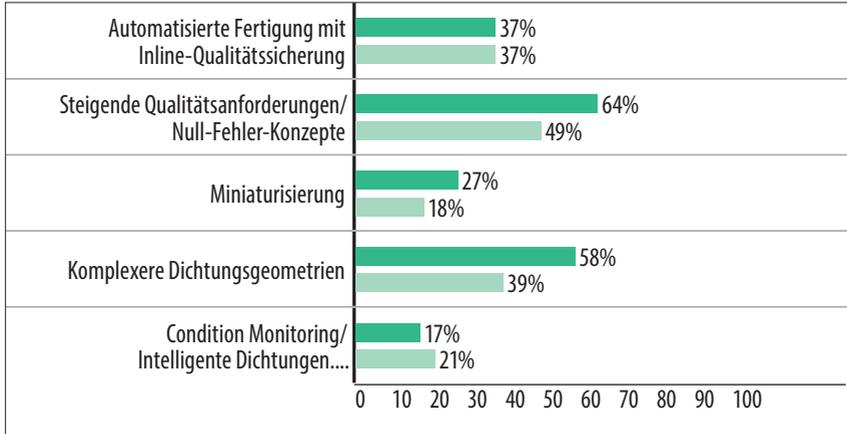
Die Automatisierung wird zunehmen – da sind sich Anwender und Hersteller einig. Allerdings schätzen Anwender das benötigte Know-how bei Maschinenbedienern und die Impulse durch Industrie 4.0-Konzepte höher ein als Hersteller.

Die richtige Dichtungsmontage hat hohen Einfluss auf die Qualität von Dichtstellen. Welchen Thesen stimmen Sie zu?¹



Dass die automatisierte Montage von Dichtungen ein höheres Maß an Genauigkeit und Sicherheit bewirken wird, sehen Hersteller mit 53% positiver als Anwender (44%). Anwender schätzen dafür den Vorbehandlungsaufwand höher ein, was letztendlich zu einer vermehrten Automatisierung der Montage führen wird. Dafür spricht anwenderseitig auch, dass 54% das Risikopotenzial durch eine manuelle Montage als hoch einschätzen – hier hat sich offensichtlich die letzten Jahre wenig verändert.

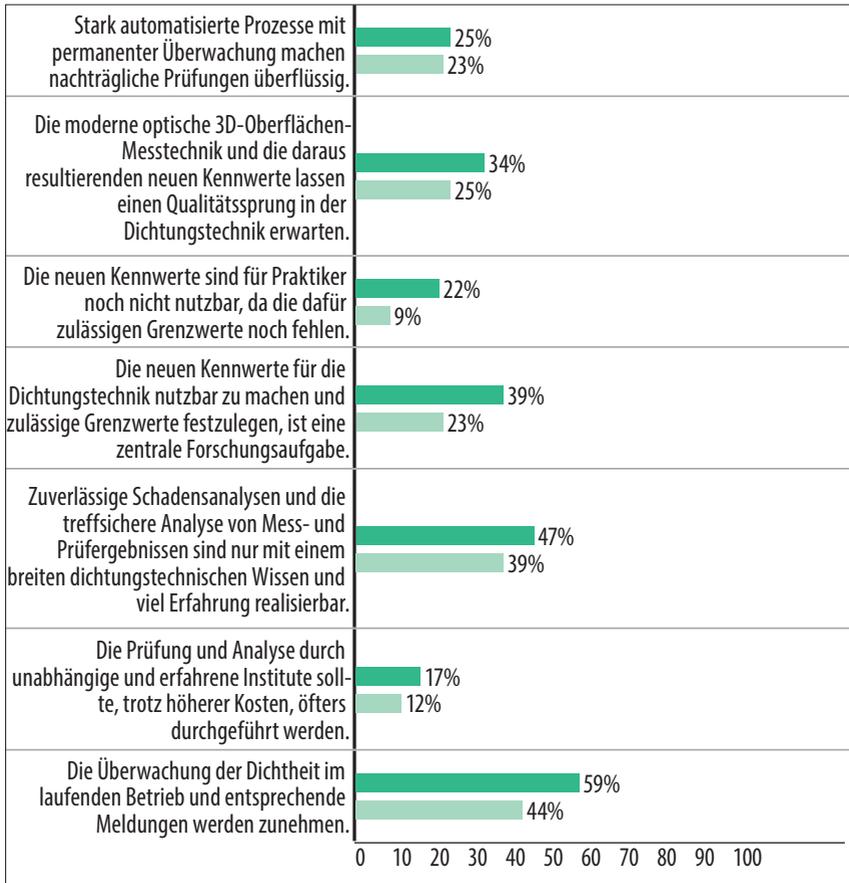
Welche Trends in der Dichtungstechnik stellen die höchsten Anforderungen an die Mess- und Prüftechnik?¹



Hier ergibt sich ein ähnliches Bild wie im Vorjahr und wie bei den Bearbeitungsverfahren: Steigende Qualitätsanforderungen/Null-Fehler-Konzepte führen das Ranking an, gefolgt von komplexeren Dichtungsgeometrien. Anwender schätzen dies aber grundsätzlich deutlich höher ein als Hersteller. Die „intelligente“ Dichtung spielt eine geringere Rolle.

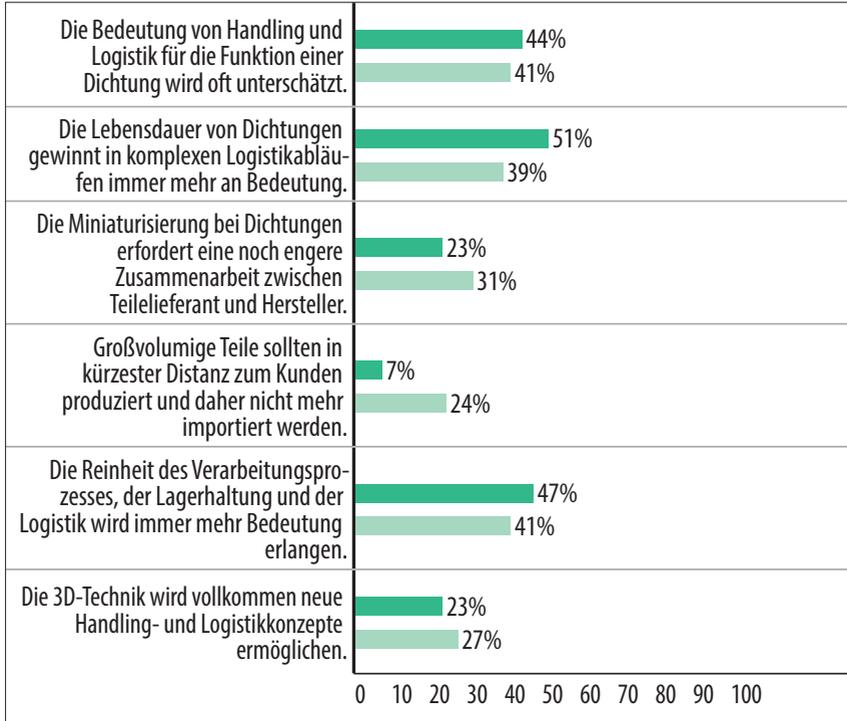
Weitere Informationen zum Thema - auf www.isgatec.com finden Sie unter dem Suchbegriff „Mess- und Prüftechnik“ 25 Treffer und den direkten Kontakt zu 2 Lösungspartnern.

Welchen Thesen zum Themenbereich „Mess- und Prüftechnik“ stimmen Sie zu? ¹



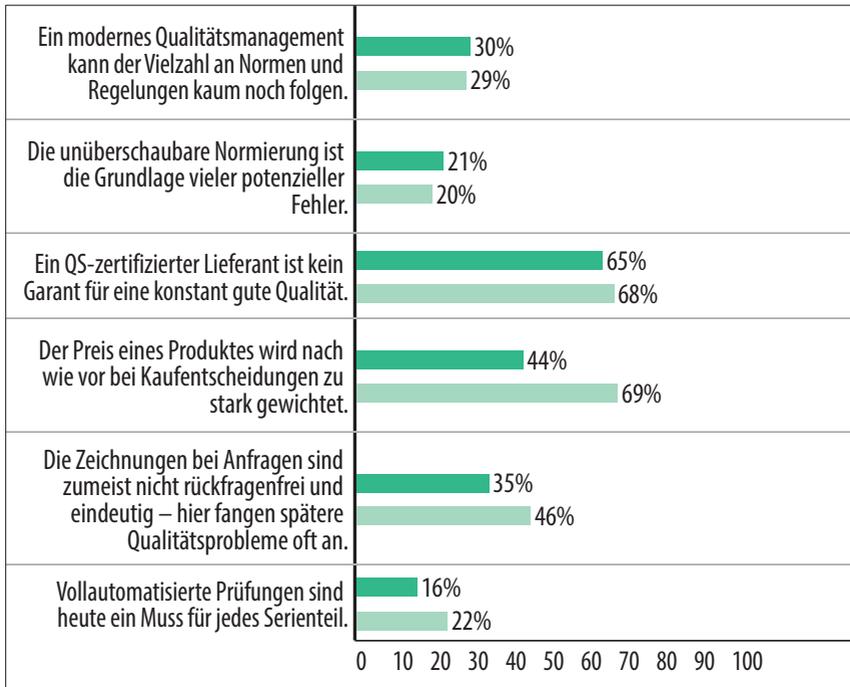
Die Überwachung der Dichtheit im laufenden Betrieb und entsprechende Meldungen werden zunehmen – dieser These stimmen 59% der teilnehmenden Anwender und 44% der Hersteller zu. Das überrascht insofern, dass z.B. „intelligenten“ Dichtungen in der vorgehenden Frage eigentlich eine Absage erteilt wurde – diese Option wird noch nicht als Trend benannt. Auch die These, dass zuverlässige Schadensanalysen und die treffsichere Analyse von Mess- und Prüfergebnissen nur mit einem breiten dichtungstechnischen Wissen und viel Erfahrung möglich sind, stellt wieder einmal die Forderung nach Know-how in den Fokus, das oft nicht in ausreichendem Maße gegeben ist.

„Handling und Logistik“ spielen im Bereich Dichten. Kleben. Polymer. eine wichtige Rolle. Welchen Thesen stimmen Sie zu?¹



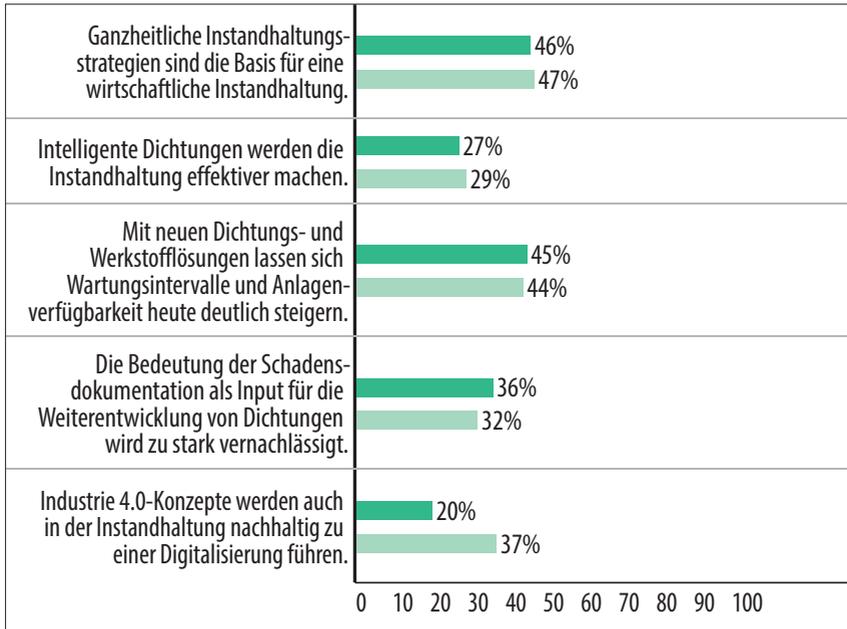
Die Bewertung der Bedeutung von Handling und Logistik nimmt im Vergleich zum Vorjahr ab: 47% der Anwender und 41% der Hersteller stimmen der These zu, dass die Reinheit des Verarbeitungsprozesses, der Lagerhaltung und der Logistik immer mehr Bedeutung erlangen wird. Leider gefolgt von der Einschätzung, dass die Bedeutung immer noch zu sehr unterschätzt wird – 44% der Anwender und 41% der Hersteller. Damit bewegen sich die Werte fast auf Vorjahresniveau, woraus sich keine positive Entwicklung ablesen lässt. Geändert haben sich die Einschätzungen in zwei Bereichen: Die Anforderungen an die Logistik im Zusammenhang mit der Miniaturisierung schätzen Anwender mit 23% deutlich geringer ein als im Vorjahr (37%). Bei den Herstellern hat dieses Thema mit 31% höhere Priorität (Vorjahr – 22%). Darüber hinaus hat sich das Meinungsbild der Hersteller hinsichtlich des Verzichtes auf einen Import großvolumiger Bauteile mit 24% (Vorjahr 6%) geändert.

„Qualitätsmanagement“ ist im Bereich Dichten. Kleben. Polymer. ein zentrales Thema: Welchen Thesen stimmen Sie zu?¹



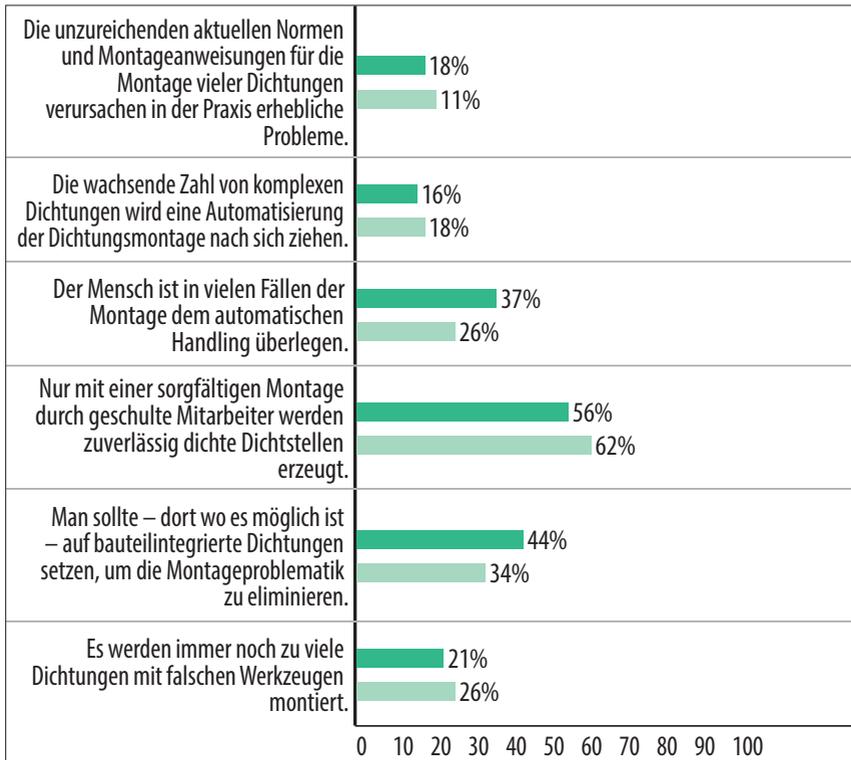
Im Vergleich zum Vorjahr wird zwar ein QS-zertifizierter Lieferant nicht als Garant für Qualität gesehen, aber bei der Meinung zur Gewichtung des Preises gehen die Meinungen inzwischen auseinander. Nur noch 44% der Anwender (Vorjahr 63%) bestätigen eine starke Bedeutung. Bei den Herstellern bewegt sich der Wert mit 69% auf Vorjahresniveau. Alle andere Werte bewegen sich auf Vorjahresniveau, was deutlich macht, dass sich rd. um das Thema Qualitätsprobleme durch Normen und Regelung wenig bewegt hat. Diese Werte sind zu hoch und ein Aspekt, der in der ganzen Diskussion um Normen und Richtlinien beachtet werden sollte. Denn letztendlich machen diese nur Sinn, wenn sie eingehalten werden können und in der Praxis umgesetzt werden. Dass rückfragefreie Zeichnungen immer noch ein Problem (35% der Anwender und 46% der Hersteller sagen dies) sind, ist wieder mal schwer nachvollziehbar, verdeutlicht aber auch wie langsam notwendige Veränderungen im Bereich Dichten. Kleben. Polymer. vonstattengehen.

Welchen Thesen zum Thema „Instandhaltung“ stimmen Sie zu? ¹



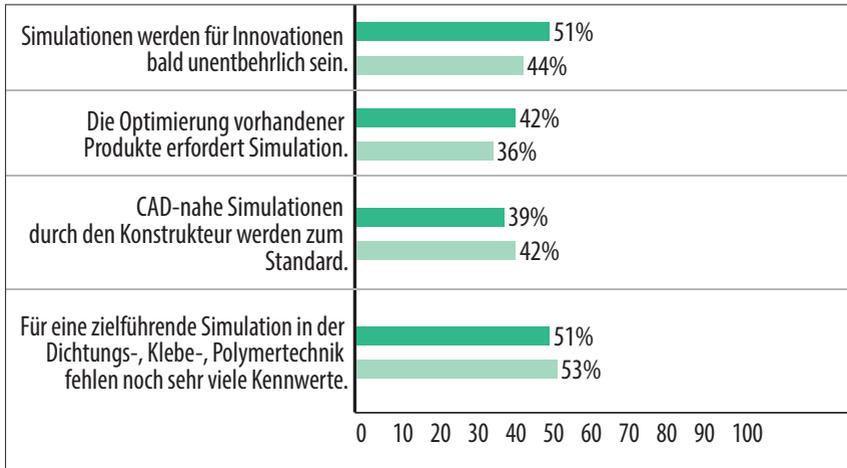
Die Werte bewegen sich Vorjahresniveau – ganzheitliche Instandhaltungsstrategien und neue Dichtungs- und Werkstofflösungen, die die Wartungsintervalle und Anlagenverfügbarkeit heute deutlich steigern, haben die größte Zustimmung. Erstmals wurde hier zur Bedeutung von Industrie 4.0-Konzepten in der Instandhaltung gefragt. Die Hersteller schätzen den Einsatz hier mit 37% deutlich höher ein als die Anwender mit 20%. Das liegt vielleicht auch daran, dass Hersteller diese Themen im Rahmen der Digitalisierung der Wirtschaft forcieren und Anwender aufgrund der teilweise komplexen Umsetzung und des ganzheitlichen Eingriffs in unternehmensweite IT-Strukturen und der Fragen, die damit verbunden sind, zurückhaltender sind.

Die „Dichtungsmontage“ ist ein Dauerthema: Welchen Thesen stimmen Sie zu? ¹



Zuverlässige Dichtstellen lassen sich nur mit einer sorgfältigen Montage durch geschulte Mitarbeiter erzeugen. 56% der Anwender und 62% der Hersteller sind dieser Meinung. Bei der Einschätzung der Probleme durch unzureichende Normen ist im Vergleich zum Vorjahr etwas Beruhigung eingekehrt. Nur noch 18% der Anwender (Vorjahr – 28%) und 11% der Hersteller (Vorjahr – 26%) sehen hier ein Problem. Mit 44% sind zunehmend mehr Anwender als Hersteller (34%) dafür – dort, wo es möglich ist – auf bauteilintegrierte Dichtungen zu setzen, um die Montageproblematik zu eliminieren. Diese Einschätzung ist nachvollziehbar, aber – angesichts der Bemühungen im Normenbereich der letzten Jahre – auch ernüchternd. Dies gilt auch für die Einschätzung, dass zu viele Dichtungen mit den falschen Werkzeugen montiert werden. 21% der Anwender und 26% der Hersteller meinen dies. Ein Wert, der angesichts der Lösungen am Markt definitiv zu hoch ist.

Dichtungen werden immer komplexer. Wie bewerten Sie den Einsatz von Simulationstechnologien für die Entwicklung von Dichtungen? Welchen Thesen stimmen Sie zu?¹



Hier hat sich wenig geändert, Simulation wird zwar als wichtig gesehen und soll an Bedeutung gewinnen. Nach wie vor sind aber 51% der Anwender der Meinung, dass für eine zielführende Simulation in der Dichtungs-, Klebe-, Polymertechnik noch sehr viele Kennwerte fehlen. 53% der Hersteller sehen das so. Dass CAD-nahe Simulationen zum Standard werden, sehen 39% der Anwender so. Diese Einschätzung teilten letztes Jahr nur 22% der Hersteller. In diesem Jahr sind es immerhin schon 42%.

Welche Entwicklungen und Trends haben derzeit den größten Einfluss auf Ihre Arbeit?

Preisdruck, Kostendruck/ Effizienzsteigerung, längere Lebensdauer, **Normen, Gesetzgebung**, automatische Qualitätssicherung, Time-to-Market , Organisation, **Dichtungen für tiefere und höhere Temperaturen**, Dichtungen für höhere Drücke, Dichtungen für aggressive Medien, Reibungsoptimierung, neue Werkstoffe und Compounds, **Materialabkündigungen bzw. -umstellungen**, Klebstoffe, -technik und -analyse , DIN2304, Oberflächenbehandlung, Flüssigdichtungen, 2K-Spritzguss-technik, Additive Fertigung/3D-Druck, Funktionsintegration/Multifunktionsdichtungen, **Dosiertechnik/Fertigungsprozesse, Simulation, Leichtbau, Miniaturisierung/Mikrotechnik, E-Mobilität, Industrie 4.0**

Preisdruck, Kostendruck/Effizienzsteigerung, längere Lebensdauer, Verfügbarkeit von Roh- und Klebstoffen, Richtlinien, **Normen, Gesetzgebung**, Fachkräftemangel, **Sourcing-Strategien**, Entwicklungs-Outsourcing, **Innovationsmanagement, DSGVO**, Dichtungen für tiefere und höhere Temperaturen, Energieeffizienz, **lebensmittelkonforme Dichtungen**, neue Werkstoffe und Compounds, **Klebstoffe , -technik und -analyse, Mess-und Prüftechnik, Bilderkennung**, Funktionsintegration/ Multifunktionsdichtungen, **Additive Fertigung/3D-Druck**, Simulation **Miniaturisierung/Mikrotechnik, Leichtbau, E-Mobilität, Industrie 4.0, Digitalisierung**

Normen und Gesetzgebung, E-Mobilität sind die Top-Themen für Anwender und Hersteller, die derzeit den größten Einfluss auf ihre Arbeit haben. Hier noch mal ein individuelles Stimmungsbild auf Basis von freien Einzelnennungen (>8 fett grün , 4 bis 7 fett und <4 Nennungen) getrennt nach Anwendern (oben) und Herstellern (unten).

Normen richtig anwenden

Technische Rechtsbegriffe, über die sich Anwender bei Dichtungsauswahl und -einsatz im Klaren sein sollten

Bezüglich der Auslegung der rechtlichen Begriffe „anerkannte Regeln der Technik“, „Stand der Technik“ und „Bestandsschutz“ kommt es immer wieder zu Diskussionen, die meistens auf Basis einer Auslegung nach Wissen der Diskutierenden geführt werden. Rechtsbegriffe sind aber eindeutig und deshalb sollte ihre tatsächliche Bedeutung bekannt sein.

Normen sind anerkannte Regeln der Technik und damit anerkannte, dokumentierte Festlegungen, in denen eine Mehrheit repräsentativer Fachleute den Stand der Technik wiedergibt. Sie entsprechen dem Stand der Technik zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung. Beispiele sind Normen (DIN, EN, ASME, ISO, ...), VDI-Richtlinien, das DVGW-Regelwerk, das AD 2000-Regelwerk etc. Sie sollen der Öffentlichkeit zugänglich sein und müssen, um mit dem Stand der Technik Schritt halten zu können, regelmäßig überarbeitet werden. Sind sie vereinbart, kann eine Nichteinhaltung zu rechtlichen Konsequenzen, bei Gefährdung von Leib und Leben sogar zu Geld- oder Freiheitsstrafen bis zu fünf Jahren führen. Es gibt allerdings auch Einschränkungen: So kann man, z.B. nach einer Gefährdungsanalyse, von ihnen abweichen.

Verbindlichkeit von Normen

Üblicherweise sind Normen von empfehlendem Charakter. Eine Anwendung ist nicht zwingend, ausgenommen, sie sind Bestandteil von Gesetzen und Vorschriften. Sie sollten jedoch als Mindeststandard bei Abweichungen von ihnen gelten. **Bild 1** zeigt die Abstufung von Gesetzen über Richtlinien bis hin zu Normen und die Verbindlichkeit zur Anwendung. Für die Umsetzung der europäischen Richtlinien kann in einer Norm (EN) ein Anhang ZA aufgeführt sein. Dieser Anhang stellt die Norm oder Teile der Norm in die Verbindlichkeit zur europäischen Richtlinie. Man spricht von der Auslösung der Konformitätsvermutung zur jeweiligen Richtlinie. In diesen Fällen ersetzt die Norm die regionalen Gesetze und Richtlinien und tritt an deren Stelle. In Deutschland wird die Norm durch Veröffentlichung im Ministerialblatt verbindlich.

Region	Benennung					Wirkung	
	EUROPÄISCHE RICHTLINIEN					Umsetzung für Mitgliedsländer der EU verpflichtend	
	Rahmenrichtlinie Arbeitsschutz 89/391/EWG	Druckgeräte-richtlinie 2014/68/EU (ex.97/23/EG) PED/DGRL	Industrieemissions-Richtlinie 2010/75/EU ex. IVU-Richtlinie	Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG			
	NATIONALE GESETZE					nationale Umsetzung der Richtlinien Anwendung verpflichtend	
	ArbSchG Arbeitsschutzgesetz	ProdSG Produktsicherheitsgesetz	BImSchG Bundesimmissionschutzgesetz	WHG Wasserhaushaltsgesetz	KrWG Kreislaufwirtschaftsgesetz		
	NATIONALE VERORDNUNGEN / HARMONISIERTE NORMEN*					Anwendung löst die Vermutung zur Konformität, die Einhaltung der Anforderungen der Richtlinien und der Gesetze aus (Konformitätsvermutung)	
	BetrSichV Betriebssicherheitsverordnung	14. ProdSV Druckgeräteverordnung	TA Luft Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft	AwSV Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen			
	RohrFltgV GasHDrLtgV * z.B. DIN EN 1515-4, DIN EN 10269, DIN EN 764, DIN EN 13445, DIN EN 13480		VDI 2440 (ist Verbindlich durch Anforderung in der Verordnung)	GefStoffV ChemVerbotsV			
	ANERKANNTE TECHNISCHE REGELN					Konformitätsvermutung zur Umsetzung der Gesetze, wenn sie dem Stand der Technik entsprechen	
	TRBS	TRFL		TRwS DWA-A 780-1 und -2			
	Verwaltungsvorschriften UVV, BGR					Konformitätsvermutung zur Umsetzung	
	TECHNISCHE REGELN, NORMEN					nach Vereinbarung	
	z.B. DIN, EN, ISO, ASME, VDE, VDI						
	VERTRAGLICHE VEREINBARUNGEN ODER VORSCHRIFTEN						
	(dürfen nicht gegen die guten Sitten verstoßen und müssen die Richtlinien, Gesetze und Verordnungen einhalten und umsetzen)						
Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit							

Bild 1: Abstufung von Gesetzen, Richtlinien bis hin zu Normen und deren Verbindlichkeit zur Anwendung (Bild: Lannewehr + Thomsen GmbH & Co. KG)

Normen entsprechen nicht automatisch dem Stand der Technik. So sagt ein BGH-Urteil vom Mai 1998: „DIN-Normen können die anerkannten Regeln der Technik wiedergeben oder hinter ihnen zurückbleiben.“

Das Bundesverwaltungsgericht BVerwG stellt fest: „Normen haben nicht schon kraft ihrer Existenz die Qualität von anerkannten Regeln der Technik und begründen keinen Ausschließlichkeitsanspruch.“ Jeder, der Normen anwendet, ist gut beraten, die inhaltliche Richtigkeit für seinen Fall zu prüfen.

Harmonisierte Normen

Die Wirkung harmonisierter Normen wird in [1] beschrieben. Hier wird Folgendes ausgeführt:

Definition der harmonisierten Norm

Als harmonisierte Normen im Sinne des neuen Konzepts werden die europäischen Normen angesehen, die europäische Normenorganisationen (CEN, CENELEC, ETSI) der europäischen Kommission formell vorlegen und die in deren Auftrag erarbeitet wurden (mandatierte Norm).

Definition der europäischen Norm

Nach der Definition in der Richtlinie 98/34/EG sind europäische Normen technische Spezifikationen, die von europäischen Normenorganisationen zur wiederholten oder ständigen Anwendung angenommen wurden, deren Einhaltung jedoch nicht zwingend vorgeschrieben ist.

Erstellung der Normen

Die europäischen Normenorganisationen sind für die Erarbeitung bzw. den technischen Inhalt der harmonisierten Normen verantwortlich. Eine Überprüfung bzw. Genehmigung harmonisierter Normen durch nationale oder europäische Behörden findet nicht mehr statt. Gleichwohl ist die Mitwirkung der Behörden am Normungsprozess in bestimmten Bereichen, wie z.B. der Druckgeräte-Richtlinie, vorgesehen. Durch die Beteiligung am Normungsprozess ist sichergestellt, dass die Anforderungen des Normungsauftrags richtig verstanden und öffentliche Belange berücksichtigt werden.

Als harmonisierte Normen brauchen die europäischen Normenorganisationen nicht unbedingt neue erarbeitete Normen vorzulegen. Sie können auch auf bestehende Normen zurückgreifen, die sie nach einer Prüfung und eventueller Überarbeitung als den Anforderungen des Normungsauftrages genügend beurteilen, oder bestehende Normen entsprechend ändern. Ferner ist es möglich, dass sie nationale (z.B. DIN ...) oder internationale (z.B. ISO ...) Normen zu europäischen Normen erklären und diese der Kommission als harmonisierte Normen vorlegen.

Umsetzung als nationale Normen

Europäische Normen müssen als nationale Normen (z.B. DIN...) umgesetzt werden. Dies bedeutet, dass alle im Widerspruch dazu bestehenden nationalen Normen innerhalb eines bestimmten Zeitraumes zurückgezogen werden müssen.

Konkretisierung der wesentlichen Anforderungen einer Richtlinie

Harmonisierte Normen haben formal einen Anhang ZA. In Form einer Tabelle wird dort angegeben, welche Abschnitte der jeweiligen Norm die wesentlichen Anforderungen der EG-Richtlinie, z.B. Anhang I der Druckgeräte-Richtlinie, erfüllen.

Konformitätsvermutung

Voraussetzung für eine Konformitätsvermutung ist:

- die Norm gründet auf einen Normungsauftrag durch die Kommission (mandatierte Norm),
- sie wird der Kommission von der Normenorganisation vorgelegt,
- sie wird von der Kommission im Amtsblatt veröffentlicht,
- sie wird in eine nationale Norm umgesetzt.

Bei Konformität mit einer nationalen Norm (DIN EN...), soweit es sich um die Umsetzung einer harmonisierten Norm handelt, deren Fundstelle veröffentlicht wurde, ist davon auszugehen, dass die wesentlichen Anforderungen der anwendbaren Richtlinie (z. B. Druckgeräte-Richtlinie) erfüllt sind.

Veröffentlichung

Ziel der Veröffentlichung im Amtsblatt der EU ist es, den Termin festzulegen, ab dem frühestens davon auszugehen ist, dass Konformität mit den Anforderungen besteht. Die Mitgliedsstaaten müssen die Fundstelle der nationalen Norm (DIN EN...), die eine harmonisierte Norm umsetzt, ebenfalls veröffentlichen (in Deutschland erfolgt dies im Bundesarbeitsblatt).

Anwendung

Die Anwendung einer harmonisierten Norm, auf der eine Konformitätsvermutung beruht, bleibt freiwillig. Der Hersteller kann selbst wählen, ob er auf harmonisierte Normen zurückgreift. Entscheidet er sich jedoch gegen die Anwendung einer harmonisierten Norm, muss er nachweisen, dass die Produkte durch die Anwendung anderer Spezifikationen die wesentlichen Anforderungen erfüllen. Zum Thema „Veröffentlichung“ in [1] sei noch angemerkt: Die Veröffentlichung des Bundesarbeitsblattes wurde im Dezember 2006 eingestellt. Seit Januar 2007 werden die Veröffentlichungen im Gemeinsamen Ministerialblatt (GMBL) vorgenommen.

Hinweise für den Anwender von DIN-Normen:

Die Normen des Deutschen Normenwerkes stehen jedermann zur Anwendung frei und sollen sich als „anerkannte Regeln der Technik“ etablieren. Es ist auch zu berücksichtigen, dass DIN-Normen nur den zum Zeitpunkt der jeweiligen Ausgabe herrschenden Stand der Technik berücksichtigen können. Wichtig ist auch, dass sich durch das Anwenden von Normen niemand der Verantwortung für eigenes Handeln entzieht. Die Anwendung einer Norm schützt nicht vor ihrer Überprüfung auf den Bezug zum Stand der Technik. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Inhalt einer Norm richtig ist. Der Verband SVG der Bausachverständigen, Gutachter und Ingenieure veröffentlicht auf seiner Homepage folgende Informationen: „Die (allgemein) anerkannten Regeln der Technik sind nicht identisch mit den DIN-Normen und anderen Normen. Vielmehr gehen sie über die allgemeinen technischen Vorschriften, wozu auch die DIN-Normen gehören, hinaus. Für gültige DIN-Normen besteht nur die Vermutung, dass sie den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen. Diese Vermutung ist widerlegbar, denn in den Normenausschüssen werden auch Interessensstandpunkte vertreten. Außerdem entsprechen Normen nicht immer dem aktuellen technischen Kenntnisstand und beinhalten nicht immer Regeln, die sich langfristig bewähren oder bewährt haben.“

Folgende Hinweise zur Anwendung von Normen gibt das Deutsche Institut für Normung (DIN), und zwar grundsätzliche Hinweise an denjenigen, der die Norm anwendet – denn jeder deliktfähige Mensch hat sein Handeln (Tun und Unterlassen) selbst zu verantworten. Der Anwender einer DIN-Norm ist davon nicht ausgenommen. Daher wird er beim Anwenden einer DIN-Norm insbesondere beachten müssen, dass

1. er das für das richtige Anwenden der Norm erforderliche Verständnis besitzt (DIN-Normen sind nicht für Laien gedacht; eine vergleichbare Situation besteht bei Rechtsnormen, für deren richtiges Anwenden der Gesetzgeber ebenfalls allgemeine und spezielle Rechtskenntnisse voraussetzt) sowie die Verwendung der Verbformen nach den Gestaltungsregeln (DIN 820-2:2011-04; Anhang H) kennt, um zwischen Anforderung, Empfehlung, Zulässigkeit und Möglichkeit unterscheiden zu können,
2. die Norm nicht die einzige, sondern nur eine Erkenntnisquelle für technisch-ordnungsgemäßes Verhalten im Regelfall ist,
3. die Regeln für das Aufstellen der DIN-Normen zwar das Berücksichtigen des Standes der Technik verlangen, diese Forderung aber schon wegen der fortwährenden Weiterentwicklung in der Technik äußerst schwer zu realisieren ist,
4. das Ergebnis einer Gemeinschaftsarbeit sich nicht für das Befriedigen von Höchstansprüchen eignet,

5. sich das Anwenden der Norm wider besseres eigenes Wissen verbietet (z. B. wegen einer fehlerhaften technischen Angabe in einer Norm, wegen möglicher Verletzung von Rechten anderer, insbesondere gewerblicher Schutzrechte, wegen möglichen Verstoßes gegen Rechtsvorschriften).

Hier sind auch grundsätzliche Hinweise an denjenigen, der eine historische Norm anwendet, zu finden. Nur die jeweils neueste Ausgabe einer Norm sollte angewendet werden. Über geplante, laufende und abgeschlossene Normungsarbeiten in den einzelnen Fachgebieten auf nationaler, regionaler und internationaler Ebene sowie über Übersetzungen von Deutschen Normen wird in dem monatlich erscheinenden Zentralorgan der deutschen Normung [2], berichtet. Im DIN-Anzeiger für technische Regeln, der ständigen Beilage dieser Zeitschrift, werden Veränderungen im Deutschen Normenwerk, in der europäischen und in der internationalen Normung angezeigt.

Zurückgezogene – somit historische – Normen dürfen grundsätzlich weiter angewendet werden, wenn dies zwischen Vertragspartnern vereinbart und nicht vom Gesetzgeber untersagt ist. Auf diese Weise kann die Beschaffung von Ersatzteilen für bestehende Produkte oder der Weiterbetrieb bestehender Anlagen, die nach der historischen Norm entwickelt wurden, ermöglicht werden. Historische Normen sind im Zusammenhang mit aktuellen Normen weiter anzuwenden, wenn sie dort im Rahmen einer datierten Verweisung in Bezug genommen werden.

Auch grundsätzliche Hinweise an denjenigen, der eine Vornorm anwendet, sind hier aufgeführt: DIN SPEC (Vornorm) sollten angewendet werden, um dadurch weitere praktische Erfahrungen sammeln und dem zuständigen Arbeitsgremium des DIN mitteilen zu können. Denn definitionsgemäß handelt es sich bei einer DIN SPEC (Vornorm) um das Ergebnis einer Normungsarbeit, das wegen bestimmter Vorbehalte zum Inhalt oder wegen des gegenüber einer Norm abweichenden Aufstellungsverfahrens vom DIN nicht als Norm herausgegeben wird. DIN SPEC (Vornormen) befassen sich mit Gegenständen, die normungswürdig sind. Daran knüpft sich die Erwartung, dass DIN SPEC (Vornorm) zum geeigneten Zeitpunkt und nach notwendigen Veränderungen nach dem üblichen Verfahren in eine Norm überführt oder ersatzlos zurückgezogen wird [3].

Weil der Norm-Entwurf nicht die endgültige Fassung der Norm ist, wird ausdrücklich darauf aufmerksam gemacht, dass bei der Anwendung des Norm-Entwurfes Nachteile eintreten können. Soll ausnahmsweise nach einem Norm-Entwurf gearbeitet werden, so muss das zwischen den Vertragspartnern vereinbart werden. Besonders

die in einem Norm-Entwurf für die geplante Norm vorgesehenen Festlegungen über die Bezeichnung des Genormten und die Kennzeichnung, insbesondere die markenrechtliche Kennzeichnung, sind noch nicht für die Anwendung im überbetrieblichen Verkehr bestimmt.

Die Einhaltung von Normen gibt gute Anhaltspunkte für sorgfältiges/verkehrssicheres Verhalten [4].

Der Stand der Technik ist im Handbuch der Rechtsförmlichkeit [4] ganz klar definiert: „Stand der Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Erreichung des vorgegebenen Schutzzieles als gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg im Betrieb erprobt worden sind. Stand der Technik kennzeichnet den Zustand des jeweiligen technischen Entwicklungsstandes.“

Die Einhaltung des Stands der Technik wird in verschiedenen Gesetzen verlangt:

- Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG §5 und §22 jeweils Absatz (1), 2
- Wasserhaushaltsgesetz WHG §3 11
- Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV §4 Absatz (1), 2. und 3
- Rohrfernleitungsverordnung RohrFLtGV §3 Absatz (2)
- Gashochdruckleitungsverordnung GasHDrLtGV §2 Absatz (1)

Wobei die GasHDrLtGV die einzige ist, die in §2 Absatz (4) darauf hinweist, dass europäische Rechtsakte (z.B. Richtlinie 2014/68/EU, ex. 97/23/EG) umzusetzen sind [5].

Fazit

Wir haben, gerade im Umgang mit gefährlichen Medien, den Stand der Technik einzuhalten. Dabei handelt jeder auf eigene Gefahr. Die teilweise recht unterschiedlichen Aussagen zu Verbindlichkeit und Gesetzen sollten nicht darüber hinwegtäuschen, dass man sich bei der Auswahl von Dichtungslösungen sehr genau darüber im Klaren sein sollte, welche rechtlichen Rahmenbedingungen aktuell gelten. Vor diesem Hintergrund sind die Inhalte der Regeln zum Teil zitiert, zum Teil in den Worten der Regeln wiedergegeben. Die Anmerkungen und Auslegungen beruhen auf langjähriger Erfahrung und dienen der Entscheidungshilfe, können aber in dieser Form nie eine rechtliche Beratung ersetzen. Da muss man dann fallbezogen tiefer einsteigen.

Literatur

- [1] http://www.druckgeraete-online.de/seiten/nor_intro.htm
- [2] DIN-MITTEILUNGEN + elektronorm, Beuth Verlag, www.beuth.de/en/publication/zeitschrift-din-mitteilungen-abo/3695987
- [3] DIN 820-4:2010-07, 6.1.2
- [4] EG-Kommission, Anwenderleitfaden Maschinenrichtlinie 2006/42. 2. Aufl. 2010, §162
- [5] www.gesetze-im-internet.de



Raum für Experten

Erfahrung. Erkennen. Lösungen.

**Mit unserem technischen Consulting kommen
Sie schnell und ohne Umwege ans Ziel**

www.isgatec.com > Consulting

Ihr Ansprechpartner: Karl-Friedrich Berger

Tel.: 0049(0)621-7176888-5

ISGATEC[®]
CONSULTING

Beschichtungen lösen Zielkonflikte von Dichtungen

Wie aus Elastomer-Dichtungen leistungsstarke und funktionssichere Premiumprodukte werden

Was Dichtungen alles können müssen, ist nicht hoch genug zu bewerten. Obwohl sie als klassische C-Teile gelten, müssen sie A-Funktionen übernehmen. So sollen sie möglichst den ewigen Zielkonflikt zwischen hervorragender Dichtwirkung, niedrigster Reibung und geringstmöglichem Verschleiß auflösen. Und das bei immer mehr neuen und komplexeren Anwendungen, neuen Materialien und Werkstoffen sowie neuen Geometrien für Bauteile und Dichtungen. Eine Beschichtung mit Gleitlack bringt Elastomerdichtungen allen konkurrierenden Zielen näher. Diese Nachbehandlung und Veredelung eignet sich für Großserien genauso wie für Kleinstmengen ab Losgröße 1.

Wer früher das Handschuhfach im Auto geöffnet hat, kennt es noch: Mit einem Krachen rauscht es samt Inhalt nach unten – gehalten, nur von zwei Bändern. Genauso der Haltegriff am Dachhimmel: Hat man ihn losgelassen, ist er mit einem lauten Klack in die Ruhestellung zurückgeschnappt. Und zu Hause in der Küche oder im Wohnzimmer war es das Gleiche: Schubladen und Schranktüren schließen mit lautem Knall, ungebremst. Mit heutigem Komfortverständnis ist das nicht mehr vereinbar. Kein Auto- oder Möbelhersteller würde sich mit solcher Technik auf den Markt wagen. Das Handschuhfach gleitet heute sanft nach unten, der Haltegriff wird gebremst und geräuschlos in die Ursprungsstellung zurückgeführt, Schubladen und Schranktüren gleiten behutsam und lautlos in die jeweilige Endposition. Verantwortlich dafür sind Dämpfer, deren Kolben mit leistungsfähigen Dichtungen ausgestattet sind. Und auch eventuelle Geräusche der Dichtungen in Funktion sind heute deutlich niedriger oder sogar vollständig verschwunden. Das ist im Automobil sowie in der Möbelbranche immens wichtig. Gerade im Innenraum der Autos ist es heute immer leiser. Unvorstellbar, dass eine quietschende Dichtung diese Atmosphäre beeinträchtigt.

Dass diese Dichtungen ihre Arbeit zuverlässig und geräuschlos verrichten können, hat einen besonderen Grund: Ihre Oberflächen sind veredelt. Sie sind gereinigt, aktiviert und

Von Heiko Friedrich, Geschäftsführer
OVE Plasmatec GmbH | www.ove-plasmatec.de

beschichtet. Immer mehr setzt sich diese Nachbehandlung produzierter Elastomerdichtungen durch, nicht nur in Autos und Möbeln. In unzähligen weiteren Anwendungen, Bereichen und Branchen kommen beschichtete Dichtungen zum Einsatz. Und fast täglich kommen neue Anwendungen mit neuen Materialien und Werkstoffen sowie neuen Geometrien für Bauteil und Dichtung hinzu. Stets werden die Anforderungen dabei komplexer – auch für die Leistungsfähigkeit und Funktionssicherheit der Dichtungen werden immer höhere Forderungen definiert.



Bild 1: Mit dem Beschichten von Elastomer-Dichtungen werden aus einfachen Dichtringen leistungsfähige Hightech-Teile (Bild: OVE Plasmatec GmbH)

Aber sind diese zusätzlichen Veredelungsschritte durch Reinigen und Beschichten auch wirklich notwendig und sinnvoll? Und wenn ja, für welche Branchen und Anwendungen? Welchen Nutzen haben Anwender, und wie funktioniert das eigentlich?

Von Dichtungen werden Hightech-Funktionen erwartet

Fest steht, das hat die Praxis bisher gezeigt: Mit dem Beschichten von Elastomer-Dichtungen werden aus einfachen Dichtringen leistungsfähige Hightech-Teile (**Bild 1**). Damit lassen sich Reibwerte ebenso verbessern wie deren dynamische Funktionen. Durch Vereinzelung und optionale Farben wird die Montage erleichtert und ermöglicht oftmals erst die automatisierte Verarbeitung der Dichtungen, weil sie sich erst dann einzeln zuführen lassen. Gleichzeitig entfällt das aufwändige, meist manuelle Aufbringen herkömmlicher Fertigungs- und Montagehilfen. Die Beschichtung mit einer wasserbasierten Gleitlackschicht ist hauchdünn, hochelastisch und umweltfreundlich. Das Verfahren eignet sich für jede beliebige Menge ab Losgröße 1.

Nicht alle Verfahren entsprechen modernen Anforderungen

Am Markt werden mehrere verschiedene Beschichtungsverfahren angeboten. So gibt es z.B. nasse Beschichtungen. Dabei werden Wachse, Fette oder Öle, z.B. Silikonöle, verwendet. Beschichtungen durch aufgetrommeltes Pulver verwenden MoS₂, Talkum oder PTFE. Darüber hinaus gibt es Verfahren, bei denen die Dichtungen ummantelt werden. Alle diese Verfahren haben ihre Berechtigung, aber auch gravierende Nachteile.

So sind, z.B. mit Silikonölen, beschichtete Dichtungen zwar im Centbereich günstiger, häufig aber nicht für alle Branchen und Anwendungen zugelassen oder sinnvoll einsetzbar – so wie z.B. für den Medizin- oder Lebensmittelbereich. Für hoch anspruchsvolle Automotive-Bereiche gelten gleiche Einschränkungen. Wie bei den nassen Beschichtungen ist auch bei jenen mit aufgetrommelten Pulver das Verfahren nicht prozesssicher und wiederholgenau durchzuführen und kommt damit für die Standards des heutigen Qualitätsmanagements mit Rückverfolgbarkeit für viele Anforderungen nicht infrage. Das universellste Beschichtungsverfahren verwendet Gleitlacke, um die Leistungsfähigkeit von Dichtungen zu steigern. Seriöse Dienstleister bieten zu den Beschichtungsverfahren zusätzliche Qualitätsprüfungen an und führen z.B. Reibwert-, Drehmoment- und/oder Haftprüfungen durch, stellen verschiedene Farbvergleiche an oder können LABS-Tests durchführen. Die Prüfungsergebnisse können dann auch in einem Zertifikat dokumentiert werden.

Drei Schritte zur erfolgreichen Beschichtung

Drei Schritte sind durchzuführen, damit am Ende erfolgreich beschichtete Dichtungen mit höherer Leistungsfähigkeit stehen: Die Nassreinigung, die Plasmaaktivierung und schließlich die eigentliche Beschichtung.

1. Schritt: Nassreinigung

Nach der Herstellung weisen Elastomer-Dichtungen häufig Reste von Ölen, Fetten, Trennmitteln oder sonstigen Fertigungshilfsstoffen auf. Darüber hinaus sind sie häufig miteinander verklebt. So eingebaut, würden sie nicht zuverlässig funktionieren und sie würden sich auch nicht automatisiert montieren lassen. Im ersten Schritt der Oberflächenveredelung werden die Elastomerteile deshalb gründlich nassgereinigt und die sauberen Teile anschließend schonend getrocknet. Bei Anwendung des Sinnerschen Waschkreises (**Bild 2**) gilt es, unter Berücksichtigung der Faktoren Reinigungsmittel, Mechanik, Temperatur und Zeit, die optimale Einstellung der Faktoren für die für den Anwendungsfall günstigste und schonendste Methode zu finden – sowohl für den Reinigungserfolg als auch für die Wirtschaftlichkeit. In einer Trommelwaschmaschine werden die Dichtungen zusammen mit dem passenden Reinigungsmittel in der geeigneten Konzentration eine definierte Zeit mit der vom Werkstoff abhängigen Temperatur gewaschen. Das Ergebnis sind grundgereinigte Elastomer-dichtungen bzw. -teile. Darüber hinaus gibt es beim Reinigen heute vom einfachen Waschen über das tiefenwirkende Plasmareinigen ebenso geprüfte LABS-Freiheit nach verschiedenen Werksnormen.

2. Schritt: Plasmaaktivierung

Anschließend folgt die Plasmaaktivierung. Hierbei kommen die grundgereinigten Elastomere in eine Niederdruckplasmaanlage, in der zunächst ein Vakuum erzeugt wird. Ein Hochfrequenzgenerator liefert elektrische Spannung, die gemeinsam mit Sauerstoff eingebracht wird. So entsteht ein elektrisch leitfähiges Gas – das Plasma –, das die Oberflächeneigenschaften der Dichtungsringe verändert, indem die Moleküle angeregt werden. Diese Aktivierung sorgt dafür, dass sich freie Radikale mit den ausdiffundierenden nicht-elastomeren Stoffen verbinden und oxydieren. Dieser Vorgang ist durch ein Sichtfenster an der lilafarbenen Flamme zu beobachten (Bild 3). Die Kohlenwasserstoffverbindungen verändern sich. Nun hat sich die Adhäsionsfähigkeit und Benetzbarkeit der Oberflächen erhöht und wasserbasierende Lacke lassen sich so bestens mit den unpolaren Stoffen verbinden. Die Benetzungsfähigkeit bzw. die Oberflächenspannung muss vor dem Beschichten jedoch geprüft werden. Hier bieten sich die Kontaktwinkelmessung sowie Versuche mit Testtinte an. Je nach Elastomer kommen dabei Testtinten in verschiedenen Ausführungen für unterschiedliche Molekularkräfte (mNm) zum Einsatz.

Die Dauer der Plasmaaktivierung hängt dabei vom Elastomer, den Zusatzstoffen und dem gewünschten oder benötigten Oberflächenergebnis ab. Hier ist die Erfahrung der Experten gefragt, denn vorgeschriebene Normwerte gibt es dabei genauso wenig wie immer gleiche Elastomere. Ist das gewünschte Ergebnis erreicht, können die Werkstücke beschichtet werden.



Bild 2: Bei Anwendung des Sinner'schen Waschkreises gilt es, die für den Anwendungsfall günstigste und schonendste Methode zu finden (Bild: OVE Plasmatec GmbH)

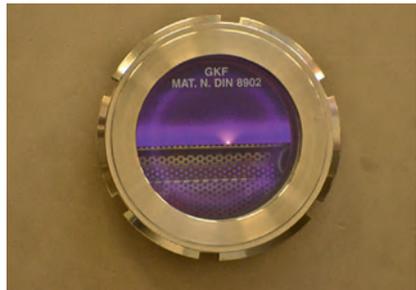


Bild 3: Die Aktivierung sorgt dafür, dass sich freie Radikale mit den ausdiffundierenden nicht-elastomeren Stoffen verbinden und oxydieren. Dieser Vorgang ist durch ein Sichtfenster sehr schön an der lilafarbenen Flamme zu beobachten (Bild: OVE Plasmatec GmbH)



Bild 4: Werden Dichtungen in speziellen Maschinen mit einer Gleitlackschicht auf Wasserbasis beschichtet, lässt sich die Reibung um durchschnittlich 50% reduzieren

(Bild: OVE Plasmatec GmbH)

3. Schritt: Beschichtung

Nun werden die Elastomer-Dichtungen in speziellen Maschinen mit einer hauchdünnen, hochelastischen und umweltfreundlichen Gleitlackschicht auf Wasserbasis beschichtet (**Bild 4**). Damit lässt sich die Reibung um durchschnittlich 50% reduzieren. Die gereinigten und aktivierten Schüttgutteile kommen in die Beschichtungstrommel, wo sie in einem Batchprozess beschichtet werden. Hierzu werden die Werkstücke in der Trommel in Bewegung versetzt und fallen dann durch einen Sprühnebel des Gleitlacks. Dieser wird in getakteten Sprühstößen auf die fallenden Elastomerteile gesprüht. Dadurch, dass die Teile in der Bewegung aneinander reiben, glättet sich der aufgesprühte Gleitlack. Das Beschichtungsergebnis entspricht der Normalverteilung. Im Ergebnis entsteht eine Schichtdicke von 3 bis 12 μ . Ob die Beschichtung im jeweiligen Fall ausreicht, zeigt sich durch prozessbegleitende Funktionsprüfungen eher als durch kaum realisierbare Messungen der Schichtdicke. Geprüft wird während des Beschichtungsvorgangs, indem einzelne Teile entnommen werden. So kann jeder Beschichtungsvorgang feinjustiert werden. Das ist auch notwendig, da die Elastomere unterschiedlicher Chargen niemals vollkommen identisch sind. Dazu ist der Stoff zu „lebendig“. Deshalb muss auf jeden Fall beim ersten Beschichtungsvorgang ein Rezept hinterlegt werden, das sämtliche Parameter dokumentiert.

Die großen Herausforderungen beim Beschichten sind einerseits, die richtige Menge und den passenden Umfang der Gleitlackbeschichtung herauszufinden sowie andererseits die Umstellung von manueller Besprühung auf maschinelle Lackaufbringung. Mit dem manuellen Prozess nähert man sich gemeinsam mit dem Dichtungshersteller und/oder dem Anwender der Dichtungen dem gewünschten Ergebnis an. Hierzu werden Menge und Umfang der Gleitlackbeschichtung hinsichtlich der jeweiligen Anwendung und das zu beschichtende Elastomerbauteil in einem iterativen Prozess entwickelt und festgelegt. Dabei wird das Rezept des Elastomers genauso wie das für

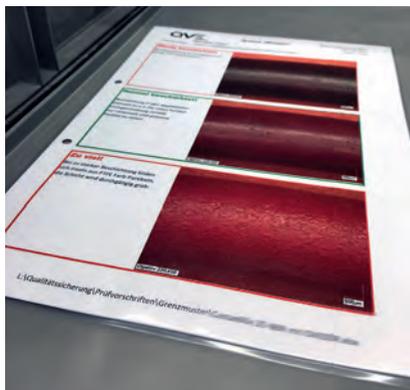


Bild 5: Oberflächen werden mit Mikroskopen geprüft und mit Vergleichskarten und Rückstellmustern abgeglichen

(Bild: OVE Plasmatec GmbH)



Bild 6: Um den Anwendern die beruhigende Sicherheit über den ordnungsgemäßen Zustand der Dichtungen zu geben, schließen sich nach dem Beschichtungsprozess zahlreiche Prüfungen an.

(Bild: OVE Plasmatec GmbH)

die Beschichtung aufgezeichnet und fest hinterlegt. Berücksichtigt werden darin u.a. Parameter wie die Ofenzeit und die Mindesthaltbarkeit genauso wie die Lager- und Verarbeitungsbedingungen. Ist das geschehen, gilt es, dieses Ergebnis auch beim maschinellen Vorgang zu erreichen. Neben regelmäßigen Prüfungen sind dabei auch die ständigen Rückmeldungen der Anwender von essenzieller Wichtigkeit.

Sehr wichtig für ein gutes Beschichtungsergebnis ist die Sauberkeit aller Sprühkomponenten. Das erfordert nach jedem Auftrag und bei jedem Wechsel des Gleitlacks die sorgfältige Reinigung von Trommel, Leitungen, Sprüheinheit und Haube. Erfüllt das Beschichtungsergebnis die geforderten Qualitätsanforderungen, folgt der letzte Teilprozess des Beschichtungs Vorgangs. Die aufgebraute Gleitlackschicht wird ein-gebrannt. Am Ende steht so ein perfektes Beschichtungsergebnis.

Prüfungen und Dokumentationen geben Sicherheit

Um den Anwendern der nun hochleistungsfähigen Dichtungen die beruhigende Sicherheit über den ordnungsgemäßen Zustand der Dichtungen geben zu können, schließen sich nach dem Beschichtungsprozess zahlreiche Prüfungen an. So werden die Oberflächen mit Mikroskopen geprüft und mit Vergleichskarten und Rückstellmustern abgeglichen (Bild 5). In speziellen Anordnungen werden Drehmomentbelastung, Zug- und Druckkräfte, wie sie beim Fügen und Stecken der Produkte vorkommen, simuliert, um die mit dem Kunden vereinbarte Qualität der Beschichtung zu

testen. Bei Beschichtungen mit UV-Indikatoren folgt eine Prüfung der Gleitlackbeschichtung durch UV-Licht (**Bild 6**). Und schließlich werden physikalische und chemische Prüfungen durchgeführt, um die Qualität zu bescheinigen. Das können ganz einfache Knickprüfungen und Einlagerungsversuche unter bestimmten Umgebungsbedingungen sein. Verantwortungsvolle Beschichter können diese Prüfungsergebnisse auch dokumentieren und entsprechende Zertifikate mitliefern.

Im Endergebnis entstehen mit den maschinell aufgetragenen, wasserbasierten Gleitlacksystemen trockene, grifffeste und saubere Beschichtungen auf Elastomerbauteilen mit PTFE, Silikonen oder Siloxanen als Trockenschmierstoff. Dabei entstehen Oberflächenstrukturen, die die Reibwerte positiv beeinflussen und die Verschleißeigenschaften in Richtung höherer Festigkeit verbessern. Je nach Anwendung und Funktion der Dichtung gibt es unterschiedliche Beschichtungen. Darunter sind auch spezielle Beschichtungen für Dichtungen im Lebensmittel- oder Trinkwasserbereich. Die entsprechenden Gleitlacke sind dahingehend unbedenklich, erfüllen verschiedene Normen und Spezifikationen oder haben die erforderlichen Freigaben. Sicherheit geben dabei die zahlreichen Prüfungen samt Dokumentationen. Weitere Behandlungen der Oberflächen können zusätzliche Effekte bringen. So verhärtet z.B. die Behandlung mit Jod die Oberflächen von NBR-Dichtungen und lässt sie so künstlich altern. Das senkt die Reibung weiterhin, Stick-Slip-Effekte lassen sich nahezu vollständig eliminieren.

Farbige Lacke vermeiden Verwechslungen

Die Gleitlacke können sowohl transparent als auch farbig sein (**Bild 6**). Bei transparenter Beschichtung bleibt die Farbe des Basiswerkstoffes weiterhin erkennbar. Wird farbig beschichtet, lassen sich die Dichtungen besser unterscheiden. Das vermeidet Verwechslungen. So lassen sich die Dichtungen z.B. nach Lieferanten oder Anwendungen unterscheiden. Auf die reibungsreduzierenden Eigenschaften hat die Farbe keinen Einfluss, diese bleiben nahezu erhalten. Ebenso erleichtert sich durch die Beschichtung die Montage, weil die Dichtungen nicht mehr zusammenkleben. Zusätzliche Fertigungs- und Montagehilfen wie Öle und Fette, die umständlich aufgetragen werden müssen, sind nicht mehr notwendig. Eine automatisierte Zuführung im Rahmen einer Serienproduktion wird durch vereinzelt und reibungsoptimierte Dichterringe überhaupt erst möglich. Und auch der Nutzung tut das Beschichten gut, denn die Grenzwerte verschieben sich, die Dichtungen arbeiten länger.

Trotz aller Möglichkeiten, die das Beschichten herkömmlichen Dichtungen eröffnet, bleiben viele Einflussfaktoren, die das Beschichtungsergebnis erschweren und die es

zu beherrschen gilt. Das fängt bei der Werkstoffvielfalt mit unterschiedlichen Arten an. So gilt es, sich mit NBR, HNBR, AEM, FKM, EPDM, VMQ, FVMQ oder Gummi-Metallverbindungen auseinanderzusetzen. Hinzu kommen Compounds in ihrer Zusammensetzung aus natürlichem oder synthetischem Kautschuk, mit Füllstoffen aus Ruß oder Mineralen und mit Weichmachern – seien es Öle oder synthetische Produkte. Darüber hinaus beeinflussen Vernetzungsmittel wie Schwefel etc. Vulkanisationsbeschleuniger oder -verzögerer sowie Hilfsmittel wie Farbpigmente, Alterungsschutz etc. das Verhalten von Elastomeren. Und schließlich sorgen auch die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe dafür, dass man den Veredelungsprozess nicht auf die leichte Schulter nehmen darf.

Und als ob das nicht schon genug wäre, können darüber hinaus auch variierende Anlieferungszustände der Dichtungen für abweichendes Verhalten im Beschichtungsprozess sorgen. So kämpfen Beschichter häufig mit unerwarteten Verunreinigungen und/oder Prozessänderungen während der Herstellung, weil Teile z.B. plötzlich chloriert, getempert oder entgratet sind, Werkstoffmischungen verändert werden, Werkzeugänderungen für eine andere Oberflächenrauigkeit der Bauteile sorgen oder dadurch dass das optische Erscheinungsbild der angelieferten Produkte oft voneinander abweicht. Dies alles bestätigt lediglich, dass es sich bei Gummi letztendlich um ein lebendiges Produkt handelt, dem größtmögliche Aufmerksamkeit gebührt. Die Beschichtungsverfahren müssen also mit größter Sorgfalt durchgeführt werden. Langjährige Erfahrung ist hierbei sicherlich von besonderem Vorteil.

Fazit und Perspektive: Dichtung meldet, dass Austausch ansteht

Versteht es ein Lohnveredler, mit all diesen Herausforderungen umzugehen, lassen sich durch das Beschichten die Leistungsfähigkeit und Langlebigkeit von Elastomer-Dichtungen erheblich steigern. Insbesondere hier werden weitere Herausforderungen auf Dichtungshersteller zukommen. Denn im Rahmen von QM-Systemen werden immer mehr, auch werks- oder OEM-spezifische Normen genauere und höhere Anforderungen an die Dichtungen stellen. Dichtungen werden auch durch weiterentwickelte Veredelungen verbessert werden. Und wer sagt denn, dass im Rahmen von Digitalisierung und Industrie 4.0 die Beschichtungen nicht eines Tages Sensoren und Elektronik enthalten? Dann meldet die Dichtung gleich selbst, wann sie ausgetauscht werden muss.

Die Räder der Produktivität am Laufen halten

Der technische Handel im Wandel der Marktherausforderungen

Maximale Anlagenverfügbarkeit ist das A und O für die Produktivität und den Erfolg eines Unternehmens. Je technologisch ausgefeilter Maschinen und Anlagenstraßen sind, desto höher sind die Anforderungen und Herausforderungen an den Instandhalter. Ein Beispiel ist die Dichtungstechnik. In diesem Bereich muss er u.a. Wartungs- und Instandhaltungspläne koordinieren und sie durch vorausschauende Condition-Monitoring-Maßnahmen unterstützen und optimieren. So hält er Maschinenausfälle und Reparaturen auf einem niedrigen Level. Hilfreich sind Expertisen von außen, etwa durch einen technischen Händler, der neben der nahtlosen, termingerechten Ersatzteilversorgung auch durch flankierende Maintenance-Services Mehrwert generiert und mithilft, dass die Räder permanent am Laufen sind.

Instandhaltung, Wartung und Reparatur begleiten den Menschen quasi seit er aufrecht gehen kann. Denn bereits in der Steinzeit war es überlebenswichtig, dass die primitiven Waffen zur Jagd durch stete „Instandhaltung“ einsatzbereit sein mussten. So konnte selbst eine ungeschärfte Steinspitze im Ernstfall über Leben und Tod entscheiden.

Mit fortschreitender Industrialisierung im 18. Jahrhundert – etwa mit Einführung der Dampfmaschine – erlangte in den Industriebetrieben der Stellenwert und der Einsatz von Instandhaltungsmaßnahmen eine immer wichtigere Rolle. Ein Beispiel ist der Simmerring: Als der österreichische Ingenieur Walther Simmer 1929 die später nach ihm benannten Simmerringe aus Leder erfand, konnte er nicht ahnen, dass seine Erfindung zur Abdichtung von Maschinengehäusen bei austretenden Elementen, wie etwa Wellen oder Schubstangen, den Durchbruch in Sachen Dichtung bedeuten würde. In unzähligen Größen, Variationen und Materialien kommen heutzutage diese Wellendichtringe als unverzichtbare Hightech-Bauteile, beispielsweise in allen Bereichen des Fahrzeug-, Maschinen- und Anlagenbaus, zum Einsatz.

Von Ralf Hellwig, Geschäftsführer Vertrieb
ZITEC-Brammer | www.brammer.biz/de

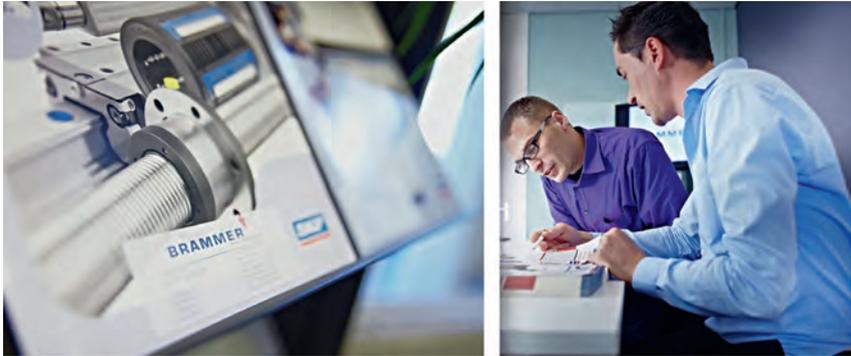


Bild 1: Als Wegbegleiter beim industriellen Umbruch zu Industrie 4.0 kommt dem technischen MRO-Händler mit der nötigen Produkt- und Prozesskompetenz sowie maßgeschneiderten Smart-Services im Bereich Wartung und Instandhaltung eine bedeutende Rolle zu (Bild: Brammer GmbH)

Bis heute steigt der Bedarf an technischen Produkten, etwa an Dichtungen, thermoplastischen Elastomeren, Klebstoffen und -bändern – und damit auch nach Händlerdienstleistungen – kontinuierlich.

Vom Warenverteiler zum MRO-Dienstleister

Vier industrielle Revolutionen später geben deutsche Unternehmen mehrere 100 Mrd. € im Jahr für MRO (Maintenance, Repair and Overhaul)-Dienstleistungen und -Produkte aus – mit steigender Tendenz. Instandhaltung ist Chefsache und hat sich vom Kosten- zum Wertschöpfungsfaktor entwickelt. Intelligente Instandhaltungs-Strategien – auch vor dem Hintergrund von Industrie 4.0 mit vernetzten Maschinen – sind wichtige Schlüssel für Wettbewerbsvorteile und Profit.

Das prägt auch das Bild des modernen technischen Händlers: So hat sich das Anforderungsprofil vom reinen Bauteillieferanten zum umfassenden Instandhaltungsdienstleister geändert (**Bild 1**). Als strategisch bedeutender Partner für Hersteller in allen produzierenden Industriesektoren agiert er idealerweise weltweit vernetzt mit produktbegleitenden Mehrwertsupports, die Firmen dabei unterstützen, ihre Produktivität zu steigern und die Kosten zu senken. Das heißt: global aufgestellt und doch beim Bedarfsträger lokal um die Ecke präsent sein. Ein 24/7/365-Lieferkonzept, mit Unterstützung durch innovative E-Procurementlösungen, garantiert termintreue Versorgungssicherheit aller benötigten technischen Materialien – auch in dringenden Notfällen. Kompetente und stets geschulte Mitarbeiter sind bezüglich neuer Technologien, Prozesse und Produkte in Know-how und Handhabung up to date.

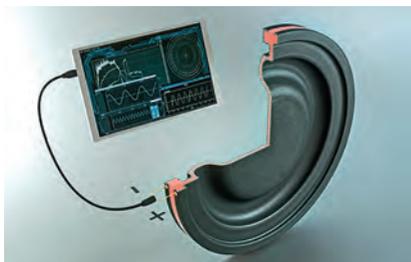


Bild 2: Eine Lösung für selbstüberwachende Dichtungssysteme besteht darin, einen Sensor oder einen Mikrochip in die Dichtung einzubringen. Das ermöglicht, eine Dichtung mit „Intelligenz“ auszustatten (Bild: Freudenberg

Sealing Technologies GmbH & Co. KG)

Prozesse der vierten industriellen Revolution betreffen nicht nur die Produktion, sondern hängen im wesentlichen Maße vom Einkauf und der Lieferkette ab. Das Internet der Dinge bietet dem Einkauf enorme Chancen. Er kann als zentrale Schnittstelle zu internen und externen Partnern in der Wertschöpfungskette Industrie 4.0 den Weg ebnen. Danach wird der digitale Strukturwandel der Industrie ohne den Einkauf nicht erfolgreich sein. Diese Vernetzung benötigt leistungsfähige technische Händler, die selbst Industrie 4.0 bzw. Beschaffung und Einkauf 4.0 leben und entsprechende E-Procurement- und Supply-Chain-Lösungen in ihrem Beschaffungssportfolio bereitstellen.

Kompetenz in Dichtungstechnik

Das ungeheure Potenzial der Digitalisierung und Interkonnektivität zur vorausschauenden Wartung zeigt sich exemplarisch bei Dichtungssystemen. Dichtungen sind heutzutage in vielen Fällen technologisch hochwertige Komponenten. Neben ihrer eigentlichen Aufgabe – der Vermeidung von Stoffübergängen – werden sie auch als Sensoren oder als Aktuatoren eingesetzt. Ein Beispiel sind moderne intelligente Dichtungssysteme (Bild 2).

Eine Lösung besteht darin, einen Sensor oder einen Mikrochip in die Dichtung einzubringen. Das ermöglicht, eine Dichtung mit intelligenten Funktionen auszustatten. Die Entwickler richten daher ihr Augenmerk auf Ansätze, bei denen die „Intelligenz“ bereits aus dem Material an sich kommt. Zu diesem Zweck bringen sie z.B. spezielle Füllstoffe in das Elastomer ein, mit deren Hilfe die Dichtung zusätzliche Eigenschaften (wie z.B. Magnetismus) bekommt und so sogar als Permanentmagnet wirken kann. Die Vorteile der zusätzlichen Funktionen können bei einer vollständigen Betrachtung der Wertschöpfungskette die Mehrkosten bei der Herstellung schnell aufwiegen, etwa wenn eine Dichtung ihren eigenen Verschleiß erkennt.

Um hier beratend tätig zu sein, wird hohe Werkstoff- und Prozesskompetenz bei diesen technologisch komplexen Komponenten daher immer wichtiger, insbesondere bei Dichtungen, die für Predictive Maintenance (PdM) entwickelt wurden. Für den



Bild 3: Mit Xpress® steht ein Service für gedrehte Dichtungen aus den Originalwerkstoffen und Originalprofilen der Serienproduktion zur Verfügung – als maßgeschneiderte Einzelteile für den Ersatzteilbedarf, für Prototypen oder als wirtschaftliche Kleinserie (Bild: Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG)

Technologies GmbH & Co. KG)

technischen Händler reicht es daher nicht mehr aus, solche beratungsintensiven Komponenten lediglich zu verkaufen. Als Kompetenzrelais zwischen Premium-Hersteller und Anwender unterstützt er bei der individuellen Produktauswahl, der Handhabung und bei weiterführendem Support durch den Dichtungstechnik-Produzenten.

Dichtungs-Schnellservice

Wenn Profis im MRO-Bereich ihre Kompetenzen bündeln, entsteht Mehrwert zugunsten des Kunden. Ein Beispiel ist die Zusammenarbeit zwischen dem technischen Händler als Preferred Distributor und einem Technologie-Spezialisten für Dichtungen. In enger Zusammenarbeit stellen die Unternehmen die Versorgung verschiedenster Industriebranchen mit hoch qualitativen Dichtungslösungen sicher. Hier zählt neben der Lieferung von Qualitäts-Produkten umfassende und kompetente technische Beratung. Dazu arbeiten erfahrene Applikationsingenieure des technischen Händlers mit Dichtungsspezialisten sowie dem Endanwender eng zusammen, wenn es u.a. darum geht, unternehmensspezifische Lösungen zu finden oder in Notfällen Dichtungen in Rekordzeit zu liefern.

Dazu steht z.B. der Schnellservice Xpress® für Ersatzteile, Prototypen und Kleinserien (**Bild 3**) zur Verfügung. Das sind u. a. gedrehte Dichtungen aus den Originalwerkstoffen und Originalprofilen der Serienproduktion. Als maßgeschneiderte Einzelteile für den Ersatzteilbedarf, für Prototypen oder als wirtschaftliche Kleinserie. Stets gilt: bestellt, gedreht, sofort geliefert. Wenn's ganz schnell gehen muss – sogar von heute auf morgen.

Das heißt Lieferung von Dichtungen, Drehteilen und Führungen innerhalb von 24 h. Auch Sonder- und Spezialdichtungen sind in Rekordzeit nach individuellen Ansprüchen



Bild 4: Als Kompetenzrelais zwischen Premium-Hersteller und Anwender unterstützen Applikationsingenieure Kunden bei der individuellen Produktauswahl, der Handhabung und beim weiterführenden Support durch den Dichtungstechnik-Produzenten (Bild:

Brammer GmbH)

und Vorgaben hergestellt. Der technische Händler begleitet Projekte in enger Zusammenarbeit über den gesamten Verlauf – von Produktentwicklung über Angebot, Bemusterung, Prüfzeugnisse bis hin zu den Serienlieferungen – und stellt bei Bedarf die zuverlässige Versorgung des Kunden sicher (**Bild 4**). Das gibt den produzierenden Unternehmen planbare Fertigungssicherheit auf hohem Niveau.

Die Beispiele zeigen die mannigfaltigen Marktherausforderungen an den technischen Händler. Wichtig: Ein genau auf

die Produktionsbedingungen des Kunden ausgerichtetes, zukunftsorientiertes Versorgungskonzept ist ein Garant für eine verzugslose Ersatzteillieferung. Moderne EDI-Lösungen stehen Kunden dabei als Schnittstellen von Produktion und Instandsetzung zur Verfügung, während flankierende Mehrwertdienstleistungen außerhalb der reinen Beschaffung die Kostenbremse direkt an den Betriebsabläufen ansetzen. So sagen Kunden mit flankierenden Service-Leistungen des technischen Händlers ungeplanten Ausfällen und Zusatzkosten wirksam den Kampf an und gewinnen eine durchgängige, wirtschaftliche Anlagenverfügbarkeit.

Umfassendes Prozessverständnis für produktive und nachhaltige Lösungen

Kleben, Abdichten, Schrauben und Stanznieten: Fügetechniken für Antriebsbatterien von Elektrofahrzeugen

Bei immer mehr technischen Fragestellungen liefert nicht eine Fügetechnologie die Lösung – sondern die Kombination mehrerer in einem Konzept. Die Batteriemontage für Elektrofahrzeuge ist hierfür ein Beispiel. In einem Innovationszentrum entwickelt und vorgestellt, gibt dieses Konzept auch Impulse für die Lösung anderer Fragestellungen.

Der weltweite Trend zur Elektromobilität verändert die Automobilproduktion derzeit radikal. Der teilweise oder ausschließlich elektrische Antrieb von Fahrzeugen verändert die Konstruktionen schneller als jede andere Innovation der vergangenen Jahrzehnte. In den Antriebssträngen werden zahlreiche unterschiedliche Batterietypen eingesetzt. Sie müssen bestimmte Aufgaben erfüllen und in puncto Langlebigkeit, Leistung und Sicherheit immer weiter verbessert werden. Denn die Batterie wird bei Elektroautos zu einem strukturellen Bestandteil. Sie muss bestimmte, konstruktiv wichtige Funktionen übernehmen und bei einem Unfall Sicherheit bieten. Intelligente Fügetechnologien können Hersteller dabei unterstützen, diese Ziele zu erreichen, und sie können einen produktiven Montageprozess mit einem leistungsfähigen Endprodukt ermöglichen.

Bei dem im unternehmenseigenen Innovationszentrum gezeigten Konzept zur Batteriefertigung sind verschiedene Fügetechniken und Montageprozesse an einer Antriebsbatterie zusammengefasst. Entscheidend bei diesem Konzepte war die Praxisnähe und die Erkenntnis, dass eine Technologie allein nicht die Lösung ist, um Batterien wirtschaftlich und nachhaltig zu montieren: Alle Stationen sind als reale Anwendungen in der Industrie zu finden. Bei einigen wurden zur Verdeutlichung der



Bild 1: Die einzelnen Batteriezellen werden mit einem 2K-Klebstoff zu Zellstapeln („Stacks“) gefügt (Bild: Atlas Copco)

jeweiligen Kernaussagen Prozessparameter abgewandelt. Zu den Montageschritten zählen u.a.:

- die Verklebung der einzelnen Batteriezellen – den Herzstücken des Batteriepacks – zu Zellstapeln,
- die Fertigung der Zellmodule unter Einsatz des Stanznietens,
- das Auftragen einer Wärmeleitpaste mit speziell konstruierter Dosiertechnik,
- die Modulmontage mit einem Vierfach-Schraubensystem,
- die Abdichtung der Gehäuseabdeckung sowie
- die Montage des Deckels mit Fließlochschrauben.

Diese Fügetechniken zusammen ergeben ein Konzept, das eine effiziente Batteriemontage aus einer Hand erlaubt.

Batteriezellen zu Stapeln verkleben

Um die benötigte Energie bereitzustellen, müssen die prismatischen Zellen fest miteinander verbunden werden. Dazu ist eine präzise Klebeverbindung ohne Luft einschüsse notwendig. Das Fügen der Zellstapel (Stacks) (**Bild 1**) ist eine große Herausforderung, weil die Zellen temperaturempfindlich sind. Über den Fügeprozess darf daher keine Hitze eingebracht werden. Trotzdem muss ein Hersteller die Zellen produktiv verarbeiten können – und zwar schnell, exakt und sicher, damit sie während des Montageprozesses oder durch Vibrationen im Fahrzeug nicht verrutschen können.

Mit modernen Dosierlösungen können die Zellen schnell und prozesssicher verarbeitet werden. Dafür eignen sich 2K-Flüssigklebstoffe auf Polyurethan-Basis. Für deren Aushärten wird keine äußere Hitze benötigt und die Fügestelle erfüllt höchste Anfor-

derungen an die Steifigkeit. Durch den Einsatz leicht elastischer Klebstoffe werden Vibrationen während des Betriebs aufgenommen, was die Lebensdauer der Batterie erhöht. Die Elastizität erlaubt zudem eine gewisse Ausdehnung der Zellen beim Be- und Entladen.

In dem im Innovationszentrum gezeigten Beispiel lag das Verhältnis des 2K-Klebstoffs von Hauptkomponente und Härter bei 1:1. Im Feld sind aber auch Mischungsverhältnisse bis zu 10:1 zu finden. Um die

Mischqualität sicherzustellen, wurden getrennte Antriebe verwendet, die über einen Mikrocontroller gesteuert werden. Bei der Auslegung der Anlagenkomponenten muss die einzusetzende Dichtung in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Materials gewählt werden, da es zum Teil zu unerwünschten chemischen Reaktionen kommen kann. Hier könnten Komponenten aus Edelstahl erforderlich sein.

Der Markt fordert immer kleinere Zwischenräume zwischen den einzelnen Zellen, um kleinere Batterien – oder leistungsfähigere bei gleicher Größe – entwickeln zu können. Dies hat zudem den Vorteil von Materialeinsparungen beim Klebstoff. Andererseits müssen die Flächen der zugelieferten Zellen so plan wie möglich sein; Unebenheiten müssen bei der Applikation mit Klebstoff aufgefüllt werden.

Versuche, Luft einschließen bei der Klebstoffapplikation bzw. dem anschließenden Verpressen beider Zellen zu minimieren, ergaben einen Auftrag in X-Form als bestes Verfahren, bei dem die Luft nahezu vollständig aus dem Material gedrückt werden konnte. Zuvor waren etwa eine Handvoll anderer Raupenarten getestet worden, darunter die U-Form, ein Linienauftrag sowie ein mäanderndes Muster. In der realen Produktion werden jeweils zwei Zellen parallel zueinander gefügt, unter normalen atmosphärischen Bedingungen. Die Versuche fanden daher unter gleichen Bedingungen statt und nicht – wie etwa beim Elektronikverguss – unter Vakuum.

Stanznieten verstärken die Zellstapel seitlich

Um die Batterie im Crashfall noch besser zu schützen, können die Zellstapel über seitlich angebrachte Streben verstärkt werden. An dieser Station zeigt sich, dass es in der Batteriefertigung im Feld noch keine Universallösung gibt: Jeder Hersteller hat seine



Bild 2: Befestigung seitlicher Streben mit Stanznieten (Bild: Atlas Copco)

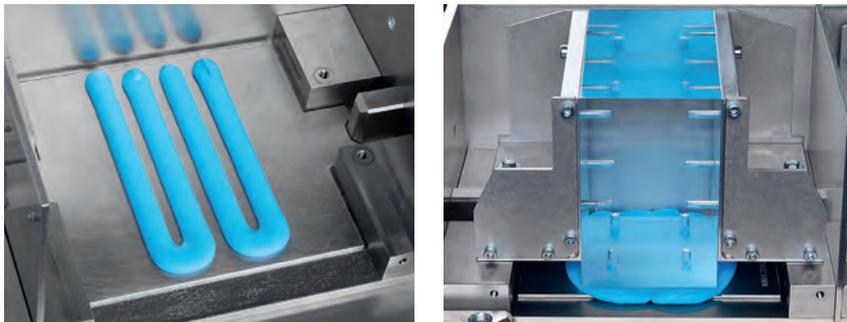


Bild 3: Die Wärmeleitpaste wird eingebracht (Bild: Atlas Copco)

eigene Philosophie. So lassen sich die Zuganker prinzipiell mit den Druckplatten per Laser verschweißen oder vernieten. Hier wird die Verbindung mittels Halbhohl-Stanznieten hergestellt (**Bild 2**). Dieses kalte, rein mechanische Fügeverfahren bringt keine Hitze in die Zellen ein und verursacht auch keine schädlichen Dämpfe oder Schweißspritzer. Der Stanzniet wird mit hoher Kraft und bei kurzer Taktzeit durch die zu fügenden Materialschichten getrieben. Die Verstärkungsstruktur kann aus unterschiedlichen Werkstoffen und mehreren Schichten bestehen. Das erlaubt den Konstrukteuren eine hohe Designfreiheit auf der Suche nach maximaler Sicherheit. Zusätzlich können die Streben auch verklebt werden, was in der Praxis bereits in Serie getan wird und die Stabilität noch weiter erhöht. Die eingesetzte Lösung aus der Henrob-Produktlinie stellt mit einer schnellen Stanzniet-Zuführung kurze Taktzeiten sicher. Das System ist flexibel und kann bis zu vier verschiedene Stanzniettypen und -längen in einem Prozess verarbeiten, sofern die Durchmesser gleich sind.

Wärmeleitpaste erhöht Lebensdauer

Der nächste Schritt ist die Einbringung einer Wärmeleitpaste (**Bild 3**). Dieser Prozess ist durch eine Besonderheit in der Batteriefertigung bedingt: das notwendige Temperaturmanagement. Batteriezellen müssen in einem definierten Temperaturbereich betrieben werden, um die Leistung zu erhalten und Überhitzung zu vermeiden. Dafür wird eine Wärmeleitpaste, die typischerweise mit Füllstoffen versetzt ist, mit hoher Präzision und unter Vermeidung von Luft einschließen eingebracht. Die aufgetragene Menge, die Position sowie die Durchgängigkeit der Kleberaube werden kontinuierlich optisch überwacht, um die Wärmeleiteigenschaft und damit auch die Langlebigkeit der Batterie sicherzustellen. Applikationsfehler werden erkannt und können umgehend korrigiert werden. Das hält die Zykluszeit kurz und senkt die Kosten für Nacharbeit und Qualitätssicherung. Weil die abrasive Leitpaste zu höherem Verschleiß der eingesetzten

Anlagenkomponenten führen kann, sind dafür robust ausgelegte, spezielle Pumpen- und Dosiertechnikkomponenten erforderlich. Sie wurden eigens entwickelt.

Die Wärmeleitpaste sollte beim Einbringen in das Gehäuse eine möglichst saubere Fläche ergeben. Dafür darf sie nicht komplett aushärten. Mit einem 2K-Material ließe sich das elegant umsetzen, da zwei Komponenten eine langsame Reaktion ermöglichen. Das im Innovationszentrum gezeigte Beispiel, das derzeit auch bei einigen Herstellern verwendet wird, ist ein 1K-Material auf der Basis eines natürlichen Öls. Es härtet nicht aus, was in vielen Fällen genügt, denn die Hauptaufgabe ist an dieser Stelle, die Wärme von den Zellen in Richtung Rahmen/Gehäuse abzuleiten. Für höhere Festigkeit und besondere Ansprüche an die Belastung im Dauerbetrieb kann an dieser Stelle ein 2K-Material eingesetzt werden. Prinzipiell kommen 2K-Polyurethane, 2K-Silikone oder auch Pasten auf Acrylbasis infrage.

Alle Wärmeleitpasten sind vergleichsweise hochpreisig, was einen effizienten Umgang mit dem Material erfordert, und von hoher Dichte (etwa 3 g/cm^3), womit 200-l-Standardfässer für die Bevorratung bzw. als Puffer ungeeignet sind. Hier sind für den Einsatz im Feld spezielle Container erforderlich. Allen genannten Wärmeleitpasten gemeinsam ist auch der hohe Anteil an Füllstoffen, um die Wärme leiten zu können. Dabei handelt es sich typischerweise um Aluminiumoxid oder Aluminiumhydroxid – sehr abrasive Stoffe, die die inneren Oberflächen der Anlagenkomponenten schneller verschleifen lassen. Wo besonders hohe Fließgeschwindigkeiten vorliegen, z.B. an den Ventilsitzen, bieten sich Konstruktionen aus Hartmetall an. Zudem sollten Durchmesser möglichst groß gewählt werden, um die Fließgeschwindigkeit zu reduzieren. So lässt sich der Verschleiß minimieren.

Um wiederum die benötigte Menge gering zu halten, dabei aber eine hohe Oberflächenbenetzung von mindestens 98% sicherzustellen, wird der Auftrag der Kleberaube per Kamera überwacht. Zudem kann ein 3D-Scanner etwaige Unebenheiten des Bodens erfassen, sodass das Material punktgenau minimiert aufgetragen werden kann. Derzeit arbeitet man an einer Software, die aus den vorhandenen Daten den minimal nötigen Spalt errechnen kann, der mit der Paste ausgefüllt werden muss. Dies sollte Materialeinsparungen im Bereich von weiteren 40 bis 60% gegenüber aktuell verfügbaren Lösungen ermöglichen.

Vierfach-Schraubsystem montiert Module synchron in der Batteriewanne

Die Wärmeleitung ist neben dem Einhalten eines optimalen Temperaturfensters für einen sicheren Betrieb der Batterie von maßgeblicher Bedeutung. Deshalb gilt es, einen

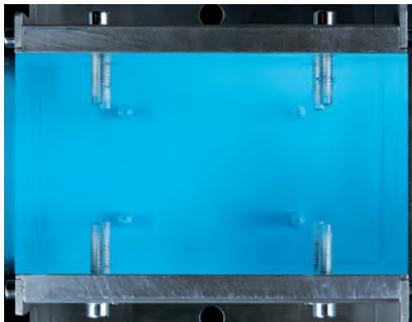


Bild 4: Die Module werden mit einem Vierfach-Schraubsystem in dem Gehäuse fixiert (Bild: Atlas Copco)

optimalen Kontakt zwischen den Batteriemodulen und der Wärmeleitpaste herzustellen. Zur Befestigung der Module in der Batteriewanne wird im Live-Beispiel elektronisch gesteuerte Schraubtechnik verwendet. Vier Schraubspindeln aus der QST-Baureihe arbeiten dergestalt zusammen, dass die Wärmeleitpaste unter den Modulen seitlich „ausgedrückt“ wird. Damit wird eine gleichmäßige Verteilung sichergestellt, Lufteinschlüsse werden verhindert (**Bild 4**). Im Endanzug arbeiten alle vier Spindeln synchron, was die Taktzeit verkürzt und jedes Modul gleichmä-

ßig in der Wanne verankert. Die programmierte Schraubstrategie berücksichtigt das Verhalten der flüssigen Leitpaste an der Fügestelle und stellt den optimalen Kontakt her. Durch den Einsatz „klassischer“ Schraubtechnik lässt sich diese Aluminium-Stahl-Verbindung zudem für den Wartungsfall wieder lösen.

Automatische Applikation einer Flüssigdichtung

Sobald alle Module fest verankert sind, werden noch die Verkabelung und das Batteriemanagementsystem (BMS) eingebaut. Dann kann das Gehäuse verschlossen werden. Dabei muss aber verhindert werden, dass Feuchtigkeit eindringt. Sonst verschlechtert sich die Leistung der Batterie dramatisch und es kann zu Schäden und Korrosion kommen. Außerdem produziert die Batterie gesundheitsschädliche Gase. Der Innenraum muss daher wirksam nach innen und außen abgedichtet werden. Dazu ist eine vollständige Naht ohne Lücken und Luftblasen zwingend. Mit den eigenen Standard-Applikationstechniken lassen sich diese Anforderungen zuverlässig umsetzen. Ein Kamerasystem kann den Auftrag des Dichtmittels überwachen, um etwaige Lücken noch in der Linie auszubessern.

An der Beispielstation im Innovationszentrum wird eine hochviskose Dichtnaht präzise, schnell und unterbrechungsfrei aufgetragen (**Bild 5**). Prinzipiell kann dies entweder auf der Abdeckung oder auf dem Gehäuse geschehen. Weil die Batterie keinem Wärmeprozess ausgesetzt werden darf, eignen sich an dieser Stelle Materialien wie 1K-Heißbutyl, 2K-Polyurethan oder 2K-Silikon. So muss die Dichtung nicht im Ofen aushärten. Alle diese Materialien haben ihre Berechtigung, mit Vor- und Nachteilen. Heißbutyl ist wegen der Hitze nicht einfach zu applizieren, aber anlagentechnisch



Bild 5: Auf dem Gehäuserand applizierte Flüssigdichtung (Bild: Atlas Copco)

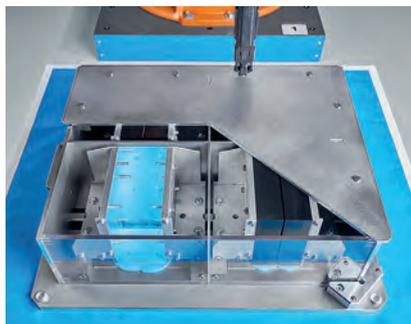


Bild 6: Deckelmontage mit Fließlochschrauben (Bild: Atlas Copco)

muss nur eine Komponente zugeführt werden. 2K-PU ist leichter zu applizieren, und sofern der Anwender z.B. ohnehin einen geprüften Scheibenkleber an anderer Stelle verwendet, ist die Zulassung an dieser Stelle ohne Aufwand zu haben. Silikon wiederum härtet erst aus, bevor es verklebt wird, kann also wie ein O-Ring aufgebracht werden. Da in der Automobilindustrie der Einsatz von Silikon an manchen Stellen als kritisch erachtet wird, sind hier besondere Vorsichtsmaßnahmen zu treffen.

Fließlochschrauben für einseitige Zugänglichkeit bei Deckelmontage

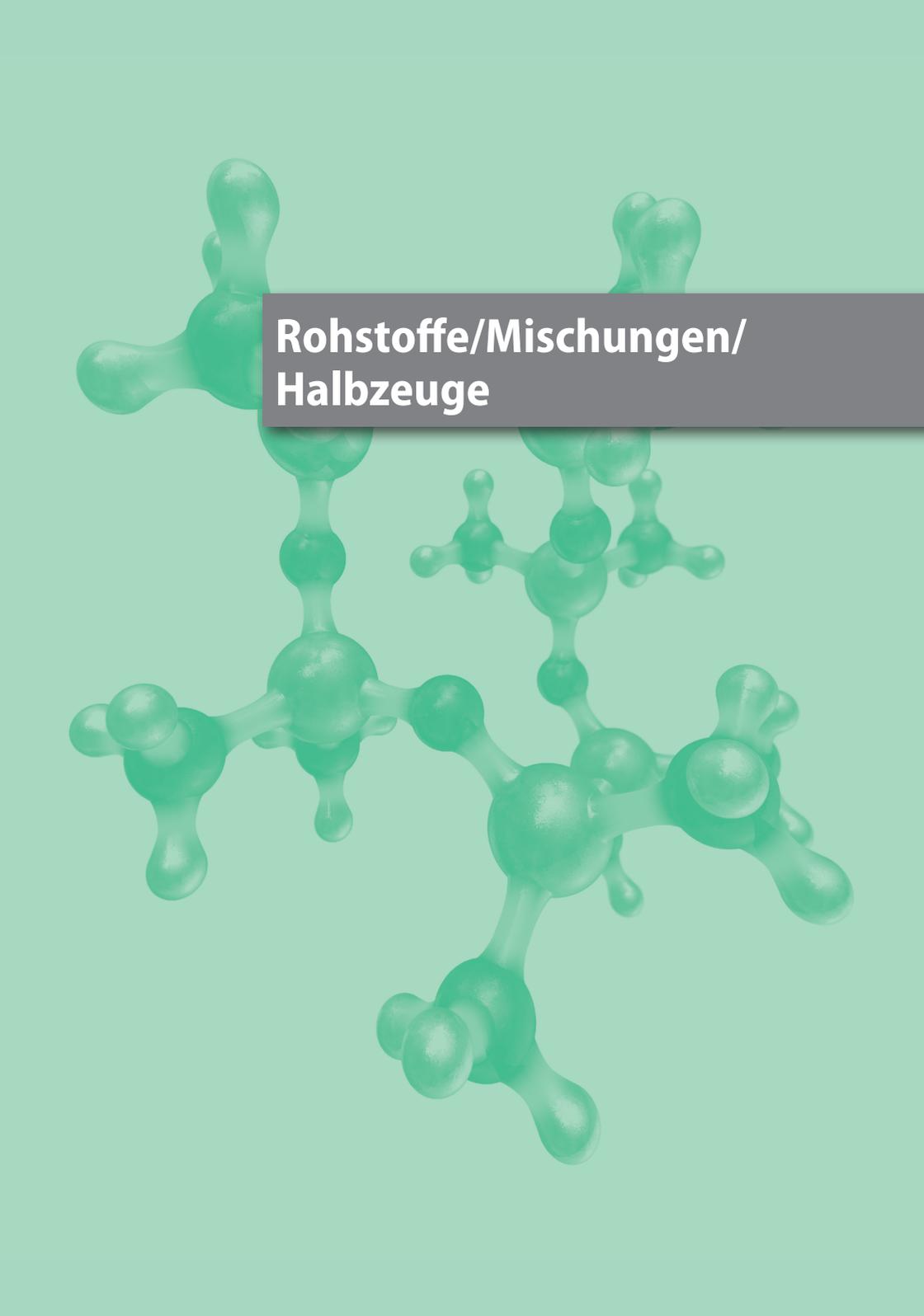
Im letzten Schritt wird die Abdeckung auf das Gehäuse gesetzt. Da das Batteriegehäuse hierfür nur von außen zugänglich ist, muss das Fügeverfahren darauf abgestimmt sein. Außerdem sollte auch diese Verbindung lösbar sein, um die Wartung und Demontage zu vereinfachen. Erfüllt werden diese Anforderungen von der Fließlochschraubentechnik (**Bild 6**). Das Verfahren bietet eine zuverlässige mechanische Verbindung, ist reversibel und benötigt nur einseitigen Zugang. Die entsprechenden Werkzeuge versetzen die Schrauben an der Werkstückoberfläche bei hohem Druck in eine schnelle Rotation. Dadurch erwärmt sich der Werkstoff an dieser Stelle und wird verformbar. Die Schraube – zum Einsatz kommt hier ein Flowform-Element – wird durch die Werkstoffe Aluminium und Stahl gedrückt und schneidet abschließend ein Gewinde ein. Die metallischen Bauteile werden so leitend verbunden und formen einen Faraday'schen Käfig, der elektromagnetische Interferenzen vermeidet.

Hybridfügen und Projektentwicklung

Im Innovationszentrum sind überwiegend automatisierte Montagestationen mit den Fügetechniken Kleben und Dosieren (inklusive Dichten und Dämmen), Stanznieten, Schrauben und Fließlochschrauben installiert und vorführbereit. Weitere Prozess-

schritte, wie die Qualitätssicherung mit Kamerasystemen, werden ebenfalls abgedeckt. Davon profitieren Anwender, denn angesichts des zunehmenden Einsatzes hybrider Fügeverfahren, insbesondere im Leichtbau mit Multi-Material-Design und neuen Werkstoffpaarungen, ist umfassendes Prozessverständnis und Know-how vonnöten. So kann man etwa über die beim Verschrauben oder Stanznieten auftretenden Kräfte Rückschlüsse auf die Klebstoffapplikation ziehen.

Mit dem Ziel, maßgeschneiderte Lösungen zu entwickeln, die höchsten Anforderungen an Produktivität, Qualität und Nachhaltigkeit gerecht werden, können Kunden auf diese Weise umfassend beraten werden. Im Rahmen der Entwicklung geeigneter fügetechnischer Lösungen für neue Anwendungen werden im Innovationszentrum außerdem diverse Vortests und praktische Versuche durchgeführt, bei denen die Kunden i.d.R. dabei sind, um ihre eigenen Erfahrungen einzubringen und die Resultate zu begutachten. Das Konzept der Batteriefertigung bietet darüber hinaus die Möglichkeit, über einzelne Fügeprozesse hinaus auch angrenzende Techniken kennenzulernen und dies in zukünftige Lösungen einzubeziehen.



**Rohstoffe/Mischungen/
Halbzeuge**

Die optimale Elastomerdichtung

Leitfaden zur Werkstoffauswahl

An die Antriebstechnik werden hinsichtlich Effizienz, Dichtheit und Zuverlässigkeit hohe Ansprüche gestellt. Das betrifft auch die hier eingesetzten Dichtungen. Anwender stehen allerdings bei der Auswahl von geeigneten Elastomer-Dichtungswerkstoffen häufig vor dem Problem, aus einem teilweise sehr umfangreichen Produktportfolio bei einer Vielzahl von Lieferanten den für die jeweilige Anwendung geeigneten Dichtungswerkstoff herauszufinden. Neben verschiedenen Elastomer-Typen, wie z.B. NBR, EPDM oder FKM, gibt es unterschiedliche Härten (wie z. B. 70 Shore A oder 90 Shore A), unterschiedliche Farben oder Merkmale, wie z.B. Eignung für Lebensmittelkontakt oder Medien-Beständigkeiten. Nicht immer ist sofort ersichtlich, dass der eingesetzte Dichtungswerkstoff für die Anwendung nicht geeignet ist, denn nicht selten tritt die Undichtigkeit schleichend auf. Eine systematische Vorgehensweise hilft Anwendern, den optimalen Werkstoff für die spezielle Anwendung zu finden.

Bei der Werkstoff-Auswahl einer Elastomerdichtung sind verschiedene Parameter von Bedeutung:

- Dichtungswerkstoff bzw. Elastomertyp,
- Einsatztemperatur,
- Medienkontakt,
- mechanische Eigenschaften,
- Freigaben/Zulassungen,
- Einbauräume.

Dichtungswerkstoffe

Tabelle 1 zeigt typische Elastomer-Werkstoffe, die für Dichtungsaufgaben Verwendung finden. Aufgeführt sind neben der Kurzbezeichnung nach DIN ISO 1629 auch die chemische Bezeichnung dieses Werkstoffs und einige typische Handelsbezeichnungen. Anzumerken ist, dass ein Dichtungswerkstoff nicht nur aus dem Basis-Elastomer oder – genauer gesagt – Kautschuk besteht. Darüber hinaus besteht ein Werkstoff auch noch aus diversen zusätzlichen Mischungsbestandteilen, wie z.B. Füllstoffen, Verarbeitungshilfsstoffen, Weichmachern sowie Vernetzern, um nur einige zu nennen

Von Dipl.-Ing. (FH) Michael Krüger, Leiter Operative Anwendungstechnik
C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG | www.cog.de

Tabelle 1:
Auswahl typischer
Dichtungswerkstoffe

(Quelle: C. Otto Gehrckens
GmbH & Co. KG)

Kurzzeichen	chemische Bezeichnung	typische Handelsbez.
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	Perbunan®
HNBR	Hydrierter Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	Therban®
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	Keltan®
FKM	Fluor-Kautschuk	Viton®
FFKM	Perfluor-Kautschuk	Kalrez®, Perlast®
TFE/P (FEPM)	Tetrafluor-Ethylen-Kautschuk	Aflas®
ETP (FEPM)	Ethylen-Tetrafluorethylen-PMVE- Kautschuk	Viton®, Extreme™
CR	Chloropren-Kautschuk	Neoprene®
AU/EU	Polyurethan-Kautschuk	
ACM	Acrylat-Kautschuk	
AEM	Ethylen-Acrylat-Kautschuk	Vamac®
VMQ	Vinyl-Methyl-Polysiloxan-Kautschuk	Elastosit®
FVMQ	Fluor-Vinyl-Methyl-Polysiloxan-Kautschuk	

Tabelle 2: Mischungs-
bestandteile

(Quelle: C. Otto Gehrckens
GmbH & Co. KG)

Inhaltsstoff	Anteil in %
Kautschuk (Polymer, z.B. NBR)	55 - 65
Füllstoff (Carbon Black, Kieselsäure)	35 - 45
Weichmacher (mineralisch oder synthetisch)	0 - 20
Vernetzungsmittel (z.B. Peroxid, Schwefel)	1 - 5
Verarbeitungsstoffe (z.B. Stearinsäure)	1 - 5
sonstige (z.B. Metalloxide, Farbpigmente)	0 - 8

(Tabelle 2). Der Kautschuk ist der bestimmende Parameter, wenn es um die Anwendung als Dichtungswerkstoff geht, aber auch die übrigen Mischungsbestandteile können einen nicht zu unterschätzenden Einfluss in der Anwendung haben.

Einsatztemperatur

Um einen geeigneten Elastomerdichtungswerkstoff auswählen zu können, ist es notwendig, den Einsatztemperaturbereich festzulegen, in dem die Dichtung verwendet werden soll. **Tabelle 3** gibt einen Überblick über die minimalen und maximalen Einsatztemperaturen von einigen Elastomer-Werkstoffen, wobei sich die dort genannten Temperaturen stets auf das Medium Luft beziehen. Bei Kontakt mit einem anderen Medium – unabhängig, ob flüssig oder gasförmig – können sich die zulässigen Einsatztemperaturen teilweise deutlich ändern (**Bild 1**). Dies gilt es bei der Auswahl nach einem geeigneten Dichtungswerkstoff unbedingt zu berücksichtigen. Ein Beispiel: Obwohl ein Standard-FKM-Werkstoff eine maximale Einsatztemperatur von 200 °C aufweist, ist dieser Werkstoff bei Abdichtung gegenüber Wasserdampf nur bis zu ca.

Werkstoff	minimale Temperatur	maximale Temperatur
Standard-NBR	-25 °C	120 °C
kälteflexibler NBR	-40 °C	120 °C
Standard-HNBR	-20 °C	150 °C
EPDM	-40 °C	150 °C
Standard-FKM	-15 °C	200 °C
kälteflexibler FKM	-40 °C	200 °C
ETP (FEPM)	-10 °C	200 °C
TFE/P (FEPM)	0 °C	230 °C
Standard FFKM	-15 °C	260 °C
kälteflexibler FFKM	-46 °C	260 °C
Hochtemperatur-FFKM	-15 °C	325 °C
AU/EU	-30 °C	120 °C
CR	-40 °C	100 °C
ACM	-20 °C	150 °C
Hochtemperatur-ACM	-20 °C	175 °C
VMQ	-60 °C	180 °C
FVMQ	-55 °C	180 °C

Tabelle 3: Übersicht der Einsatztemperaturen einiger Werkstoffe, bezogen auf Luft (Quelle: C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG)



Bild 1: Thermische Zersetzung einer Dichtung

(Bild: C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG)



Bild 2: Durch chemischen Angriff zerstörte Dichtung (Bild: C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG)

120 °C einsetzbar. Oberhalb dieser Temperatur würde dieser Werkstoff über die Dauer chemisch angegriffen werden und seine Dichtfunktion durch Verhärtung verlieren.

Medienkontakt

Der nächste wichtige Parameter zur Werkstoffauswahl ist die Klärung über das abzudichtende Medium bzw. die Medien, wobei diese flüssig als auch gasförmig sein können. In erster Linie muss die Frage beantwortet werden, gegenüber welchem Medium abgedichtet werden soll. Zusätzlich muss auch geklärt werden, ob noch zusätzliche Medien

mit dem Dichtungswerkstoff in Berührung kommen können, wie z. B. Reinigungsmittel in Produktionsanlagen der Lebensmittelindustrie oder Medien, mit denen der Dichtungswerkstoff vor der Montage gereinigt oder gefettet wird. In vielen Fällen ist auch noch eine Angabe über die Medienkonzentration notwendig (z.B. bei Säuren oder Basen) sowie eine Angabe über die Zusammensetzung des Mediums (z.B. bei Hydraulikflüssigkeiten). Darüber hinaus ist neben der Angabe des Mediums auch die dazugehörige auftretende Temperatur von großer Bedeutung, da mit zunehmender Temperatur meist auch die Aggressivität des Mediums ansteigt (**Bild 2**). Ein Beispiel hierfür ist Wasser, welches bei Raumtemperatur (20 °C) keine größeren Beständigkeitsprobleme mit den üblichen Dichtungswerkstoffen aufweist, aber mit ansteigender Temperatur bei einigen Compounds zu starken Wechselwirkungen führt. So ist z.B. ein Standard-NBR-Dichtungswerkstoff gegenüber Wasser bei 80 °C nicht mehr beständig bzw. ausreichend resistent.

Wenn alle Medien bekannt sind, mit denen die Dichtung vorhersehbar in Kontakt kommen kann, erfolgt die Auswahl eines geeigneten Werkstoffs. Zur ersten groben Abschätzung bieten sich hierfür Beständigkeitstabellen an, die i.d.R. bei jedem Lieferanten frei erhältlich sind. Diese sind allerdings meist nur sehr allgemein gehalten und beziehen sich überwiegend auf den verwendeten Basis-Elastomer (Kautschuk). Die übrigen Mischungsbestandteile bleiben dabei unberücksichtigt, obwohl auch sie einen nicht zu unterschätzenden Einfluss haben können. So sind einige Medien in der Lage, einen Weichmacher aus dem Dichtungswerkstoff herauszulösen, wodurch es zu einer Versprödung und damit verbunden zur Undichtigkeit der Dichtung kommen kann, obwohl gemäß Beständigkeitstabelle der Kautschuk als beständig eingestuft wurde. Darüber hinaus liegt die Temperatur des abzudichtenden Mediums – wenn nichts anderes vermerkt ist – bei Raumtemperatur, was in einer Anwendung eher die Ausnahme ist (**Tabelle 4**).

Darüber hinaus gibt es genormte anwendungsspezifische Beständigkeitslisten, bei denen neben den Basis-Elastomeren und den Medien auch die dazugehörige maximale Einsatztemperatur aufgeführt ist. Beispiele hierfür sind die DIN 11483-2 für Lebensmittelanwendungen und die ISO 6072 für Hydraulikanwendungen.

Eine weitere Möglichkeit, einen geeigneten Werkstoff bezüglich Medium und Temperatur auszuwählen, sind erweiterte oder spezielle Beständigkeitslisten oder firmeninterne Datenbanken, die neben den allgemein zugänglichen Beständigkeitstabellen bei einigen Herstellern verfügbar sind. Gute Ergebnisse für den Anwender liefern Einlagerungs- oder besser noch Praxisversuche, die aber i.d.R. sehr zeit- und kostenaufwändig sind.

A													
Medium	NR/BR	IIR	EPDM	NBR	HNBR	CR	CSM	AU	ACM	VMQ	FVMQ	TFE/P	FKM
Abwasser	B	B	B	A	A	B	A	D	D	B	A	-	A
Acetamid	D	A	A	A	A	B	B	D	D	B	A	A	B
Aceton	C	A	A	D	D	C	B	D	D	C	D	D	D

Tabelle 4: Auszug aus einer Beständigkeitstabelle (Quelle: C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG)

Nomenklatur:

A = 0 – 5 % Volumenquellung, Elastomer zeigt keine bis geringe Quellung

B = 5 – 10 % Volumenquellung, Elastomer zeigt geringe bis mäßige Quellung

C = 10 – 20 % Volumenquellung, Elastomer zeigt mäßige bis starke Quellung

D = nicht zu empfehlen

Mechanische Eigenschaften

Sobald unter Beachtung der Medien und der Einsatztemperaturen die Auswahl eines geeigneten Elastomer-Werkstoffs getroffen worden ist, muss auch eine eventuelle mechanische Beeinflussung des Werkstoffs geklärt werden, die z.B. aufgrund der Einbausituation bzw. der Anwendung auftreten kann. Ein Beispiel hierfür ist die Hochdruckanwendung. Hier spielen nicht nur die Beständigkeit gegen das Medium und die Einsatztemperatur eine Rolle, sondern auch der Widerstand gegen den auftretenden hohen Druck. Je höher dieser Druck ist (z.B. 350 bar), desto höher muss auch die Härte des Elastomerwerkstoffs sein (z.B. 90 Shore A), um einen vorzeitigen Dichtungsausfall durch Spaltextrusion vorzubeugen (**Bild 3**).

Weitere mechanische Beeinflussungen, auf die der Elastomer-Werkstoff richtig ausgelegt werden muss, sind Abriebfestigkeit bei dynamischen Anwendungen oder hohe innere Festigkeiten bei Anwendungen mit plötzlich starkem Druckabfall. Auch gute Dehnungseigenschaften – wenn die Dichtung bei der Montage konstruktionsbedingt stark gedehnt werden muss – können eine signifikante Rolle bei der Werkstoffauswahl spielen.

Freigaben/Zulassungen

In einigen Branchen ist es erforderlich, die Eignung des Elastomer-Werkstoffs zusätzlich noch mit einer Freigabe bzw. Zulassung zu belegen. Hiervon sind z.B. Anwendungen im Bereich Trinkwasser, Lebensmittel, Pharmazie oder Gasversorgung betroffen. Anwenderseitig zu klären ist hier, welche Kriterien der Dichtungswerkstoff erfüllen muss, z.B. FDA-konform gemäß der US-Bundesverordnung 21 CFR 177.2600, wenn eine Verwendung in der Lebensmittelindustrie vorgesehen ist. Werkstoffe, die einer Frei-

gabeprozedur unterliegen, weisen z.B. Beschränkungen bei der Verwendung von Mischungsbestandteilen auf (Lebensmittel, Pharma), müssen über bestimmte physikalische Eigenschaften verfügen (Gasversorgung) oder spezielle Prüfkriterien erfüllen (Sauerstoffanwendung). Die Eignung dieser Dichtungswerkstoffe ist mit einem entsprechenden Zeugnis zu belegen.

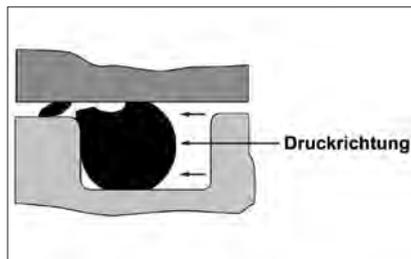


Bild 3: Verhalten eines O-Rings im Einbauraum unter Druck (Bild: C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG)

Einbauräume

Der notwendige Einbauraum stellt eine nicht zu unterschätzende Rolle bei der Auswahl von Elastomer-Werkstoffen, auch bezogen auf O-Ringe, dar. Als Standard-Einbauraum ist hier die Rechtecknut nach DIN ISO 3601-2 anzusehen, die dem Anwender, bezogen auf die Schnurstärke, die Werte für Breite und Tiefe des Einbauraums nennt. Daraus ergeben sich die Werte für die notwendige Verpressung des O-Rings sowie der entsprechende Füllgrad der Nut.

Bei Anwendung dieser Norm ist eine konstruktiv sichere Abdichtung mit O-Ringen in Standard-Anwendungen gewährleistet. Abweichungen von diesen rechteckigen Einbauräumen sind möglich und teilweise auch notwendig. So werden z.B. in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie spezielle, hygienegerechte Einbauräume verlangt, die nur eine sehr geringe Ausdehnung des Dichtungswerkstoffe zulassen. Solche Einbauräume sind u. a. in der DIN 11864 oder der DIN 11853 genormt (**Bild 4**).



Bild 4: Darstellung eines hygienegerechten Einbauraumes (DIN 11862, DIN 11853)

(Bild: C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG)

Praxisbeispiele zur Auswahl

Anhand von zwei unterschiedlichen Branchen soll nachstehend kurz erläutert werden, wie bei der Auswahl eines optimalen Dichtungswerkstoffe vorgegangen werden sollte.

Branche: Lebensmittelindustrie

Es soll ein Dichtungswerkstoff für eine Armatur gefunden werden, die in einer Molke- rei verwendet werden soll, in der Milch bei 20 °C abgefüllt wird. Die Anlage soll täglich

mit 4%-iger Natronlauge über 20 min. bei 80 °C gereinigt und über 30 min. mit Dampf bei 121 °C sterilisiert werden. Eine FDA-Konformität des Dichtungswerkstoffes wird gefordert.

Unter den genannten Voraussetzungen wären verschiedene Elastomer-Werkstoffe verwendbar. Aufgrund von Erfahrungswerten würde für diese Anwendung ein spezieller Peroxid-vernetzter EPDM-Werkstoff mit einer Nennhärte von 70 bis 75 Shore A zum Einsatz kommen. Dieser muss der FDA-Verordnung 21 CFR 177.2600 entsprechen, was bedeutet, dass nur zugelassene Mischungsbestandteile verwendet werden dürfen und mit dem Werkstoff zusätzlich noch Extraktionsversuche in Wasser und n-Hexan als Lebensmittelsimulanzien durchgeführt und bestanden wurden.

Branche: Gasversorgung

Es soll ein Dichtungswerkstoff gefunden werden, der in einem Ventil (**Bild 5**) eingesetzt wird, welches sich als Auf-/Zu-Stellorgan in der Erdgasleitung befindet. Bei dem Medium handelt es sich um Erdgas mit Anteilen von Schwefelwasserstoff von bis zu 5% bei einer Temperatur von maximal 60 °C. Der in der Erdgasleitung auftretende maximale Druck beträgt 300 bar, der beim Schließen des Ventils innerhalb von wenigen Sekunden auf Umgebungsdruck abfallen kann. Eine Werkstoff-Freigabe nach DIN EN 682 wird aufgrund des Einsatzes in einer Erdgasleitung gefordert.

Aufgrund des Anteils von Schwefelwasserstoff reduziert sich die Werkstoffauswahl bereits erheblich. Da beim Schließen des Ventils mit einem starken Druckabfall von 300 bar auf ca. 1 bar gerechnet werden muss, muss der Dichtungswerkstoff eine sehr hohe mechanische Festigkeit aufweisen, um der plötzlichen Gasentspannung (explosive Dekompression) im Werkstoff standzuhalten.

Aufgrund der gemachten Erfahrungen würde für diese Anwendung ein speziell formulierter, Peroxid-vernetzter FKM-Werkstoff mit einer Nennhärte von 90 Shore A und einer Beständigkeit gegen „Explosive Dekompression“ infrage kommen. Dieser müsste zusätzlich noch nach der Erdgas-Norm DIN EN 682 geprüft und zugelassen sein. Beim Einbauraum würde man sich an die Norm ISO 3601-2 für axiale Einbauräume anlehnen, wobei die Werte für die Verpressung des O-Rings und der Füllgrad des Einbauraumes zu optimieren sind, da es sich hierbei nicht um eine Standard-, sondern um eine sehr spezielle Anwendung handelt.

Fazit

Die jahrzehntelange Erfahrung hat gezeigt, dass es sich bei der Auswahl eines geeigneten Dichtungswerkstoffes um eine sehr komplexe Aufgabe handelt. Diese wird gleichermaßen durch die Vielzahl an anwendungsspezifischen Parametern, die auf den Dichtungswerkstoff einwirken können, und auch durch die Vielzahl von unterschiedlichen Elastomeren und deren Formulierungen erschwert. Weiter

erschwerend ist für den Anwender, dass die Formulierungen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung keiner Norm unterliegen und jeder Hersteller mehr oder weniger frei in der Werkstoffgestaltung ist. Um dem Anwender trotzdem eine Möglichkeit zu geben, den für seine Anwendung optimalen Werkstoff auswählen zu können, hat sich diese Vorgehensweise bewährt:

- Festlegung des Einsatztemperaturbereichs – sowohl untere als auch obere Einsatztemperatur.
- Benennung der Medien, mit denen der Dichtungswerkstoff in Berührung kommen kann (hierzu zählen auch Medien, mit denen der Dichtungswerkstoff gereinigt und/oder gefettet wurde). Hierbei ist das Medium nicht nur alleine zu betrachten, sondern stets mit seiner entsprechenden Temperatur.
- Festlegung, ob und welche mechanischen Eigenschaften notwendig sind (z.B. hohe Härte aufgrund des hohen Druckes, der in der Anwendung auftritt).
- Klärung, ob und welche Freigaben bzw. Zulassungen gefordert werden (z.B. FDA-Konformität).
- Festlegung der richtigen Einbaugeometrie (z.B. DIN ISO 3601-2).

Da sich viele Fragen, die zur optimalen Werkstoff-Auswahl von Elastomer-Dichtungswerkstoffen gestellt werden müssen, nicht ohne Weiteres alleine beantworten lassen und weil die Formulierungen, aus denen diese Werkstoffe bestehen, individuell zusammengesetzt sind und keiner Norm unterliegen, sollte der Anwender stets eine enge Zusammenarbeit mit dem Lieferanten bzw. Hersteller des Elastomer-Dichtungswerkstoffes anstreben. Neben der Werkstoffexpertise kann der Anwender auch von den bei anderen Anwendungsprojekten gemachten Erfahrungen des Herstellers profitieren. Erst bei Berücksichtigung bzw. dem Vorliegen aller notwendigen Anwendungsparameter, wie sie vorstehend genannt worden sind, ist eine optimale Werkstoff-Auswahl für den jeweiligen Anwendungsfall möglich.



Bild 5: Ventilkomponente mit O-Ring

(Bild: C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG)

Glatte Sache

Antihaft- und Gleitschichten für herausfordernde Produktionsumgebungen

Leistungsfähigkeit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit entscheiden maßgeblich über die Wirtschaftlichkeit industrieller Fertigungsprozesse. Deshalb sind überall dort, wo Maschinen und Werkzeuge reibungslos und ohne Anhaftungen oder Ablagerungen dauerhaft funktionieren müssen, Beschichtungen aus Polytetrafluorethylen (PTFE) etablierter Standard. Die vielen Möglichkeiten, die man heute bei Beschichtungen hat, zeigen auch, was bei abdichtenden Funktionsbauteilen möglich ist.

Ob Marzipan, Schaumstoffblöcke, Printen, Reifen, Torteletts oder Wellpappe: Steigende Ansprüche an die Effizienz ihrer Herstellungsprozesse stellen die dabei eingesetzten Anlagen und Werkzeuge permanent auf Bewährungsprobe. Anhaftung an Walzen, Blechen oder Formen gilt es ebenso zuverlässig zu vermeiden wie Materialaufbau an Maschinen und Anlagenteilen. Messer müssen optimal durch dicke, schnittzähe Produkte gleiten und dabei Abrasion und Korrosion dauerhaft widerstehen. Hohe Prozesstemperaturen und -geschwindigkeiten oder chemische Belastung dürfen die Leistungsfähigkeit der Komponenten überdies nicht beeinträchtigen. Zielvorgaben für eine wettbewerbsfähige Produktion sind konstant hohe Produktqualität, problemloses Entformen sowie minimaler Reinigungs- und Instandhaltungsaufwand. Nicht zuletzt sollen die Prozesse umweltschonend sein, also der Einsatz von Verbrauchsgütern wie Trennmitteln und deren Entsorgung minimiert werden.

Beschichtungen aus Polytetrafluorethylen tragen durch ihr vielseitiges Eigenschaftsspektrum entscheidend zu dieser geforderten Produktions- und Anlagensicherheit bei. Neben rein industriellen Anwendungen gibt es physiologisch unbedenkliche und FDA-konforme PTFE-Schichten, die für den Kontakt mit Trinkwasser oder Lebensmitteln prädestiniert sind. Ihre wachsartige, hydrophobe Oberfläche verhindert das Anhaften klebriger Produkte – ein Vorteil, den sie, z.B. bei der Herstellung von Back- und Süßwaren, in Zuführtrichtern oder Walzen, auf Blechen und Prozessbändern, ausspielen. Durch den sehr geringen Reibungskoeffizienten der Beschichtung lösen sich klebrige oder zähflüssige Substanzen von allein. Damit bewährt sich PTFE auch in ent-

Von Alexander Kalawrytinou, Geschäftsführer
Pallas GmbH & Co. KG | www.pallaskg.de

formenden Anwendungen der Kunststoffindustrie, verhindert in Lackierstraßen den Materialaufbau auf Anlagenteilen und in der Vliesstoffindustrie das Anhaften der Fasern auf Prozessbändern. Zum wahren Allrounder macht den Beschichtungswerkstoff seine Chemie- und Säureresistenz – gepaart mit Dauertemperaturbeständigkeit bis maximal 260 °C. Das außergewöhnlich gute Gleitverhalten sorgt in tribologischen Systemen für gleichmäßigen Lauf. Als Gleitschicht für Industriemesser gewährleistet diese reibmindernde Eigenschaft auch bei stark haftenden oder schnittzähen Produkten schnelle und präzise Schnitte.

Individuelle Stärken

Neben PTFE zählen zu den Fluorpolymer-Beschichtungen auch PFA-, MFA- und FEP-Schichten, die sich lediglich in der Ausprägung der einzelnen Charakteristika unterscheiden. So haben PFA und MFA, verglichen mit PTFE, eine höhere Abrasions- und Temperaturbeständigkeit, während FEP vor allem mit noch besseren Entformungseigenschaften punktet. Allen gemeinsam ist, dass sie als Nasslack- oder Pulverapplikation in werkstoffabhängigen Schichtdicken von 10 bis 50 µm auf nahezu alle Grundwerkstoffe – sogar Kunststoff oder Gummi – aufgetragen werden können. Während Lackschichten im Sprühverfahren appliziert werden, erfolgt die Pulverbeschichtung mithilfe der Elektrostatik. Die Pulverwerkstoffe werden elektrostatisch aufgeladen, sodass sie an der Werkstückoberfläche haften bleiben. Der abschließende Sinterprozess brennt die Lackschichten ein und verschmilzt die Pulverpartikel zu einem homogenen Film. Heute steht für die Beschichtung von Klein- und Mittelserien ein Spektrum an technischen Schichten mit Antihafwirkung – neben PTFE auch Beschichtungen mit PEEK, Halar® oder auf Nanobasis – zur Verfügung.

PEEK kann hohen Temperaturen ausgesetzt werden, ohne seine mechanischen oder physikalischen Eigenschaften zu verändern. Bei der Beständigkeit gegenüber Abrieb oder Verschleiß ist PEEK PTFE und PFA überlegen. So führte der Wechsel von PTFE zu einer Beschichtung mit PEEK in der Printenindustrie zu einer dreifach längeren Standzeit der Sägeblätter – unter Verzicht auf die bessere Antihafwirkung von PTFE. Halar® ermöglicht absolut porenfreie, chemieresistente Beschichtungen, die sogar Schwefel- oder Salzsäure sowie Königswasser standhalten.

Perfekt kombinierte Eigenschaften

Besondere Stärke im Betrieb entfalten all diese Schichtwerkstoffe als multifunktionale Schichtsysteme (**Bild 1**). Dabei werden die üblichen inneren Verstärkungen der PTFE-Compounds aus Diamant-, Glas- oder Keramikpartikeln – sogenannte reinforced Produkte – durch externe Duplex- oder Triplexschichten ersetzt. Dazu wird auf die



Bild 1: Antihafte Wirkung und Abrasionsschutz: Multifunktionale Beschichtungssysteme tragen maßgeblich zur Produktions- und Anlagensicherheit von Walzen bei

(Bild: Pallas GmbH & Co. KG)

mechanisch vorbereitete Bauteiloberfläche zunächst eine verschleißfeste keramische oder hartmetallische Schicht aufgebracht. Diese stabile Matrix kombiniert man mit einem Layer aus PTFE als Deckschicht.

Der Vorteil dieses Schichtsystems zeigt sich im Gebrauch: Die PTFE-Schicht erreicht im Einlaufprozess den gewünschten Betriebszustand. Die tragende Schicht schützt das Werkzeug oder Bauteil zuverlässig vor Verschleiß und es behält die antiadhäsiven Eigenschaften. Typische Anwendungsfälle solcher Duplex-Schichten sind Messer an Papierschneidemaschinen oder 20 m lange und 3 m breite Prozessbänder, die im Bereich der Ölindustrie eingesetzt werden.

Die Beschichtung der Spezialgewebe aus Edelstahl erhöht die Effizienz der Bänder maßgeblich. Die multifunktionalen Schichtsysteme werden heute in unterschiedlichsten Werkstoffkombinationen hergestellt. Sie ermöglichen es, Eigenschaften wie Verschleißschutz, Antihafte Wirkung, Temperatur- und Chemikalienresistenz anwendungsspezifisch optimal zu kombinieren.

So entwickelt man immer wieder neue Eigenschaftskombinationen, die bisherige Einsatzgrenzen und Leistungsprofile einer Antihaftebeschichtung deutlich erweitern. Beispielfähig stehen dafür leimbelastete Walzen in Papiermaschinen zur Wellpappenerzeugung, woherkömmliche PTFE-Beschichtungen den abrasiven Prozessbedingungen nicht lange standhalten. Zusatzvorteil dieser Spezialschichtsysteme ist, dass sie eine unterschiedliche Beschichtung von Bauteilzonen an einem Werkstück ermöglichen. Auch als Alternative zu Nano-Beschichtungen setzt man vermehrt Duplex-Schichten ein, die die für den Lotosblüteneffekt typischen Rauigkeiten nachstellen. Hersteller von Möbeln, Matratzen, Sport- und Freizeitartikeln oder auch von Akustikmaterial für Bau und Automobilbau schneiden PE-, PU-, Latex- und Verbundschäume in kontinuierlichen Prozessen auf Maß oder in definierte Formen. Oszillierende Bandmesser setzen dazu mit großer Schneidgeschwindigkeit sehr hohe und lange Schnitte in die Schaumblöcke. Die abrasiven und haftenden Schäume neigen beim Vorschub zum Stoppen und erfordern von den Messern deshalb neben Gleitfähigkeit auch Verschleißfestigkeit. Um die erforderliche Schnittgeschwindigkeit und -genauigkeit zu

gewährleisten, beschichtet man solche Bandmesser gezielt mit maßgeschneiderten Duplex-Schichten, die signifikant zur Erhöhung der Standzeit beitragen.

Auswahl mit Augenmaß

PTFE-Beschichtungen erfolgen stets in drei Bearbeitungsstufen: Vorbehandlung, Applikation und Sintern. In der Vorbehandlung wird das zu beschichtende Bauteil chemisch gereinigt und mechanisch aufgeraut – hier in der Regel durch Strahlen mit Edelmetall in unterschiedlicher Rauigkeit. Bauteile, die dieser Behandlung nicht standhalten, können alternativ durch Beizen und Anätzen der Oberfläche vorbehandelt werden. Auch die Teilegeometrie muss beschichtungsgerecht sein. Insbesondere bei einer Lackapplikation ist die Erreichbarkeit aller zu beschichtenden Oberflächen mit der Lackierpistole des Bauteils unverzichtbar. So schließen z.B. schmale Rohre mit großer Tiefe oder auch fehlende



Bild 2: Auswahl mit Augenmaß: Bei einer Lackapplikation ist die Erreichbarkeit aller zu beschichtenden Oberflächen des Bauteils mit einer Lackpistole unverzichtbar

(Bild: Pallas GmbH & Co. KG)

Möglichkeiten, eine Aufhängung anzubringen, eine PTFE-Beschichtung aus. Deshalb macht es Sinn, den Beschichtungsspezialisten bereits in der Konstruktionsphase von Bauteilen miteinzubeziehen. So konnte z.B. in einem Fall eine Lösung entwickelt werden, die eine lacksprühtechnische Beschichtung der späteren Nutzflächen sicherstellt (**Bild 2**). Für eine PTFE-Beschichtung muss das Bauteil außerdem Einbrenntemperaturen bis zu 420 °C standhalten. Bei einer Reparaturbeschichtung ist deshalb auch die Art der vorherigen Schicht von Bedeutung. Scheidet eine PTFE-Beschichtung aufgrund dieser Parameter aus, gibt es alternative Lösungen, da der Sinterofen des Oberflächenspezialisten für Pulverbeschichtungen mit Chemikalienschutz bei Einbrenntemperaturen unter 200 °C ebenfalls geeignet ist. Neben der vorhandenen Anlagentechnik bietet dafür zudem die Kombination der vielfältigen im Unternehmen vorhandenen Roh- und Zuschlagstoffe mit dem außergewöhnlich breiten Spektrum an eingesetzten Verfahren die besten Voraussetzungen.

Temperaturgrenzen verschieben

Moderner Festsilikonkautschuk bleibt auch bei 300 °C elastisch

Hitzebeständige Elastomere werden in alltäglichen Gebrauchsgegenständen immer wichtiger. Die Antwort auf die steigende Nachfrage ist z.B. ein additionsvernetzender Festsilikonkautschuk, der hinsichtlich seiner Temperaturbeständigkeit derzeit die Grenze des Machbaren markiert.

Backöfen sind heute die Tausendsassas unter den Küchengeräten. Sie müssen weit mehr können als nur backen und braten. Bereits einfachere Mittelklasseöfen bieten diverse Zusatzfunktionen wie Dünsten, Garen oder Grillen. Und dieser Trend zum Multifunktionsgerät hält weiter an. Backöfen mit integrierter Mikrowellen-, Selbstreinigungs- oder Dampfgarfunktion sind gefragt wie nie. Mit der Funktionsvielfalt steigen aber auch die Anforderungen an die im Gerät verbauten Materialien. Das gilt insbesondere für deren Hitzebeständigkeit. Gummielastische Bauteile etwa müssen immer häufiger und während zunehmend längerer Phasen Temperaturen von 300 °C und mehr standhalten. Organische Elastomere sind solchen Einsatzbedingungen oft nicht mehr gewachsen. Selbst Silicone stoßen an ihre Grenzen, wenn sie nicht mithilfe von geeigneten Additiven dafür entsprechend ausgelegt sind.

Eine Lösung bietet ein Festsilikonkautschuk, der im Zusammenspiel mit speziellen Hitzestabilisatoren auch über längere Zeiträume hohen Temperaturen widersteht. Schläuche, Profile und Dichtungen (**Bild 1**) aus ELASTOSIL® R plus 4350/55 behalten auch nach 170 h bei Temperaturen von bis zu 300 °C ihre elastischen Eigenschaften bei. Der Werkstoff vernetzt durch eine platinkatalysierte Additionsreaktion und lässt sich mittels Extrusion sehr gut verarbeiten. Weil bei der Vernetzung keine geruchs- oder geschmacksbeeinträchtigenden Spaltprodukte entstehen, besteht wachsendes Interesse an solchen hitzebeständigen Festsiliconen. Das gilt insbesondere für Anwendungen im Lebensmittelbereich, wofür sich getemperte Vulkanisate aus diesem Werkstoff ebenfalls eignen. Diese erfüllen die einschlägigen Vorschriften des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) und der US-amerikanischen Food and Drug Administration (FDA) und gelten somit als lebensmittelverträglich.

Die Kautschukmischung steht in der Basisversion ohne Hitzestabilisatoren und Katalysator zur Verfügung – so kann ein Verarbeiter sein eigenes Compound herstellen und dieses optimal auf den Extrusionsprozess und seine Anforderungen hinsichtlich der Temperaturstabilität und der Farbe des Endprodukts abstimmen.



Bild 1: Extrusion eines Dichtungsprofils aus dem neuen Festsilikonkautschuk

(Bild: Wacker Chemie AG)

Herausforderung für Dichtungen: Backofentüren

Dichtungen im Backofenbereich sind Hitze, aber auch anderen Einflüssen ausgesetzt. Sie müssen z.B. gegen Fettspritzer, herabtropfende Braten- und Obstsaft oder übergelaufene Speisereste resistent sein. Zwar sind die Türen und die angrenzenden Flächen durch eine aufwändige Konstruktion vor Hitze und Verunreinigungen geschützt. Trotzdem lässt es sich nicht vermeiden, dass sich die Profildichtung zwischen dem Garraum des Backofens und der Ofentür während des Betriebs stark erhitzt.

Backofenhersteller verwenden traditionell für die Türen häufig schlauchförmige Dichtungen aus gewebter Glasseide. Allerdings altern solche Dichtungen im alltäglichen Gebrauch recht schnell, da sich Glasseiddichtungen schlecht reinigen lassen und eine geringe mechanische Belastbarkeit aufweisen.

Alternative: hitzebeständiger Festsilikonkautschuk

Eine Alternative zu Glasseiddichtungen sind Türprofil dichtungen aus Festsilicon. Sie trotzen den hohen Temperaturen und bleiben auch nach vielen Jahren elastisch genug, um zuverlässig als Dichtung wirken zu können. Sie tolerieren außerdem gewisse Mengen an Fett und Speiseresten und lassen sich dadurch gut reinigen. Und noch einen Vorteil bietet die neue Type: Tests zeigen, dass Profildichtungen aus Silicon die Wärme besser isolieren als Dichtungen aus Glasseide. Davon profitiert der Backofenbesitzer gleich doppelt: Die Ofentür wird weniger heiß und der Backofen verliert weniger Hitze. Das senkt wiederum den Energiebedarf beim Backen und damit auch die Stromkosten.

Immer häufiger wünschen sich Verbraucher Backöfen mit integrierter Dampfgarfunktion. Solche Geräte vereinen die Vorteile des Dampfgarens – etwa die Möglichkeit,

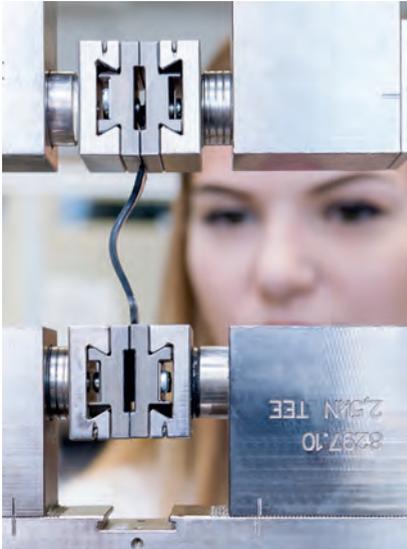


Bild 2: Umfangreiche Tests belegen die Vorteile des Festsilikonkautschuks, u.a. als Alternative zu Glaseisdichtungen (Bild: Wacker Chemie AG)

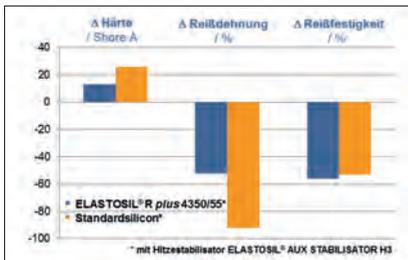


Bild 3: Hitzestabilität nach sieben Tagen bei 300 °C (Bild: Wacker Chemie AG)

Gemüse besonders schonend zuzubereiten – mit den Möglichkeiten klassischer Backöfen. Auch das Dampfgaren ist für Silcondichtungen eine Herausforderung: Durch den heißen Wasserdampf können die Polymerketten der Silicone gespalten werden. Folge: Elastizität und Festigkeit des Elastomers leiden. Auch hier bietet das neue Festsilicon Vorteile. In Testreihen wurden Dichtungen aus diesem Werkstoff 250 °C heißem Wasserdampf ausgesetzt. Das Ergebnis: Nach 28 Tagen besaßen die Silcondichtungen eine Reißdehnung von über 100%. Die Shore A-Härte der Proben nahm dabei weniger als 15% zu.

Hitzestabilisator erhöht Temperaturbeständigkeit

Die maximale Temperaturbelastung, die das Silicon verkräftet, hängt vom ausgewählten Hitzestabilisator und seiner Einsatzmenge ab. Um eine möglichst hohe Hitzebeständigkeit zu erzielen, muss ein geeignetes Additiv in die farblose, transluzente Basis-Kautschukmischung eingemischt werden. Ausgerüstet mit dem Hitzestabilisator ELASTOSIL® AUX STABILISATOR H3 verkräftet ELASTOSIL® R plus 4350/55 mit Temperaturen von 300 °C deutlich höhere Belastungen als hitzestabilisierte Standardsilicone. Auch bei einer

mehrtägigen Hitzebelastung ist die Type hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften anderen extrudierbaren Siliconen überlegen. Dies belegen Tests (**Bild 2**) und Messungen: Vulkanisate aus dem Festsilikonkautschuk wurden rd. 2.000 h lang Temperaturen über 220 °C ausgesetzt, die schrittweise bis auf 300 °C erhöht wurden (**Bild 3**). Vor bzw. nach der Heizphase wurden die mechanischen Eigenschaften des Silicons gemessen. Damit simulierte man Temperaturbelastungen, denen z.B. eine Türprofilichtung

Bild 4: Veränderung der Shore A-Härte nach Lagerung bei 275 °C

(Bild: Wacker Chemie AG)

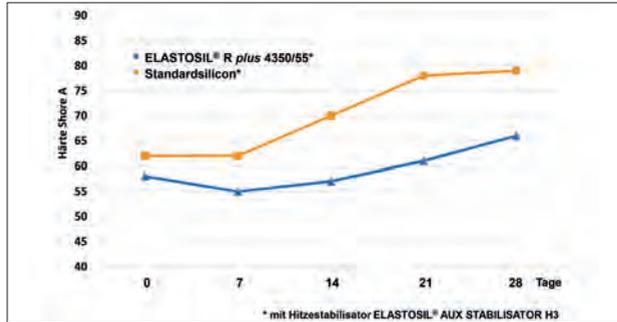
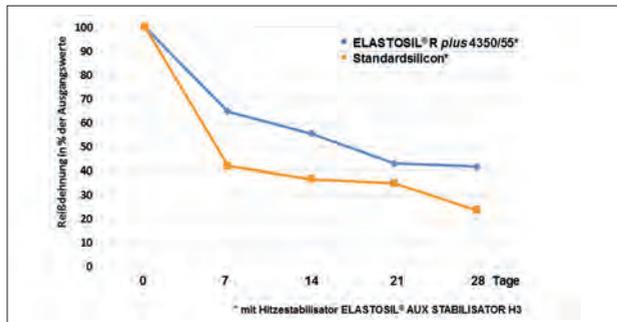


Bild 5: Reißdehnung nach Lagerung bei 275 °C

(Bild: Wacker Chemie AG)



eines Backofens über einen Zeitraum von zehn Jahren ausgesetzt ist. In den Hitzelagerungstests stieg die Härte des neuen Festsilicons von ursprünglich 55 auf 75 Shore A (Bild 4). Hitzestabilisierte Standardsilicone verhärteten schon bei einer erheblich geringeren Temperaturbelastung deutlich stärker. Auch die Reißdehnung (Bild 5), welche Rückschlüsse auf die Flexibilität und Haltbarkeit der Dichtung zulässt, veränderte sich bei der neuen Type in geringerem Umfang. Sie sank von ursprünglich 400% auf 175%. Zum Vergleich: Das hitzestabilisierte Standardsilicon war nach der Hitzelagerung bereits so stark versprödet, dass keine mechanische Charakterisierung mehr möglich war.

Fazit

Mit dem extrudierbaren Festsiliconkautschuk steht ein Material für lebensmittelnahen Anwendungen zur Verfügung, das die Vorteile der Additionsvernetzung mit hoher Hitzebeständigkeit kombiniert. Mit einem Hitzestabilisator widersteht das ausgehärtete Siliconteil Temperaturen von bis zu 300 °C, selbst wenn es für längere Zeit der Hitze ausgesetzt ist. Seine mechanischen Eigenschaften und seine Elastizität bleiben auf einem Niveau, das die Funktionsfähigkeit des Formteils sicherstellt. Das neue Produkt versetzt Verarbeiter somit in die Lage, Silicone auch in Anwendungen mit steigender Hitzebelastung einsetzen zu können.

Sicher gegen Wasser abdichten

Quellende thermoplastische Elastomere (TPE) für verschiedenste Anwendungsbereiche

In einer Vielzahl von Anwendungen, z.B. im Baugewerbe und bei Abwassersystemen, ist eine zuverlässige, dauerhafte Abdichtung gegenüber Wasser von großer Bedeutung. Hierfür eignen sich spezielle thermoplastische Elastomere (TPE), welche in der Lage sind, bei Kontakt mit Wasser stark zu quellen und somit abzudichten. Dieses Quellverhalten ist reversibel und über Jahre hinweg beliebig oft wiederholbar.

Die Neigung von Polymeren, Wasser aufzunehmen, d.h. zu quellen, ist in erster Linie von ihrer Polarität abhängig. Polymere, in deren Struktur keine großen Polaritätsunterschiede vorhanden sind, nehmen nahezu kein Wasser auf. Dies ist der Fall, da Wassermoleküle polar und somit mit unpolaren Substanzen unverträglich sind. Aus diesem Grund bezeichnet man solche unpolaren Substanzen auch als hydrophob (aus dem Griechischen: „wasserscheu“). Beispiele hierfür sind Polyethylen, Polystyrol und Polytetrafluorethylen (PTFE).

Polymere mit polaren Gruppen, wie z.B. Polyamide und Polymethylmethacrylat (PMMA), neigen hingegen zur Aufnahme von Wasser, weshalb sie als hydrophil (gr.: „wasserliebend“) bezeichnet werden. Diese Wasseraufnahme ist häufig nicht erwünscht, da sich die Material- und Prozesseigenschaften verschlechtern können.

Für spezielle Anwendungen sind eine kontrollierbare Wasseraufnahme und die daraus folgende Volumenausdehnung jedoch von Vorteil, sofern sie reversibel sind und sich die Materialeigenschaften auch über lange Zeit nicht verschlechtern. Die Hauptanwendung hierfür sind durch Feuchtigkeit bzw. Nässe aufquellende Dichtungen, die, z.B. im Baugewerbe, für eine zuverlässige Abdichtung gegenüber Wasser sorgen. Hierfür müssen die Materialien meist auch relativ weich sein, weshalb thermoplastische Elastomere (TPE) sehr gut geeignet sind.

Von M. Sc. Florian Dresel, Central Research Engineer; Andy Wilson, Technical Manager HEXPOL TPE Ltd;
Dr.-Ing. Thomas Köppl, Product Manager
HEXPOL TPE GmbH | www.hexpoltpe.com

Thermoplastische Elastomere

Diese sind eine eigene Werkstoffgruppe, da sie sich thermoplastisch verarbeiten lassen (z.B. Spritzgießen, Extrusion), aber dennoch elastomerähnliche Eigenschaften haben (z.B. geringe Härte und ein gutes Rückstellverhalten). Dies kann entweder durch Polymerblends oder durch eine Blockcopolymer-Struktur aus harten und weichen Bausteinen erreicht werden. Die Benennung und Unterscheidung von TPE ist nach DIN ISO 18064 festgelegt. Die gebräuchlichsten Polymerblends sind TPO (thermoplastisches Olefinelastomer) und TPV (thermoplastisches Kautschukvulkanisat). Auf Blockcopolymeren basieren u.a. TPS (thermoplastisches Styrol-elastomer), TPU (thermoplastisches Urethanelastomer) und TPC (thermoplastisches Copolyesterelastomer). Je nach Klasse und Zusammensetzung der jeweiligen Compounds können sich die Materialien in Aussehen und Eigenschaften sehr deutlich unterscheiden (z.B. Härte, Mechanik, Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit, Haptik). So lässt sich mit TPE ein breites Härtespektrum vom gelartigen Shore 00 bis in den sehr harten Shore D-Bereich realisieren. Des Weiteren können TPE-Compounds in beliebigen Farben hergestellt werden.

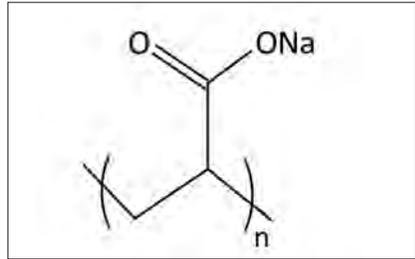


Bild1: Strukturformel von Natriumpolyacrylat
(Bild: HEXPOL TPE)

Durch geeignete Rohstoffe und Verfahrensprozesse ist es auch möglich, Compounds herzustellen, die hydrophil sind und somit Wasser aufnehmen können. Auf diese Weise quillt das Material bei Kontakt mit Wasser stark auf und expandiert über einen Zeitraum von mehreren Tagen auf ein Vielfaches seines ursprünglichen Volumens. Dieser Quellprozess ist reversibel und vielfach wiederholbar, ohne dass sich die Materialeigenschaften verschlechtern.

Funktionsweise quellender TPE

Für hydrophile TPE sind Salze von Polyacrylaten als Rohstoffe gut geeignet, wie zum Beispiel Natriumpolyacrylat (**Bild 1**). Bei diesen wird durch die Anwesenheit von Wasser das Kation (z.B. Na⁺) abgespalten und die negativ geladenen Carboxylat-Gruppen (COO⁻) liegen frei. An diese sich gegenseitig abstoßenden, ionischen Gruppen können sich durch Ion-Dipol-Wechselwirkungen Wassermoleküle anlagern und das ursprünglich geknäulte Polymer streckt sich aus, um die sterisch günstigste Position einzunehmen.

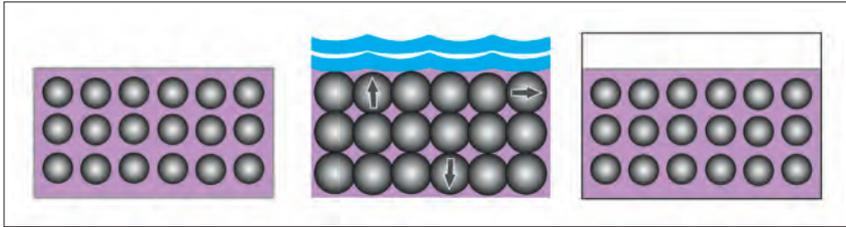


Bild 2: Skizze des reversiblen Quellens hydrophiler TPE. Links: Während der Fertigung werden dem TPE aktive hydrophile Bestandteile zugesetzt. Mitte: Das TPE quillt mit kontrollierbarer Geschwindigkeit und Vergrößerung des Volumens gleichmäßig in Wasser auf. Rechts: In trockener Umgebung schrumpft das TPE wieder auf seine ursprüngliche Größe zurück (Bild: HEXPOL TPE)

In TPE können die hydrophilen Bestandteile durch die Compoundierung sehr homogen verteilt werden, wodurch auch die Expansion des Compounds in der Anwendung gleichförmig verläuft. Die Volumenexpansion kann dabei durch die Menge der hydrophilen Bestandteile im Compound kontrolliert werden. Zusammen mit den einstellbaren Grundeigenschaften des TPE, wie z.B. Härte und Fließeigenschaften, ist es so möglich, eine Vielzahl an verschiedenen Compounds auf die Anforderungen maßzuschneidern.

Sobald das Material nicht mehr mit Wasser in Kontakt ist, bewegt sich die Flüssigkeit langsam aus dem gequollenen Material heraus und verdunstet an der Luft. Dadurch wird der Prozess der Quellung umgekehrt und das Material schrumpft auf seine ursprüngliche Größe zurück (**Bild 2**). Die Geschwindigkeit, mit der dieser Vorgang stattfindet, ist maßgeblich von den Umgebungsbedingungen abhängig (z.B. Temperatur und Luftfeuchtigkeit). Dieser Prozess des Quellens läuft relativ langsam ab und es dauert einige Tage, bis das maximale Volumen erreicht ist.

Ein Beispiel für solche TPE sind die Materialien der Produktreihe Dryflex WS, welche in der Lage sind, den Wechsel zwischen nass und trocken vielfach zu wiederholen, ohne dass Materialschäden auftreten. Die Compounds lassen sich dabei mit üblichen Prozessen wie Extrusion und Spritzgießen verarbeiten und werden, z.B. in der Bauindustrie, als Fugenbänder eingesetzt.

Einflussfaktoren auf die Quellung

Die maximale Quellung ist dabei je nach Compound unterschiedlich und kann durch Materialparameter eingestellt werden. In **Bild 3** wird die Quellung von einem Probekörper Dryflex WS über sieben Tage gezeigt. Es ist erkennbar, dass die Quellung zuerst

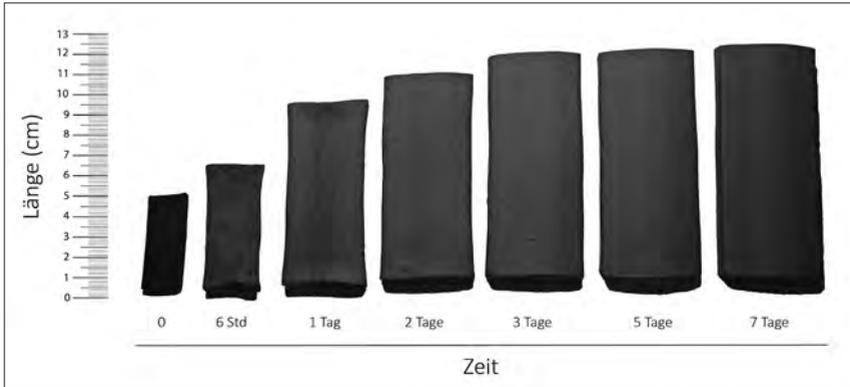
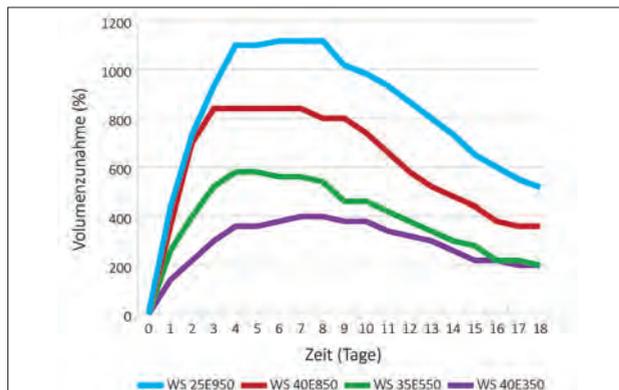


Bild 3: Bilder der Längenzunahme von Dryflex WS Prüfkörpern über sieben Tage (Bild: HEXPOL TPE)

Bild 4: Volumenexpansion verschiedener hydrophiler TPE (Dryflex WS) über 18 Tage (Bild: HEXPOL TPE)



relativ schnell erfolgt und dann langsamer wird. Im gezeigten Beispiel ist nach sieben Tagen das Maximum an Quellung erreicht. Die erforderliche Zeit bis zur maximalen Volumenzunahme ist je nach Compound unterschiedlich und wird u. a. von den Umgebungsbedingungen beeinflusst.

Bild 4 zeigt das Expansionsverhalten über 18 Tage in Wasser anhand des Beispiels verschiedener hydrophiler TPE. In der Bezeichnung der Compounds lässt sich die Shore-Härte an den ersten beiden Ziffern und die maximale Volumenzunahme in Prozent an den letzten drei Ziffern ablesen. Es ist erkennbar, dass sich das Expansionsverhalten auch bei gleicher Shore-Härte deutlich unterscheiden kann (im Beispiel: 350 bzw. 850% Quellung bei 40 Shore A). Dies zeigt, dass wasserquellende TPE für ein breites

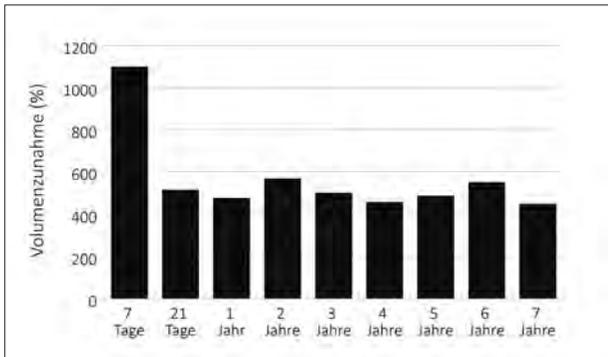


Bild 5: Langzeit-Test mit wöchentlichem Wechsel zwischen Nässe und Trockenheit
(Bild: HEXPOL TPE)

Spektrum an Anforderungen hinsichtlich der Quellung angepasst werden können. Ebenfalls kann die Geschwindigkeit der Quellung unterschiedlich sein, da diese unter anderem von der Härte des Compounds, der Menge des hydrophilen Rohstoffs, der Geometrie und Oberfläche des Bauteils sowie den Umgebungsbedingungen abhängt.

Wenn das Material länger als sieben Tage in Kontakt mit Wasser bleibt, sinkt das Volumen ab, bis ein relativ konstanter Wert erreicht wird. Die Ursache hierfür ist, dass das Polymer durch das Quellen belastet wird und die Polymerketten gespannt werden. Diese Spannung geht mit der Zeit durch Relaxation zum Teil verloren, wodurch das Volumen absinkt. Nach einiger Zeit wird ein stabiler Gleichgewichtszustand erreicht und das Volumen ändert sich nicht mehr.

Dieser stabile Zustand lässt sich gut beobachten, wenn das Material über einen langen Zeitraum einem Zyklus mit Wechsel von Nässe und Trockenheit ausgesetzt wird. Hierfür wurde ein hydrophiles TPE mit einer Härte von 25 Shore A in einem Langzeit-Test betrachtet **Bild 5**. Das TPE wurde im Wechsel jeweils eine Woche in Wasser und dann eine Woche im Trockenen gelagert. Pro Jahr wurden also 26 Nass- und Trockenlagerungen durchlaufen. Es ist erkennbar, dass das TPE nach 21 Tagen (Ende der zweiten Lagerung im Kontakt mit Wasser) eine stabile maximale Quellung aufweist, die sich auch über lange Zeit nicht mehr nennenswert ändert (in diesem Fall ca. 500% Quellung). Durch diesen Extremtest wurde gezeigt, dass das TPE auch unter realen Bedingungen eine hohe Lebensdauer aufweist, selbst wenn sich die Umgebungsbedingungen häufig ändern. In der Realität können solche Bedingungen z.B. auftreten, wenn das Material nicht komplett abgekapselt ist oder die Verdunstung von Wasser stellenweise nur sehr langsam erfolgt.

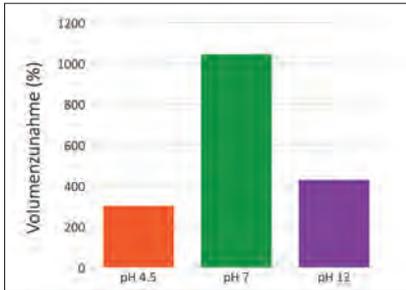


Bild 6: Effekt unterschiedlicher pH-Werte auf die maximale Volumenzunahme (nach acht Tagen bei 23 °C) (Bild: HEXPOL TPE)

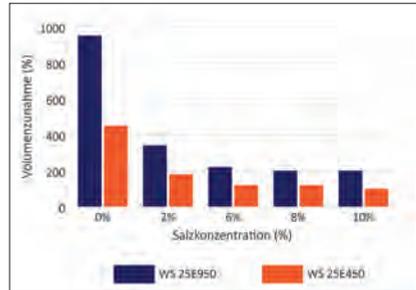


Bild 7: Einfluss der Salzkonzentration auf die maximale Volumenzunahme (nach 21 Tagen bei 23 °C) (Bild: HEXPOL TPE)

Die dargestellten Tests wurden alle mit VE-Wasser durchgeführt, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit sicherzustellen. Dies ist nötig, da sowohl der pH-Wert als auch eventuelle Fremdsalze die Quellung beeinflussen können.

Einfluss des pH-Werts

Durch eine Abweichung von pH 7 (neutral) wird die Funktion der hydrophilen, wasserabsorbenden Bestandteile gestört und die Quellung funktioniert nicht mehr optimal. Dies ist der Fall, da die Anzahl an ionisierten funktionellen Gruppen vom pH-Wert abhängig ist. Wenn vom neutralen pH-Wert abgewichen wird, liegen weniger ionisierte Gruppen vor und die gegenseitige Abstoßung ist geringer. Dadurch können sich die Polymerketten weniger stark ausdehnen und die maximale Volumenzunahme sinkt deutlich ab. Der Unterschied in der maximalen Volumenzunahme kann dabei je nach pH-Wert und Compound drastisch ausfallen (Bild 6).

Für Anwendungen mit einem hohen bzw. niedrigen pH-Wert muss also mit einer entsprechend niedrigeren Quellung gerechnet werden. Wenn dies bei der Materialauswahl beachtet wird, lässt sich das Material aber auch problemlos z.B. in Anwendungen mit einem stark basischen Milieu einsetzen. Das wichtigste Beispiel hierfür ist die Verwendung in Beton mit einem pH-Wert von etwa 12.

Einfluss der Salzkonzentration

Ein sehr ähnliches Verhalten zeigt sich auch, wenn das Wasser salzhaltig ist (Bild 7). Durch die Fremdsalze wird die maximale Volumenänderung reduziert und es kann deutlich länger dauern, bis die maximale Quellung erreicht wird. Die Kationen der Fremdsalze behindern die gegenseitige Abstoßung der Carboxylat-Gruppen der

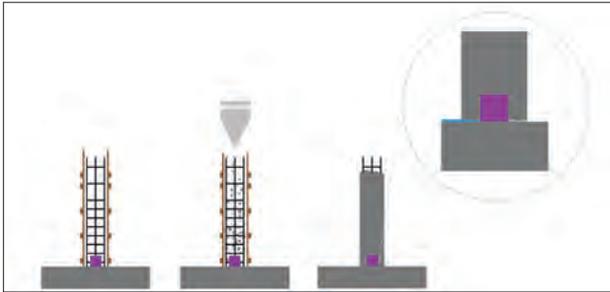


Bild 8: Beispiel für die Anwendung von hydrophilen TPE: Einbettung als Fugenbänder im Betonguss

(Bild: HEXPOL TPE)

Polymerkette, wodurch diese in einem weniger ausgedehnten Zustand vorliegt. Als Folge daraus ist auch das Volumen des Materials geringer.

Anwendungen und Verarbeitungsverfahren

Eine der Hauptanwendungen von hydrophilen TPE ist der Einsatz als Fugenbänder im Baugewerbe (**Bild 8**). Hierfür wird das TPE im Beton eingebettet und läuft ohne Unterbrechung über die Nahtstellen einzelner Betonelemente. Auf diese Weise kann es zuverlässig den Durchtritt von Wasser verhindern. In dieser Anwendung kommen meist sehr weiche Materialien (ca. 25 Shore A) zum Einsatz, welche einfach in Form gebracht werden können und auch um komplexe Strukturen herumgezogen werden können.

Zu den Anwendungen gehört außerdem auch der Einsatz als Abdichtung gegen Wasser im Tunnelbau. Hierbei wird das Material an der Decke des Tunnels eingesetzt, um eine zuverlässige Abdichtung gegen Wasser von oben zu schaffen. Weitere Anwendungsfelder sind z.B. Dichtungen in Abwasserkanälen, Abflüssen, Wassertanks, Verglasungen. Weitere Anwendungsfelder sind Schutzmänteln für Kabel.

Dieses breite Spektrum an Anwendungen ist realisierbar, da sich hydrophile TPE ähnlich wie andere thermoplastische Materialien verarbeiten lassen. Hauptprozessmethode ist die Extrusion zu Dichtprofilen, aber auch Spritzgießen ist problemlos möglich. Im Vergleich zu Standard-TPE sind die Prozesstemperaturen allerdings deutlich niedriger. Beim Spritzgießen von hydrophilen TPE wird meist im Temperaturbereich von 100 bis 140 °C gearbeitet, während für Extrusionsanwendungen Temperaturen von etwa 80 bis 120 °C ausreichend sind. Durch diese niedrigen Temperaturen kann sowohl energieeffizient als auch mit kurzen Kühlzeiten und somit kurzen Zykluszeiten gearbeitet werden. Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass das Material bis zur Verarbeitung trocken gelagert und vorgetrocknet wird. In dieser Hinsicht verhalten sich die hydrophilen TPE also ähnlich wie polare Thermoplaste, z.B. Polyamid.

Fazit

Hydrophile TPE lassen sich sehr gut auf die Anforderungen verschiedener Anwendungen zuschneiden. Die TPE bleiben dabei auch unter schwierigen Bedingungen, wie z.B. in saurem/basischem Milieu, funktionsfähig und über sehr lange Zeit stabil. Aus diesem Grund eignen sich solche TPE hervorragend für diverse Abdichtungen gegen Wasser und werden z.B. im Baugewerbe für Fugenbänder immer häufiger eingesetzt.



Vielfalt auf der richtigen Werkstoffbasis

TPE für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche

Viele Anforderungen an Dichtungen werden heute über den gewählten Werkstoff oder entsprechende Compounds erfüllt. TPE haben sich vor diesem Hintergrund in den letzten Jahren in einem immer breiteren Anwendungsspektrum etabliert.

Dichtungen findet man in nahezu allen Bereichen des Alltags, so z.B. in der Freizeit (etwa Dichtungen an Taucherbrillen), im Bereich Haushaltsartikel (z.B. Dichtungen von Aufbewahrungsdosen), in Kosmetikverpackungen, in Pharmazie und Medizintechnik (z.B. pharmazeutische Stopfen oder Dichtungen für Spritzenkolben) sowie in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie (bei allen Arten von Verschlüssen).

Dichtungen – laut Definition: Elemente zum Trennen von zwei funktionsmäßig verschiedenen Räumen gleichen oder unterschiedlichen Druckes, damit kein Austausch fester, flüssiger oder gasförmiger Medien stattfinden kann – gibt es in unzähligen Werkstoffalternativen und enormer Materialvielfalt. Eingesetzt werden heute z.B. EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk), NBR (Nitrilkautschuk/Nitrile Butadiene Rubber), FKM (Fluorkarbon-Kautschuk), FFKM (Perfluorkautschuk), PTFE (Polytetrafluorethylen), PK (Polyketone), TPU (Thermoplastisches Polyurethan) oder TPE (Thermoplastische Elastomere), die sich in ihren Eigenschaften – wie etwa Medienbeständigkeit, Druckverformung, Verschleißbeständigkeit, Reibungskoeffizient, Temperaturbeständigkeit, Rückstellvermögen etc. – unterscheiden. Daher erscheinen sie für unterschiedliche Einsatzgebiete mal mehr, mal weniger geeignet.

Dichtungswerkstoffe für Medizin und Pharma

Dichtungen für Medizin und Pharma müssen unterschiedliche und äußerst anspruchsvolle Aufgaben erfüllen, werden sie doch in kritischen Komponenten und Verfahren eingesetzt, wie z.B. in therapeutischen-, diagnostischen- und Infusionsgeräten, aber auch bei der Herstellung und Verpackung von Arzneimitteln. Die Werkstoffe müssen grundsätzlich den Vorgaben der U.S. Arzneimittel- und Lebensmittelbehörde

Von B. A. Florian Schindler, Product Manager New Business
ACTEGA DS GmbH | www.actega.com/ds

FDA sowie den USP Class VI Standards entsprechen. Sie müssen auf Biokompatibilität (ISO 10993) und physiologische Unbedenklichkeit geprüft sein sowie die Verträglichkeit des Materials mit dem menschlichen Organismus garantieren, wenn ein unmittelbarer Kontakt von Werkstoff/Produkt mit dem Patienten besteht. Chemische und Medienbeständigkeit sind weitere Merkmale – z.B. gegenüber gebräuchlichen Desinfektions- und Reinigungsmitteln – und last not least Sterilisationsfähigkeit.

Durch die Möglichkeit ihrer thermoplastischen Verarbeitung, insbesondere in Mehrkomponentensystemen, bieten sich TPE als Werkstoff für eine ganze Reihe von Anwendungen in diesem Umfeld an. Dazu zählen u.a. Verschlussdichtungen für Kunststoffbehälter und -geräte, Membranen und Faltenbälge, medizinische Schläuche (**Bild 1**), Dichtungen für besondere hygienische Anforderungen, Kleinbehälter und Sterilisationsgeräte (Autoklaven), Dichtungen für Ampullenkappen und Dosierinhalatoren (**Bild 2**) sowie für Verschlussstopfen und pharmazeutische Verschlüsse (**Bild 3**).

Diese medizinischen oder pharmazeutischen Applikationen unterliegen ihrerseits wieder einer Vielzahl von Anforderungen an Qualität und Eigenschaftsprofil. Das Material für pharmazeutische Verschlüsse etwa – also für alle Arten von Konnektoren, Ventil- oder Verschlussmembranen, Infusionsleitungen, Ports,

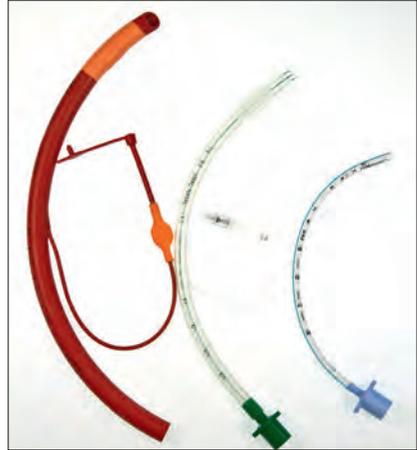


Bild 1: Klassische Einsatzfelder für moderne TPE in der Medizin sind Schläuche,...

(Bild: ACTEGA DS GmbH/istockphoto)



Bild 2: ...Dichtungen für Kappen,...

(Bild: ACTEGA DS GmbH/istockphoto)



Bild 3: ...pharmazeutische Verschlüsse und...

(Bild: ACTEGA DS GmbH/istockphoto)



Bild 4: ...die Abdichtung von Spritzenkolben

(Bild: ACTEGA DS GmbH/istockphoto)

Stopfen oder Überleitungssystemen – muss die Fähigkeit des vollständigen Wiederverschlusses aufweisen und alle gängigen Arten von Sterilisationsverfahren ohne signifikante Veränderungen des Eigenschaftsprofils bestehen. Darüber hinaus muss die Partikelkontamination vermieden werden, d.h. es darf kein Material aus dem Kunststoff des Stopfens an der Kanüle haften bleiben.

Auch die Anforderungsprofile an das Dichtungsmaterial für Spritzenkolben (**Bild 4**) oder die Dichtelemente von Katheterkupplungen sind äußerst umfangreich: Neben Funktionalität, Sterilität, Migrationsarmut muss eine konstante Dichtigkeit des Kolbens gewährleistet sein. Durch die Elastizität der Dichtung ist ein leichtes Gleiten des Spritzenzylinders für exaktes Dosieren ohne Stick-Slip-Effekt zu gewährleisten. Das Material muss den Anforderungen der EN ISO 7886 Norm (Norm für Einmalspritzen) zur Feststellung der Gleiteigenschaften, Dichtigkeit und Mechanik entsprechen. Der weiche Teil einer Katheterkupplung muss auf der einen Seite spezifizierten Zugkräften standhalten können, darf andererseits weder gequetscht noch sonst wie beschädigt werden.

Ein äußerst komplexes und gleichzeitig hochsensibles Feld ist das der Schläuche (**Bild 1**) in der Medizintechnik. Es gibt zahlreiche Schlaucharten und detaillierte Anforderungen. Für die Werkstoffe für medizinische Schlauchsysteme kommen je nach Art der Schläuche – ein- oder mehrlumig, Mono- oder Multilayer oder fadenarmiert – und je nach Einsatzgebiet unterschiedliche Eigenschaftsprofile zum Tragen. Generell gilt aber für alle medizinischen Schläuche: Es sind Wechselwirkungen zwischen Schlauchmaterial und pharmazeutischen oder körpereigenen Stoffen, bei denen es zu Beeinträchtigungen des menschlichen Organismus kommen könnte, zwingend zu vermeiden. Es darf keine Interaktion mit dem Kunststoff geben, die Medikamentenabsorption ist zu verhindern, das Material muss in jeder Beziehung medienbeständig und sollte in bestimmten Fällen auch UV-stabil sein, um Versprödung, Verformung und Intransparenz zu vermeiden. Ein hohes Maß an Transparenz ist gefordert, damit flüssige Inhalte sichtbar bleiben und die optische Kontrolle ermöglicht wird (**Bild 5**). Das Schlauchsystem in klinischer Anwendung sollte darüber hinaus röntgenkontrastgebende Streifen (z.B. aus Bariumsulfat) in der Schlauchwand aufweisen, damit die Schlauchposition im Körper verfolgt werden kann oder um eine implantierte Drainage oder chirurgische Komponente mithilfe von Röntgenstrahlen lokalisieren zu kön-

nen. Mittels antimikrobieller Beschichtung sollte die Keimresistenz erhöht werden. Ein wichtiger Aspekt ist die Biokompatibilität des Materials in Abhängigkeit vom Einsatzort im Körper, vom physiologischen Kontaktmedium während der Anwendung des Produkts, von der Einsatzdauer und dem Sterilisationsverfahren – insbesondere bei Schlauchsystemen im Blutkontakt. Um den freien Fluss der Stoffe innerhalb der Schläuche zu gewährleisten, ist Knickbeständigkeit gefordert. Sterilisationsfähigkeit ist natürlich ein Muss, hier im Wesentlichen die Sterilisation per EtO-Verfahren oder im Autoklav. Auch die Verklebbarkeit von TPE mit anderen Werkstoffen mittels Lösemitteln und mit Ultraschallwellen kann eine wichtige Anforderung sein, z.B. bei Katheterschläuchen mit Konnektoren. Und auch hier ist konstante Dichtigkeit wieder ein Thema.



Bild 5: Transparenz ist eine zentrale Anforderung an die verwendeten Materialien

(Bild: ACTEGA DS GmbH)

Mit PROVAMED® steht ein TPE-Portfolio für Dichtsysteme und weitere Applikationen für Medizin und Pharma, frei von Latex, Silikon und Phthalaten, zur Verfügung, das die notwendigen Materialqualifizierungen hinsichtlich normativer, toxikologischer, biologischer und kundenspezifischer Anforderungen – u.a. USP Class VI, ISO 10993-11 (Systemtoxizität) oder ISO 10993-10 (Sensibilisierung und Irritation) nachweist. Die Werkstoffe können auf eine Vielzahl der beschriebenen Anforderungsprofile eingestellt werden und können zudem eine besonders gute Haftung auf Thermoplasten wie PE, PP, PS, ABS, PC und PA bieten, die auch bei kontinuierlichem Medienkontakt und erhöhten Temperaturen aufrechterhalten wird.

Dichtungswerkstoffe für Lebensmittel- und Getränkeanwendungen

Alle Werkstoffe für Dichtungen, die mit Substanzen unterschiedlicher Art in Kontakt kommen, müssen bestimmten Reinheitsanforderungen entsprechen und Medienbeständigkeit aufweisen. Das sind Grundvoraussetzungen für Werkstoffe in der Lebensmittelindustrie. Die Herausforderung ist es, den richtigen Dichtungswerkstoff für die gewünschte Anwendung zu wählen. Dabei gilt grundsätzlich, dass bei der Herstel-



Bild 6: Deckeldichtungen sollten PVC-frei sein

(Bild: ACTEGA DS GmbH)

lung von Nahrungsmitteln und Getränken deren gesundheitliche Unbedenklichkeit im Vordergrund steht. Es gilt eine ganze Reihe von gesetzlichen Vorschriften und Standards, die zu erfüllen sind. Die Unbedenklichkeit der Werkstoffe muss durch entsprechende Freigaben und Konformitäten – z.B. für den Kontakt mit Lebensmitteln oder Trinkwasser – bestätigt sein. Auch die Freiheit von PAK (polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen), Phthalaten und von als bedenklich geltenden Weichmachern ist von großer Bedeutung für die Sicherheit der Verbraucher.

Darüber hinaus sind auch Geschmacks- und Geruchsneutralität gefordert. Und schließlich muss sichergestellt sein, dass weder im Produktionsprozess noch aus der Verpackung (z.B. aus der Deckeldichtung **Bild 6**) Bestandteile aus den Dichtungswerkstoffen gelöst werden und in das Lebensmittel übergehen. Denn selbst bei gesundheitlicher Unbedenklichkeit könnte dies Auswirkungen auf die sensorische oder sonstige Qualität des Produktes haben. Oder sogar zum Punktabzug führen, wie der letzte Test von Stiftung Warentest zeigte, in dem getrocknete Tomaten im Glas getestet wurden. Mit Blick auf die Dichtung im Deckel schrieb das Blatt: „Neben anderen Schadstoffen stehen Weichmacher im Focus unseres Testes. Sie gelangen über die Umwelt oder Verarbeitungsprozesse in die Nahrung – und über Deckeldichtungsringe, die aus PVC bestehen. Die Stoffe werden dem Kunststoff PVC zugesetzt, um ihn geschmeidiger zu machen – der Deckel schließt so besser. Kommen ölhaltige Lebensmittel mit solchen Dichtungsringen in Kontakt, können sich die Weichmacher herauslösen und ins Produkt gelangen.“ Im Vergleich zu einem Würzsoßentest im Jahr 2007, in dem durchweg hohe Weichmachergehalte - „oft in gesundheitsgefährdenden Mengen“ - festgestellt wurden, konstatiert man zwar eine Verbesserung, da in neun von 17 getesteten Produkten keine Weichmacher nachweisbar waren, aber selbst bei geringen Weichmachergehalten (in sechs Produkten) besteht ein Risiko durch dauerhafte Aufnahme. Diese Nachweise von Weichmachern im Lebensmittel führten daher zur negativen Bewertung, denn, so stellt nicht nur die Stiftung fest: Es geht auch ohne, da PVC-freie Deckeldichtungen im Markt vorhanden sind.

Mit PROVALIN® steht eine innovative Dichtmasse frei von PVC, Phthalaten oder anderen als bedenklich eingestuften Weichmachern zur Verfügung und wird von einigen Verantwortlichen aus Verschlussherstellung, Abfüllung und Lebensmittelproduktion bereits seit 2011 eingesetzt. Mit dieser TPE-Compound-Familie für alle Arten von Füllgütern, Abfüll- und Verschleißprozesse wird allen Beteiligten und Verantwortlichen entlang der Lebensmittelkette höchste, geprüfte Lebensmittelsicherheit und die Erfüllung aller EU-Vorschriften geboten. Langzeitstudien und Migrationsprüfungen bestätigen dies eindrücklich. Solche Tests führen unabhängige Prüflabore wie etwa das Institut Nehring (seit Mitte 2017 Eurofins), die schweizerische SQTS oder die in Italien ansässige CSI durch. Dort werden u.a. zielgerichtete Analysen der Globalmigration sowie der spezifischen Migrationen aus einer Vielzahl von Einzelsubstanzen (Weichmacher, Additive, Antioxidantien, Epoxyharz- und Druckfarbenbestandteile) analysiert, Screenings von in allen in Verpackungsbereichen angewendeten Materialien durchgeführt, Evaluierungen der Supporting Documents in Bezug auf die Positivlisten für Monomere und Additive vorgenommen, sensorische Evaluierungen und olfaktorische sowie organoleptische Tests durchgeführt und das Vorhandensein von NIAS (not intentionally added substances) überprüft. Nur so kann sichergestellt werden, dass das überprüfte Material nicht nur allen gesetzlichen Vorschriften entspricht, sondern auch Lebensmittelsicherheit garantiert.

Einer Garantie, der sich auch Tin Cap verpflichtet fühlt. 2015 auf Grundlage der Idee gegründet, ein ökologisch, gesundes und leicht zu recycelndes Produkt zu entwickeln, hat man mit der Produktion des PT51 begonnen – einem PVC-freien PT-(Press & Twist) Verschluss für Glaskonserven. Das hierin verwendete Dichtungsmaterial ist PROVALIN® 1771. Dieses TPE-Dichtungsmaterial basiert auf Werkstoffen, die sowohl auf PVC und Weichmacher als auch auf als bedenklich geltende Additive verzichten. Damit ist insbesondere für den hochsensiblen Bereich von Baby-Food und besonders empfindliche Füllgüter eine Lösung gefunden worden. Der Compound ist für alle Füllgüter mit Wärmebehandlung einsetzbar. Es liegen bereits ausführliche Tests, u.a. hinsichtlich Verarbeitung, Lagersicherheit, Vakuum-Erhalt, Öffnungseigenschaften und Migration, mit hervorragenden Ergebnissen vor. Sowohl geeignet für Baby-Food und andere ölhaltige Lebensmittel als auch für alle nicht ölhaltigen Lebensmittel sowie für alle sensiblen Füllgüter sind diese PVC-freien Verschlüsse die geeignete Alternative für alle diejenigen, die schon seit geraumer Zeit nach Lösungen suchen, um PVC aus Verpackungen zu eliminieren und gleichzeitig den Schutz des Füllgutes bis zur Haltbarkeitsgrenze gewährleisten wollen.



Bild 7: Wiederverschließbare Crowler basieren u.a. auf TPE-Dichtungen

(Bild: ACTEGA DS GmbH)

Der Schutz des Füllgutes stand auch im Fokus von Anbietern in der Craft-Beer-Szene (**Bild 7**), die als Joint Venture zwischen einer Brauerei, Gebinde- und Verschluss-Herstellern sowie Dichtungsmassen-Entwicklern den wiederverschließbaren Crowler im Markt einführten; eine Gebindeform zwischen Dose und Fässchen, deren Verschlusskappe das TPE-Dichtungsmaterial SVELOX® 5200 L mit Sauerstoff-Scavenger-Funktion enthält. Diese Compounds wurden für Fruchtsäfte, Bier und Mineralwässer entwickelt und zeichnen sich durch exzellente elastische und organoleptische Eigenschaften aus.

Nachdem verschiedene Brauereien nach der Einführung der DSG Cap Can (einem wiederverschließbaren Twist-Off Verschluss für Getränkedosen) auf der Suche nach einer weiteren Reduktion von Sauerstoff und damit einer weiteren Verbesserung des Geschmackserhalts und der Haltbarkeit waren, konnte mit diesem Scavenger Compound die geeignete Lösung für diese Anforderungen gefunden werden.

Abdichtende Elemente für Tauchsportartikel

Durch ihre flexible Anwendung und die Fähigkeit zu präziser Anpassung sind weich-elastische TPE-Materialien auch besonders gut für die Herstellung von Konsumgüterartikeln und von Ausrüstungsprodukten im Sport- und Freizeitbereich, wie z.B. im Tauchsport, geeignet (**Bild 8**). So sorgen sie dafür, dass Taucherbrillen dicht sitzen und dies – trotz UV-Einstrahlung, Sand am Strand und Salzwasser beim Tauchen – auch lange bleiben. Diese Eigenschaften sollten auch andere Kunststoffprodukte, die in besonders sonnigen Bereichen genutzt werden, aufweisen. Durch zusätzliche UV-Stabilisierung – die TPE werden z.B. zusätzlich additiviert – bleibt etwa die Farbe erhalten und die mechanischen Eigenschaften der Produkte werden nicht negativ beeinflusst. UV-stabilisierte TPE filtern das schädliche UV-Licht und agieren als freie Radikalfänger. Das verhindert, dass Rückstellfähigkeit und Druckverformungsrest verringert werden und damit die Funktion des Endproduktes womöglich verschlechtert wird. Auch die Hitzebeständigkeit bei 80 °C kann gewährleistet werden. Das ist wichtig, wenn z.B. eine Lagerung im Seecontainer unter hohen Temperaturen stattfindet, was dann der Fall ist, wenn die Ausrüstung in besonders warme Regionen verschifft werden muss.

Es muss gewährleistet sein, dass auch bei Lagerung unter hohen Temperaturen kein Einfluss auf das Produkt – wie etwa eine Verformung – genommen wird. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Lebensmittelechtheit, denn die Mundteile von Schnorcheln werden – wie der Name schon sagt – in den Mund genommen. Konformität ist hier also ein wichtiger Punkt.



Bild 8: Dichtungen, die jeder kennt, an die komplexe Anforderungen gestellt werden

(Bild: ACTEGA DS GmbH/istockphoto)

Weiter gilt es, die Norm EN 1772-2016-02 einzuhalten. Das ist die Europäische Norm, die die sicherheitstechnischen Anforderungen an Schnorchel festlegt. Last not least spielen Flexibilität, Transparenz und Haptik eine Rolle.

Für diese Eigenschaftsprofile steht das SOFT EST.® TPE-Portfolio zur Verfügung. Die weichelastischen TPE-Compounds bieten sowohl hochtransparente als auch transluzente und naturfarbene Versionen in Shore-Härten von A-20 bis A-85. Die Materialien sind ausnahmslos lebensmittelecht nach EU 10/2011 und FDA-Regularien.

Fazit

Dichtungsaufgaben erfordern markt- und anwendungsgerechte Lösungen und je nach Einsatzgebiet eine sorgfältige Werkstoffauswahl und -komposition. TPE-Werkstoffe sind in vielen Fällen eine richtige Wahl, insbesondere, wenn es um hoch reglementierte Märkte und die Einhaltung einer Vielzahl von Regularien und Vorschriften geht – wie etwa in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie, aber auch in der Medizintechnik und Pharmazie. Und auch wenn es um wirtschaftliche Lösungen und Kostenalternativen geht, können TPE reüssieren.

TPE mit Haftung zu EPDM

TPE-Technologie für direkt angespritzte Eckverbindungen und Endstücke an EPDM-Profilen

Die Automobilindustrie ist der größte und am stärksten wachsende Markt für Thermoplastische Elastomere. Vor dem Hintergrund des zunehmenden Bedarfs an TPE-Compounds für anspruchsvolle Exterieur-Anwendungen wurden anwendungsspezifische Entwicklungen effizienter TPE-Lösungen für diese Branche vorangetrieben. Zu den neuesten Entwicklungen zählen u.a. die TPE-Compounds mit Haftung zu Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM).

Die speziell für 2K-Bauteile im Bereich Automobil Exterieur entwickelten Materialien aus der THERMOLAST® K Produktgruppe zeichnen sich durch gute Haftung zu EPDM sowie ausgezeichnete UV-Beständigkeit aus. Damit zielen die neuen Compounds vor allem auf Automobilanwendungen wie Fensterlauf- und Abdichtungsprofile aus EPDM mit angespritzten Eckverbindungen und Abschlüssen aus TPE ab (**Bild 1 und 2**).

Diese Anwendungen gelten speziell in großen Fahrzeugserien als Domäne von Styrol-Butadien-Compounds (SBC) und vernetzten thermoplastischen Vulkanisaten (TPV). Aufgrund der unterschiedlichen Geometrien zwischen den Fahrzeugserien stoßen diese Materialklassen bei der Verarbeitung jedoch an ihre wirtschaftlichen Grenzen. Neue Möglichkeiten bietet die neue Materiallösung, die im Spritzgussprozess eine Haftung zu EPDM eingeht. Die ersten Compounds (TC7EAZ und TC7EFZ) dieser EPDM-Haftungsreihe (AD/EPDM/UV – AD = Adhesion, EPDM = Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber, UV = UV-Resistance) vereinen bei einer Härte von 70 Shore A gute Haftung zu EPDM mit hoher Langzeitbeständigkeit gegenüber UV-Einstrahlung und Wärmeeinwirkung. Im Vergleich zu Wettbewerbsmaterialien bieten diese Compounds nach Bewitterungstests eine überlegene Oberflächenqualität. Die Schwerpunkte bei der Entwicklung der einzelnen Compounds setzte der TPE-Spezialist auf die Haftung (TC7EAZ) und auf die Verarbeitbarkeit sowie ein geringes Foggingverhalten (TC7EFZ).

Gute Anfangshaftung

Die Anwendung der fortschrittlichen EPDM-Haftungsreihe wurde in praxisgerechter Zusammenarbeit mit einem Maschinenhersteller sowie in umfassenden Labor- und

Von Josef Neuer, Head of Product Manager EMEA; Dr. Frieder Vielsack, Head of Advance Development
KRAIBURG TPE GmbH & Co. KG | www.kraiburg-tpe.com



Bild 1: Die neue TPE-Technologie für Zweikomponententeile mit EPDM zielt vor allem auf die wirtschaftliche Fertigung von Fensterläufen und anderen Kfz-Außenprofilen ab

(Bild: KRAIBURG TPE)



Bild 2: Abdichtungs- und Fensterlaufprofile aus EPDM mit direkt angespritzten Eck- und Endstücken aus THERMOLAST® K

(Bild: KRAIBURG TPE)

Kundenversuchen erfolgreich geprüft (**Bild 3**). Im Vordergrund stand dabei zunächst die Haftfähigkeit im Verbund mit EPDM. Neben Haftungsprüfungen von EPDM/TPE-Proben wurden in diesem Rahmen auch Tests in Anlehnung an ISO 37 durchgeführt (bei Raumtemperatur sowie nach 1.500 h bei 90 °C). In den Tests wurde neben der Zugspannung und Bruchdehnung auch die erforderliche absolute Kraft bis zur Zerstörung der Probe ermittelt.

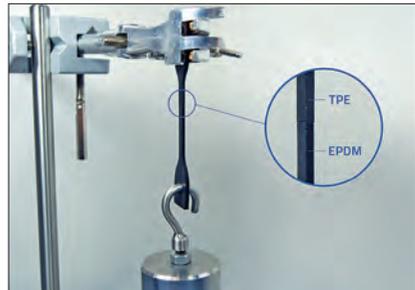


Bild 3: Trotz geringer Kontaktfläche weisen die TPE- und EPDM-Materialien eine sehr gute Haftung auf (Bild: KRAIBURG TPE)

Die neuen Materialien erzielten bei diesen Haftungsversuchen gute Ergebnisse sowohl mit geschäumten als auch mit kompakten EPDM-Werkstücken. Die Anfangshaftung spielt eine entscheidende Rolle für die problemlose Entformbarkeit der Fertigteile bei möglichst kurzen Zykluszeiten. Darüber hinaus ergaben die Versuchsreihen, dass es bei der Haftung wesentlich auf die Sauberkeit der eingelegten EPDM-Profile ankommt. Für beste und zuverlässig reproduzierbare Resultate sollten die Profilstücke möglichst zeitnah vor dem Anspritzen der TPE-Komponente geschnitten werden – je frischer der Zuschnitt, desto besser die Haftung.

Zu den Kernanforderungen für Kfz-Außenteile zählen außerdem dauerhafte Wärme- und Witterungsbeständigkeit auch bei erhöhter UV-Einstrahlung. Um dies zu simulieren,

wurden Materialproben beschleunigten Alterungstests mit Heißluft (1.500 h bei 90 °C und 120 °C) unterzogen und mittels Bewitterungstests den Umgebungsbedingungen, wie sie z.B. in Florida (Hitze und Feuchtigkeit) und der Kalahari (Hitze und Trockenheit) vorkommen, ausgesetzt. Bei all diesen Witterungstests bewies die AD/EPDM/UV-Reihe stabile mechanische Eigenschaften und zeichneten sich durch trockene und klebfreie Oberflächen aus.

Marktorientierte Projektpartnerschaft

Um die Prozessstabilität der neuen AD/EPDM/UV-Compounds sicherzustellen, wurde deren Verarbeitbarkeit gemeinsam mit dem Spritzanlagenhersteller untersucht. Für die Tests im Verarbeitungstechnikum des Herstellers wurde eine Vertikalmaschine in holmloser Bauweise eingesetzt (**Bild 4**). Die wirtschaftliche Fertigung von EPDM/TPE-Teilen auf einer vertikalen Maschine bietet den Vorteil der Platzersparnis zugunsten von Zuführ- und Folgeaggregaten. Allerdings verlangt sie auch eine besonders sorgfältig abgestimmte Prozessführung der eingesetzten Materialien. Die spezielle Rezeptur der TPE ermöglicht es, den Nachdruck zu minimieren, um die Deformationen des EPDM-Werkstückes zu vermeiden.

Zwar wäre es naheliegend, Eck- und Endstücke von automobilen Dichtungsprofilen, wie bei Fensterläufen etc., ebenfalls aus EPDM zu fertigen – allerdings hätte dies aufgrund der Vernetzung des Kautschuks längere Zykluszeiten zur Folge und würde aufwändigere Maschinen und Arbeitsschritte erfordern.

Kürzere Zykluszeiten

Erhöhte Prozessstabilität bedeutet weniger Ausschuss und gilt heute als einer der wichtigsten Faktoren für wirtschaftliche 2K-Bauteile. Eine weitere Zielsetzung der Projektpartner war daher die Reduzierung der typischen Zykluszeit für die Fertigung von TPE-Anspritzungen an eingelegte EPDM-Werkstücke. Die neuen EPDM-Haftungscompounds zeichnen sich u. a. durch ihre wirtschaftliche Verarbeitbarkeit aus. Die Verarbeitung erfolgt bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen von 200 °C bis 220 °C. Dies bewirkt kürzere Kühlzeiten, die, zusammen mit der minimierten Nachdruckzeit, den Zyklus und damit die gesamte Fertigung beschleunigen. Neben diesen Eigenschaften sorgt die Anfangshaftung der speziell entwickelten TPE-Compounds zu den EPDM-Materialien für eine einfache Entformung der Fertigteile und verkürzt somit ebenfalls die Zykluszeiten.

Gemeinsam gelang es, die Material- und Prozesstechnologie so zu optimieren, dass sie den Anforderungen unterschiedlicher automobiler Fenstersysteme entsprechen.

Die dauerhafte Haftung und Witterungsbeständigkeit der Materialien wird dabei nicht beeinträchtigt. Zur umfassenden Kundenunterstützung bietet man außerdem einen maßgeschneiderten Farbabgleich unter Berücksichtigung des Glanzgrads zum jeweiligen EPDM bzw. zur Farbspezifikation des OEM.

Fazit

Gestützt auf marktspezifische Entwicklungsteams und eine weitreichende Marktkennntnis wurde eine neue Reihe Thermoplastischer Elastomere geschaffen, die der zunehmenden Diversität der automobilen Fenstersysteme entgegenkommt und eine wirtschaftliche Fertigung von 2K-Lösungen mit EPDM-Profilen ermöglicht. Die zusammen mit Kunden sowie mit Partnern der Maschinen- und Werkzeugindustrie durchgeführten Tests zur Optimierung der Haftfestigkeit, Witterungsbeständigkeit und Prozessstabilität der EPDM-Haftungstechnologie unterstreichen die Markt-

und Kundenorientierung dieser Produktreihe. Anwendungsgerechte Materialeinstellung und Farbabmusterung sowie Verarbeitungsempfehlungen und gesicherte Produktkonsistenz von Charge zu Charge runden den Kundensupport ab. Damit ist man gerüstet, um gemeinsam mit seinen Kunden die wachsenden Marktchancen für hochwertige TPE in diesem Segment zu nutzen und die wettbewerbsfähige Umsetzung anspruchsvoller EPDM/TPE-Anwendungen zu beschleunigen.



Bild 4: Die Prozessstabilität der neuen TPE-Technologie für 2K-Anwendungen mit EPDM wurde auf einer Vertikalmaschine erprobt und optimiert

(Bild: LWB Stein)

Ganzheitlich mit hoher Performance für die Fluidbranche

Ein Polyurethan-Portfolio bietet neue Möglichkeiten

Seit bereits mehreren Jahrzehnten ist das Leistungsvermögen bei Hydraulik Zylinder-Anwendungen nicht ohne die hohen Eigenschaftsprofile der verbauten Polyurethan-Dichtungen denkbar. Veränderte Randbedingungen am Markt stellen die bisher angewendeten Dichtungswerkstoffe in Frage.

Die Anforderungen an zukunftsweisende Hydraulikzylinder und auch andere fluid-technische Anwendungen (**Bild 1**) steigen im internationalen Umfeld kontinuierlich an: Die Entwicklung geht in Richtung höherer Kompaktheit und Dynamik mit erweiterter Flexibilität und deshalb auch zur Integration intelligenter Regeltechnik, zu hohen und niedrigen Gleit-Geschwindigkeiten, einer höheren Energieeffizienz und Geräuschlosigkeit. Auch der Leichtbau ist inzwischen ein Thema auf den Wunschlisten der Zylinderbauer. So bahnen sich z.B. Aluminium-Lösungen als Ersatz von hartverchromten Stahlstangen an. Daraus resultieren wiederum neuartige Oberflächen mit höherer Abrasivität und anderem tribologischem Verhalten. Was die Weiterentwicklung von Hydraulikflüssigkeiten betrifft, ging und geht der Weg hin zu weniger ökotoxischen, biologisch leichter abbaubaren Medien, die als Folge der günstigeren Abbaubarkeit bei den Dichtungswerkstoffen offene Fragen hinsichtlich der Beständigkeit aufwerfen können.

Wieviel „universal“ ist heute möglich?

Auf Basis dieser Trends werden von Seiten der Dichtungshersteller innovative Konzepte für die Dichtungssysteme der Zukunft bei Drücken von bis zu 450 bar nachgefragt. Übersetzt in Werkstofflogik bedeutet das für die Anforderungsprofile der Entwicklung: Weitere Verbesserungen hinsichtlich Elastizität, bleibender Verformung, Verschleiß und des dynamischen Verhaltens. Nach Möglichkeit sollten diese Werkstoffe auch günstigere Reibbeiwerte besitzen und dadurch den CO₂-Fußabdruck des Hydraulikzylinders positiv beeinflussen können. Wie schon angeschnitten, sind auch die Anforderungen an die chemische Stabilität für zukunftsweisende Polyurethansorten weiterhin gewachsen. Am deutschen Markt werden inzwischen ca. 14% der Hydraulikanwendungen auf Basis von biologisch abbaubaren oder schwer entflamm-

baren Medien bestritten (HEES, HETG, HFA und HFC) [1]. In diesem Kontext wird oft das Schlagwort vom hochleistungsfähigen Universalwerkstoff kolportiert. Durch die genannten fluidtechnischen Weiterentwicklungen ist man jedoch weiter denn je davon entfernt, über solch ein Material zu verfügen. Ein Universalwerkstoff ist bestenfalls als gute Marketing-Idee zu sehen, jedoch – technisch betrachtet – eine reine Illusion. Mit der Entwicklung eines Portfolios aus hochleistungsfähigen TPU, die speziell abgestaffelten Anforderungsinhalten gerecht werden, versucht man sich der universellen Erfüllung aller Anforderungen zu stellen.



Bild 1: Zielmarkt für neue TPU sind z.B. Bau- und Landmaschinen

(Bild: Fietz Automotive GmbH)

Entscheidend für die Entwicklung der TPU-Werkstoffe war ein ganzheitlicher Lösungsansatz, womit man den sehr hohen Ansprüchen im Bereich der physikalischen Eigenschaftsprofile gerecht werden wollte. Als Konsequenz daraus galt es, den primärchemischen Aufbau sowie die morphologische Beschaffenheit bei den neuen TPU in optimaler Weise zu gestalten. Zudem wurde der Einsatz von speziellen Funktionsfüllstoffen in Erwägung gezogen. Syntheseweg, Mischtechnik und Thermoplast-Verarbeitungsverfahren sollten notwendigerweise mit eingebunden werden. Thermoplastische Polyurethane liegen als zweiphasige Werkstoffe in Form von Hart- und Weichsegmenten vor. Deren Verhältnis zueinander, deren Größe und Größenverteilung galt es, im Aufbau der neuen Werkstoffe gezielt zu steuern.



Bild 2: Hochleistungsfähige Hydraulik-Stangendichtungen aus FiPur 100

(Bild: Fietz Automotive GmbH)

Mit FiPur 100 (**Bild 2**) gelang eine maßgeschneiderte Materiallösung, die man als Antwort auf die eingangs beschriebenen Trends in der Fluidindustrie sehen kann. Das neue Standard-TPU (**Bild 3**) wurde auf eine nominale Härte von 94 Shore A für den

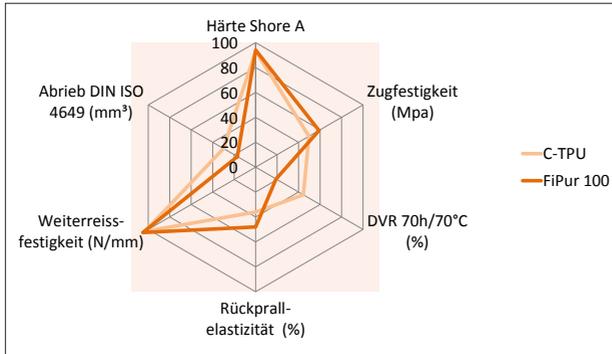


Bild 3: Physikalisches Eigenschaftsprofil: Commodity-TPU vs. FiPur 100 (Bild: Fietz Automotive GmbH)

Temperaturbereich von -35 °C bis $+110\text{ °C}$ maßgeschneidert. Die minimalen Quellwerte in Mineralölen, seine extrem niedrige, bleibende Verformung sowie sein hoher Widerstand für Extrusion, Abrieb und Weiterreißen prädestinieren diesen Werkstoff als zuverlässige und robuste Lösung für eine Fülle von anspruchsvollen Anwendungen in Mobil- und Industrie-Hydraulik: Bau- und Landmaschinen, Flurfördertechnik, Pressen, Stellzylindern, Laderampen, Ventiltechnik u.v.m.

Dem hydrolytischen Abbau entgegenwirken

Eine der Schwächen bisheriger Polyurethane ist die Anfälligkeit im Bereich des hydrolytischen Abbaus. Dieser Einfluss, der zur kompletten Dichtungsunfähigkeit des Werkstoffs führt, tritt keinesfalls nur in wässriger Umgebung auf. Der hydrolytische Abbau limitiert ebenso die Anwendung als Dichtungswerkstoff in biologisch abbaubaren Medien sowie in hoch additivierten Mineralölen und Fetten. In diesen Anwendungsbereichen gab es schon kostspielige Reklamationen und Rückrufe für Dichtungs- und KomponentenhHersteller. Vor diesem Hintergrund wurde im Werkstofflabor eine Testapparatur aufgebaut, mit deren Hilfe der Abbau in Funktions- und Prüfmedien gezielt untersucht werden konnte (**Bild 4**). Als Ergebnis detaillierter Rohstoffanalysen und der folgerichtigen Synthese von Modell-Compounds konnte auf Basis ausführlicher Untersuchungen ein neuartiger chemischer Grundaufbau validiert werden, der zu außergewöhnlich hoher Beständigkeit in hydrolysierenden Medien führte (**Bild 5**). In stark quellenden Mineralölen (IRM 903) zeigt FiPur 200 bis max. 8% Volumenquellung, womit bei dynamischen Dichtungsanwendungen keine Problemlagen entstehen. In weiteren Untersuchungen konnten hervorragende Ergebnisse mit unterschiedlichen biologisch leicht abbaubaren (HEES, HETG) Druckübertragungsmedien erzielt werden. Es gibt inzwischen positive Testbefunde und Freigaben von renommierten OEM für O-Ringe und Lippendichtungen in Hochdruckpumpen, Schnellverschlußkupplungen und Gasfedern.



Bild 4: Prüfapparatur zur Ermittlung des Hydrolyseverhaltens im Werkstofflabor

(Bild: Fietz Automotive GmbH)

Bild 5: FiPur 200 im sechswöchigen Abbauteil im Vergleich zur handelsüblichen TPU-Qualität (C-TPU). Das Maß an Zugfestigkeitsverlust korreliert mit dem Molekulargewichtsabbau am Polyurethan-Werkstoff

(Bild: Fietz Automotive GmbH)

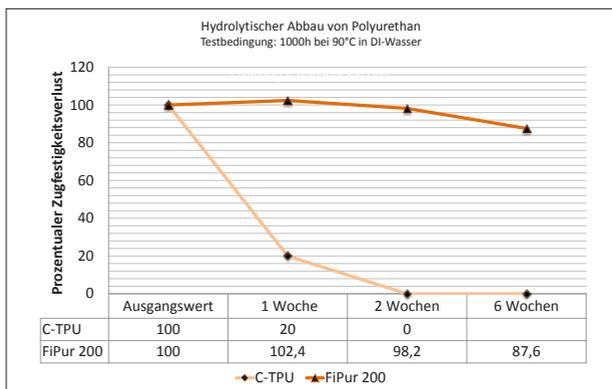
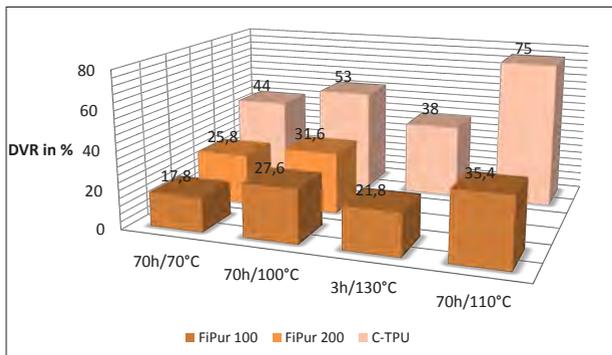


Bild 6: Druckverformungsrest bei Extremtemperaturen im Vergleich zur handelsüblichen Qualität (C-TPU)

(Bild: Fietz Automotive GmbH)



Bleibende Verformung

Der Druckverformungsrest gilt als einer der wichtigsten Kennwerte zur Charakterisierung von Dichtungswerkstoffen (**Bild 6**). Zur Erfassung der Rückstellfähigkeit von elastischen Materialien wird bei definierter Stauchung des Normprüfkörpers, vorzugsweise bei höheren Temperaturen, der prozentuale Anteil an irreversibler Verformung ermittelt. Sowohl FiPur 100 als auch FiPur 200 führen bei hohen Temperaturen zu außergewöhnlich niedrigen bleibenden Verformungen (**Bild 6**). Es wurden hierzu nicht nur Messungen an Standard-Prüfkörpern, sondern auch an regulär gefertigten Dichtungsprodukten, wie z.B. an O-Ringen, durchgeführt. Das niedrige Werte-Niveau konnte vollauf bestätigt werden.

Nachhaltige Lösung für hochwertige dynamische Dichtungen

Es gibt einen weltweiten Trend zur Verwendung von biogenen Rohstoffen in der Polymersynthese. Der Anteil an Biopolymeren wächst mit ca. 4% pro Jahr und repräsentiert am Gesamtpolymermarkt augenblicklich nur ca. 2% [2].

Im Bereich der Hochleistungs-TPU liegt die natürliche Meßlatte für die Anforderungen sehr hoch. Denn diese Werkstoffe sind aufgrund ihres erwünschten linearen Aufbaus auf nicht verzweigte, exakt zweifunktionelle Grundrohstoffe angewiesen. Kettenverzweigungen reduzieren die Abriebbeständigkeit und das hochwertige dynamische Eigenschaftsbild, welches aber im Rahmen von fluidtechnischen Applikationen vom Anwender erwartet wird.

Mit einem weltweit aktiven Rohstoffhersteller war es möglich, ein Makrodiol maßzuschneidern, das für die TPU-Synthese zu 30% aus einem biogenen Grundstoff aufgebaut ist, dessen Herkunft nicht in Konkurrenz zu Nahrungsmitteln steht, und das quasi aus organischen Abfällen hervorgeht. Aus diesem Makrodiol wurde der Prototyp VP 245 hergestellt, dessen wichtigste physikalische Eigenschaften in **Tabelle 1** dargestellt sind. Hervorgerufen durch den relativ unpolaren Aufbau am Makrodiol, führt dies am resultierenden TPU zu einer hohen Phasenabscheidung, die im Weiteren die perfekte Ausprägung der Hartsegmentdomänen ermöglicht, was dann zu den hervorragenden Abriebwerten in **Tabelle 2** führt. Durch den niedrigen Abriebwert und das generell hochwertige Eigenschaftsniveau motiviert, wurden weitere Versuche im Labor mit folgenden Zielsetzungen gestartet:

- Quellungen in Test-Mineralölen: IRM 901 und IRM 903
- Hydrolytischer Abbau in heißem Wasser (6 Wochen)
- Verträglichkeitstests in synthetischem Ester (HEES) (6 Wochen)

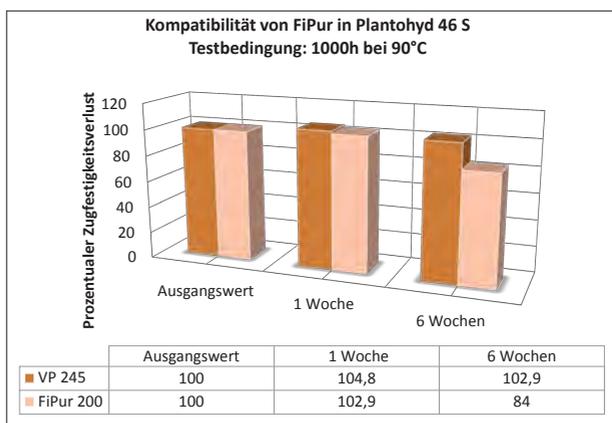
Härte (Shore A)	Zugfestigkeit (MPa)	Reißdehnung (%)	Weiterreißfestigkeit (N/mm)	DVR (%) 70h/70°C	DVR (%) 70h/100°C
94	45,6	353	113	19,1	29,3

Tabelle 1: Wichtigste physikalische Eigenschaften von VP 245 (Quelle: Fietz Automotive GmbH)

	VP 245	FiPur 100	FiPur 200
mm ³	11	17	20

Tabelle 2: Abrieb nach DIN/ISO 4649 (Quelle: Fietz Automotive GmbH)

Bild 7: Kompatibilität von VP 245 im Vergleich zu FiPur 200 in Plantohyd 46 S
(Bild: Fietz Automotive GmbH)



Sowohl hinsichtlich der Quellung in Mineralöl als auch des Dauer-Hydrolysetests, wurden mit VP 245 gute bis sehr gute Resultate erzielt. In IRM 903 (Testöl und quellstärkste Mineralölqualität) ermittelte man 8% Volumenquellung. Im Dauer-Hydrolysetest konnte man nach 1.000 h einen marginalen Zugfestigkeitsverlust von ca. 10% feststellen.

Zu guter Letzt galt es, Beständigkeiten in marktrelevanten Gebrauchsmedien zu ermitteln. Nachdem die Testergebnisse in reinen Mineralölen positiv ausgefallen waren, sollten hier biologisch leicht abbaubare Schmierstoffe näher untersucht werden werden (Bild 7). Als Testgrundlage zur Untersuchung auf Verträglichkeit verwendete man einen synthetischen Ester (Plantohyd 46 S). Das Ergebnis konnte überzeugen. Nach sechswöchiger Beaufschlagung mit der Druckflüssigkeit auf Basis von HEES (synthetischer Ester) war kein relevanter Abbau für VP 245 zu verzeichnen. Ebenfalls (nicht in Bild 7 wiedergegeben) lag man hinsichtlich der Volumenquellung bei sicheren 2,4%.

Der hier betrachtete VP 245 beinhaltet, hochgerechnet auf die Gesamtformulierung, ca. 20% nachwachsenden Rohstoff. In Absprache mit dem Rohstoffhersteller verfügt man bereits über ein Makrodiol, das einen wesentlich höheren Anteil an Biorohstoff beinhaltet und damit vieles für die Zukunft erhoffen lässt.

Fazit

Es wird sicherlich noch einige Zeit vergehen, bis TPU mit überwiegendem Anteil an regenerativen Rohstoffen und gleichzeitig höchster Leistungsfähigkeit am Dichtungsmarkt etabliert werden können. Doch wenn die Zeit reif ist, werden Dichtungshersteller, die sich diesem Thema gegenwärtig flexibel und mit angemessener Forschungstiefe stellen, auf diesem Markt die dominante Rolle spielen.

Literatur

[1] Bock, Wolfgang: **Hydraulik-Fluide als Konstruktionselement**, Vereinigte Fachverlage GmbH, Mainz

[2] KM - Kunststoff Magazin Online, www.kunststoff-magazin.de vom 23.05.2018

Biokraftstoffkompatibilität in Balance

Neue Dichtungswerkstoffe vereinen Medienbeständigkeit und Tieftemperatureignung

Die Verbindung von sehr guter Biokraftstoffkompatibilität mit exzellenten Tieftemperatureigenschaften ist für die Automobilindustrie von großer Bedeutung. Die Änderung regulatorischer Randbedingungen sowie die Erschließung neuer Märkte stoßen Neuentwicklungen in diesem Bereich verstärkt an. So wurden FKM-Werkstoffe mit einem TR10-Wert von -30 °C , -35 °C , -40 °C und -45 °C entwickelt, deren relative Änderung der physikalischen Eigenschaften nach Lagerung in FAM B, E85 und KGS (VW Erstbefüllkraftstoff) vergleichbar sind. Weiterhin wurde die Leistungsfähigkeit dieser Werkstoffe im Hinblick auf Dichtungsfähigkeit bei sehr tiefen Temperaturen über Untersuchungen des Druckverformungsrestes bei -25 °C bis zu -50 °C hin untersucht.

Biokraftstoffe haben in den letzten zehn Jahren einen immer größeren Stellenwert im weltweiten Kraftstoffpool erhalten. Umweltpolitische wie auch strategische Untersuchungen haben zu gesetzlichen Vorschriften geführt, wie z.B. zu der Zielstellung, dass im Jahr 2020 mindestens 10% des Kraftstoffverbrauchs im Transportsektor über erneuerbare Energieträger realisiert werden muss [1]. Parallel dazu erschließen der Transportsektor, präziser die Automobilindustrie, neue Märkte im Osten, wie z.B. in Russland. Dort stehen moderne Fahrzeugaggregate – und auch die sich darin befindlichen Dichtungssysteme – neuen Herausforderungen in Bezug auf Tieftemperatureigenschaften gegenüber.

Die Kombination von Biokraftstoffen mit sehr niedrigen Anwendungstemperaturen ist eine Herausforderung für Dichtungen, selbst für jene, die aus Hochleistungsmaterialien wie Fluorkohlenstoffelastomeren (FKM) hergestellt sind. Medienbeständigkeit hängt typischerweise eng mit dem Fluorierungsgrad der Polymerhauptkette zusammen. Je höher der Fluorierungsgrad, desto besser die Medienbeständigkeit. Gleichzeitig gilt aber auch: Je höher der Fluorierungsgrad, desto schlechter die Kälteflexibi-

Von Dr. Heinz-Christian Rost, Technology and Innovation Manager
Parker Hannifin Manufacturing Germany GmbH & Co. KG, Engineered Materials Group Europe,
Prädifa Technology Division | www.parker.com/praedifa

Übersicht				Neue Generation		
Typ		V8989-80	E1	E2	E3	
Polymer		FKM	FKM	FKM	FKM	
Farbe		schwarz	schwarz	schwarz	schwarz	
Eigenschaft	Einheit	V8989-80	E1	E2	E3	Prüfmethode
Härte	Shore A	84	84	84	83	DIN 53505
Zugfestigkeit	N/mm ²	16,7	14,8	13,5	11,2	DIN 53504
Reißdehnung	%	154	166	174	169	DIN 53504
Modul (100%)	N/mm ²	10,6	8,4	7,5	6,5	DIN 53504
TR10-Wert	°C	-29	-35,5	-39,9	-44,9	ASTM D 1329
DVR (24h / 200°C)	%	23	25	25	26	ISO 815 a

Tabelle 1: Ausgangswerte der betrachteten Compounds

(Quelle: Parker Hannifin GmbH)

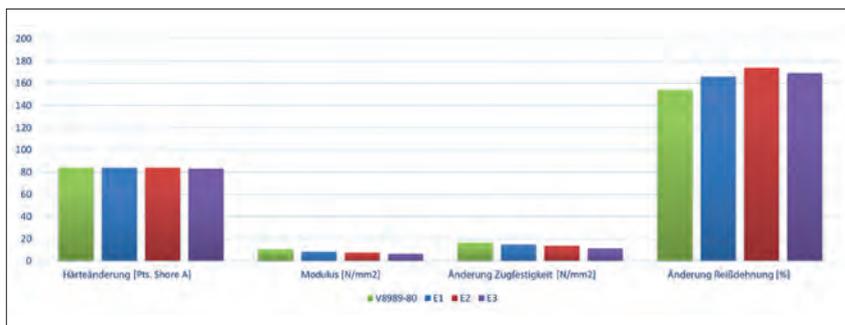


Bild 1: Graphische Darstellung der Ausgangswerte der betrachteten Compounds

(Bild: Parker Hannifin GmbH)

lität, da die Flexibilität der Polymerhauptkette abnimmt. Dies steht offensichtlich im Gegensatz zu den heutigen Anforderungen der Automobilbranche, die eine sehr gute Biokraftstoffkompatibilität in Kombination mit exzellenten Tieftemperatureigenschaften fordert.

In der vorliegenden Studie wurden FKM-Compounds formuliert, die eine Kälteflexibilität von -30 °C, -35 °C, -40 °C und -45 °C besitzen bei gleichzeitigem Fokus auf eine sehr gute Medienbeständigkeit. **Tabelle 1** fasst das Eigenschaftsprofil der benannten Compounds zusammen. Eine graphische Darstellung der Ausgangswerte zeigt **Bild 1**.

Eigenschaft	Wert	V8989-80	E1	E2	E3
TR10-Wert	°C	-29	-35,5	-39,9	-44,9
nach FAM-B-Alterung					
Härte	Pts.Shore A	77	76	76	74
Zugfestigkeit	N/mm ²	12,6	9,5	9,2	7,7
Reißdehnung	%	140	154	162	145
Gewichtsänderung	%	6,5	7,3	7,8	7,5
nach E85-Alterung					
Härte	Pts. Shore A	80	78	78	79
Zugfestigkeit	N/mm ²	14,1	11,2	10,3	8,1
Reißdehnung	%	146	164	179	155
Gewichtsänderung	%	3,0	3,6	4,2	4,0
nach KGS-Alterung					
Härte	Pts. Shore A	77	75	75	73
Zugfestigkeit	N/mm ²	12,5	10,8	9,3	7,2
Reißdehnung	%	137	164	162	137
Gewichtsänderung	%	6,1	6,6	7,3	6,9

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften nach einem Standard-Einlagerungstest in FAM B/ E85/KGS (168 h/RT)

(Quelle: Parker Hannifin GmbH)

Eigenschaftsprofile auf hohem Niveau

Der Einfluss der aggressiven Biokraftstoff-Prüfmedien FAM B, E85 und eines weiteren Prüfmediums, KGS (VW-Erstbefüllkraftstoff), auf die Änderung der physikalischen Eigenschaften wurde betrachtet. Durch den Einsatz von fortschrittlichen Formulierungsstrategien ist die relative Änderung der Medienkompatibilität der betrachteten Compounds auf einem sehr guten Niveau. **Tabelle 2** fasst die entsprechenden mechanischen Eigenschaften nach der Lagerung in FAM B, E85 und KGS zusammen. In **Tabelle 3** ist die relative Änderung der mechanischen Eigenschaften zusammengefasst:

Die balancierten Änderungen des jeweiligen Eigenschaftsprofils pro Alterungsuntersuchung zeigen sich auch in **Bild 2, 3 und 4**. Die relative Änderung der Leistungsfähigkeit der Compounds mit -30 °C / -35 °C / -40 °C und -45 °C Kälteflexibilität ist vergleichbar.

Eigenschaft	Wert	V8989-80	E1	E2	E3
TR10-Wert	°C	-29	-35,5	-39,9	-44,9
nach FAM- B- Alterung					
Härteänderung	Pts.Shore A	-7	-8	-8	-9
Änderung Zugfestig.	N/mm ²	+25	+36	+32	+31
Änderung Reißdehn.	%	+9	+7	+7	+17
Gewichtsänderung	%	+6,5	+7,3	+7,8	+7,5
nach E85-Alterung					
Härteänderung	Pts. Shore A	-4	-6	-6	-5
Änderung Zugfestig.	N/mm ²	+16	+24	+24	+28
Änderung Reißdehn.	%	+5	+1	-3	+8
Gewichtsänderung	%	+3,0	+3,6	+4,2	+4,0
nach KGS-Alterung					
Härteänderung	Pts. Shore A	-7	-9	-9	-10
Änderung Zugfestig.	N/mm ²	+25	+27	+31	+36
Änderung Reißdehn.	%	+11	+1	+7	+19
Gewichtsänderung	%	+6,1	+6,6	+7,3	+6,9

Tabelle 3: Änderung der mechanischen Eigenschaften nach einem Standard-Einlagerungstest in FAM B/ E85/KGS (168 h/RT)

(Quelle: Parker Hannifin GmbH)

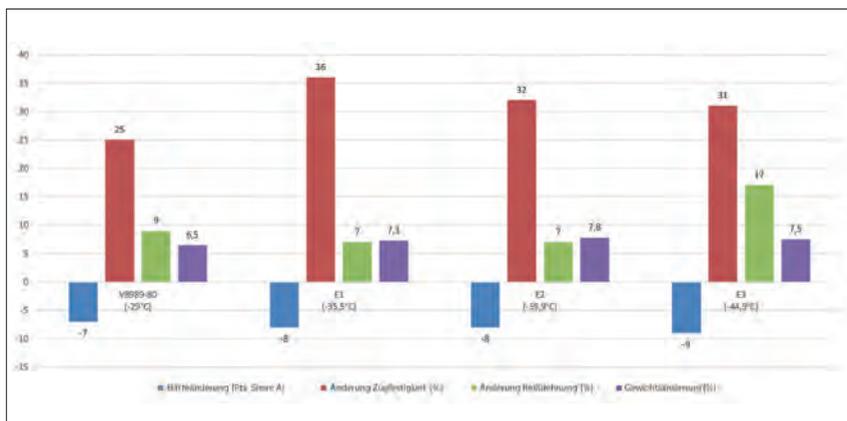


Bild 2: Änderung des Eigenschaftsprofils der betrachteten Compounds nach einer Medienlagerung in FAM B, durchgeführt bei Raumtemperatur für 168 h

(Bild: Parker Hannifin GmbH)

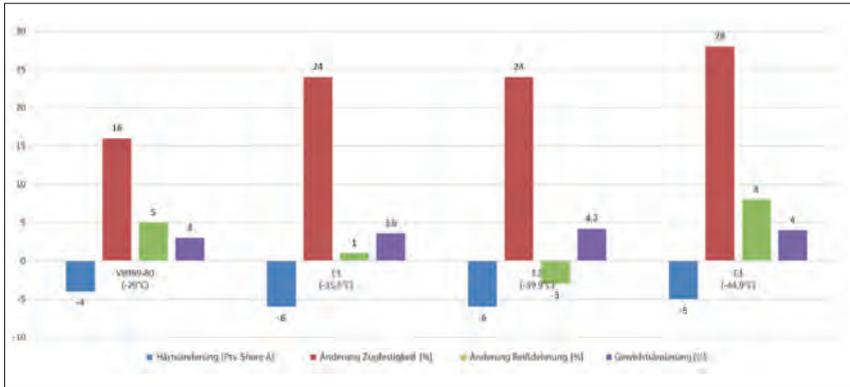


Bild 3: Änderung des Eigenschaftsprofils der betrachteten Compounds nach einer Medienlagerung in E85, durchgeführt bei Raumtemperatur für 168 h

(Bild: Parker Hannifin GmbH)

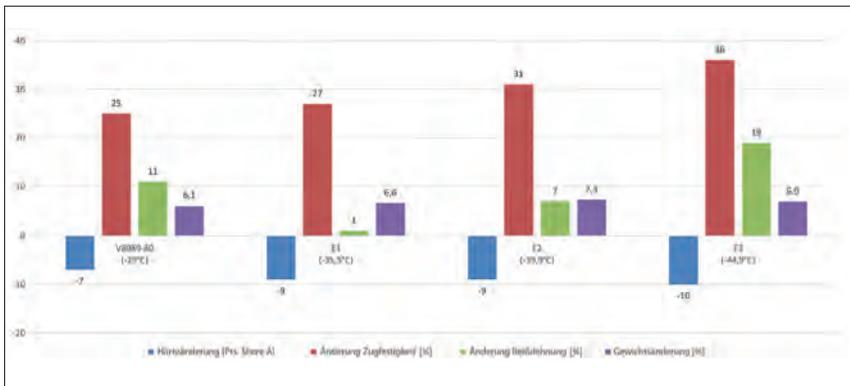


Bild 4: Änderung des Eigenschaftsprofils der betrachteten Compounds nach einer Medienlagerung in KGS, durchgeführt bei Raumtemperatur für 168 h

(Bild: Parker Hannifin GmbH)

Dichtungsleistung unter extremen Bedingungen

Um die Dichtungsfähigkeit der verschiedenen Tieftemperatur-Compounds zu evaluieren, wurde der Druckverformungsrest sowohl bei hohen Temperaturen (200 °C, siehe **Tabelle 1**), wie auch sehr niedrigen Temperaturen (-25 °C / -30 °C / -35 °C / -40 °C / -45 °C / -50 °C, siehe **Tabelle 4**) untersucht. Die Prüfungen wurden nach DIN ISO 816-2 am 6 mm Prüfknopf durchgeführt. In **Tabelle 4** sind die Ergebnisse der Tieftemperaturexperimente dargestellt.

Eigenschaft	Einheit	V8989-80	E1	E2
TR10-Wert	°C	-29	-35,5	-39,9
DVR bei -25 °C	%	53	–	–
DVR bei -30 °C	%	68	56	–
DVR bei -35 °C	%	85	70	55
DVR bei -40 °C	%	98	87	71
DVR bei -45 °C	%	–	99	87
DVR bei -50 °C	%	–	–	99

Tabelle 4: Druckverformungsrest der betrachtenden Compounds bei sehr tiefen Temperaturen nach DIN ISO 816-2 / 6 mm Prüfkopf (Quelle: Parker Hannifin GmbH)

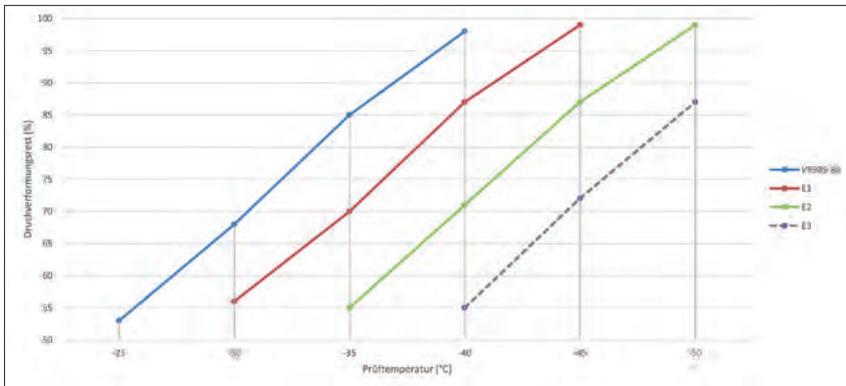


Bild 5: Extrapolation der Druckverformungsrestwerte auf ein Compound E3 mit einer Kälteflexibilität von -45 °C (grau dargestellt) (Bild: Parker Hannifin GmbH)

In Abhängigkeit der Prüftemperatur lässt sich eine lineare Verschiebung des Druckverformungsrests eines FKM-Compounds mit einer Kälteflexibilität von -30 °C zu -35 °C zu -40 °C beobachten. Es ist klar ersichtlich, dass aktuelle Dichtungslösungen mit einer Kälteflexibilität von -30 °C bei einer Anwendungstemperatur von -40 °C an ihre Grenzen stoßen. Um eine hohe Leistungsfähigkeit der Dichtungen bei sehr tiefen Anwendungstemperaturen gewährleisten zu können, ist eine Kälteflexibilität des FKM-Compounds von -40 °C, besser noch -45 °C, empfehlenswert.

Dies wird besonders deutlich, wenn der ersichtliche Trend im Verlauf der Druckverformungsrestwerte bei -30 °C, -35 °C und -40 °C weiterführt und auf Druckverformungsrestwerte bei -45 °C extrapoliert. Dies ist in **Bild 5** dargestellt.

Betrachtet man die erhaltenen und den extrapolierten Druckverformungsrestwert/e bei -40 °C Prüftemperatur, erhält man für das Compound E3 (Kälteflexibilität: -45 °C) einen Druckverformungsrestwert von 55%, während bereits für das Compound E2 (Kälteflexibilität: -40 °C) ein Druckverformungsrest von über 70% ermittelt werden konnte. In puncto Anwendungssicherheit bei hoch belastbaren Dichtungslösungen ist hier klar das Compound E3 mit einer Kälteflexibilität von -45 °C zu bevorzugen.

Biokraftstoffkompatibilität + Tieftemperatureigenschaften = Dichtungsleistung bei sehr tiefen Temperaturen

Die Verbindung von exzellenter Beständigkeit gegenüber Biokraftstoffen mit einer Kälteflexibilität von bis zu -45 °C ermöglicht es, neuen Dichtungslösungen selbst bei sehr tiefen Anwendungstemperaturen eine sehr gute Dichtungsleistung zu gewährleisten. Die neuen Werkstoffgenerationen leisten damit einen signifikanten Beitrag zu verlässlichen Anwendungen im Automobilbereich unter herausfordernden Anwendungsbedingungen.

Literatur

[1] USDA Foreign Agricultural Service / EU-27 EU Biofuels Annual 2012, issued 25th of June 2012

Compounds 
rubber solutions



von der Mischungsentwicklung
bis zum fertigen Profil
alles aus einer Hand

hohe Qualität und Präzision

Entwicklungspartner für Ihr
spezifisches Projekt

eigene Werkzeugkonzepte
für Spezialprofile und
Spezialwerkstoffe

diskontinuierlich in Dampf
vulkanisierte Spezialprofile und
Rundschnüre

**IHRE REZEPTUR
ZUM ERFOLG**

SealFlex 
a Compounds AG brand

Compounds AG
Barzloostrasse 1 · CH-8330 Pfäffikon/ZH

www.compounds.ch

Wirtschaftlichkeit und Sicherheit erhöhen

Für Multifunktionsdichtungen die Fibrillenstruktur von PTFE nutzen

Die Integration verschiedener Funktionen in Bauteile oder Baugruppen ist eine der wichtigsten Maßnahmen für hohe Zuverlässigkeit in der Anwendung sowie Wirtschaftlichkeit in der Problemlösung. Mit jeder integrierten Funktion vermindert sich die Anzahl der Bauteile, die zur Lösung einer Problemstellung erforderlich sind. Dadurch verringert sich das Risiko der Fehlfunktion, der Komplexität der Fertigungsverfahren und das Risiko des Ausfalls im Einsatz. Signifikant erhöht sich auch die Wirtschaftlichkeit der Gesamtlösung. Ein Beispiel sind funktionsintegrierte Membranen und Dichtungen aus expandiertem PTFE (ePTFE).

PTFE bietet neben den bekannten Vorteilen wie universeller Beständigkeit gegenüber fast allen Medien, der breiten Dauergebrauchstemperatur von -250 °C bis $+250\text{ °C}$, den exzellenten Antihaft-Eigenschaften und der Fähigkeit, nicht zu altern oder spröde zu werden, weitere außergewöhnliche Eigenschaften, die sich aus dem extrem hohen Molekulargewicht dieses Hochleistungspolymers ableiten. Hierzu zählt die Fähigkeit der Fibrillenbildung unter Zugbelastung: Sie entstehen durch lineare Anordnung der PTFE-Molekülketten und zeichnen sich durch einen nahezu idealen Ordnungszustand aus (**Bild 1**). Dieser wird z.B. über das DSC-Messverfahren (DSC = Differential Scanning Calorimetrie/Differenzialthermoanalyse) quantifizierbar. Während im teilkristallinen Aufbau des gesinterten PTFE die amorphen Bereiche schon durch vergleichsweise geringen Energieeintrag bei 142 °C schmelzen, tritt dies beim Kristallinanteil erst bei 327 °C auf. Die Kristallinanteile des ungesinterten PTFE schmelzen sogar erst bei 342 °C , ein Indiz für die besonders geordnete und defektarme Kristallitstruktur des direkt aus der Polymerisation ausgefällten hochkristallinen Polymers. Nochmals 30 °C mehr, also ca. 372 °C , sind erforderlich, um die in Fibrillen organisierten Makromoleküle in Bewegung zu versetzen, also aufzuschmelzen. Diese insgesamt vier verschiedenen „Aggregatzustände“ des expandierten PTFE, vereint in einem einzigen Polymer-

Von Dr. Michael Schlipf¹, Geschäftsführer; Dipl.-Ing. (FH) Detlef Reichl², Geschäftsführer

¹ FPS GmbH,

² FluorTex GmbH | www.fluortex.de

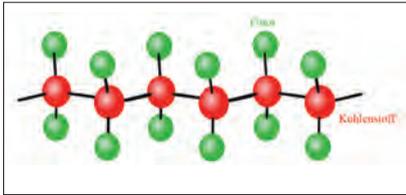


Bild 1: Das PTFE-Molekül mit seinem hohen Molekulargewicht von bis zu 1×10^8 g/mol kann organisiert sein in amorphen, ungeordneten Bereichen, in Kristalliten und in Fibrillen (Bild: FPS GmbH)

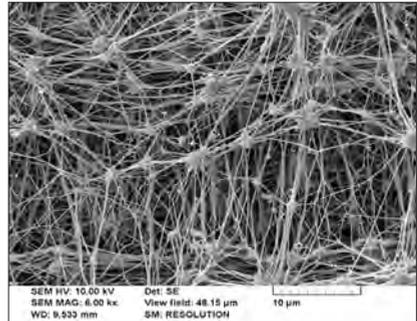


Bild 2: Multidirektional expandiertes PTFE mit seiner Struktur feinsten Fibrillen

(Bild: FluorTex GmbH)

substrat, ermöglichen neuartige Eigenschaftsprofile, neue Verarbeitungsprozesse und Anwendungen mit Eigenschaftsprofilen, die bisher in dieser Art nicht möglich waren.

Mono- und multidirektionale Expansion

Durch spezielle Expansionsprozesse bei erhöhten Temperaturen, bei denen die Molekülketten leicht gegeneinander abgleiten können, entstehen Fibrillenstrukturen von höchstem Orientierungsgrad, die durch Knötchen von ungerecktem PTFE miteinander verknüpft sind. Dieses 100 % reine PTFE, das üblicherweise in Membranstärken von ca. $25 \mu\text{m}$ hergestellt wird, weist nur noch ein Flächengewicht von ca. 10 g/m^2 auf. Die effektive Dichte beträgt ca. $0,4 \text{ g/cm}^3$, was einem Porositätsgrad von ca. 80% entspricht. In unveränderter Form werden diese porösen Dichtungen, z.B. in Ventilationsöffnungen zum Schutz gegen Wasser- und Schmutzeintritt und in Gehäusen von Elektro-/Elektronikkomponenten, vor allem in Gegenständen des Haushalts und in Kraftfahrzeugen eingesetzt. Auch in Smartphones wird die Membran eingesetzt: Mit einem Durchmesser von nur ca. 2 mm findet sie in den Lautsprechern und Mikrofonen Verwendung. Dort gewährleistet sie den sicheren Betrieb dieser Elektronikgeräte auch „unter der Dusche“ und ist dabei gleichzeitig vollständig offen gegenüber ein- und austretendem Schall. Die wasser- und schmutzabweisende Wirkung entfaltet sie durch die unpolaren antihaft-Eigenschaften des PTFE, während die Gasdurchlässigkeit durch den hohen Porositätsgrad gegeben ist (**Bild 2**).

Die enge Zusammenarbeit zwischen Polymerhersteller und -verarbeiter ist erforderlich, um poröse Strukturen von multidirektional expandiertem PTFE der neuen Generation herstellen zu können. Zunächst ist es erforderlich, dass die durch Expansion

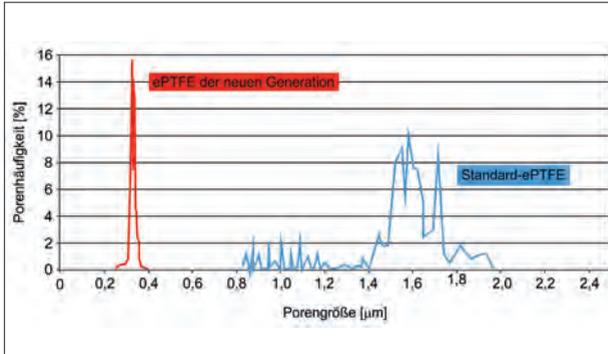


Bild 3: Porengrößen und -verteilung in multidirektional expandiertem ePTFE: rechts – Standard-Membrane, links – Neuentwicklung mit besonders kleinen Poren und enger Porengrößenverteilung

(Bild: FluorTex GmbH)

Parameter	Dimension	Typischer Wert	Möglicher Wertebereich
Spez. Gewicht	g/m ²	10	6 – 20
Dicke	µm	20	15 – 40
Volumen / Fläche	cm ³ /m ²	20	9 – 80
Effektive Dichte	g/cm ³	0,50	0,35 – 0,55
Porositätsgrad	%	77	75 – 85

Tabelle 1: Typische Eigenschaften von multidirektional gereckten ePTFE-Membranen

(Quelle: FPS GmbH)

gebildeten PTFE-Fibrillen eine möglichst einheitliche Länge aufweisen, und zwar auch dann, wenn richtungsabhängig unterschiedliche Expansionsverhältnisse zur Membranherstellung erforderlich sind. Hier ist der Rohstoffhersteller gefordert, durch das Design des kristallinen Aufbaus des Emulsionspolymerisats die entsprechenden Voraussetzungen zu schaffen. Der Polymerverarbeiter muss dann die Bedingungen der Verstreckung des ungesinterten PTFE so steuern, dass über einen weiten Dehnbereich die erforderliche Reckkraft vom Expansionsverhältnis praktisch unabhängig ist. Nur dann gelingt es, die in **Bild 3** dargestellte Porengrößenverteilung zu erzeugen: Im Gegensatz zu Standard-ePTFE, für das Porengrößen in einem breiten Bereich von 0,8 bis 2,0 µm typisch sind, weist das ePTFE der neuen Generation eine extrem enge Porengrößenverteilung auf, dessen Maximum der Porenhäufigkeit bei ca. 0,3 µm liegt. Die durchschnittliche Porengröße dieser Neuentwicklung liegt damit unterhalb des bisher üblichen Porengrößenbereichs. Da der Porositätsgrad aber den bisher üblichen Produkten sehr nahe kommt, ist es damit zum ersten Mal gelungen, sehr hohe Luftdurchsätze mit ausgezeichneter Barrierewirkung gegenüber Feinstaub < 1 µm mit der Sperrwirkung gegen flüssiges Wasser zu verbinden..

Typische Eigenschaften und Anwendungen

Multidirektional gereckte ePTFE-Membranen haben verschiedene typische Eigenschaften (**Tabelle 1**) und sind damit z.B. für Öffnungen zur Ventilation geeignet. Hier bieten sie Schutz gegen Eindringen von Wasser und Schmutz und lassen sich in die Gehäuse elektronischer Bauteile integrieren. Einsatzbereiche sind Anwendungen der Automobilindustrie bzw. andere Outdoor-Verwendungsmöglichkeiten sowie in der Consumer-

Elektronik. Neben der Verbraucherelektronik wie Smartphones, Tablets etc. gibt es auch Einsatzbereiche in der Mess- und Regeltechnik. Die herausragende Eigenschaft in Smartphone-Anwendungen (**Bild 4**) ist die nur geringe akustische Dämpfung, verbunden mit einer exzellenten Hydrophobizität. Mit einer typischen Membranstärke von 15 μm und einer Öffnungsüberspannung von 1,5 bis 2,3 mm lässt sich der Eintritt von Wasser bei einer Wassersäule von 3 m (Schwimmbecken) über eine Stunde sicher vermeiden (Anforderungen entsprechend IP 68).



Bild 4: In Lautsprechern und Mikrofonen von Smartphones sind multidirektional gereckte ePTFE-Membranen integriert, die die Öffnungen von ca. 2 mm überspannen und dadurch Funktion und Schutz miteinander verbinden (Bild: FluorTex GmbH)

Fertigungsverfahren zur Funktionsintegration

Zur Anpassung an das jeweils geforderte Eigenschaftsprofil ist es ggf. erforderlich, multi-Schichtlamine aus expandierten Basismembranen und geeigneten Trägermaterialien herzustellen um dadurch einerseits größere Barrierewirkung gegenüber Wasser, andererseits jedoch auch höhere mechanische Festigkeiten und größere Schichtdicken zu generieren. Dies ist einerseits z.B. über Druckaufbau möglich, wobei die Lage der Schmelzpunkte der vorweg beschriebenen, Aggregatzustände des PTFE es ermöglichen, die Schichten fest miteinander zu verbinden, unter vollständiger Beibehaltung der festigkeitsgebenden Fibrillenstruktur. Andererseits ist dies aber auch möglich über die Verbindung zwischen thermoplastischen Basismaterialien und expandiertem PTFE.

Die sichere Verankerung der porösen Dichtung in der betreffenden Baugruppe, z.B. durch Umspritzen mit einem thermoplastischen Kunststoff, erfordert die partielle Überführung des Membranwerkstoffes in ein entsprechend festes Substrat. Dies kann in Prozessen von höchster Wirtschaftlichkeit erfolgen, wie es z.B. in **Bild 3** dargestellt ist. Aus dem Multi-Schichtlaminat wird im Rolle-zu-Rolle-Verfahren über Prägetechnik

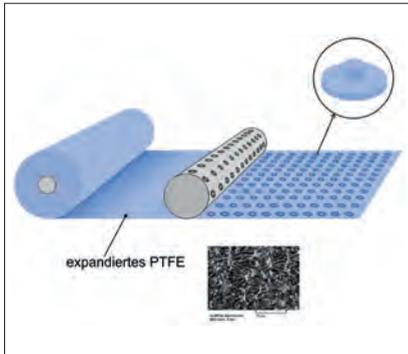


Bild 5: Multidirektional expandiertes PTFE erhält über Prägetechnik die gewünschte Eigenschaftskombination: Hohe Porosität im Zentrum zur Verwendung als Ventilationskörper, z.B. in Elektro- oder Elektronikgehäusen zum Ermöglichen des Druckausgleichs bei gleichzeitiger Barriere gegenüber flüssigem Wasser oder Schmutz, kombiniert mit einer festen Zone entlang des Umfangs, die durch Umspritzung mit einem thermoplastischen Kunststoff die Integration in die Baukomponente ermöglicht (Bild: FPS GmbH)

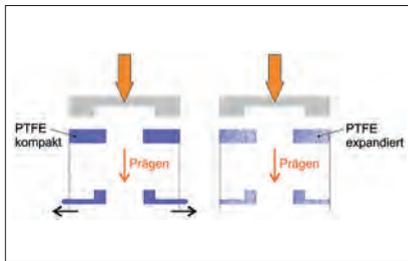


Bild 6: Während kompaktes, gesintertes PTFE unter Druckbelastung zu fließen beginnt und dadurch seine Form verändert, zeigt multidirektional expandiertes PTFE diese Tendenz nicht (Bild: FPS GmbH)

das gewünschte Endprodukt in großer Stückzahl gefertigt. Über die Gestaltung des Prägestempels wird dabei die Kontur des Endproduktes definiert. Im Gegensatz zu kompaktem, gesintertem PTFE ist bei kompaktiertem, expandiertem ePTFE-Membranen eine feste Anbindung durch Anschmelzen an poröse Thermoplaste unter gleichzeitiger mechanischer Verankerung der porösen ePTFE Membran auf deren Oberfläche möglich (Bild 5).

Höchste Präzision und Festigkeit dank Fibrillenstruktur

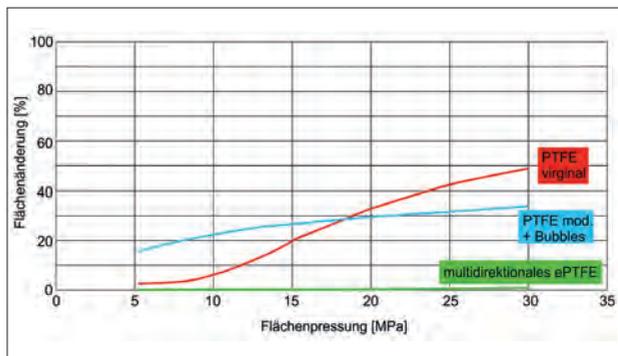
Einer der Nachteile von gesintertem, kompaktem PTFE ist dessen Tendenz, unter Druckbelastung zu fließen. Dieses als „Kaltfluss“ oder auch „Deformation unter Last“ bekannte Phänomen ist bei kompaktiertem PTFE aus multidirektional expandiertem PTFE aufgrund der beschriebenen Struktur aus hochfesten Fibrillen nicht mehr existent. Eine der Auswirkungen dieser Besonderheit auf entsprechende Fertigungsverfahren ist in Bild 6 näher beschrieben: Wird ein Substrat aus gesintertem, kompaktem PTFE, z.B. eine ringförmige Scheibe, mittels Prägestempel im Außenbereich einer starken Druckbelastung unterworfen (links dargestellt), so nimmt es die Geometrie des Prägestempels an, wobei das Material unter Fließen nach außen seine Kontur ver-

Parameter	Dimension; Messbedingungen	Kennwert nach EN 13555
Qmin	40 bar He; 0,01 mg/(s*m)	27 MPa
Q5min	QA=30 MPa; 40 bar He; L=0,01	< 10 MPa
Q5max	23 °C	160 MPa
PQR	@ 23 °C (QA=30 MPa)	0,94
PQR	@ 120 °C (QA=30 MPa)	0,90

Tabelle 2: Dichtungskennwerte einer aus multidirektionalem ePTFE hergestellten Flachdichtung [1] Die Anforderungen der TA-Luft werden eingehalten (Quelle: FPS GmbH)

Bild 7: PTFE-Materialien im Vergleich: Fließen unter Last bei 23 °C: Das Setzverhalten von Flachdichtungen unter dem Einfluss der Flächenpressung kann über die Flächenvergrößerung quantitativ erfasst werden

(Bild: FluorTex GmbH)



ändert. Ganz anders verhält sich multidirektional expandiertes, poröses PTFE, rechts dargestellt. Unter dem Einfluss der Druckbelastung erfolgt eine Verdichtung der porösen Struktur im Außenbereich, jedoch ohne dass dadurch ein „Fließen“ einsetzt. Die Bauteilverformung wird durch den anfangs hohen Porositätsgrad ermöglicht, wobei die Fibrillenstruktur das Fließen des Werkstoffs nach außen wirksam verhindert. Auf diese Art lassen sich Bauteile mit höchster Präzision herstellen.

Verhalten verschiedener Flachdichtungswerkstoffe im Vergleich

Durch Herstellung von Verbundplatten aus einer Vielzahl an Lagen multidirektional expandierter ePTFE-Membranen erhält man den Basiswerkstoff für die Herstellung von Flachdichtungen. Diese werden entsprechend den Flanschmaßen aus den Platten ausgeschnitten. Dank der porösen Struktur eignet sich dieser Dichtungstyp insbesondere für Flansche, die nur niedere Anzugsmomente zulassen, z.B. GFK-Flansche, oder emaillierte Flansche. Darüber hinaus eignen sie sich für die Abdichtung von Glasapparaturen.

Dank der Fibrillenstruktur zeigen diese Flachdichtungen eine gute Anpassungsfähigkeit auch an unebene Flansche und gleichen Unebenheiten durch unterschiedliche Verdichtungsgrade wirkungsvoll aus. Hinsichtlich der Fähigkeit zur Dickenänderung sind sie Flachdichtungen aus kompaktem PTFE und PTFE-Compounds überlegen. Während des Verdichtungsprozesses beim Einbau in den Flansch nehmen alle Fasern unabhängig von der Orientierung auftretende Kräfte auf und sind der Garant für eine hohe Längs- und Querfestigkeit. In der Folge sind Flachdichtungen aus multidirektional gerecktem ePTFE kaltflussfrei. Der Nachweis erfolgt über die Erfassung der Flächenvergrößerung beim Einbau in den Flansch. **Tabelle 2** und **Bild 7** zeigen das Verhalten unterschiedlicher Flachdichtungsmaterialien in Abhängigkeit von der Flächenpressung hinsichtlich der Flächenvergrößerung im Vergleich.

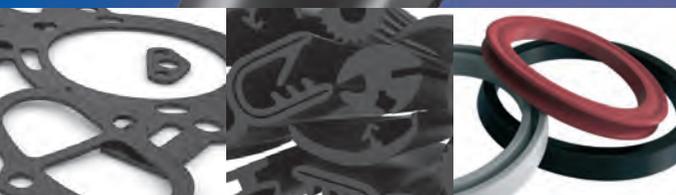
Fazit

Die verschiedenen Erscheinungsformen des expandierten PTFE mit seinen amorphen, kristallinen und fibrillenartigen Strukturelementen ermöglichen die Integration verschiedener Funktionen in einem Bauteil durch maßgeschneiderte Fertigungsverfahren. Da sich die Schmelztemperaturen der unterschiedlichen Struktureinheiten deutlich voneinander unterscheiden, ist eine separate Veränderung der Einzelphasen möglich, ohne dass dabei die jeweils anderen Bereiche verändert werden. Mit der Herstellung von ePTFE der neuen Generation konnte die mittlere Porengröße nochmals verringert und die Porengrößenverteilung signifikant verengt werden. Als Ergebnis lassen sich Multifunktionsmembranen herstellen, die höchste Barrierewirkung gegenüber Flüssigkeiten wie z.B. Wasser mit ausgezeichneter Permeabilität gegenüber Gasen verbinden. Weichheit und Festigkeit lassen sich gleichzeitig in einem Bauteil realisieren und für die Herstellung kaltflussfreier Flachdichtungen optimal umsetzen.

Literatur

[1] Daten von multiFlon®, veröffentlicht auf www.Gasketdata.org

Statische Dichtungen/ Formteile/Profile



>> Berger S2B® – über 85 Jahre Erfahrung in der Elastomer- und Dichtungstechnik.
Technische Lösungen und Dienstleistungen für OEMs.

Schwachstellen eliminieren

Großdichtungen und -membranen nahtlos in Deutschland fertigen

Vieles in unserer technischen und globalen Welt wird extremer – das gilt auch für Großdichtungen und -membranen sowie ihre Beschaffung. Waren diese bis vor einem Jahr in nahtloser Ausführung und mit Durchmessern bis zu 3,2 m meist nur in Asien zu beschaffen, eliminiert ein „Made-in-Germany-Konzept“ verschiedene Schwachstellen.

Mit der Dichtungsbeschaffung aus Asien wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Erfahrungen gemacht, die zwar nicht alle schlecht waren, aber immer wieder potenzielle Schwachstellen des Global Sourcing deutlich machten. Interkulturelle Unterschiede bei komplexeren Projekten, Sprachbarrieren Qualität der Fertigung, Konformität der Werkstoffe und Mischungen, Logistik, Lieferzeiten etc. – dies alles waren und sind Aspekte, die man sich bei Global-Sourcing-Strategien genau anschauen muss. Bei Großdichtungen und -membranen (**Bild 1**), die i.d.R. eher ein Projektgeschäft und weniger ein Mengengeschäft sind, lohnt es sich, noch mal genauer hinzuschauen.

Aber nicht nur die Beschaffung von Bauteilen ist extremer geworden. Gleiches gilt für die Bauteile selber. Dichtungen und Membranen müssen – ungeachtet ihrer Größe – immer höheren Anforderungen gerecht werden. Hinsichtlich der Größe gibt es den Trend zur Miniaturisierung, aber auch einen steigenden Bedarf an Großdichtungen für Neuanlagen oder als Ersatzteil. Bei Ersatzteilen gilt es zudem oft, die Anlagenverfügbarkeit durch bessere Dichtungen zu erhöhen. Extremer wird auch die Menge der Werkstoffe und Compounds, die für Dichtungen und Membranen zum Einsatz kommen, um die geforderte Performance zu erreichen.

Bei diesen meist steigenden Anforderungen ist es natürlich naheliegend, auch konstruktive Schwachstellen von Dichtungen und Membranen zu eliminieren. Ein solche Schwachstelle können die Nähte sein, wenn die Bauteile aufgrund ihrer Größe aus mehreren Teilen hergestellt werden. Eine nahtlose Fertigung eliminiert dieses Problem. Allerdings kamen solche Großdichtungen und -membranen bisher aus China.

**Bild 1: Großdichtung
bis 3,2 m Durchmesser
für unterschiedlichste
Einsatzbereiche**

(Bild: Steinbach AG)



Nun sind Großdichtungen und -membranen keine einfachen C-Teile, die mal eben so bestellt werden. Sie erfordern eine umfangreiche Evaluierung. So sind bei jeder Anfrage verschiedene Punkte zu klären, die teilweise in eine Machbarkeitsstudie münden. So wurde eine Beispielanfrage nach vulkanisierten Folien bzw. Platten auf Basis von Silikon, EVA oder VKM mit einem Silikon 50 - 60 Shore A, weiß, einer Reißfestigkeit $< 7 \text{ N/mm}^2$ und einer Reißdehnung $< 550\%$ gelöst – allerdings erst nach intensiven Abstimmungen und Tests. Mit Ansprechpartnern, Know-how und Produktion in Deutschland lassen sich solche Projekte erfahrungsgemäß unkomplizierter als über tausende km Entfernung realisieren.

Im Vergleich zur Beschaffung in Asien ist natürlich immer der Preis ein Thema. Dass die Fertigung in Deutschland hier nicht konkurrenzfähig ist, ist ein Missverständnis. Ungeachtet der Gesamtkostenbetrachtung, die Einkäufer gerne mit Blick auf den günstigsten Stückpreis vernachlässigen, erlaubt bei diesem Konzept die Summe der Kosteneinsparungspotenziale bis hin zur optimalen Ausnutzung des Materials durchaus wettbewerbsfähige Preise.

Nähte können zur Schwachstelle werden

Dichtungen mit Fügenähten haben verschiedene Nachteile, die ihre Performance und damit die Anlagenverfügbarkeit negativ beeinflussen können. Eine Herausforderung ist es z.B., den richtigen Kleber zu finden. Dazu sind teilweise auch Tests notwendig, denn:

- Die Beständigkeit des Klebers ist nicht immer vergleichbar mit der Beständigkeit des Dichtungsmaterials. Auch das unterschiedliche Dehnungsverhalten des Klebers im Vergleich zur Dichtungs-Rohplatte muss berücksichtigt werden.

- Dichtungen werden bei falscher Auswahl des Klebers anfälliger und büßen u.U. mit der Zeit ihre Druck- und Chemikalienbeständigkeit ein.
- Ausgasungen im Einsatzumfeld können den Kleber angreifen und zur Zerstörung der Naht führen.
- Ist die optimale Wahl gefunden, erschweren Mindestmengen und Ablaufdaten teilweise Beschaffung und sichere Verarbeitung.

Zudem müssen noch Stufen- bzw. Stärkentangen innerhalb der Platten, Dichtungen und Membranen (je nach Stärke und Materialauswahl), die ggf. auftreten, angeschliffen werden. Eine Nahtherstellung bedeutet also bei sorgfältiger Vorgehensweise einen z.T. erhöhten Fertigungsaufwand. Darüber hinaus ist eine nahtlose Dichtung i.d.R. leichter zu montieren und zu handeln. Dies kann in Summe zu deutlichen Kosteneinsparungen im Vergleich zu Großdichtungen und Membranen mit Naht führen.

Projekte sorgfältig vorbereiten

Großdichtungen und Membranen sind keine Standardprodukte, die aus dem Katalog bestellt werden. Eine frühzeitige Kommunikation zwischen Anwender und Lieferant ist wichtig, um das optimale Ergebnis zu erzielen. Dabei sollte der Anwender verschiedene Unterlagen wie Zeichnungen bereitstellen und sich z.B. über folgende Anforderungen im Klaren sein:

- Abmessungen und mögliche Toleranzen
- Werkstoffe bzw. welche Alternativwerkstoffe können angeboten werden?
- Welche Normen und Qualitätsanforderungen müssen erfüllt werden?
- Einsatz in einer neuen Anlage, zur Optimierung einer Anlage oder Ersatz einer defekten Dichtung
- Bisher aufgetretene Probleme
- Einsatzparameter wie Bewegung, Betriebsdruck und -temperatur, Medienbeständigkeit, Reißfestigkeit, Schwingung im Bereich des Teiles, Flanschbeschaffenheit, Umgebungseinflüsse und sonstige außergewöhnliche Betriebszustände
- etc.

Da Großdichtungen, -stanzteile und -membranen in vielen Industriebereichen zum Einsatz kommen – im Maschinen- und Anlagenbau, im Schiffbau, in der Flugzeugindustrie sowie beim Rohrleitungs- und Pumpenbau – sind auch die Anforderungen von Projekt zu Projekt sehr unterschiedlich. Gleiches gilt für die Anwendungsmöglichkeiten für Membranen, die in diesem Verfahren hergestellt werden. Sie eignen sich z.B. für den Einbau in der Offshore- und in der Raffineriebranche.

Bild 2: Auf modernster Maschinenteknik werden mit viel Know-how nahtlose Dichtungen und Membrane bis 3,2 m Durchmesser gefertigt

(Bild: Steinbach AG)



Grundsätzlich spielt die Auswahl des richtigen Werkstoffes bzw. der Compounds – angesichts steigender Anforderungen an Dichtungen und Membranen – eine wichtige Rolle. Das mit der neuen Anlage verarbeitbare Material-Portfolio umfasst derzeit Silikon, NR, EPDM, CR und NBR sowie FKM. Die eingesetzten Elastomere erfüllen höchste Qualitätsansprüche, z.B. die Siemens-Norm SN 53145-1. Darüber hinaus sind sie beständig gegen Traftööl, Biogas und Biodiesel. Da die Entwicklung auch in diesem Bereich nicht haltmacht, wird kontinuierlich an neuen Mischungen gearbeitet, um das Material-Portfolio mit Blick auf immer speziellere Kundenbedürfnisse zu erweitern.

Nahtlos in Deutschland fertigen

Fertigungsanlagen für solche Dichtungen und Membranen sind Sondermaschinenbau. Bisher wurden solche Anlagen für ähnliche Dichtungs- und Membrangrößen nur in China hergestellt, weshalb man mit einem hiesigen Maschinenbauer in die Entwicklung ging, denn auch die Maschinen sollten „Made in Germany“ sein. Nach zwei Jahren Entwicklungs- und Aufbauzeit ist die Anlage (**Bild 2**) seit letztem Jahr in Betrieb. Doch mit der Maschinenteknik alleine war es nicht getan. Natürlich mussten auch die Mitarbeiter an die neue Technik und die Arbeit mit Großbauteilen herangeführt werden. So bestehen hier hohe Anforderungen an ein passgenaues Arbeiten. Aber die Mitarbeiter mussten sich auch auf das unterschiedliche Werkstoffverhalten im Herstellungsprozess der Ausgangsplatten einstellen. So können z.B. zwei unvulkanisierte Silikonplatten problemlos zu einer Platte zusammengeschmolzen werden. Bei EPDM mit hoher Shorehärte wird formgebendes Stahlband benötigt. Befürchtungen, dass sich dieses im Produktionsprozess deformiert, konnten durch Tests beseitigt werden – eine wichtige Erfahrung. Inzwischen werden zahlreiche Spezialprodukte mit eng gefassten Parametern (harte Dichtungsplatten und weiche Membrane

0,5 mm dick mit hoher Elastizität) vulkanisiert. Mit der Rotocure D320 lassen sich Membranbreiten und Dichtungsdurchmesser von bis zu 3,2 m realisieren und die verschiedensten Materialien mit Stärken von 0,5 bis 6 mm verarbeiten. Ergänzend können auf eigenen 3D-Purwasserstrahlanlagen und Plottern großformatige Geometrien kundenspezifisch umgesetzt werden.

Fazit

Das Konzept, nahtlose Dichtungen und Membrane, gefertigt in Deutschland, als Alternative zu solchen mit Naht, „Made in Germany“ oder nahtlos „Made in China“, anzubieten geht auf, da mit diesem Konzept verschiedene Schwachstellen eliminiert werden. Die unterschiedlichen Vorteile für Konstrukteure, Einkäufer, Qualitätsmanager und Instandhalter haben sich bei den verschiedenen Projekten immer ausgezahlt. Bestand zunächst der Plan, das Konzept primär für Membranen einzusetzen, entstehen z.Z. auch immer mehr Großdichtungen nahtlos.

Raum für Impulse

Überblick. Wissen. Transparenz.



**Anwendungsorientierter Wissenstransfer:
Die Basis für Ihre Lösungen im Bereich
Dichten. Kleben. Polymer. finden Sie hier**

www.isgatec.com > Medien

Kostenloses DICHTI-Probeexemplar anfordern
unter info@isgatec.com

ISGATEC[®]
MEDIEN

Das vielseitigste Dichtelement – der O-Ring

Entstehungsgeschichte und Potenzial

O-Ringe werden heute in Milliardenstückzahlen sowohl in statischen als auch dynamischen Anwendungen (z.B. Hydraulik oder als Abdichtung auf einer drehenden Welle) als Dichtung eingesetzt. Seine vielen Vorteile haben ihn zu diesem „Allrounder“ in der Dichtungstechnik werden lassen. Und seine Geschichte ist noch nicht zu Ende.

Das „O“ in dem Begriff O-Ring bezieht sich auf den runden Querschnitt dieses Ringes. Inzwischen hat sich diese Bezeichnung in der Technik durchgesetzt. In älteren Unterlagen finden sich auch die Begriffe Schnurring, Nullring oder Rundring. Letzteres war die offizielle Bezeichnung in der DDR [1]. Im englischen Sprachgebrauch waren vor der Bezeichnung „O-Ring“ auch die Begriffe „Round Ring“, „Toroid Ring“, „Donut Seal“ [2] und „Toroidal Sealing Ring“ [3] üblich.

O-Ringe bieten viele Vorteile, die letztendlich auch ihren breiten Einsatz ermöglicht haben. O-Ring-Abdichtungen zeigen auch bei geringen Flächenpressungen – ausreichende Verformung vorausgesetzt – ein gutes Dichtverhalten, welches sich auch über sehr lange Einsatzzeiten hinweg trotz erheblicher Spannungsrelaxation bzw. Alterung des Werkstoffes nicht verschlechtert. Je nach Schnurstärke können Spalte bis ca. 0,5 mm und mehr mit O-Ringen überbrückt werden. Durch die enorm große Vielfalt an immer leistungsfähigeren Elastomerwerkstoffen, aus welchen O-Ringe gefertigt werden, lassen sie sich – je nach Elastomertyp – von -70 °C bis ca. +300 °C einsetzen. Mit O-Ringen können sowohl Ultrahochvakuum- (10^{-8} Torr) bis Hochdruckanwendungen (400 bar, Sonderfälle 2000 bar) abgedichtet werden. Neben dem guten Montageverhalten sind seine weltweite Verfügbarkeit und sein niedriger Preis weitere Vorteile, die den O-Ring zur häufigsten und vielleicht auch – nicht nur bei Einkäufern – beliebtesten Abdichtungsart aller Zeiten werden ließen. Denn die einfache Auslegung eines O-Rings hat sich auch bei vielen Konstrukteuren herumgesprochen. Und schließlich ist die Tatsache, dass vielen Anwendern gar nicht bewusst ist, wie oft sie sich tagtäglich auf die einwandfreie Funktion von

Von Dipl.-Ing. Bernhard Richter, Geschäftsführer; Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Blobner, Consultant
O-Ring Prüflabor Richter GmbH | www.o-ring-prueflabor.de

O-Ringen verlassen, eigentlich das allerbeste Argument für die Zuverlässigkeit von O-Ringen.

Wer erfand den O-Ring?

Aufgrund der äußerst simplen Geometrie, die auch verfahrenstechnisch bereits Mitte des 19. Jahrhunderts in der damals üblichen Qualität produziert werden konnte, ist es schwierig, einen bestimmten Erfinder des O-Rings zu benennen. Jedoch gibt es Personen, die für die Einführung des O-Rings in neuartige Anwendungen bedeutend waren. Hier zeigt sich eine Analogie zur Geschichte der Entdeckung der Kautschukvernetzung und den damit verbundenen zahlreichen Forschern und Erfindern [4]. Bereits 1832 beschrieb der deutsche Chemiker Friedrich W. Lüdersdorff (1801-1886) Vulkanisationsverfahren. Das Problem klebriger Kautschuküberzüge, z.B. von Textilien, löste er durch das Bestreuen mit pulverförmigem Schwefel [5]. Eine ähnliche Entdeckung gelang dem Amerikaner Nathaniel Hayward im Jahr 1834. Jedoch gilt erst 1839 als das eigentliche Entdeckungsjahr der Vulkanisation von Naturkautschuk durch Charles Goodyear. Parallel zu Goodyear wurde die Vulkanisation auch von Thomas Hancock 1845 zum Patent angemeldet.

Doch nun zurück zu den O-Ringen: Das vermutlich früheste Patent einer dynamischen O-Ring-Anwendung stammt aus Großbritannien und wurde im Jahr 1848 erteilt. Erfinder war Alonzo Buonaparte Woodcock aus Manchester. Er arbeitete viele Jahre mit Thomas Hancock zusammen und war Betriebsleiter bei Macintosh in Manchester [6]. In seinem Patent No. 12,253 vom 22. Februar 1848 beschreibt Woodcock die mögliche Anwendung von O-Ringen in Dampfmaschinen, u.a. in deren Stopfbuchsen, in Pumpen, Ventilen oder Hahnen. Er nennt bereits die notwendige Verpressung des O-Ring-Querschnitts in eine Ellipsenform [7]. Um den Dichtungsverschleiß zu verringern und Gleitmittel wie Öl zu vermeiden, schlägt er einen sich bei Kolbenbewegung abrollenden O-Ring vor. O-Ringe als sich abrollende Dichtelemente zu verwenden, scheint die Erfinder der damaligen Zeit besonders beschäftigt zu haben. Da es vermutlich an relativ glatten Kolben- und Zylinderwänden zu keinem definierten Abrollen der elastischen Dichtungen kam, wurde im Jahr 1856 in den USA ein Patent mit einer Verbesserung vorgeschlagen (**Bild 1**). Es ist nicht auszuschließen, dass es noch frühere Patente gibt, die eine Anwendung von O-Ringen beschreiben. Oft verbergen sich diese kleinen Dichtelemente in größeren Patenten, sodass ihr Auffinden viel detektivisches Geschick und Zeit erfordert.

John Underwood beschreibt in seiner im Dezember 1856 patentierten Erfindung den Einsatz eines zylindrischen Gummiringes, der auch aus einem anderen elastischen

Material hergestellt werden kann. Die Nuten auf dem Zylinder sollen wie die Zähne einer Zahnstange wirken und der O-Ring sollte die Funktion eines Ritzels übernehmen. In diesem Patent wird ebenso auf die Wichtigkeit der ausreichenden O-Ring-Verpressung zur Erfüllung seiner Dichtfunktion hingewiesen [8]. Ein weiteres US-Patent (No. 80,066, Erfinder: John B. Gibson) mit einer nicht statischen O-Ring-Abdichtung stammt aus dem Jahr 1868. Hierin übernehmen O-Ringe Dichtfunktionen in einer verbesserten Version eines Ventilhahnes. Es handelt sich dabei um eine Konstruktion, bei welcher der Dichtring sich auf einem Kolbenstück definiert abrollen kann.

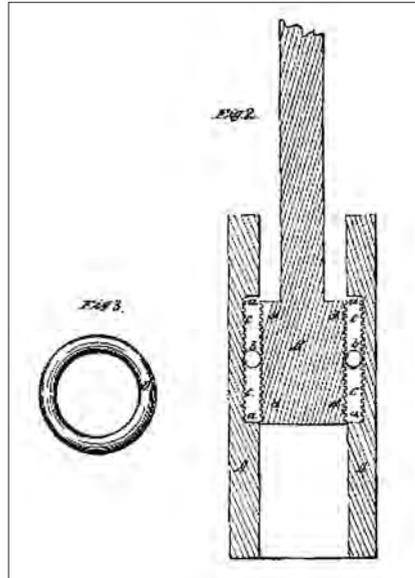


Bild 1: Ausschnitt aus dem US-Patent 16,202 vom 09.12.1856: Cylinder and Piston of Hydraulic and Steam Engines, Erfinder John Underwood

(Bild: US Patent and Trademark Office, public domain)

Da der Gummi-O-Ring zwar Bestandteil dieser Patente ist, er jedoch nicht als eigenes, vorab patentiertes Dichtelement erwähnt wird, ist davon auszugehen, dass bereits vor 1848 O-Ringe als Dichtelemente in Gebrauch waren. Die vorgestellten Patente setzten O-Ringe in für die damalige Zeit bereits gewagten dynamischen Anwendungen ein. Deswegen kann man annehmen, dass O-Ringe in einfachen statischen Abdichtungen sicherlich schon vor 1848 üblich und wohl schon ein Standarddichtelement in der Technik gewesen sind [9]. Ein Überblick über die frühen Patente mit O-Ringen, hauptsächlich in dynamischen Anwendungen, findet sich in einer Patentklage N. Christensens Erben gegen die Vereinigten Staaten aus dem Jahre 1964 [10]. Da es bei Patentklagen oft um große Geldsummen geht, ist davon auszugehen, dass die Recherche zu Vorläuferpatenten gründlich durchgeführt wurde. Die im Internet häufig zitierten frühen bzw. angeblich ersten O-Ringe-Patente, wie das Patent zum Dichtring in Th. A. Edisons Glühlampe 1882 (US Patent No. 263,878) oder das schwedische Patent No. 7679 von J.O. Lundberg aus dem Jahr 1896, sind keine Erstnennungen von O-Ringabdichtungen, sondern es gab bereits zahlreiche ähnliche statische und dynamische O-Ringanwendungen vor diesen Veröffentlichungen.

Die Entwicklung in den USA

Seinen Durchbruch erlebte der O-Ring allerdings erst durch die Erfindungen eines gewissen Niels Christensen [11]. Viele seiner Patente befassen sich mit pneumatischen oder hydraulischen Systemen. An seiner wohl bedeutendsten Erfindung arbeitete er ab 1933 in seinem Labor: Die Suche nach einer einfachen und zuverlässigen Dichtung, welche hydraulische Kolben in ihrer Bewegung nicht behinderte, aber dennoch zuverlässig abdichtete. Versuche mit O-Ringen wurden bereits vor ihm schon durchgeführt, diese Dichtungsform erwies sich allerdings als nicht lange haltbar. Er begann mit verschiedenen O-Ring- und Nutabmessungen zu experimentieren. Schließlich erzielte er seine besten Ergebnisse in Nuten mit ca. dem 1,5-fachen Wert der Schnurstärke. In sein Notizbuch schrieb er am 20. September 1933: „Dieser Dichtungsring wurde über 2.790.000 Hübe über 0,5 inch (= 12,7mm) bei 60 psi (= ca. 41bar) und über 2.790.000 Umkehrhübe bei Umgebungsdruck getestet. Dieser Dichtungsring zeigte nie eine Leckage und ist immer noch dicht und es ging keine Flüssigkeit während des ganzen Tests durch ihn hindurch. Der Ring behielt seine ursprüngliche Form und funktionierte perfekt.“ [12]

Christensen war ein Forscher, der sich mehr auf seine positiven Ergebnisse und praktischen Versuche stützte als auf das Ergründen einer Theorie dahinter. Durch sein unermüdliches Probieren hatte er nun eine Nut-/Ringkombination gefunden, die alle bisherigen Dichtsysteme übertraf. Die Funktionsweise dieses Dichtsystems wurde erst 1941 durch einen transparenten Zylinder in den Laboren von Vought-Sikorsky aufgedeckt: „In diesem Zylinder beobachteten die Forscher ein Rollen der Dichtung um ungefähr 20°, wenn Druck angelegt wurde und der Kolben sich zu bewegen begann. Sie beobachteten auch, dass diese Dichtung in der Nut vom Druck in einem bestimmten sich schlängelnden Muster wegleitet und dass der Druck die Dichtung in eine „D“-Form verzerrt, um so die Breite der Dichtungsoberfläche von etwa 30% der Schnurstärke auf 40 bis 60% zu vergrößern.“ [13] Einige Jahre später untersuchte Lockheed mit einem Farbfilm die Funktionsweise der O-Ringabdichtung. Dabei konnten wichtige Erkenntnisse über die Bewegungen des O-Ringes, wie Abrollen, Gleiten oder Wischen, gewonnen werden, aber auch Informationen über die durch den O-Ring verursachten Flüssigkeitsbewegungen. Doch zurück zu Christensen: Am 29. Dezember 1933 reichte er ein Patent über eine hydraulische Bremse (**Bild 2**) ein, welches ihm am 26. April 1938 erteilt wurde. Darin verwendet er bereits O-Ringe. Im Jahr 1937 beantragte er ein zweites Patent, das ihm am 21. November 1939 mit der Nummer 2,180,795 erteilt wurde (**Bild 3**). Er beschreibt darin eine funktionierende O-Ring-Abdichtung, obwohl er den eigentlichen Funktionsmechanismus nicht voll verstanden hat. Er glaubte nämlich, dass die Lebensdauer der Dichtung durch das kontinuierliche

Kneten und Walken - ähnlich wie bei einem Muskel - verlängert werden würde [14]. Neuartig und wichtig für spätere Patentklagen war u.a. sein Patentanspruch Nr. 1, in welchem er fordert, dass der Ring sich nicht mehr als 180° drehen darf. Im April 1943 reichte er noch ein drittes Patent zu einer Druckdichtung („pressure seal“) ein, das ihm am 5. Februar 1946 mit der Nummer 2,394,364 erteilt wurde. Anfänglich war es schwierig für Christensen, Lizenznehmer für sein Patent von 1939 zu finden. Da die Automobilindustrie die bestehenden Dichtungen in Bremszylindern nicht ersetzen wollte, ging Christensen zur Luftfahrtindustrie. Nach positiven Versuchen um 1940 erteilte er im April 1941 eine nichtexklusive Lizenz an United Aircraft Products Co.. Zur Erleichterung der Rüstung im Krieg kaufte die US-Regierung nach Pearl Harbor wichtige Patente, u.a. auch Christensens O-Ring-Patent. Für eine Zeit von fünf Jahren oder bis zum Ende der „National Emergency“ konnte nun jeder für Militärflugzeuge diese Dichtung lizenzgebührenfrei nutzen. Nachteilig für Christensen war, dass Präsident Truman den Krieg nicht 1945, sondern erst 1952 für offiziell beendet erklärte, sodass Christensen nur noch vier Jahre Restnutzung seines Patentes blieben. Damals galt in den USA noch ein Patent für 17 Jahre ab „date of issue“. Nach einem längeren Patentstreit wurden 1971 an seine Erben 100.000 US \$ für entgangene Lizenzgebühren bezahlt. In diesem Prozess von Christensens Erben gegen die Vereinigten Staaten drohte ein britisches Patent von Stewart Robertson zu einer Toilettenspülung (No. 10,716 vom 14.10.1899) Christensens Patent zu kippen. In dieser britischen Konstruktion wurden bereits 1899 O-Ringe in einer rechteckigen

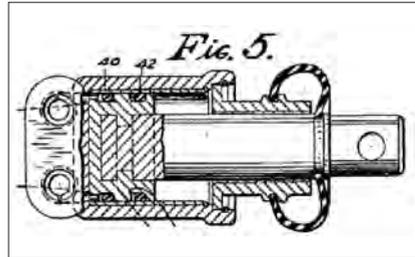


Bild 2: Ausschnitt aus US-Patent No. 2,115,383 vom 26.04.1938: Hydraulic Brake von N. Christensen (Nr. 40 zeigt einen elastischen Dichtungsring mit einem Backupring (42), falls der erstere O-Ring ausfallen sollte) (Bild: US Patent and Trademark Office, public domain)

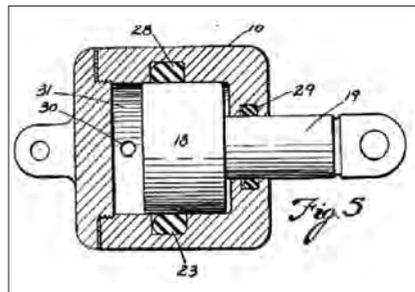


Bild 3: Ausschnitt aus dem wichtigsten O-Ring US-Patent No. 2,180,795 vom 21.11.1939: „Packing“ von N. Christensen. Neben Varianten von Kolbendichtungen in diesem Patent ist auch eine Stangendichtung dargestellt: Der O-Ring Nr. 28 dichtet den Kolben außen ab und ist im Zylinder verbaut (Bild: US Patent and Trademark Office, public domain)

rechteckigen

Nut, die nur wenig breiter als die Schnurstärke des Ringes war, eingesetzt. Der Anwalt Calhoun konnte durch den Verweis auf die genaue Formulierung Christensens, dass der Querschnitt des O-Rings in einer Art Ellipsenform verpresst sein muss [15], das Ungültigwerden des Christensen-Patentes verhindern [16].

O-Ringe in Deutschland

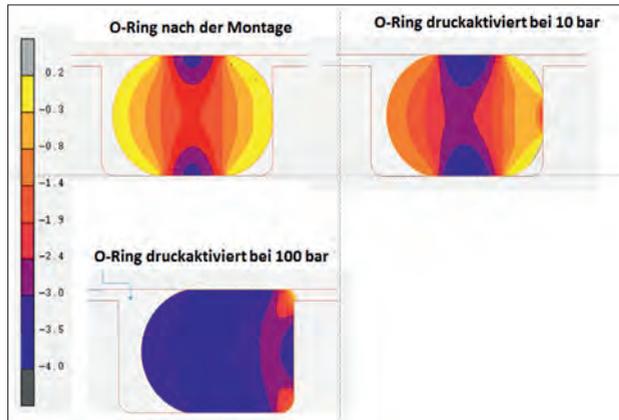
In Deutschland sind O-Ringe unter der Bezeichnung Schnurringe schon vor 1937 hergestellt worden, wie ein Blick in die Literatur beweist. So schreibt Paul Kluckow 1935 in einem Aufsatz über Technische Gummiwaren über den Einsatz von „Schnurringen für Nähmaschinenspulen, Separatoren, Honigschleudermaschinen, Kinderwagen- und Spielzeuigräder (Roller)“ [17]. Dies sind allerdings alles Anwendungen, in denen O-Ringe keine höherwertige Dichtfunktion übernommen haben. Schon 1931 ist es bekannt, dass die Produktion von guten O-Ringen keine leichte Produktionsaufgabe ist: „Schnurringformen werden nur von Spezialfabriken angefertigt, da die Herstellung Präzisionsarbeit erfordert“ [18]. Gestoßene O-Ringe wurden damals auch schon gefertigt, so heißt es weiter in der Gummi-Zeitung: „Größere Schnurringe in schwachen Schnurstärken werden aus gespritzter Schnur zugeschnitten und zusammengesetzt.“

In einer US-amerikanischen Analyse der deutschen Flugzeughydrauliksysteme während des Zweiten Weltkrieges aus dem Jahr 1946 wurde nur in einem Fall und dazu nur bei wenigen Einheiten die Verwendung von O-Ringen gefunden (V.D.M. Luftfahrtwerke GmbH, Großauheim). In den anderen Fällen wurden hauptsächlich damals übliche Stangendichtungen („U-cups“) mit Variationen (z.B. „half U-cups“) verwendet [19]. Ab den 1950er – spätestens ab den 1960er –Jahren hält der O-Ring auch in großem Umfang Einzug in die industrielle Anwendung als Dichtelement in Deutschland. Ein weiterer wichtiger, aber auch tragischer Meilenstein für die Weiterentwicklung von O-Ringen war die Challenger Katastrophe vom 28. Januar 1986, bei welcher es aufgrund einer relativ niedrigen Starttemperatur und einer fehlerhaften Dichtungskonstruktion 73 s nach dem Start zur Explosion der Raumfähre kam. Die in der Folge dieses Unfalls durchgeführten Untersuchungen und unzähligen Veröffentlichungen führten zu einem noch tieferen Verständnis des Potenzials dieses Dichtungstyps, aber auch der Risiken bei fehlerhafter Anwendung von O-Ringen und Elastomermaterialien.

Inzwischen ist der O-Ring und seine Auslegung immer mehr Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen, u.a. mithilfe von FEM-Simulationen. Außerdem werden immer bessere Modelle zur Alterung und Lebensdauervorhersage von O-Ringen entwickelt und erforscht [20].

Bild 4: Infolge der weitgehenden Inkompressibilität, der hohen inneren Festigkeit und der druckabhängigen Walkarbeit sind O-Ringe in der Lage, Drücke in erhöhte Dichtflächenpressungen umzuwandeln

(Bild: Dr. Manfred Achenbach, www.gutach-ten.de)



Funktionsweise des O-Rings

Die Dichtwirkung des O-Rings ergibt sich aus der Verformung seines runden Querschnitts um ca. 10 - 35%, je nach Anwendung und Schnurstärke. Je größer die Verpressung, umso größer ist die Dicht- bzw. Kontaktfläche. Die Ausführung der Dichtflächen sowohl des O-Rings als auch der Gegenfläche haben einen bedeutenden Einfluss auf die Dichtwirkung. In Anwendungen mit erhöhten Drücken wird eine O-Ring-Abdichtung zusätzlich noch durch den Systemdruck aktiviert. Je höher der Druck, umso höher ist die an den Dichtflächen erzeugte Flächenpressung, gleichzeitig legt sich der O-Ring durch die Walkarbeit besser an die Dichtfläche an (**Bild 4**). Dies basiert auf der weitgehenden Inkompressibilität des Werkstoffes. Elastomere verhalten sich ähnlich wie eine Newtonsche Flüssigkeit, d.h. sie haben eine belastungsunabhängige Viskosität. Außerdem wird durch die Druckaktivierung noch die (druckabhängige) Walkarbeit des O-Rings begünstigt. In Niederdruckerwendungen hingegen, „lebt“ der O-Ring ausschließlich aus dem Rückstellpotenzial des jeweiligen O-Ringwerkstoffes.

Voraussetzungen für eine gute Dichtfunktion

Folgende drei Bereiche sind wichtig für eine problemfreie Dichtfunktion: Nutgestaltung, Eigenschaften des O-Rings und Montage.

Die Nut sollte so bemessen sein, dass auch bei ungünstigen Toleranzlagen eine ausreichende Verpressung sichergestellt ist. Dies wird i.d.R. über eine Worst-Case-Betrachtung mithilfe von Auslegungs-Apps der O-Ring-Lieferanten oder Normen zur Nutberechnung (z.B. DIN ISO 3601-2) sichergestellt. Neben ausreichenden Oberflächengüten sollten zusätzlich zur Rauheit auch das Bearbeitungsverfahren bzw. die

Oberflächenstruktur definiert werden. Außerdem ist darauf zu achten, dass keine scharfen Kanten den O-Ring verletzen können. Ferner sind zu große Spaltmaße zu vermeiden. Ein zu großer Spalt kann bei außermittiger Lage der abzudichtenden Bauteile zu einer unzulässig starken lokalen Reduktion der O-Ring-Verformung führen, zudem können Systemdrücke ab ca. 50 bar den O-Ring bei zu großen Spaltmaßen in Abhängigkeit von der O-Ring-Härte durch Spaltextrusion zerstören.

Der O-Ring selbst sollte die vorgeschriebenen Maßtoleranzen einhalten, er darf keine unzulässigen Oberflächenfehler aufweisen (siehe DIN ISO 3601-3) und er sollte gute Werkstoffeigenschaften besitzen. Die O-Ring-Qualität lässt sich am einfachsten als eine multiplikative Verknüpfung von „Rezepturqualität x Fertigungsqualität“ darstellen. „Geht ein Faktor gegen Null, geht das ganze Produkt gegen Null. Noch so gute Datenblätter bzw. Rezepturqualitäten sind nutzlos, wenn die Werkstoffe schlecht verarbeitet, d.h. hier, schlecht vulkanisiert sind. Andererseits nützen die besten Qualitätsabläufe eines O-Ring-Produzenten nichts, wenn dieser Rezepturen verarbeitet, die nicht dem Stand der Technik entsprechen, weil die verwendeten Rezepturen z.B. nur auf die Verarbeitbarkeit hin optimiert wurden. Um einen guten Stand der Technik von O-Ringen abzusichern, muss also beides definiert werden: die Rezeptur (über Werkstoffeigenschaften) und die Vulkanisation (über Druckverformungsrestanforderungen für die O-Ringe)“ [21]. Es ist schon verwunderlich, dass es bis 2015 gedauert hat, bis endlich die funktionswichtigen Werkstoffeigenschaften von O-Ringen genormt wurden (ISO 3601-5 Ausgabe: 2015-04). So wird leicht verständlich, dass sich eine konsequente und gut geplante Wareneingangsprüfung von Dichtungen bezahlt macht und die Anwendungssicherheit von O-Ringen verbessern kann.

Schließlich spielt die Montage noch eine bedeutende, aber gerade bei O-Ringen häufig unterschätzte Rolle. So müssen Verunreinigungen auf den Dichtflächen vermieden werden, ebenso muss eine Verwechslung mit anderen O-Ring-Werkstoffen oder –Abmessungen ausgeschlossen werden. Außerdem darf der O-Ring nicht über scharfe Kanten gezogen werden, die ihn verletzen könnten. Letztlich fordert dies ein hohes Maß an Sorgfalt und i.d.R. auch die Verwendung von Gleitmitteln wie Montagefette oder -öle oder Beschichtungen.

Der O-Ring als statische und dynamische Dichtung

In statischen Dichtungen ist der O-Ring aufgrund seiner einfachen Geometrie, Verfügbarkeit und seines Preises fast unschlagbar. Er „eignet sich als Dichtelement von ruhenden Flächen besonders gut, weil er durch die Vorspannung den Dichtvorgang einleiten und sich bei Druckerhöhung die Anpressung an die Dichtflächen erhöht“ [22].

Elastomertyp	Vernetzungssystem	Härte [IRHD°, CM]	Beständig gegen
NBR	Schwefel	70, 90	Mineralöle, Kaltwasser
NBR	Peroxid	75, 90	Mineralöle, Kaltwasser
HNBR		75, 90	Motoröle, Kühlwasser
FKM		70, 75, 80, 90	Öle, Kraftstoff und viele auch aggressive Chemikalien
VMQ		70	Heißluft, mäßige Ölbeständigkeit
EPDM	Schwefel	70, 80	Bremsflüssigkeit, Kühlwasser
EPDM	Peroxid	70, 80	Bremsflüssigkeit, Kühlwasser
ACM		70	Motoröle, Getriebeöle

Tabelle 1: Häufig verwendete Elastomere und Härtegrade in Industrieanwendungen nach ISO 3601-5 [23]

Während statisch verbaute O-Ringe bis zu einem erstaunlich hohen Maße gut mit dynamischen Druck- und Spaltänderungen zurecht kommen, stößt der O-Ring als Dichtung zwischen zwei bewegten Flächen schnell an seine Grenzen. Hier gibt es jedoch für die meisten dynamischen Anwendungen bessere technische Lösungen in Bezug auf Reibung, Spaltüberbrückungsvermögen und Laufleistung.

Die Vielfalt an elastomeren Werkstoffen – das Erfolgsgeheimnis des O-Rings

O-Ringe können aus praktisch jeder Elastomermischung gefertigt werden, die im Press- oder Spritzverfahren verarbeitet werden kann. Jedoch haben sich bestimmte Elastomertypen – sei es wegen ihrer chemischen und thermischen Beständigkeit und/oder ihres günstigen Preises – in größerem Umfang durchgesetzt. Einen guten Einblick bietet die ISO 3601-5 mit ihrer **Tabelle 1** zu häufig gebrauchten Elastomeren und Härten für O-Ringe in Industrieanwendungen.

O-Ring-Beschichtungen

Bis zu 10% aller Dichtungsausfälle gehen auf eine fehlerhafte Montage zurück, davon die meisten Fälle auf eine fehlende oder mangelnde Gleitintensivierung. Neben dem Zweck der Montageerleichterung können Beschichtungen von O-Ringen auch andere Ziele verfolgen, wie z.B. Vermeidung von Stick-Slip-Effekten, Geräuschreduzierung, Erhöhung der Abriebfestigkeit oder eine farbliche Kennzeichnung zur Vermeidung von Verwechslungen.

Der Nutzen von Montagebeschichtungen kann in der Vermeidung von Verklebungen und in der störungsfreien automatischen Zuführung von O-Ringen und in der Reduktion von Steckkräften liegen. Sind die O-Ringe einmal beschädigungsfrei montiert,

kann je nach Beschichtung der weitere Vorteil darin liegen, die Losbrechkräfte oder Gleitreibungskräfte zumindest für eine begrenzte Anzahl an Zyklen zu reduzieren. Es werden mehrere verschiedene Arten von Oberflächenbehandlungen angeboten:

- Nasse Beschichtungen (z.B. Pasten, Fette, hydrogecrackte Mineralöle (Molykote®), synthet. Flüssigkeiten (PAO))
- Trockene Beschichtungen/Gleitlacke (in Form von Coatings oder Dispersionen)
- Pulverförmige Beschichtungen (z.B. Graphitpulver)

Durch die Einführung von Plasmaverfahren zur Vorbehandlung der O-Ringe und durch die Entwicklung neuer Gleitlacke hat sich das Angebot an hochwertigen Beschichtungen kontinuierlich erweitert und damit auch die Einsatzbereiche von O-Ringen. Trockene Beschichtungsverfahren verhindern z.B. eine Verschleppung von Gleitmittel, wie z.B. Siliconöl, und tragen damit erheblich zur Verbesserung der Qualität verschiedenster Produktgruppen bei.

Wichtige O-Ring-Kenndaten (Normung, O-Ring-Fertigteilprüfungen)

Lange Zeit wurden O-Ringe nur von großen Firmen in ihren Hausnormen spezifiziert, sodass sich eine Vergleichbarkeit verschiedener O-Ringe schwierig gestaltete. Außerdem war unklar, ob diese firmeninternen Spezifikationen immer das volle Potenzial der jeweiligen Mischung und der möglichen Verarbeitungsqualität forderten oder sich mehr an die Möglichkeiten eines bestimmten Lieferanten anpassen.

Es gab schon vor einigen Jahrzehnten Versuche, über einzelne Hersteller feststehende Normen zur Rezepturqualität von Elastomeren zu etablieren. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die ASTM D 2000, die aber in Europa als zu kompliziert und nicht praxisgerecht empfunden wurde und sich deshalb nicht durchsetzen konnte [24]. Außerdem sind diese Vorgaben sehr herstellerfreundlich, d.h., die Grenzwerte sind teilweise großzügig für die Lieferanten festgelegt und beziehen sich ausschließlich auf ideal vulkanisierte Prüfplatten und sie machen keinerlei Vorgaben für den Vulkanisationsgrad an Fertigteilen. Schließlich steht nun dem Anwender mit der ISO 3601-5, die im April 2015 erschien, ein leistungsfähiges Werkzeug zur Verfügung. Zum ersten Mal werden darin sowohl O-Ring-Materialien als auch Eigenschaften an dem fertigen Erzeugnis O-Ring spezifiziert. Bei Bestellungen nach dieser Norm hat nun der Anwender die Sicherheit, einen O-Ring nach einem guten Stand der Technik sowohl in Mischungs- als auch Verarbeitungsqualität zu bekommen. Ebenso hilfreich für den Praktiker sind die Teile 1-4 der ISO 3601:

- Fluidtechnik-O-Ringe – Teil 1: Innendurchmesser, Schnurdurchmesser, Toleranzen und Bezeichnungsschlüssel (Ausgabe 2012-07)



Bild 5: Zugversuch eines Mikro-O-Ringes mit speziellen Nadeln als Probehalter

(Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)



Bild 6: Härteprüfung an einem O-Ring (Methode IRHD, CM)

(Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

- Fluidtechnik-O-Ringe – Teil 2: Einbau Räume für allgemeine Anwendungen (Ausgabe 2016-07)
- Fluidtechnische Anlagen-O-Ringe – Teil 3: Qualitäts-Annahmebedingungen (Ausgabe 2005-11)
- Fluidtechnik-O-Ringe – Teil 4: Stützringe (Ausgabe 2008-06)

O-Ringe sind nicht nur in der Anwendung sehr vielseitige Dichtelemente, auch im Bereich der Elastomerprüfung eignen sie sich zur Durchführung der meisten Prüfmethoden ohne eine lange Vorbehandlung der Probekörper. Vielen Anwendern ist bekannt, dass es mitunter eine große Diskrepanz von Materialeigenschaften an Prüfplatten im Vergleich zum Fertigteil gibt. Bei den meisten O-Ring-Abmessungen lassen sich problemlos Härte, Zugversuch [25] oder Druck- bzw. Zugverformungsrestprüfungen [26] durchführen. Allerdings können die Ergebnisse nicht eins zu eins mit an Prüfplatten gemessenen Werten verglichen werden.

Zur Prüfung von O-Ringen gibt es eine eigene ASTM-Norm. Die ASTM D 1414 (Standard Test Methods for Rubber O-Rings) normiert Zugversuche (**Bild 5**), DVR-Prüfungen, Tieftemperatureigenschaften, Dichtemessung, Medieneinlagerung, Heißluftalterung und Härtemessungen an O-Ringen (**Bild 6**).

O-Ringe für Hightech-Anwendungen

Der Fortschritt der Technik in vielen Bereichen war schon immer sehr eng mit dem Fortschritt der Dichtungstechnik verknüpft. Eine der frühesten Anwendungen von O-Ringen ist die Sanitärtechnik. Nach wie vor spielen O-Ringe hier eine wichtige Rolle. Die komplette Hausinstallation, Heizungs- und Solartechnik baut heute auf hochleis-

tungsfähige O-Ringe, eine Lebensdauer von deutlich mehr als 50 Jahren unter typischen Einsatzbedingungen ist mit einem guten Stand der Technik möglich.

Ab den 1930er Jahren revolutionierte der O-Ring Hydraulikanwendungen in Flugzeugen. Von dort aus machte man sich den O-Ring auch in der Industriehydraulik zunutze. Moderne Hydraulik wird heute, z.B. zur Nachstellung von Sonnenkollektoren, in Solar-Kraftwerken eingesetzt oder für den Betrieb von Windkraftanlagen, auch in vielen hochleistungsfähigen Baufahrzeugen baut man auf den O-Ring in der Hydraulik, die stetig kleiner und leistungsfähiger wird. Eine konkrete O-Ring-Anwendung, die Leben rettet, ist bspw. eine hydraulische Rettungsschere, wie sie von der Feuerwehr bei Unfällen eingesetzt wird.

Ebenso sind die O-Ringe fast immer dabei, wenn es darum geht, den Schadstoffausstoß von Verbrennungsmotoren immer weiter zu reduzieren oder den Wirkungsgrad von Motoren zu verbessern, z.B. durch Turbolader. Auch viele Komfort- und Sicherheitsfunktionen (Heizung/Klima, ASR, ESP) sind erst durch den Einsatz von hochqualitativen und 100% fehlerfreien (z.B. ABS-Systeme) O-Ringen möglich. O-Ringe in modernen Dieseleinspritzsystemen werden heute unter Reinstbedingungen gefertigt, manchmal vor der Montage nochmals gereinigt und schließlich verbaut. Sicherlich wird die Einführung von Elektrofahrzeugen bestimmte Arten von O-Ringen überflüssig machen, jedoch erfordern moderne Batterien ebenso viele O-Ringe, und komfortabel und sicher soll die zukünftige Mobilität auch sein, wozu O-Ringe einiges beitragen werden.

In der Prozesstechnik haben sich durch den Einsatz von Mikroprozessoren bzw. computergesteuerten Fertigungsabläufen ganz neue Möglichkeiten aufgetan, welche allerdings darauf angewiesen sind, dass zuverlässig die Prozesszustände (Druck, Temperatur, Durchfluss, pH-Wert etc.) angezeigt werden. Dazu sind Sensoren erforderlich, die mit O-Ringen auch in einer sehr aggressiven Umgebung sicher arbeiten müssen. Der Fortschritt bei der Chip-Herstellung basiert auch auf immer höheren Einsatztemperaturen der O-Ringe, verknüpft mit höchsten Ansprüchen bezüglich Reinheit bzw. der Verhinderung der Auswaschung von Metallionen. Auf die Reinheit kommt es auch bei der Herstellung von Medikamenten an, auch hier ist die Werkstofftechnik nicht stehen geblieben, moderne Analyseverfahren, wie z.B. GC-MS-Analysen, ermöglichen es, auch kleinste Mengen an Schadstoffen zu finden und Werkstoffe bezüglich der Abgabe von kritischen Chemikalien zu verbessern.

Ausblick

Auch wenn dieses einfache Dichtelement schon über 150 Jahre alt ist, ist es keineswegs überholt und aus unserem heutigen Alltag nicht mehr wegzudenken. In Milliarden Anwendungen erfüllen O-Ringe ihren Dienst. Innovation in der Technik ist ohne O-Ringe kaum vorstellbar und wäre wohl nur schwer bezahlbar. Auch für die Zukunft werden sie daher ein wichtiger Baustein für effektive und schnelle Produktentwicklung sein. Macht man sich die Fortschritte in der Werkstofftechnik, der Prozesstechnik, der Normung, der Automationstechnik und der Prüftechnik zunutze, so kann man davon ausgehen, dass man mit O-Ringen auch weiterhin den kommenden Herausforderungen in der Dichtungstechnik begegnen kann. Die Frage wird sein, ob es gelingt, die vorhandenen Potenziale auch auszuschöpfen. Und hier können und müssen sicherlich spezielle Know-how-Träger dazu beitragen, dass Firmen nicht „abgehängt“ werden und wichtige Entwicklungen verschlafen.

Literatur

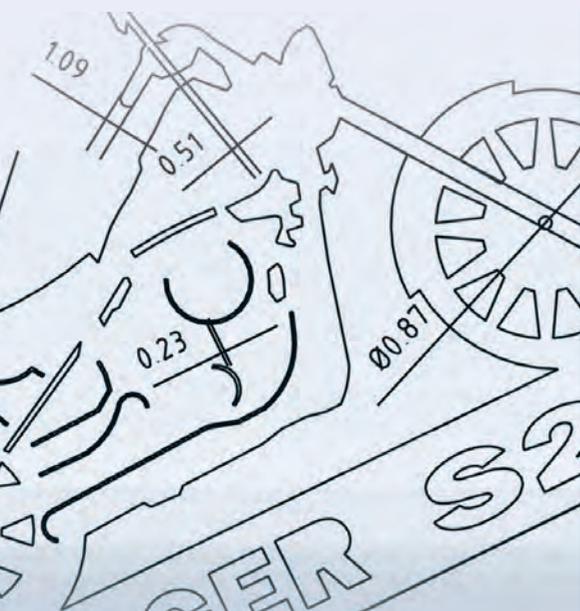
- [1] TGL 6365: Dichtungen Rundringe (Ausgabe Oktober 1976, online abrufbar: <https://www.bbr-server.de/bauarchivddr/archiv/tglarchiv/tgl2500bis10000/tgl6001bis6500/tgl-6365-okt-1976.pdf>)
- [2] ALLEN, Robert E.: "O" Rings Make History, Otterbein Publishing Co., Dayton, Ohio, 1969, S. 8
- [3] British Standard 1806 / 1951: Dimensions of Toroidal Sealing Rings, British Standards Institution, London, 1951
- [4] RÖKER, Klaus-D.: Vulkanisation – chemische Reaktion oder Adsorptionsvorgang? Eine Kontroverse zu Beginn des 20. Jahrhunderts in: Mitteilungen, Gesellschaft Deutscher Chemiker/ Fachgruppe Geschichte der Chemie, Frankfurt/Main, Bd 20, 2009, S. 68
- [5] SCHNETGER, J.: Lexikon der Kautschuktechnik, Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1991, S. 370
- [6] LOADMAN, John und JAMES, Francis: The Hancocks of Marlborough: Rubber, Art and the Industrial Revolution: A Family of Inventive Genius, Oxford University Press, 2010, S. 117
- [7] GB-Patent No. 12,253 vom 22. Februar 1848, Erfinder: Alonzo B. Woodcock: Steam Engines, and Apparatus for Raising and Forcing Water, &c., S.3
- [8] "...the diameter of the piston is such that it will fill the ring when in the chamber of the cylinder and give the ring a proper pressure." in: US-Patent No. 16,202, dated December 9, 1856: Inventor: John Underwood: Cylinder and Piston of Hydraulic and Steam Engines, S.2
- [9] Resilient round sealing rings were used at least as early as the mid 1800's with mixed success" in: <http://logwell.com/tech/O-ring/index.html>
- [10] 339 F.2d 665 Jo. C. CALHOUN, Jr., and Esther C. Young, Executors of the Estate of Niels A. Christensen (Deceased) v. The UNITED STATES No. 432-55. (Online verfügbar: <https://openjurist.org/339/f2d/665/calhoun-v-united-states#fn-s> oder <https://law.resource.org/pub/us/case/reporter/F2/339/339.F2d.665.432-55.html>)
- [11] Weiterführende biographische Angaben: WISE, George: Ring Master in: American heritage's invention & technology, Bd. 7, Spring/Summer 1991, S.58-63
- [12] ALLEN, Robert E.: "O" Rings Make History, Otterbein Publishing Co., Dayton, Ohio, 1969, S. 3 [13] Ebd.
- [14] US-Patent No. 2,180,795 vom 21. November 1939, Erfinder: Niels Christensen: Packing, S.4

- [15] "...when the ring is in the groove in operative position, it is compressed into somewhat ellipsoidal cross-section,.." US-Patent No. 2,180,795 vom 21. November 1939, Erfinder: Niels Christensen: Packing, Patentanspruch 5, S.5
- [16] WISE, George: Ring Master in: American heritage's invention & technology, Bd. 7, Spring/Summer 1991, S. 63
- [17] KLUCKOW, Paul: Technische Gummiwaren in: HAUSER, E.A.: Handbuch der gesamten Kautschuktechnologie, Union Deutsche Verlagsgesellschaft, Berlin, 1935, Bd. 1, S.441
- [18] Ohne Autorenangabe: Die Fabrikation technischer Formartikel in: Gummi-Zeitung, Band 46, 1931, S. 116
- [19] DAVIES, R.H.: German Aircraft Hydraulic Systems and Their Components in: SAE Journal (Transactions), Vol. 54, No. 8, August, 1946, S. 419
- [20] z.B. KÖMMLING, Anja: Alterung und Lebensdauervorhersage von O-Ring Dichtungen, Dissertation, TU Berlin, 2017
- [21] RICHTER, Bernhard: O-Ring wird zum Normteil in: BERGER, Karl-Friedrich und KIEFER, Sandra: Dichtungstechnik Jahrbuch 2016, Mannheim, 2015, S.200
- [22] PARKER-PRÄDIFA: O-Ring Handbuch, Ausgabe 07/2015, S.9 (Online verfügbar: https://www.parker.com/literature/Praedifa/Catalogs/Catalog_O-Ring-Handbook_PTD5705-DE.pdf)
- [23] Nach ISO 3601-5: 2015-04: Fluid power systems - O-rings – Part 5: Specification of elastomeric materials for industrial applications, S.2, Table 1
- [24] NAGDI, Khairi: Gummi-Werkstoffe – Ein Ratgeber für Anwender, Gupta-Verlag, Ratingen, 2002, S. 365
- [25] BLOBNER, U. und RICHTER, B.: Fachwissen Prüfverfahren für Elastomere: Zugversuch von Ringen (O-Ringe / Rechteckringe) – Prüftechnische Grundlagen und wissenswerte Besonderheiten, Ausgabe 12/2014 (Onlineveröffentlichung: http://www.o-ring-prueflabor.de/files/fachwissen-zugversuchringe_12_2014.pdf)
- [26] BLOBNER, U. und RICHTER, B.: Fachwissen Prüfverfahren für Elastomere: Zugverformungsrestprüfung (ZVR): Prüftechnische Grundlagen und Abgrenzung zur DVR-Prüfung, Ausgabe 06/2014 (Onlineveröffentlichung: http://www.o-ring-prueflabor.de/files/fachwissen_zugverformungsrestpruefung_06_2014.pdf)

BERGER
einfach passgenau **S2B**[®]

3D-WASSERSTRAHLZUSCHNITTE

OHNE WERKZEUGKOSTEN • HÖCHSTE PRÄZISION



- ▶ GUMMI
- ▶ SCHAUMSTOFFE
- ▶ KUNSTSTOFFE
- ▶ VERBUNDWERKSTOFFE

SOLUTIONS AND SERVICES TO BUSINESS
FOR POLYMER AND SEALING TECHNOLOGY

www.BergerS2B.com

Telefon: 0049 (0) 621- 4 10 03 - 0

ÜBER 85 JAHRE
ERFAHRUNG UND QUALITÄT

Das nächste Level

PTFE-Dichtungen mit verbesserter technischer Dichtheit und höherer Sicherheit gegenüber Montagefehlern

Kundennähe und -nutzen können viele Facetten haben– wie etwa die Entwicklung der Oberflächentextur eines neuen Dichtungsmaterials, das technisch eine höhere Dichtheit aufweist, zeitgleich einfacher zu installieren ist und auch noch mehrere bislang verwendete Dicken ersetzen kann. Mit einer solchen Entwicklung können ungeahnte Synergieeffekte entstehen, die von einer “Dichtung” bisher nicht erwartet werden.

Wenn man die derzeit größten Herausforderungen auf modernen wie auch alten Anlagen abfragt, so zeigt sich, dass mehr und mehr Arbeitslast auf immer weniger Personen verteilt wird. Zeitgleich wird die Verantwortung ebenfalls auf die Schultern von immer weniger „verantwortlichen“ Personen abgegeben. Wartung und Instandhaltung werden dabei häufig an Fremdanbieter vergeben, welche nicht immer mit den Vorgehensweisen hinsichtlich einer guten Installation von Flanschverbindungen vertraut sind. Daher müssen Dichtungsmaterialien zunehmend nicht nur toleranter gegenüber Prozessbedingungen sein, sondern auch toleranter gegenüber vielen unterschiedlichen Montagefehlern oder -schwierigkeiten und sollen zeitgleich auch zunehmend dichter sein, um zukünftigen Emissionsstandards gerecht zu werden. Als Beispiel ist hier die neue TA-Luft zu nennen, welche sich derzeit in der Schlussphase der Überarbeitung befindet und zukünftig auch bislang nicht betrachtete Verbindungen, wie z.B. Rührwerke mit einer technischen Dichtheit belegen wird.

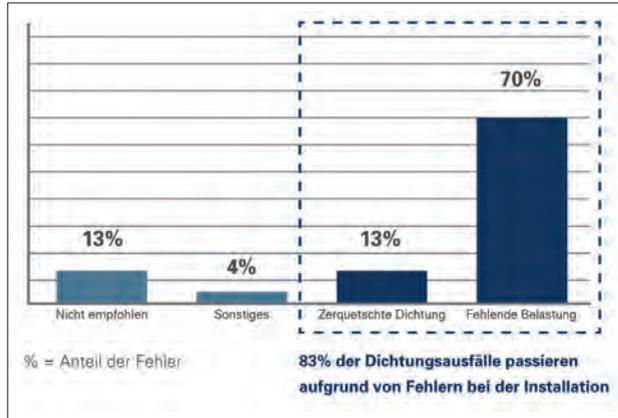
Große Herausforderungen:

Eine Befragung von Prozess-Ingenieuren, Betriebsleitern, Montageleitern und Schichtführern zum Thema, wo Ihre größten Schwierigkeiten bei Flanschverbindungen innerhalb des Betriebes liegen und wo ihre Ziele für ein Betriebsjahr gesteckt sind, ergab folgendes:

- 28% des Montagepersonals sieht Schwierigkeiten, wenn es darum geht, ein Anziehdrehmoment in Verbindung mit einer Dichtung zu identifizieren, da unterschiedliche Dichtungen unterschiedliche Anziehdrehmomente benötigen.

Bild 1: Warum Dichtungen ausfallen: Rückschluss nach der Überprüfung von 100 ausgefallenen Dichtungen: 83% aller Ausfälle basieren auf Montageschwierigkeiten (Überpressung und mangelnde Flächenpressung)

(Bild: Garlock GmbH)



- 21% der Endanwender suchen nach einer Dichtung mit einer höheren technischen Dichtigkeit. Außerdem wurde der Bedarf geäußert, weniger Flächenpressung für eine effektivere Dichtung zu benötigen.
- 21% der Endanwender haben Bedarf an einer Dichtung mit vermindertem Kriechen, was für sie eine Verbesserung durch vermindertes Nachziehen von Flanschverbindungen bedeutet.
- 14% des Personals erkennen zunehmend Montageschwierigkeiten und daraus resultierend beschädigtes Equipment bei der Installation.
- 14% haben das Problem von Undichtigkeiten im Betriebszustand, speziell unter Einsatz von aggressiven und korrosiven Medien.

Die derzeit verfügbaren Optionen, um einige der vorgenannten Hindernisse zu lösen, sind nicht sonderlich hilfreich. Typischerweise werden in Anlagen dickere Dichtungen durch dünnere Dichtungen ersetzt, um die Dichtigkeit zu erhöhen und das Kriechen der Dichtung zu reduzieren, wobei zeitgleich zwar eine bessere Druckstandfestigkeit erreicht wird, aber eine „schlechtere Anpassungsfähigkeit“ und geringere Fehlertoleranz bei Schiefstellung von Flanschen akzeptiert wird. Typischerweise werden 3,2 mm dicke Dichtungen dort eingesetzt, wo Flansche bereits leicht überholungsbedürftig sind und evtl. auch eine größere Abweichung hinsichtlich Parallelität oder Versatz und Verdrehung erwartet wird. Dabei werden willentlich ein höheres Kriechen, eine verminderte Ausblassicherheit und eine generell schlechtere technische Dichtigkeit in Kauf genommen. Dies geschieht basierend auf der Annahme, dass keine bessere Lösung vorhanden ist (**Bild 1**).

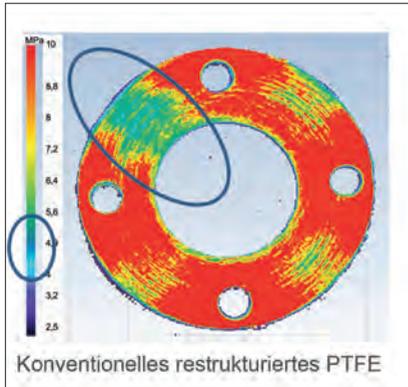


Bild 2: 3" Verpressung bei einer vollflächigen Anwendung (Bild: Garlock GmbH)

Woher kommt dieser hohe Prozentsatz an „mangelhafter Installation“?

Hier addieren sich in der Praxis verschiedene Aspekte. Betrachtet man einen, auch in Europa häufig genutzten 3"cl150 ASME-Flansch hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Flächenpressung bei Einsatz einer vollflächigen Dichtung in perfekter Kondition, so erhält man unter Anwendung von gängigen Schrauben eine Flächenpressung von 33,7MPa. Die mindestens notwendige Flächenpressung einer 3,2 mm dicken Dichtung liegt jedoch bei 33,1MPa, was auf einen Sicherheitsfaktor von nur 1 bis 2% hinausläuft (**Bild 2**).

Zu den Montageschwierigkeiten kommen Entlastungszustände (englisch: unloading) unter Betriebsbedingungen im System. Solche Entlastungen werden bei innerbetrieblichen Rohrleitungen derzeit nur über die Berechnungen nach DIN EN 1591-1 abgefangen, da hier die Mindestflächenpressung zum Aufrechterhalten der Dichtheit ebenfalls iterativ abgeprüft wird. Wenn eine 20 m lange Rohrleitung bereits 0,3 mm Längenausdehnung bei einem Temperaturwechsel von 150 °C hat, so unterliegt die Dichtung zusätzlich bei Prozessbeginn einer höheren Flächenpressung als bei der Montage.

Eine Dichtung muss also nicht nur tolerant gegenüber Entlastung, sondern auch tolerant gegenüber „Überpressung“ – also gegenüber einer gestiegenen Belastung – sein.

Solange nun die Temperatur der Rohrleitung noch erhöht ist, besteht hier keine Schwierigkeit, vorausgesetzt, die maximal tolerierte Flächenpressung (QS_{max}) wird dabei nicht überschritten. Der Entlastungszustand beim Herunterfahren der Anlage jedoch muss nun von der Restspannung in der Schraube wie auch von der Rückfederung des verwendeten Dichtungsmaterials ausgeglichen werden. Hier ist nun der Wert einer Dichtung entscheidend, welcher die mindestens notwendige Flächenpressung zum Aufrechterhalten einer gewünschten Dichtheit vorgibt ($QS_{min/L}$). Eine Dichtung, die hier niedrigere Mindestflächenpressungen benötigt, ist gegenüber einer „normalen“ Dichtung von Vorteil.

Dichtungskennwerte bestimmen das Sicherheitsfenster

Typische Dichtungskennwerte und die kompensatorischen Möglichkeiten eines Dichtungsmaterials bestimmen in der Praxis die Einsatzmöglichkeiten in der Anlage und speziell in der Rohrleitung. Hierbei spielt der Bereich des Sicherheitsfensters eine große Rolle. Da ein Dichtungsmaterial über seine Flächenpressungen (minimale, maximale und die zum Aufrechterhalten der Dichtleistung benötigte) ebenso definiert wird wie über die Kompressibilität und die Rückfederung, spricht man in einer Anlage nun von einem Sicherheitsfenster (Bild 3). Hier bieten die – vom jeweiligen

Hersteller – zur Verfügung gestellten EN 13555-Kennwerte die Möglichkeit, unterschiedliche Materialien verschiedener Hersteller miteinander zu vergleichen, ohne als verantwortlicher Ingenieur eigene zeit- und kostenintensive Tests durchführen zu müssen.

Rückblick: 83% der analysierten Leckagen konnten auf Montageparameter zurückgeführt werden, hier ist noch nicht die Rede von einem Sicherheitsfenster.

Was muss eine technisch bessere Dichtung bieten?

Grundsätzlich wird also ein Dichtungsmaterial benötigt, das

- ein breiteres Anwendungsspektrum besitzt,
- höhere kompensatorische Fähigkeiten hat,
- toleranter hinsichtlich möglicher auftretender Betriebsparameter ist,
- dabei eine höhere technische Dichttheit aufweist als vergleichbare Produkte und
- zusätzlich möglichst mit nur einer Dichtungsdicke mehrere verschiedene im Lager vorhandene Produkte ersetzen kann.

Und dies alles vor dem Hintergrund, dass niedrigere diffuse Emissionen gefordert sind, deren Grenzwerte auch hinsichtlich einer möglicherweise schlecht durchgeführten Montage noch eingehalten werden können.

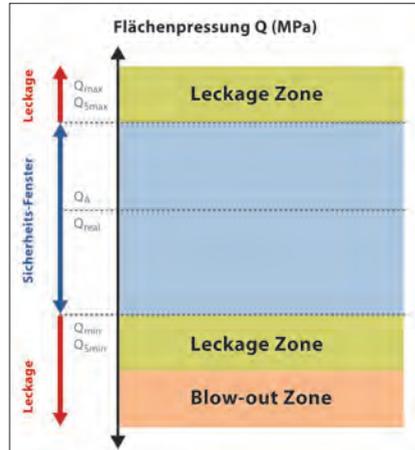


Bild 3: Operatives Sicherheitsfenster

(Bild: Garlock GmbH)

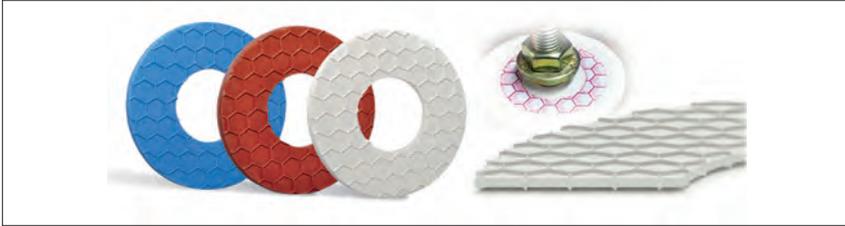


Bild 4: GYLON® EPIX als Beispiel einer Dichtung mit Oberflächentextur (Bild: Garlock GmbH)

Eine in diese Richtung weiterentwickelte Dichtungsfamilie ermöglicht es Anwendern, wertvolle Stillstandszeit zu reduzieren, ungeplante Stillstände nahezu zu eliminieren, Rüstzeiten zu verringern und Montagezeit insgesamt zu senken. Neben der Möglichkeit vor der geplanten Sollzeit ein Ziel abzuschließen, kann ein gestecktes Produktionsziel leichter erreicht werden und die Gesamtkosten zum Betrieb einer Anlage können langfristig gesenkt werden. Als Beispiel ist hier die Notwendigkeit der Überarbeitung einer Werksnorm genannt, wenn für eine Rohrklasse mehrere Dicken von Dichtungen nicht nur bevorratet und eingekauft, sondern auch berechnet, ausgelegt, eingekauft oder insgesamt nur bedacht werden müssen. Neben der langfristigen Einsparung in allen Bereichen der internen Normung bedeutet dies auch eine höhere Verwechslungssicherheit bei der Entnahme aus dem Lager.

Ein vor diesem Hintergrund neu entwickeltes Dichtungsprodukt (**Bild 4**) senkt z.B. die diffusen Immissionen, verringert den Produktverlust und vereinfacht die Montage. Dabei bietet es mehr Freiraum bei bekannten Montageschwierigkeiten oder bei bekannten Einflüssen von Betriebsparametern. Es bietet ein breiteres Anwendungsspektrum mit größerem Sicherheitsfenster und eine geringere Verwechslungsgefahr gegenüber bislang verwendeten Materialien unterschiedlicher Dicke.

Niedrigere diffuse Immissionen und höhere verfügbare Restschraubenspannung können z.B. über Modifikationen innerhalb der Dichte eines Materials erfolgen. Verglichen mit bereits existierenden TA-Luft-Werten bekannter Dichtungsmaterialien unterschiedlicher Dichtungsdicken (**Bild 5**) kann hier bereits durch eine Modifikation der Oberfläche eine Verbesserung der technischen Dichtheit nachgewiesen werden. Das Ergebnis eliminiert die Notwendigkeit unterschiedlicher Dichtungsdicken, speziell dünnerer Materialien für eine Verbesserung der Dichtheit für unterschiedliche geforderte Anwendungen. Höhere technische Dichtheit und eine bessere Adaption an Flanschoberflächen und Schadstellen eliminieren bekannte Montageschwierigkeiten. Mit einer Waben-Modifikation der Dichtungsoberfläche, die durch eine Textur von erhabenen Rippen bestimmt

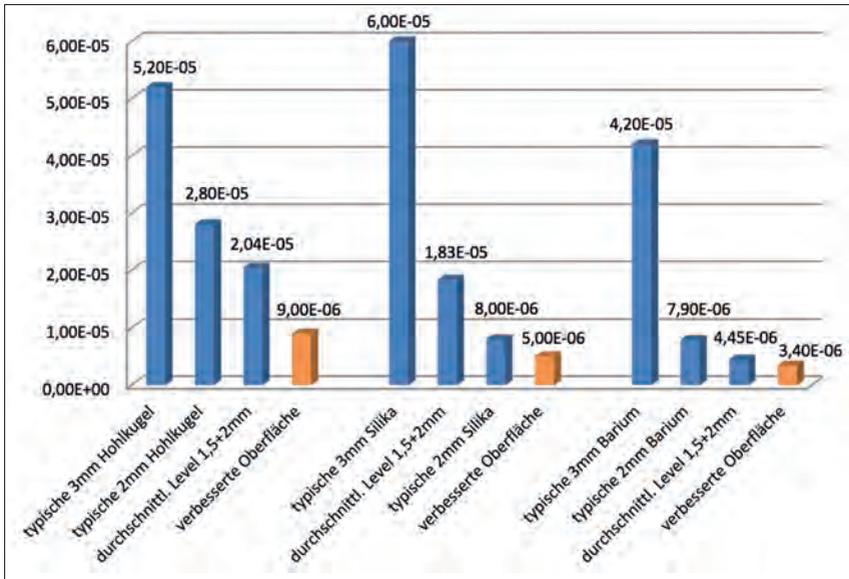


Bild 5: Vergleich von TA-Luft-Ergebnissen bei Oberflächen-Modifikation (Bild: Garlock GmbH)

wird, die bei Montage in den Dichtungskern hinein verpresst werden, wird hier eine Multi-Barriere innerhalb der Dichtungsgeometrie gebildet. Aktuell wird mit einem nicht öffentlichen Forschungsprojekt die These überprüft, dass nicht Leakageströme entlang der Dichtungsfläche, sondern Stofftransportmodelle durch die Dichtung hindurch für die technische Dichtheit verantwortlich sind. Dies kann begründen, warum eine Multi-Barriere scheinbar eine Reduzierung der Leakage ermöglicht.

Durch die Verpressung der Oberflächen-Textur in den Kern hinein wird der Verpressungsgrad der Dichtung (technisch: die Dichte) innerhalb dieser Zonen erhöht. Beide Eigenschaften, die Erhöhung der Dichte wie auch die Multi-Barrieren ermöglichen eine bessere technische Dichtheit und verhindern so nicht nur Produktverlust, sondern sorgen für einen zukunftssicheren Einsatz auch bei einer möglichen Verschärfung der maximal zulässigen Immissionswerte.

Die Konzentration der verfügbaren Schraubkraft auf die erhabenen Rippen der Wabenstruktur zu Beginn der Montage ermöglicht zudem die Verwendung des Dichtungsmaterials auch dann, wenn die Presskräfte vermindert sind, und eliminiert so das Risiko unverspresster Zonen einer Flanschverbindung erheblich.

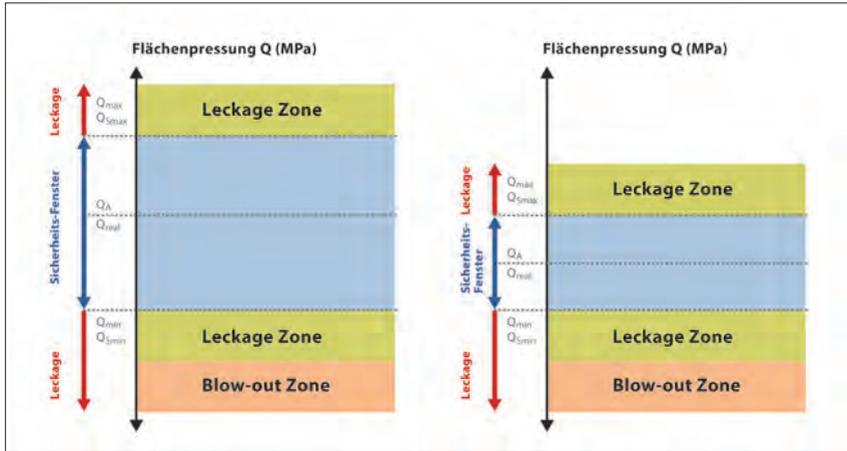


Bild 6: Vergrößertes Sicherheitsfenster (Bild: Garlock GmbH)

Flächenpressungen geben den Ausschlag

Betrachtet man die Möglichkeit einer niedrigeren benötigten Flächenpressung zum Erreichen einer gewünschten technischen Dichtigkeit durch Konzentration der Kraft auf eine kleinere Wirklinie (in diesem Fall eine Oberflächen-Textur) bei zeitgleich höherer tolerierter „Entlastung“ der Dichtung, so hat das Dichtungsmaterial großen Einfluss auf die Langzeit-Performance der Anlage und damit auch entscheidenden Einfluss auf die Verfügbarkeit der Anlage und das Erreichen der Produktionsziele.

Verbessert man also Entlastungseigenschaften und die Dichte eines Materials und vergrößert zeitgleich die maximal ertragbare Flächenpressung, so erreicht man nicht nur ein größeres Sicherheitsfenster als bei herkömmlichen PTFE-Dichtungen, sondern die Schraubenrestspannung wird ebenfalls auf einem höheren Niveau gehalten und eine Entlastung der Dichtung wird wirksam minimiert. **Bild 6** zeigt dies schematisch anhand einer Dichtung bei höherer tolerierter max. Flächenpressung.

Reduzierung in Lager und Einkauf

Rückblick: Ein Ergebnis der von einem neutralen Institut durchgeführten Umfrage ergab, dass 49% der Befragten mit Schwierigkeiten bei der Normung und bei der Erfüllung zukünftiger Standards rechnen, weitere 49% nannten Montage- und/oder Betriebsschwierigkeiten.

Vor diesem Hintergrund spricht vieles für einen Dichtungstyp, der für alles genutzt werden kann. Wählt man einen Dichtungstyp aus, der sowohl die Anpassungsfähigkeit einer dickeren Dichtung als auch die bessere Dichtheit eines „dünnere Dichtungsproduktes“ hat, lassen sich nicht nur Lagerhaltungskosten deutlich reduzieren, sondern auch die Verwechslungsgefahr lässt sich vermindern. Zudem wird Restverschleiß reduziert und die mögliche Ausnutzung einer Dichtungsplatte wird zumeist verbessert. Dies reduziert Beschaffungsprozesse und setzt bislang gebundenes Kapital frei, was zuletzt nicht nur die Liquidität erhöht, sondern auch Mitarbeiterressourcen schont.

Bereits jetzt sind auf dem Markt einige Produkte verfügbar, die dieses Prinzip umsetzen. Vorreiter in diesem Bereich waren die in Zusammenarbeit mit großen Chemieunternehmen entwickelten Produkte „Pro-GFK T504“ sowie „STRESS-SAVER GYLON® Style 3504“. Eine weitere Dichtung mit Oberflächen-Modifikationen ist die Produktserie GYLON® EPIX. Hier wird bereits die vollständige Dichtungsplatte, aus der anschließend Dichtungsgeometrien gefertigt werden, mit einer Oberflächentextur versehen, weshalb nicht nur Normdichtungen, sondern auch Sondergeometrien mit dieser Art der Modifikation verfügbar sind. Im Rückblick auf die zu Beginn von den befragten Personen angeführten Schwierigkeiten und Hindernisse werden hiermit folgende Vorteile von oberflächentexturierten Dichtungen abgedeckt. Aus Sicht der Anwender sind dies:

- geeignet für alle relevanten Medien
- höhere technische Dichtheit gegenüber 2,0 mm dicken PTFE-Materialien
- höhere Anpassungsfähigkeit gegenüber 3,2 mm dicken PTFE-Materialien
- größere tolerierte Entlastung bei Aufrechterhaltung der technischen Dichtheit
- hervorragende Anpassung an unebene Flanschdichtleisten
- größere mögliche Flächenpressung bei bereits niedriger Kraft
- höhere tolerierte maximale Flächenpressung im Betriebszustand und bei Montage
- einfache Installation bei zeitgleich höherer Prozess-Sicherheit
- weniger LDAR, weniger Leckage und weniger ungeplante Stillstände
- reduzierte Lagerhaltungskosten und reduzierter Verschleiß
- reduzierte Verwechslungsgefahr gegenüber unterschiedlichen Dicken

Aus Sicht von Montagedienstleistern sind folgende Vorteile zu nennen:

- Reduzierung der benötigten werksinternen Standards, wenn einmal im Beschaffungssystem eingepflegt
- einfachere Erfüllung der proaktiven Berechnungen (wie z.B. DIN EN 1591-1)
- toleranter hinsichtlich der bei einer Montage zu erwartenden Schwierigkeiten

Wenn man nun die zukünftig steigenden Anforderungen im Markt hinsichtlich einer zunehmend geringeren Immission von Medien betrachtet, so stellt man fest, dass hier bislang im Bereich der Dichtungstechnik nahezu ausschließlich runde Dichtungsgeometrien betrachtet werden. Viele Anwendungen, wie z.B. Rührwerke, Filter, Agitatoren oder einfach nur Gebläse, besitzen jedoch eine Rahmengenometrie, also eine „eckige“ Form. Bislang gab es allerdings kaum Möglichkeiten, Rahmengenometrien ohne eine Sondergeometrie mit einer kraftreduzierenden und zugleich technisch dichter Lösung zu versehen. Die Nutzung von Oberflächentexturen bei bereits im Markt bekannten Materialien ermöglicht neue Anwendungsbereiche für den Kunden und schließt eine bislang bekannte Lücke, zudem werden hohe Einsparungspotenziale und größere Sicherheitsreserven im Vergleich zu bislang verwendeten Produkten bei runden Geometrien erreicht.

Fazit

Oberflächen-Texturen auf Dichtungen begünstigen neben den vorgenannten technischen Vorteilen, wie z.B. höherer Dichtigkeit, verbesserter Anpassungsfähigkeit an den Flansch und höherer Toleranz bei Montageschwierigkeiten, auch eine Steigerung der Produktkapazität einer Anlage und eine Freisetzung von personellen Kapazitäten durch einen langfristig verringerten Aufwand an werksinterner Normenarbeit.

Öffnen, wenn es nötig ist

Druckausgleichselemente im Hochvoltpeicher

Langsam, aber unaufhaltsam, gewinnen elektrische Antriebe bei fast allen uns bekannten Fortbewegungsmitteln an Bedeutung. Dabei sind jedoch noch verschiedene Fragen offen. Aus technischer Sicht ist die sichere Abdichtung der Hochvoltspeichergehäuse eine aktuelle Herausforderung. Hier ist eine Abdichtung gefordert, welche im Bedarfsfall wie ein Druckausgleichselement funktioniert. Semipermeable Membranen aus porösem PTFE sind hier eine Lösung.

2017 wurden bereits 720.000 E-Bikes in Deutschland verkauft und die Zuwachsraten sind seit einigen Jahren stets zweistellig. Und auch sämtliche Fahrzeughersteller haben das ernsthafte Ziel, ihre elektrisch bzw. durch Hybridkonzepte angetriebenen Modelle in den kommenden Jahren zügig in den Markt zu bringen. So will z.B. der chinesische Fahrdienstvermittler Didi Chuxing bis zum Jahr 2028 10 Mio. Elektrofahrzeuge in seine Plattform integrieren, die erste Million bis 2020.

Wie bereits in den Anfängen der E-Mobility ist nach wie vor die Bereitstellung leistungsfähiger und robuster Energiespeicher die größte Herausforderung. Hier gelten die Reichweiten kraftstoffgetriebener Verbrenner als feste Benchmark. Im Hochvoltpeicher werden die einzelnen Akkumulatoren in Form von Pouch- und Prismazellen sowie von klassischen zylindrischen Zellen parallel und in Reihe geschaltet, bis die gewünschten Stromstärken und Kapazitäten erreicht sind.

Temperaturmanagement der Hochvoltspeicher ist ein Problem

Die Lebensdauer und Betriebssicherheit wird bei den zurzeit im Einsatz befindlichen Lithium-Zellen vor allem vom Temperaturmanagement der als Hochvoltpeicher bezeichneten Gehäuse (**Bild 1**) und der Regelelektronik der Lade- bzw. Entladeströme bestimmt. Deshalb betreiben insbesondere europäische Hersteller bei ihren hochwertigen Fahrzeugen einen erheblichen Aufwand in Form von voll klimatisierten Hochvoltspeichern mit integrierten Notentgasungssystemen.

Von Gerd Schollenberger, Inhaber¹ und freier Mitarbeiter²

¹MIS | www.gs-mis.de

²Berghof Fluoroplastic Technology GmbH (BFT) | www.berghof-fluoroplastics.com



Bild 1: Schematischer Aufbau Hochvolt-speicher (Bild: MIS)

Bei Pedelecs (pedalelektrischen Fahrrädern), elektrisch angetriebenen Rollstühlen und weiteren LEV (Light Electric Vehicle) reduzieren die Hersteller den Schutz der Zellen innerhalb der Hochvolt-speicher jedoch meistens auf ein Minimum. Die auf dem Markt anzutreffenden Lösungen sind i.d.R. mit einem Staub- und Spritzwasserschutz, entsprechend IP 64k, versehen. Druckausgleichselemente bzw. Notentgasungssysteme sind in diesem Anwendungsbereich eher noch eine Seltenheit.

Die klassischen Aufgaben von Druckausgleichselementen sind primär der sichere Schutz abgedichteter Gehäuse vor eindringender, korrosionsfördernder Feuchtigkeit. Durch die definierten Be-/Entlüftungseigenschaften der hier zur Anwendung kommenden semipermeablen Membranen wird ein durch Erwärmung bzw. Abkühlung erfolgreicher, für die Gehäusestabilität sowie die Gehäusedichtungen schädlicher Druckauf- bzw. Druckabbau wirkungsvoll unterbunden.

Betrachtet man nun die aus den unterschiedlichen Anwendungsgebieten bzw. dem entsprechenden Bauaufwand der jeweiligen Hochvolt-speicher resultierenden Anforderungen an Druckausgleichselemente, so sind klare Schwerpunkte erkennbar:

- Für die in Pedelecs und LEV (Light Electric Vehicles) verwendeten Speicher ist ein effektiver Schutz sowohl vor den Auswirkungen von Temperaturschwankungen als auch vor den Folgen von Kurzschlüssen im Zellinneren (thermal runaway) notwendig. Bautechnisch aufwändige, klimatisierte Hochvolt-speicher benötigen hingegen vor allem einen wirksamen Schutz im Falle eines dramatisch ablaufenden Zellbrands.
- In allen bekannten Anwendungsfällen sind die Anforderungen an die Druckausgleichselemente herausfordernd. Primär geht es darum, wirkungsvoll zu verhindern, dass die ganze Bandbreite der Umgebungsmedien des Speichers im Alltag, wie z.B. Straßenstaub, Öl, Streusalz, Wasser, Hochdruckwasserstrahl, Reinigungslösungen etc., ins System eindringen kann. Das alles im Temperaturbereich von -40 °C bis teilweise > 100 °C.

- Zusätzlich sind die durch die genannten Einsatztemperaturen möglichen Druckschwankungen im geschlossenen Gehäuse von mehr als 600 mbar zum Schutz der Gehäusedichtheit stets auszugleichen.



Bild 2: Bildlich gesprochen muss eine Lösung diesen Anforderungen Rechnung tragen

(Bild: MIS)

Mit semipermeablen Membranen die benötigte Dichtheit erreichen

Nun gibt es diverse interessante konstruktive Lösungen geeigneter Druckausgleichselemente und Notentgasungssysteme, nachfolgend steht das Herzstück beider Elemente, die semipermeable Membran, (**Bild 2**) im Fokus.

Hierfür eignen sich im Prinzip generell alle porösen Werkstoffe mit ausgeprägter Hydrophobie. Allerdings wird die Auswahl bei der ebenso wichtigen dauerhaften Beständigkeitsforderung gegen die verwendeten aprotischen Elektrolytlösungen, wie z.B. Propylencarbonat, Acetonitril oder Festelektrolyte, bereits deutlich eingeschränkt. Aufgrund der im automotiven Umfeld ebenfalls geforderten Ölbeständigkeit muss die Membrane zudem auch noch oleophobe Eigenschaften aufweisen.

Hierfür eignen sich im Prinzip generell alle porösen Werkstoffe mit ausgeprägter Hydrophobie. Allerdings wird die Auswahl bei der ebenso wichtigen dauerhaften Beständigkeitsforderung gegen die verwendeten aprotischen Elektrolytlösungen, wie z.B. Propylencarbonat, Acetonitril oder Festelektrolyte, bereits deutlich eingeschränkt. Aufgrund der im automotiven Umfeld ebenfalls geforderten Ölbeständigkeit muss die Membrane zudem auch noch oleophobe Eigenschaften aufweisen.

Durch die in einigen Notentgasungssystemen geforderte Berstfähigkeit der Membran wird die Werkstoffauswahl weiter eingeschränkt, denn die häufig anzutreffenden Membranwerkstoffe ePTFE und PES sind oft zu flexibel oder mit einem Trägerstoff laminiert und lassen sich nicht definiert zum Reißen bringen. Die genannten Selektionskriterien führen systematisch zu porösem, gesintertem PTFE. Dieser Membranwerkstoff verfügt neben der vollständig vorhandenen Medienbeständigkeit auch über diverse verfahrensbedingte Alleinstellungsmerkmale:

- Poröses PTFE wird durchgesintert und kann prozessbedingt ein definierbares Reißverhalten bieten.
- Die für den Luftdurchsatz und den Wassereintrittsdruck verantwortlichen Faktoren Porengröße und Membranstärke lassen sich auf die Forderungen des Lastenheftes einstellen.
- Es sind auch Formteile sowie zylindrische DAE (Druckausgleichselemente) fertigbar.
- Beim Ultraschallschweißen bietet die Haftfähigkeit auch auf gefüllten Thermoplasten Bestwerte.

Der Fertigungsprozess von porösem PTFE erfolgt mehrstufig. Dadurch kann der Hersteller in hohem Maß die in der entsprechenden Anwendung benötigten Funktions-

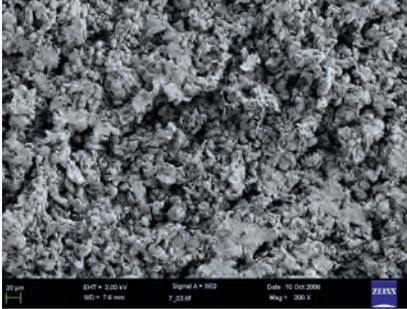


Bild 3: Poröses PTFE (Bild: BFT)

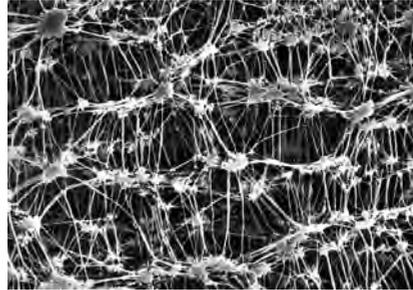


Bild 4: Ungesintertes, axial gestrecktes PTFE (ePTFE) (Bild: BFT)

eigenschaften sowohl bei der Auswahl der geeignetsten PTFE-Typen wie auch bei Einstellung der Fertigungsparameter in den Prozessstufen berücksichtigen:

- isostatisches Verpressen der ausgewählten PTFE-Typen in Zylinderform
- hochpräzises Sintern mit permanenter Temperaturverlaufskontrolle
- Abschälen der Membrane zu eng tolerierten Folienbändern

In **Bild 3** ist der beim Sintervorgang des porösen PTFE entstandene schwammartige Aufbau unzähliger Mikroöffnungen und Verbindungen zu sehen. Luft und weitere Gase penetrieren hierdurch problemlos die Membran. Der entsprechende Luftdurchsatz wird gebräuchlich als AFR (Air Flow Rate) bezeichnet. Die ausgeprägt hydrophobe Eigenschaft semipermeabler PTFE-Membranen resultiert aus der hohen Oberflächenspannung von Wasser und seiner Polarität beim Kontakt mit PTFE. Diese Kombination ergibt einen die Benetzung sehr stark hemmenden Kontaktwinkel. In der Folge kann flüssiges Wasser erst bei entsprechenden Drücken in die Membrane eindringen. Dieser Kennwert wird als WIP (Water Intrusion Pressure) ausgewiesen.

Im Vergleich hierzu zeigt das **Bild 4** die fadenförmigen, an Knotenpunkten zusammenlaufenden Permeationspfade von ePTFE. Das Funktionsprinzip samt dem resultierenden Eigenschaftsprofil dieses Membrantyps ist bezüglich Luftdurchsatz und Wasserrückhaltevermögen mit dem porösen, gesinterten PTFE absolut vergleichbar. Problematisch wird für das ePTFE die bei Notentgasungssystemen zusätzlich geforderte Berstfähigkeit. Hierbei wird die durch axiales Verstrecken gewonnene Porosität bei plötzlich unter hohem Druck anstehenden Gasmassen mittels des anstehenden Staudrucks durch weitere Streckung der in **Bild 4** zu sehenden PTFE-Microfilamente lediglich dramatisch vergrößert. Die Membrane wird weiter expandiert, reißt aber nicht bei definierten Maximaldrücken.

Fazit

Poröses, gesintertes PTFE verfügt über einzigartige technische Eigenschaften:

- Porengröße und Membranstärke lassen sich je nach Anforderung präzise einstellen,
- Luftdurchsatz und Wassereintrittsdruck weisen niedrige Toleranzen auf,
- hervorragende Verbindungsgüte beim Ultraschallschweißen und
- definiertes Reißverhalten bei Notentgasung.

Das macht dieses Material zum idealen Membranwerkstoff für Druckausgleichselemente und Notentgasungssysteme in Hochvoltspeichern in der nach langer Vorlaufzeit nun boomenden E-Mobility.



SICHER DICHT!

Mit KLINGER® top-chem – für alle Anforderungen
die passende PTFE-Dichtung



KLINGER GmbH
Rich.-Klinger-Straße 37
D-65510 Idstein

T +49 61 26 4016-0
F +49 61 26 4016-11
mail@klinger.de

www.klinger.de

Neues Dichtsystem für kriechende Flansche

GFK-Flansche fast so zuverlässig und wartungsarm abdichten wie Stahlflansche

Bei Temperaturen ab ca. 50 °C zeigen in der Prozesstechnik vielfach verwendete GFK-Flansche ein nennenswertes Kriechen und Setzen, wobei es sich um eine systematische Schwäche handelt. Ein neues Dichtsystem stellt vor diesem Hintergrund konstruktive Merkmale zur Verfügung, die das unvermeidliche Setzen und Kriechen von Kunststoff- bzw. GFK-Flanschen unter Temperatur aktiv ausgleichen können. Somit entfällt das regelmäßige Nachziehen der Schrauben weitgehend, gleichzeitig erhöht sich die Dichtigkeit und somit die Sicherheit in der Anlage.

Insbesondere für aggressive Medien sind Rohrleitungssysteme aus z.B. glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) ein wichtiger Bestandteil in der heutigen Prozesstechniklandschaft. Sie zeichnen sich nicht nur durch die erforderliche chemische Beständigkeit gegenüber den zu fördernden Medien, sondern auch durch eine konkurrenzlose Leichtbauweise und flexible Leitungsführung aus. Der Betrieb derartiger Anlagen im üblichen Temperaturbereich zwischen RT und ca. 80 °C gilt allgemein als erprobt und bewährt. Wo Licht ist, gibt es bekanntlich auch Schatten. In diesem Fall bezieht sich diese Aussage auf die Langzeitstabilität der Dichtverbindung. Vor allem bei Temperaturen ab ca. 50 °C zeigen GFK-Flansche nennenswertes Kriechen und Setzen, wobei es sich um eine systematische Schwäche handelt. Die Folge: Schraubenvorspannkräfte und somit die Flächenpressung auf der Dichtung fallen unzulässig weit ab. Das Dichtsystem wird undicht – selbst bei flüssigen Medien – und es kommt zu Produktionsausfällen, von der Sicherheit in der Anlage ganz zu schweigen.

Bild 1 zeigt den Verlust an Schraubenvorspannkraft eines GFK-Flansches bei 45 °C Temperaturlagerung. Durch einmaliges Nachziehen kann das Weiterkriechen verlangsamt, aber nicht völlig gestoppt werden. Mit zunehmender Anwendungstemperatur beschleunigt sich dieser Vorgang.

Von Dipl.-Ing. Marco Schildknecht, Leiter Anwendungstechnik Dichtungen; B. Eng. Ilona Wohner, Entwicklung Dichtungen
Frenzelit GmbH | www.frenzelit.com

Bild 1: Kriechen von GFK-Flanschen

(Bild: Frenzelit GmbH)

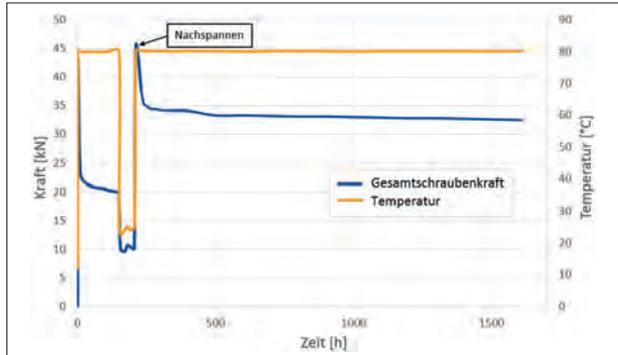
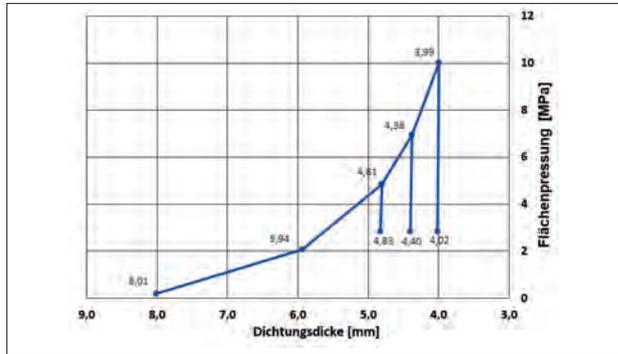


Bild 2: Verformung von ePTFE-Dichtungen

(Bild: Frenzelit GmbH)



Rückfederung von Dichtwerkstoffen – oft überschätzt

In der Praxis heißt es häufig: „Das muss die Dichtung ausgleichen können“, was jedoch für herkömmliche Dichtungen eine unmöglich zu leistende Herausforderung darstellt.

An dieser Stelle müssen häufige Fehlannahmen über die Rückfederung verschiedener Dichtungswerkstoffe korrigiert werden. Üblicherweise werden bei Flachdichtungen die technischen Daten Zusammendrückung und Rückfederung nach ASTM F36J ermittelt. Dort wird die Rückfederung als Prozentwert der vorher gemessenen Zusammendrückung angegeben, allerdings bei nahezu vollständiger Entlastung des Prüfkörpers. **Bild 2, 3 und 4** zeigen die Zusammendrückung und Rückfederung verschiedener Werkstoffe gemessen an einer realen Dichtungsgeometrie in einem automatisierten Dichtungsprüfstand. Die Werte des zurückgelegten Weges beziehen sich auf eine Verpressung von anfangs 0 bis 10 MPa und eine Entlastung auf ca. 2,5 MPa. Werte darunter sind aus naheliegenden Gründen nicht betrachtet worden,

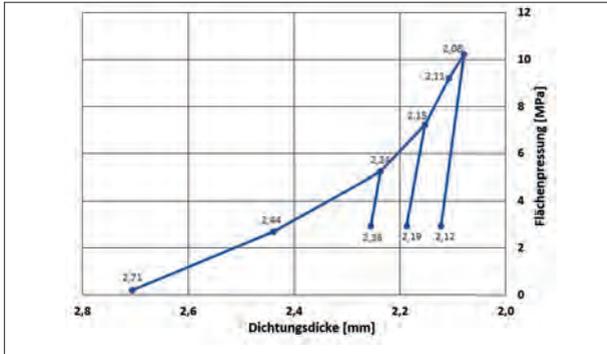


Bild 3: Verformung von Wellringen

(Bild: Frenzelit GmbH)

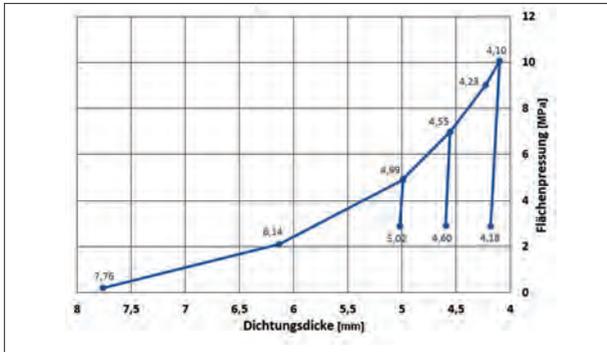


Bild 4: Verformung einer NBR-Dichtung Shore A 70

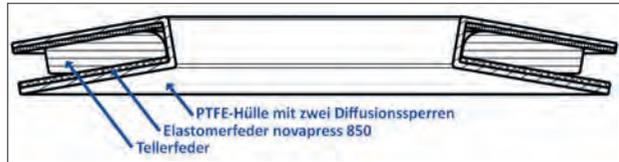
(Bild: Frenzelit GmbH)

da die Dichtverbindung unterhalb der genannten Flächenpressung ohnehin Gefahr läuft, undicht zu werden. Es erfolgt also eine praxistaugliche Bewertung der Rückfederung verschiedener Dichtungslösungen.

Aus Gründen der chemischen Beständigkeit werden häufig ePTFE-Dichtungen für GFK-Flansche eingesetzt. Die gemessene Rückfederung bei einer 8 mm dicken ePTFE-Dichtung von 10 auf 2,5 MPa liegt jedoch lediglich bei 0,03 mm (**Bild 2**). Die eingangs beschriebenen Setzvorgänge der GFK-Flansche stellen Dichtungen aus ePTFE vor nahezu unlösbare Aufgaben. In jedem Fall müssen Schraubenvorspannkraftverluste regelmäßig durch Nachziehen kompensiert werden. Dieser manuelle Vorgang ist eine nicht zu unterschätzende Fehlerquelle und darüber hinaus mit Zeitaufwand und Kosten verbunden. Ebenso stellt das von Temperatur und Zeit abhängige Kriechen der GFK-Flansche und die damit verbundene unzulässige Entlastung der Dichtung ein Risiko für die Anlagensicherheit dar.

Bild 5: Aufbau des neuen Dichtsystems novaline 910

(Bild: Frenzelt GmbH)



Die Rückfederung bei einer handelsüblichen Wellringdichtung (**Bild 3**) mit Graphitauflage, Gesamtdicke 2,8 mm, gemessen von 10 auf 2,5 MPa Flächenpressung liegt lediglich bei 0,04 mm. Der Test zeigt, dass die den Wellringen gelegentlich nachgesagte Rückfederung durch die gewellte Stahleinlage kaum vorhanden ist.

Insbesondere dem Werkstoff „Gummi“ sagt man eine ideale Rückfederung nach. **Bild 4** zeigt jedoch, dass bis zu einer Entlastung auf 2,5 MPa ebenfalls kaum eine nennenswerte Rückfederung stattfindet. Hier wurden 0,08 mm ermittelt. Der wesentliche Weg der Rückfederung des Elastomers erfolgt erst unterhalb einer sehr geringen Restflächenpressung von ca. 1 MPa. In diesem Bereich der Verpressung befindet man sich bereits auf sehr dünnem Eis, was daher in der Praxis stets vermieden werden sollte.

Die Lösung

Das neue Dichtsystem novaline 910 (**Bild 5**) besteht aus drei verschiedenen Komponenten, die unterschiedliche Aufgaben wahrnehmen:

- Die außen liegende PTFE-Hülle samt Diffusionssperren sorgt sowohl für die chemische Beständigkeit als auch für eine hohe Dichtigkeit der Dichtung.
- Die darunterliegende Polymerfeder aus novapress 850 sorgt für eine hohe Anpassungsfähigkeit an die Flanschoberfläche.
- Die innen liegende Tellerfeder sorgt für eine nennenswerte Rückfederung des Gesamtsystems, um auch ein hohes Setzen der Flansche ausgleichen zu können. Die Federkraft der Tellerfeder ist speziell auf die jeweilige Nennweite des GFK-Flansches abgestimmt.

Die Verformungskurve (**Bild 6**) des Dichtsystems – gemessen an einer Dichtung für DN 40 Flansche – zeigt einen konkreten Rückfederungsweg von 0,6 mm; bei größeren Nennweiten sogar bis zu 1 mm. Hier wird aktiv das Kriechen der GFK-Flansche unter Temperatur ausgeglichen, sodass ausreichend Restflächenpressung auf der Dichtung für zuverlässige Dichtigkeit sorgt.

Durch die Struktur der Tellerfeder erfolgt die Verpressung des Dichtsystems niemals vollflächig, sondern auf einem deutlich schmaleren Rand, sodass höhere wirksame

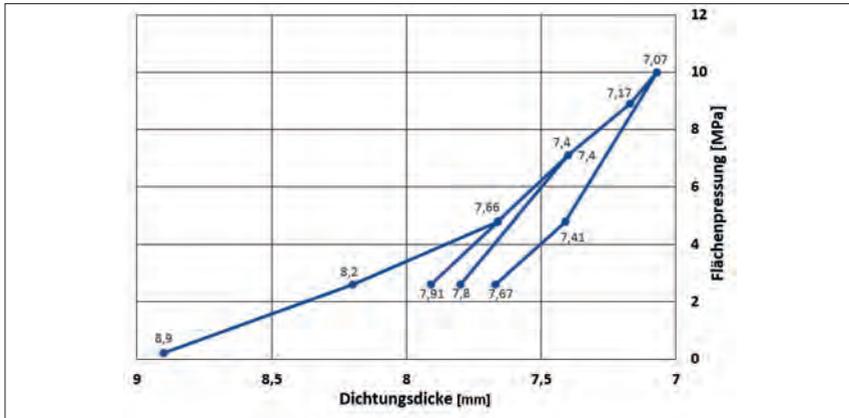


Bild 6: Verformung von novaline 910 (Bild: Frenzelit GmbH)

Flächenpressungen auf der Dichtung vorliegen (**Bild 7**). Dies erhöht die Dichtigkeit, selbst wenn – vollflächig gerechnet – nur noch magere 2,5 MPa vorhanden sind. Gleichzeitig werden die Flansche geschont und vor unnötig hohen Kräften bewahrt.

Als Nachweis der Leistungsfähigkeit des Dichtsystems wurden Leckageuntersuchungen mit verschiedenen Flächenpressungsniveaus bis hinunter zu lediglich 2,5 MPa durchgeführt. **Bild 8** zeigt die niedrige Leckagerate der novaline 910, selbst wenn die Flächenpressung auf 2,5 MPa (vollflächig) reduziert wird. Die Messungen wurden mit 16 bar Helium durchgeführt. **Bild 8** zeigt ebenfalls den zur Verfügung stehenden Rückfederungsweg der Dichtung.

Fazit

Mit dem neuen Dichtsystem novaline 910 können Dichtverbindungen in Flanschsystemen mit unvermeidlichem Temperaturkriechen auf einem neuen Zuverlässigkeitslevel realisiert werden. Die Kombination aus chemischer Beständigkeit, optimaler Anpassungsfähigkeit und aktiver mechanischer Wegkompensation ermöglicht Dichtverbindungen für GFK-Flansche mit ähnlicher Zuverlässigkeit und Wartungsfreiheit, wie sie sonst nur mit Stahlflanschen möglich sind.



Bild 7: Film-Aufnahmen verdeutlichen die Pressungsverteilung (Bild: Frenzelit GmbH)

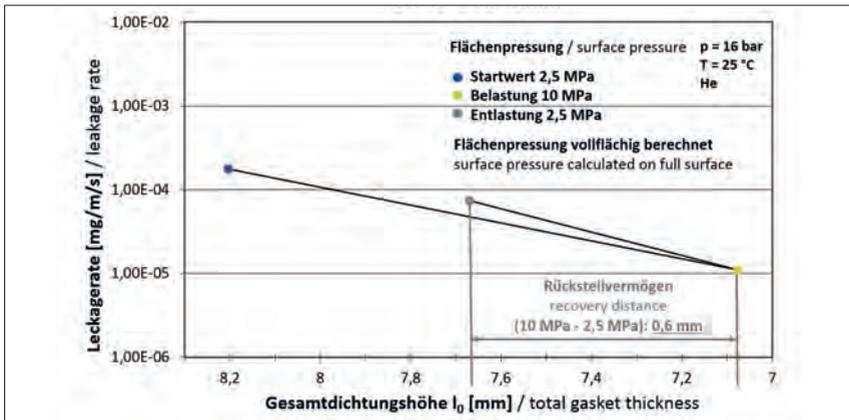


Bild 8: Leckagekurve des neuen Dichtsystems novaline 910 für einen Flansch DN 40 86 x 46 mm über der Verformung (Bild: Frenzelit GmbH)

Gummi-Stahl-Dichtung ist nicht gleich Gummi-Stahl-Dichtung

Neue Generation erweitert Leistungsspektrum

„Das Bessere ist der Feind des Guten“ sagte schon Voltaire. So verhält es sich auch bei Dichtungen, wie z.B. bei der Weiterentwicklung einer bekannten Gummi-Stahl-Dichtung. Durch Optimierung der einzelnen Bestandteile dieses Dichtungskonzeptes konnte der Leistungsbereich deutlich erweitert werden.

Vielfach wird die Leistungsfähigkeit von Gummi-Stahl-Dichtungen unterschätzt. Unterstützt durch den herrschenden Preiskampf kommen Billig-Produkte auf den Markt, die aufgrund ihrer Eigenschaften das Ansehen dieser Dichtungsgattung nicht gerade unterstützen. Selbst in der Normung hat dieser Trend schon Auswirkungen gezeigt und generelle Einsatzgrenzen definiert, die den Einsatzbereich auf das „Billig-Niveau“ einschränken wollen. Steht man jedoch für hochwertige Produkte, für Sicherheit und Seriosität, dann kann man sich mit diesem Trend nicht zufriedengeben. Dies war mit ein Grund, die neue Generation der Gummi-Stahl-Dichtung zu entwickeln.

Verbesserte Formgebung

Die verwendeten hochwertigen Elastomere ergeben mit der hochfesten Gummi-Stahl-Verbindung schon bei den bisherigen Dichtungen vom Typ KGS eine sehr stabile Kombination. Eine Trennung des Elastomers vom Stahlkern ist selbst unter extremem Krafteinsatz nicht möglich. Auf diese Eigenschaften konnte man sich bei der Optimierung der Formgebung also gut verlassen. Allerdings wandert bei hohen Pressungen der Elastomere nach außen und innen, um der Flächenpressung zwischen Flansch und dem Stahlring zu „entkommen“ und Entlastung zu erlangen (**Bild 1**). Dies führt aber dazu, dass das verdrängte Material innen in den Querschnitt der Rohrverbindung einwandert. Diese Intrusion ist natürlich nicht erwünscht. Wenn man nun die Menge an „wanderndem“ Elastomer reduziert und ein Puffervolumen bereithält, kann diese Intrusion vermieden werden (**Bild 2**). Dies wurde mit dem optimierten Speerprofil und den speziellen Masseverhältnissen über den Radius der neuen KGS G II erreicht. Die Funktionsweise zeigen die **Bilder 3 bis 6**. Gleichzeitig erhält man eine

Von Dipl.-Ing. Norbert Weimer, Unternehmensleitung
KLINGER GmbH | www.klinger.de

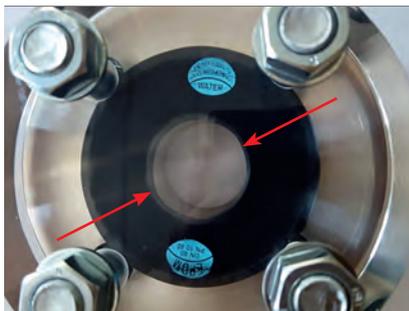


Bild 1: Bewährte Standarddichtung bei 32 MPa – Intrusion erkennbar (Bild: Klinger GmbH)

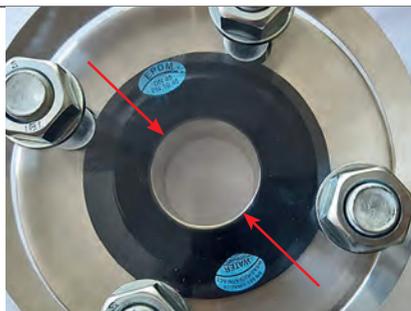


Bild 2: Die neue Dichtung bei 53 MP – keine Intrusion (Bild: Klinger GmbH)

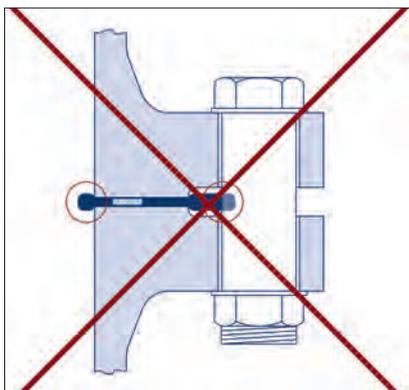


Bild 3: Fehlerhafte Funktion

(Bild: Klinger GmbH)

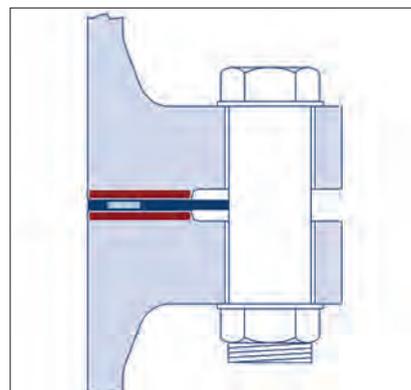


Bild 4: Unter Höchstlast

(Bild: Klinger GmbH)

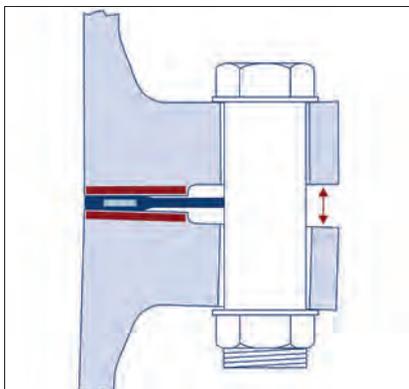


Bild 5: Bei Interparallelitäten

(Bild: Klinger GmbH)

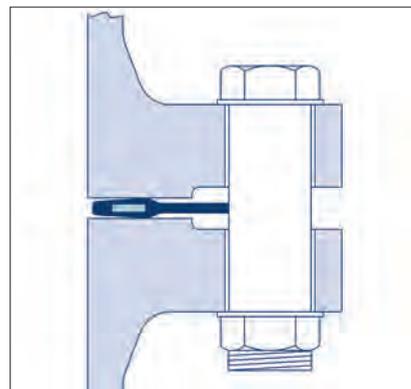


Bild 6: Bei minimaler Pressung

(Bild: Klinger GmbH)

Gummi-Stahl-Dichtung, die deutlich höhere Flanschkräfte aufnehmen kann als bisher bekannt, weil auch die Wegstrecke, die das nach Entlastung suchende Elastomer aufgrund des schmaleren Stahlringes zurücklegen muss, kürzer ist. Ist der Weg zu lang, also der Stahlring zu breit, so können bei hohen Pressungen Risse im Elastomer entstehen.

Noch eine weitere Verbesserung konnte durch die Formgebung erreicht werden. Aufgrund des Produktionsprozesses ist eine sichere Positionierung des Stahlringes in der Form- nicht wirklich möglich. Der Stahlring „schwimmt“ während des Herstellvorganges und kann daher auch eine dezentrierte Position annehmen. Dies führt zu unterschiedlichen Hebellängen von Schraube zu Auflagepunkt innerhalb des Flanschkreises und damit zu ungleichen Kräften in der Flanschverbindung. Bei der Weiterentwicklung wurde erstmals für eine Gummi-Stahl-Dichtung eine exakte Zentrierung des Stahlringes im Produktionsprozess durch die Formgebung sichergestellt. Hierdurch sind die Hebelkräfte bei der Flanschmontage gleichmäßig verteilt und die Krafteinleitung erfolgt symmetrisch – das „Verziehen“ des Flansches ist weniger wahrscheinlich. Die Montagequalität ist aufgrund der Optimierung der Geometrien und Masseanteile von Stahl und Gummi deutlich höher als bei herkömmlichen Gummi-Stahl-Dichtungen.

Breites Materialspektrum

Die neue Dichtung kann über den Einsatz unterschiedlicher Elastomere auf den jeweiligen Einsatzbereich angepasst werden. Typische Einsatzfelder der verwendeten Elastomere sind:

- EPDM – Trinkwasser, Wasser, Prozesswasser (in Abstimmung mit dem Anbieter)
- NBR – Gas, kohlenwasserstoffhaltige Medien, Abwasser, Wasser
- NR – Wasser, Kreislaufwasser, verdünnte Laugen (in Abstimmung mit dem Anbieter)
- CSM – Säuren, Laugen
- FKM – Säuren, Laugen und Chemikalien bei höheren Temperaturen ((in Abstimmung mit dem Anbieter)

Ausgeführt in NBR bietet die Dichtung eine gute Beständigkeit gegen aliphatische Kohlenwasserstoffe, Mineralöle und -fette sowie Kraftstoffe. Daher ist sie gut geeignet für den Einsatz bei kohlenwasserstoffhaltigen Medien in Gasleitungen. KGS Dichtungen sowie die neue KGS II aus NBR können weiterhin im Gasbereich bis PN/MOP 40 eingesetzt werden. Beide Dichtungen erfüllen der Anforderungen der DIN 30690-1 sowie des Arbeitsblattes DVGW G19. Aber auch bei Abwasser und Brauchwasseranlagen wird sie eingesetzt. Der Temperatureinsatzbereich reicht von - 15 °C bis + 110 °C. Zulassungen und Zertifikate sind: DVGW-Zertifikat nach EN 682 GBL ,EN 681-1 WG Klasse 70 und TA-Luft.

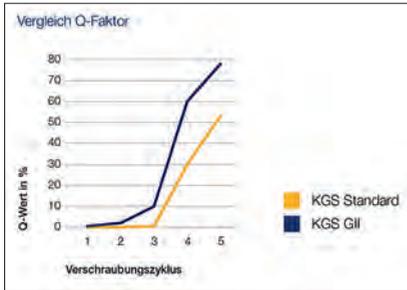


Bild 7: Vergleich des Montagequalitätsfaktors zwischen alter und neuer Dichtung

(Bild: Klinger GmbH)

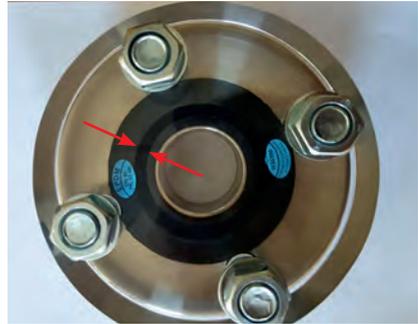


Bild 8: Die neue Dichtung bei 5 MPa

(Bild: Klinger GmbH)

Bei der Ausführung in EPDM überwiegen die gute Chemikalienbeständigkeit sowie eine gute Ozon-, Alterungs- und Witterungsbeständigkeit. Durch die Zulassungen ist besonders der Einsatz im Trinkwasserbereich hervorzuheben. Die Einsatztemperaturen liegen zwischen -40 °C und $+110\text{ °C}$, kurzfristig bis 130 °C . Vorhandene Zulassungen und Zertifikate sind: EN 681-1 WAL / WCL Klasse 70, Elastomerleitlinie (neue KTW), DVGW W270, ACS, WRAS (BS6920), FDA Konformitätsbescheinigung sowie die TA-Luft.

Umfangreiche Tests

Um die Eigenschaften der neuen Dichtung hinsichtlich ihrer Montagequalität zu beurteilen, wurde das Verhalten auf einem Prüfstand im Vergleich zur Standardversion KGS geprüft. Der durchgeführte Test bietet zur schnellen Prüfung und Beurteilung der Montagequalität als Resultat den Q-Faktor. Er ist das Produkt von Zielschraubenkraft zu tatsächlich erreichter Schraubenkraft, Differenz von minimaler zu maximaler Schraubenkraft und der Standardabweichung zur Zielschraubenkraft (**Bild 7**).

Die neue Formgebung wirkt sich auch auf das Abdichtverhalten positiv aus. Die Geometrie ist so gewählt, dass schon bei geringsten Flächenpressungen eine sichere Abdichtung entsteht (**Bild 8**). Andererseits kann die Dichtung aufgrund kurzer Ausgleichswege des Elastomers enorm hohe statische Lasten abtragen. Damit wird die Verbindung bei höheren Schrauben- und Rohrkräften deutlich sicherer. Spezielle Reservoirbereiche führen dazu, dass trotz der hohen möglichen Pressung keine Intrusion des Elastomers in die lichte Weite des Rohres bzw. keine Extrusion in den Zentrierbereich stattfindet (**Bild 2**).

Der TÜV SÜD hat entsprechende Tests durchgeführt, um die Hochwertigkeit dieser neuen Dichtungsgeneration nachzuweisen. Hierbei wurde das Leckage-, Ausblas- und Alterungsverhalten geprüft. Bezüglich der Ausblassicherheit sind 3 Klassen definiert:

- Klasse A – Prüfung beim 1,5-fachen des Nenndruckes bei der Restflächenpressung nach Auslagerung, hier bei 110 °C und 1.500 h. Hier wurde sogar der 2,5-fache Nenndruck als Prüfdruck gewählt, also 100 bar.
- Klasse B – hier wird die Flächenpressung auf die vom Hersteller angegebene Mindestflächenpressung im Betriebszustand QS_{\min} reduziert. In diesem Fall 5 MPa.
- Klasse C – bei dieser Prüfklasse wird die Flächenpressung der Klasse B nochmals um 25% reduziert, in diesem Fall 3,75 MPa.

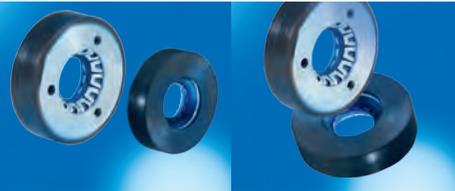
Die hohen Anforderungen wurden bei den Tests noch übertroffen, denn selbst die Ausblassicherheitsklasse C konnte mit einigen 10er Potenzen an Sicherheit nachgewiesen werden. Und dies bei einem Druck von 100 bar nach einer Alterung bei 110 °C über 1.500 h.

Die Optimierung der Gummi-Stahl-Dichtung hat noch einen weiteren interessanten Effekt: Es wird nur die Menge an Rohstoffen verwendet, die auch für die Funktion benötigt wird. Somit sind die Dichtungen leichter, einfacher zu handhaben und im Transport ressourcenschonend. Aufgrund der deutlichen Verbesserungen wurde das Dichtkonzept zum Patent angemeldet.

Fazit

Gummi-Stahl-Dichtungen können einen großen Anwendungsbereich bis PN 40 (MOP 40 bar) sicher abdecken, wenn es sich um Qualitätsprodukte mit nachprüfaren Eigenschaften handelt. Die Neuentwicklung zeigt Potenzial, diesen Bereich noch zu erweitern. Alle Gummi-Stahl-Dichtungen hinsichtlich ihrer Eigenschaften gleich zu bewerten, ist falsch – es gibt deutliche Unterschiede.

Dynamische Dichtsysteme/ Tribologie



>> Innovative Dichtsysteme und Konstruktionsbauteile aus Hochleistungskunststoffen – von der Idee bis zur kompletten Systemlösung von ElringKlinger Kunststofftechnik.

PTFE-Wellendichtungen effizient simulieren

Eine neues multiphysikalisches Simulationsmodell erleichtert die Auslegung von Dichtsystemen

Wellendichtungen sollen das Austreten von Öl und das Eindringen von Schmutzpartikeln an Gehäuseausgängen verhindern. Wegen der guten thermischen und chemischen Beständigkeit sowie der Trockenlaufeigenschaften werden häufig Wellendichtungen aus Polytetrafluorethylen (PTFE) verwendet. Andere Eigenschaften von PTFE legen allerdings eine Simulation eines Dichtsystems nahe. Hierzu wurde die letzten Jahre ein Modell entwickelt.

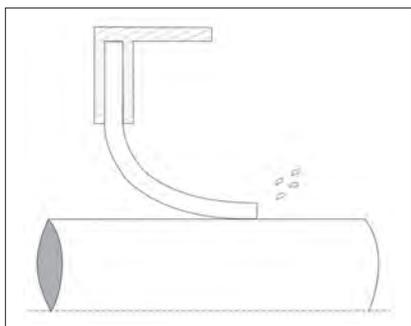


Bild 1: Prinzipdarstellung einer PTFE-Manschettendichtung (Bild: HAW Hamburg)

Die Dichtung (**Bild 1**) muss so auslegt werden, dass ihre Funktionalität für alle auftretenden Kombinationen aus Öl-, Wellen- und Lufttemperatur sowie Drehzahl, Koaxialitäts- und Rundlaufabweichungen der Welle gewährleistet ist. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Dichtung im Einsatzzeitraum keine gleichbleibenden Eigenschaften hat. Grund hierfür ist vorrangig der Abrieb der Dichtung im Dichtkontakt, der zu einer größeren Kontaktfläche mit der Welle und einer geringeren Flächenpressung

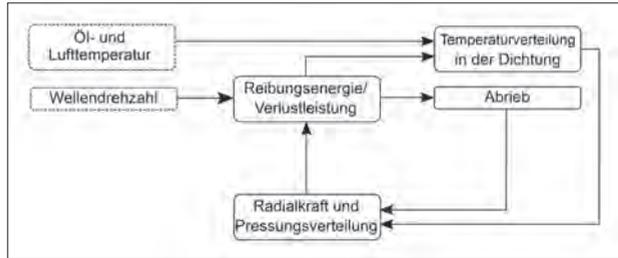
führt. Dies wirkt sich weiterhin auf die reibungsinduzierte Wärmeentwicklung und auf die Temperaturverteilung in der Dichtung aus. Die Temperaturverteilung in der Dichtung ist entscheidend, da die mechanischen Eigenschaften von PTFE stark temperaturabhängig sind.

Die Simulation des Dichtsystems erfordert eine multiphysikalische Betrachtung unter Berücksichtigung der reibungsinduzierten Wärmeentwicklung, der Wärmeleitung

Von M. Sc. Florian Albrecht, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Professor Dr.-Ing. habil. Thomas Kletschkowski, Professor Für Adaptronik und Strukturdynamik, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Technik + Informatik, Department Fahrzeugbau und Flugzeugbau | www.haw-hamburg.de

Bild 2: Abhängigkeiten im Dichtsystem

(Bild: HAW Hamburg)



und des Abriebs (**Bild 2**). Dazu kommen weitere Nichtlinearitäten wie die ausgeprägten elasto-viskoplastischen Eigenschaften von PTFE, die geometrische Nichtlinearität und der Kontakt. In den letzten drei Jahren wurde ein Simulationsmodell zur schnellen Berechnung des Dichtsystems entwickelt, welches nachfolgend in Kurzform dargestellt wird. Die Interaktion zwischen Welle und Dichtung bei einer unrund laufenden Welle wird hier nicht behandelt. Für diesbezügliche Details wird auf [1] und [2] verwiesen.

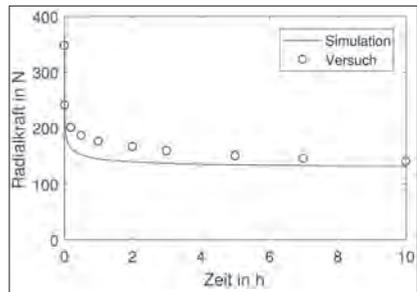


Bild 3: Verlauf der Radialkraft bei der Relaxation nach der Montage im Vergleich mit Versuchen aus [4] (Bild: HAW Hamburg)

Mechanik der Dichtung

Die Dichtung wird axialsymmetrisch betrachtet und mit einem Gitternetz aus Stabelementen und Punktmassen diskretisiert [3]. Diese lokal eindimensionale Betrachtung erlaubt die direkte Implementierung von rheologischen Materialgesetzen, wie z.B. in [4] dargestellt, wodurch das Bilden einer analytischen Materialtangente und somit auch einer analytischen Steifigkeitsmatrix stark vereinfacht wird. Die Lösung der nichtlinearen strukturdynamischen Bewegungsgleichung erfolgt mit einem impliziten Zweischritt-Integrationsalgorithmus [5] und einer adaptiven Schrittweitensteuerung. Für die Entwicklungsgleichungen des Materialmodells wird dahingegen das explizite Heun-Verfahren verwendet. Als Kontaktformulierung wird die Penalty-Methode gewählt, bei der Strafterme auf der rechten Seite des Gleichungssystems zu einer hinreichenden Erfüllung der Kontakttrandbedingung führen. Das mechanische Verhalten von PTFE wird mit dem rheologischen Materialmodell von Kletschkowski [4] dargestellt, für das auf Basis von Zugversuchen mit Relaxation aus [4] ein neuer temperaturabhängiger Parametersatz bestimmt wird.

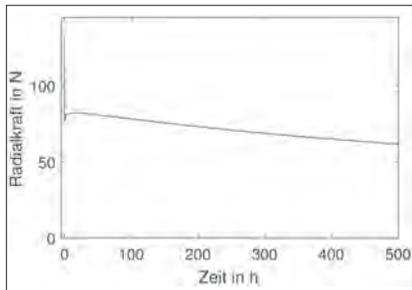


Bild 4: Darstellung der Radialkraft über der Zeit (Bild: HAW Hamburg)

Bei der Simulation des Montageprozesses der Dichtung mit dieser lokal ein-dimensionalen Betrachtung wird der Verlauf der Radialkraft hinreichend gut dargestellt (**Bild 3**). Lediglich die Relaxationsgeschwindigkeit ist leicht erhöht. Nach einer Relaxationszeit von 10 h ist die Abweichung aber gering.

Thermomechanische Analyse

Mit einer funktionalen Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Materialpa-

rameter lässt sich die Auswirkung der Temperatur auf das mechanische Verhalten der Dichtung berücksichtigen. Für die Berechnung der Temperaturverteilung in der Dichtung werden diese und die Welle mit der energiekonservativen Finite-Volumen-Methode in diskrete Zellen aufgeteilt. Für den Temperaturübergang zur Luft und zum Öl werden feste Konvektionsparameter verwendet, wobei die Erweiterung mit einer drehzahlabhängigen Nußelt-Zahl-Korrelation [6] problemlos möglich ist. Es werden die Randbedingungen der Momentankonfiguration auf die Ausgangskonfiguration angewendet und an dieser wird die Wärmeleitung in Dichtung und Welle berechnet. Im Dichtkontakt wird die Reibleistung, die sich aus der Wellendrehzahl, dem Reibungskoeffizienten und der Flächenpressung zusammensetzt, in Wärme umgewandelt. Für den Reibungsparameter wird eine funktionale Beschreibung in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit aus den Messungen von Sui [7] erstellt. Diese unterscheiden sich nach [7] nicht wesentlich für geschmierte oder trockene Reibkontakte von PTFE und Stahl.

Abriebssimulation

Die Berücksichtigung von Abrieb in der Simulation erfolgt in Anlehnung an Strömberg in der Kontaktformulierung [8]. Dazu wird für jeden Massepunkt eine innere Variable für den Abriebszustand eingeführt, die eine erlaubte Durchdringung des Massepunktes repräsentiert. Ist das Abriebsgesamt volumen eines Massepunktes erreicht, werden dieser und alle mit ihm verbundenen Stabelemente aus der Simulation entfernt. Der Abriebsparameter wird an Experimente für trockenlaufende PTFE-Dichtungen nach Sui [7] angepasst. Bei einem geschmierten Kontakt ist der Abriebsparameter einige Größenordnungen geringer.

Beispielsimulation

Zur Demonstration des Simulationsmodells mit den Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Größen und der damit verbundenen Komplexität wird eine Beispielsimulation durchgeführt und die Ergebnisse werden diskutiert. Drehzahl und Öltemperatur werden nach einer Relaxationszeit von 24 h innerhalb von 15 min vom Ausgangswert auf einen Endwert erhöht, der anschließend konstant gehalten wird. Die Öltemperatur wird von 23 °C auf 60 °C und die Drehzahl der Welle von 0 min⁻¹ auf 2.000 min⁻¹ erhöht.

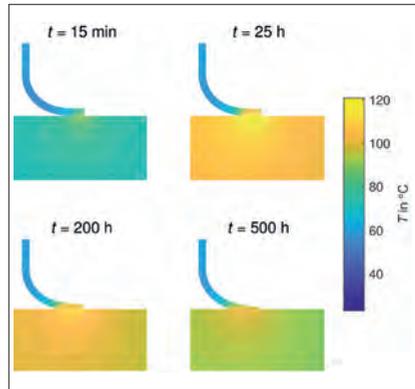


Bild 5: Temperaturverteilung in Dichtung und Welle (Bild: HAW Hamburg)

Bild 4 zeigt den Verlauf der Radialkraft, die zunächst wegen der Erwärmung stark abfällt. Durch den Abrieb nimmt die Kontaktbreite zu und verschiebt die resultierende Kraft von der Welle auf die Dichtung in die Richtung der Dichtungseinspannung. Dies führt – wegen des kleiner werdenden Hebelarms und somit einer Erhöhung der Biegekraft – zunächst zu einem kurzfristigen Anstieg der Radialkraft. Anschließend nimmt diese kontinuierlich ab. Grund hierfür ist – neben der abriebsbedingt sinkenden Umfangskraft – die steigende Kontaktbreite, die zu einer besseren Temperaturverteilung in der Dichtung führt. Diese ist in **Bild 5** für vier verschiedene Zeitpunkte dargestellt. Im Dichtkontakt befindet sich wegen des Reibkontakts und der damit verbundenen Temperaturerhöhung das Temperaturmaximum. Die entstehende Wärme wird wegen der guten Wärmeleitfähigkeit von Stahl und der größeren Oberfläche zur Umgebung größtenteils von der Welle abgeleitet. Wegen der geringen Dicke der Dichtung und der schlechteren Wärmeleitfähigkeit von PTFE hat diese das Temperaturniveau des Öls. Eine Ausnahme bildet aber der Bereich um den Dichtkontakt.

Eine genauere Zeitauflösung von Lippendicke und Kontaktbreite sowie der Temperatur im Dichtkontakt geben die in **Bild 6 und 7** dargestellten Ergebnisse. Der Abrieb führt zu einer schnellen Zunahme in der Kontaktbreite, die sich aber mit steigendem Abriebszustand verlangsamt. Die Entwicklung der Lippendicke ist abnehmend. Die Kontakttemperatur nimmt zunächst wegen der steigenden Wellendrehzahl und Öltemperatur rasch zu. Anschließend sinkt sie aber wegen der abfallenden Radialkraft und zunehmender Kontaktbreite.

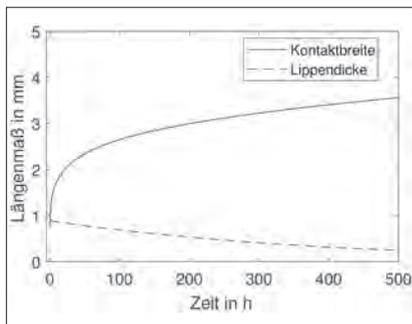


Bild 6: Änderung der Kontaktbreite und der Lippendicke (Bild: HAW Hamburg)

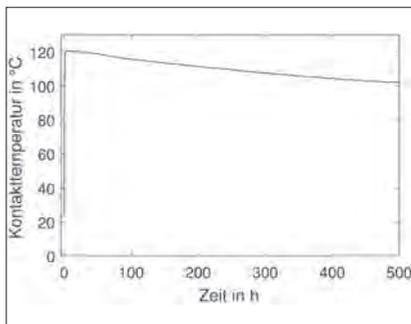


Bild 7: Entwicklung der Temperatur im Dichtkontakt (Bild: HAW Hamburg)

Das Simulationsmodell ist in Matlab 2017a implementiert und benötigt für die Montage und Relaxation der Dichtung auf einem handelsüblichen PC weniger als 70 s. Die anschließende multiphysikalische Simulation hat eine Rechendauer von ca. 3 s für einen Zeitschritt.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Simulationsmodell für die schnelle multiphysikalische Simulation eines Dichtsystems vorgestellt, bei der die reibungsinduzierte Wärmeentwicklung, die Wärmeleitung und der Abrieb des Dichtmaterials berücksichtigt werden. Die lokal eindimensionale Betrachtung ermöglicht sehr kurze Rechenzeiten. Dieses Simulationsmodell wird in weiteren Arbeiten dazu verwendet, um adaptive Systeme für Wellendichtungen zu entwickeln und deren Potenzial in Hinsicht auf die energetische Effizienz des Dichtsystems und die Lebensdauer zu untersuchen. Partner zur Umsetzung der Simulationsumgebung in industriell nutzbare Entwicklungstools sind herzlich willkommen.

Literatur

- [1] F. Albrecht und T. Kletschkowski: A quasi-axisymmetric lattice model applied to analyze the vibrational contact between a PTFE shaft seal and a rotor, *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, Weimar, 19. - 23. März, 2017.
- [2] F. Albrecht, S. K. Baydoun, S. Marburg und T. Kletschkowski: Numerische Untersuchungen zur Dynamik einer Antriebswelle im Kontakt mit einer PTFE Wellendichtung, *DAGA 2018*, München, 6. - 13. März, 2018.

- [3] F. Albrecht und T. Kletschkowski: Simulation von Wellendichtringen mit einer Vielteilchenmethode, 19th International Sealing Conference, Stuttgart, 12. - 13. Oktober, 2016.
- [4] T. Kletschkowski: Finite Thermoviskoplastizität von Kompositen aus Polytetrafluorethylen mit Zug-Druck-Asymmetrie und plastischem Gedächtnis. Dissertation. Universität der Bundeswehr Hamburg, 2004.
- [5] K.-J. Bathe und M. M. I. Baig: On a composite implicit time integration procedure for nonlinear dynamics, Computers & Structures, 2005.
- [6] S. Feldmeth, F. Bauer und W. Haas: Abschätzverfahren für die Kontakttemperatur bei Radial-Wellendichtungen, 19th International Sealing Conference, Stuttgart, 12. - 13. Oktober, 2016.
- [7] H. Sui et al.: Wear and friction of PTFE seals, Wear, 1999.
- [8] N. Strömberg: Derivation and analysis of a generalized standard model for contact, friction and wear, International Journal of Solids and Structures, 1996.

MIT DOYMA RAUS AUS DEM
PRODUKT-DSCHUNDEL

ABDICHTUNG
GEGEN WASSER &
GASE

ABSCHOTTUNG
GEGEN FEUER &
RAUCH

www.doyma.de

WEIL SICHER EINFACH
SICHER IST. **DOYMA**

Leckagen zuverlässig verhindern

Großdichtungen für fettgeschmierte Hauptlager in Windkraftanlagen

Für Betreiber von Windkraftanlagen stehen Verlässlichkeit und Planungssicherheit an erster Stelle. Das betrifft insbesondere Dichtungen, die hohen Beanspruchungen ausgesetzt sind – z.B. auf der Hauptwelle. Verschärft werden die Anforderungen durch immer größer werdende Wellendurchmesser. Vor diesem Hintergrund wurde eine neue Dichtung entwickelt, die eine Leckage fettgeschmierter Hauptlager bei großen Wellendurchmessern zuverlässig verhindert und auch starken Wellenschlag toleriert.

Im Zuge der Umstellung auf regenerative Energien ist die Windkraft eine der am stärksten wachsenden Industrien. Da passende Standorte an Land knapp und streng reguliert sind, verstärken sich die Bemühungen der Betreiber, Offshore-Windkraftparks zu errichten. Zur Gewinnung sauberer Energie werden dabei immer größere Windkraftanlagen eingesetzt. Einerseits lässt sich dadurch die Einzelleistung der jeweiligen Windkraftanlage steigern, andererseits spart man Material und Baukosten im Vergleich zur Errichtung mehrerer kleinerer Anlagen.

Ein Rotor mit einem Durchmesser von 180 m ist daher heute keine Seltenheit mehr. Allerdings entstehen beim Betrieb derart großer Anlagen gewaltige Kräfte, die sich insbesondere auf Wälzlager und Hauptwellendichtungen auswirken. Da sich konstruktive Bauteile wie Dichtungen nicht linear in Größe und Funktion skalieren lassen, sind neue Dichtungskonzepte notwendig, um den hohen Anforderungen zu genügen. Es ist jetzt gelungen, eine Dichtung zu entwickeln, die sowohl radial innen- als auch außendichtend für fettgeschmierte Lager bei großen Wellendurchmessern geeignet ist und dank ihrer Konstruktion sogar starken Wellenschlag toleriert.

Zuverlässige Abdichtung bei großen Wellendurchmessern

Herkömmliche Wellendichtungen, die Vorspannkräfte an der Dichtlippe mithilfe einer Wurmfeder erzeugen, kommen konstruktionsbedingt bei sehr großen Durchmessern an ihre Grenzen. Denn um den nötigen Anpressdruck bei dieser Anwendung aufbauen zu können, müssten Wurmfedern und damit die Dichtungen selbst sehr massiv

Von Dr. Frank Schönberg, Technology & Innovation; Dr. Kristian Müller-Niehuus, Fluid Power General Industry
Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG | www.fst.com



Bild 1: Seventomatic mit Windkraftanlage (Bild: Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG)

ausgeführt sein. Zudem lassen sich in dieser Bauweise radial außendichtende Lösungen schwer bis gar nicht realisieren.

Die neue Wellendichtung Seventomatic (**Bild 1**) für Wellendurchmesser ab 1,5 m verwendet daher anstelle der Wurmfeder eine Mäanderfeder, um die nötigen Vorspannkraft aufbauen zu können. Mit dieser neuen Entwicklung für fettgeschmierte Großlager lässt sich die Anpressrichtung der Dichtlippe nahezu beliebig einstellen. Das namensgebende Design basiert auf der Form der Zahl 7 – ein langer Dichtschenkel ist mit dem statischen Teil der Dichtung über ein flexibles Gelenk verbunden. Herausragend an dieser Konstruktion ist, dass sie konsistente Linienkräfte erzeugt und im Vergleich zu anderen Lösungen gegenüber Wellenschlag unempfindlich ist. Die aus dem HNBR-Werkstoff Ventoguard hergestellte Wellendichtung akzeptiert in der Standardgröße ohne Funktionseinbußen eine Auslenkung von ± 4 mm – die Dichtlippe folgt also einem Weg von maximal 8 mm. Aus dem gleichem Grund zeigt sich die Dichtung auch äußerst gutmütig gegenüber Fertigungstoleranzen der Welle – Ungenauigkeiten bezüglich Rundheit werden zuverlässig ausgeglichen. Zudem ist die neue Dichtung einfach zu installieren und es gibt die Möglichkeit, im Retrofit Dichtungen mithilfe eines speziellen Klebesets zu wechseln.

Simulationen für robustes Design

In der Entwicklung nutzte man eine umfangreiche Computersimulation, um die Konstruktion eines robusten Designs schon im Vorfeld zu ermöglichen. Dazu wurde ein FEM-Modell der Seventomatic parametrisiert, im Versuchsraum abgebildet und anschließend das Design der neuen Dichtung in etwa 400 automatisierten Simulationen herausgearbeitet. Mithilfe der dabei gewonnenen Datensätze erstellte man ein mathematisches Modell, um das Verhalten der Dichtung hinsichtlich der Linienkraft und der maximalen Folgemöglichkeit bei Wellenschlag und Exzentrizität vorauszusagen. **Bild 2** zeigt ein 3D-Flächen-Diagramm zur Optimierung der Linienkraft in Abhängig-

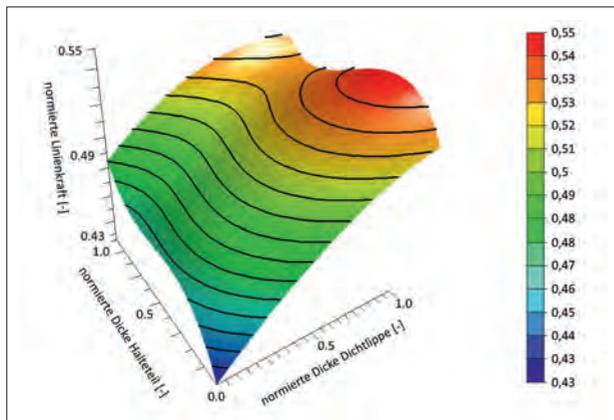


Bild 2: 3D-Flächen-Diagramm zur Optimierung der Linienkraft in Abhängigkeit der unterschiedlichen Dicken von Halteteil und Dichtlippe (Bild:

Freudenberg

Sealing Technologies

GmbH & Co. KG)

keit der unterschiedlichen Dicken des statischen Teils der Dichtung und der Dichtlippe selbst.

Nach der Definition dieser Zielgrößen legte man in einer weiteren mathematischen Funktion wünschenswerte Bereiche für diese Parameter fest und verknüpfte diese Ziele mit dem Design. Auch wurden Zusatzgrößen wie Toleranzen und Umwelteinflüsse aus der Fertigung in das mathematische Modell mit aufgenommen. Daraufhin begann der eigentliche Optimierungsprozess, um simulativ die Designausprägung zu finden, welche die gesetzten Ziele am besten erfüllt: In jeder Simulationsschleife wurde ein Nenndesign festgelegt, das zusätzlich mit Störgrößen beaufschlagt wurde. Jedes Design durchlief so zahlreiche Unterversuche, um die Streuung der Zielgrößen zu prüfen und festzustellen, wie gut die jeweilige Lösung unter allen denkbaren Bedingungen funktioniert. Ziel war ein robustes Design mit bestmöglichen Werten bei minimaler Ausfallwahrscheinlichkeit durch Streuung. Hunderte von Einzelsimulationen, in denen die Performance der neuen Dichtung zunehmend optimiert wurde, führten zum ersten Prototypen.

Reale Bedingungen

Es hat sich gezeigt, dass die Robust-Design-Simulationen die Anforderungen und Bedingungen so umfangreich und gezielt abdecken, dass Anpassungen am realen Prototypen kaum mehr notwendig sind. Die neue Dichtung für Hauptlager in Windkraftanlagen hält das in den verbauten Wälzlagern verwendete Fett zuverlässig zurück, ist unempfindlich gegenüber statischer und dynamischer Exzentrizität und bietet gleichzeitig eine konstante Linienkraft. Der obere Ast der Hysterese in den Kraft-Weg-Kenn-

Bild 3: Kraft-Weg-Kennlinien der Dichtung Seventomatic (Bild: Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG)

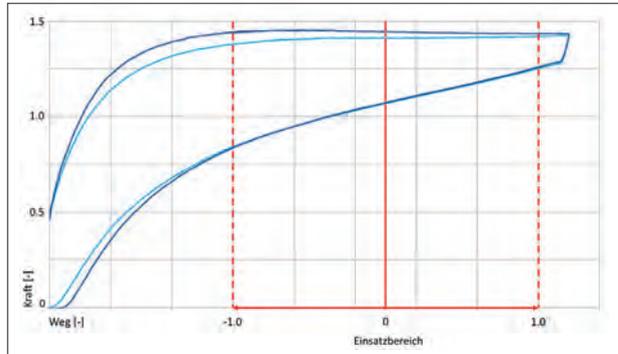
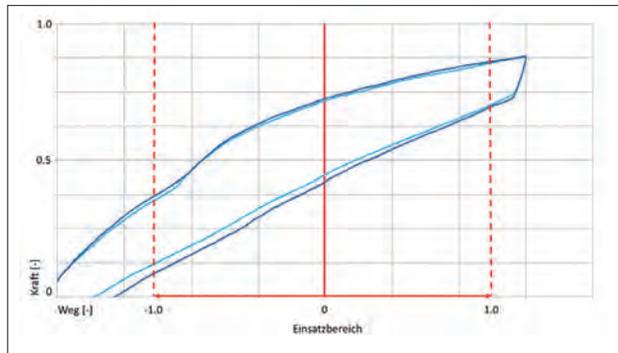


Bild 4: Kraft-Weg-Kennlinien einer Dichtung für Tunnelbohrmaschinen (Bild: Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG)



linien in **Bild 3** zeigt die Konstanz der Kraft über den Weg bei Auslenkung der Dichtlippe in beide Richtungen. **Bild 4** zeigt im Vergleich dazu die proportionale Abhängigkeit einer Dichtung, z.B. für Tunnelbohrmaschinen.

Lebensdauerversuche an Proben mit ca. 15 Mio. Lastwechseln, zeigten weder erkennbare Schädigungen noch Einschränkungen der Funktionen. Die Versuche wurden bei einer um 40 °C höheren Temperatur durchgeführt, sodass nach üblichen Berechnungen eine Lebensdauer von 20 Jahren angenommen werden kann. Weitere Prüfungen betrafen Temperaturwechsel zwischen -30 und +100 °C sowie die Haltbarkeit bei Schwingungen von 8 Hz mit einer Amplitude von ± 3 mm bei 110 °C. Zusätzlich wurden die Linienkräfte montierter Dichtungen nach 240 Tagen Lagerung bei Raumtemperatur und 100 °C untersucht.

Fazit

Die neue Seventomatic Großwellendichtung ist auf die zuverlässige Abdichtung fettgefüllter Wälzlager und Wellen mit 1,5 m Durchmesser und größer abgestimmt. Das Design in Form einer 7 sorgt für konstante Linienkräfte und ein großes Toleranzfeld für die Exzentrizität der Welle. Die neue Wellendichtung kann sowohl radial innen-dichtend als auch außendichtend eingesetzt werden. Damit haben Konstrukteure jetzt und in Zukunft die Freiheit, an neuen und optimierten Designs von Windkraftanlagen zu arbeiten, um die Windkraft an Land und auf See optimal zu nutzen.



Raum für Ergebnisse

Recherche. Wissen. Netzwerk.

**Das Online-Portal für den Bereich
Dichten. Kleben. Polymer.,
das Sie täglich effektiv unterstützt**

www.isgatec.com > Netzwerk

Was vermissen Sie?

Impulse an: skiefer@isgatec.com

ISGATEC[®]
NETZWERK

Effizienzsteigerung bei Schwerlast-Hydraulikzylindern

Optimierung des Stangendichtungssystems durch die richtige Wahl der Vorschaltdichtung

Insbesondere bei Off-Highway-Anwendungen wie Bau- und Agrarmaschinen nehmen die Anforderungen an das Hydrauliksystem und dessen Effizienz in rasantem Tempo zu. Um die gewünschten Effizienzsteigerungen zu realisieren, ist die Verbesserung des Dichtsystems innerhalb von Schwerlast-Zylindern von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Konzepte zur Optimierung von Vorschaltdichtungen unter Berücksichtigung des gesamten Stangendichtungssystems in Hydraulikzylindern untersucht. Die Erkenntnisse können dazu beitragen, die Lebensdauer des Systems zu verlängern.

In Hydraulikzylindern ist u.a. deshalb ein hohes Maß an Dichtheit notwendig, weil sie immer strengeren Umweltschutzvorschriften gerecht werden müssen. Gleichzeitig sollen die entsprechenden Dichtungssysteme aber auch möglichst wenig Verlustreibung aufweisen, um das Hydrauliksystem zu schonen und somit letztlich dessen Lebensdauer zu verlängern. Dieses im Grunde widersprüchliche Anforderungsprofil verlangt nach Hochleistungswerkstoffen sowie nach besonders ausgeklügelten Dichtungsdesigns und -paketen.

Aufbau eines Hydraulikzylinders

Die häufigste Bauform in der Mobilhydraulik sind doppelwirkende Hydraulikzylinder, in denen – aus dichtungstechnischer Sicht – zwei Hauptdichtsysteme existieren: Einerseits das Kolbendichtsystem, bestehend aus Führungsringen und Kolbendichtung (verschiedene Variationen möglich), und andererseits das Stangendichtsystem, bestehend aus Führungsring, Vorschaltdichtung (bei Schwerlast-Hydraulikzylindern), Stangendichtung und Abstreifer (verschiedene Paketvariationen möglich). Dabei dichtet das Kolbendichtungspaket die zwei Druckräume links und rechts des Kolbens ab, während das Stangendichtungspaket den Druckraum gegenüber der Umgebung

Von Emmanuel Pichlmaier, Entwicklungsingenieur Strategic Product Lines and Machined Seals Development; Wolfgang Swete, Leiter Fluid System Seals and Machined Seals Development & Engineering
SKF Sealing Solutions Austria GmbH | www.skf.com

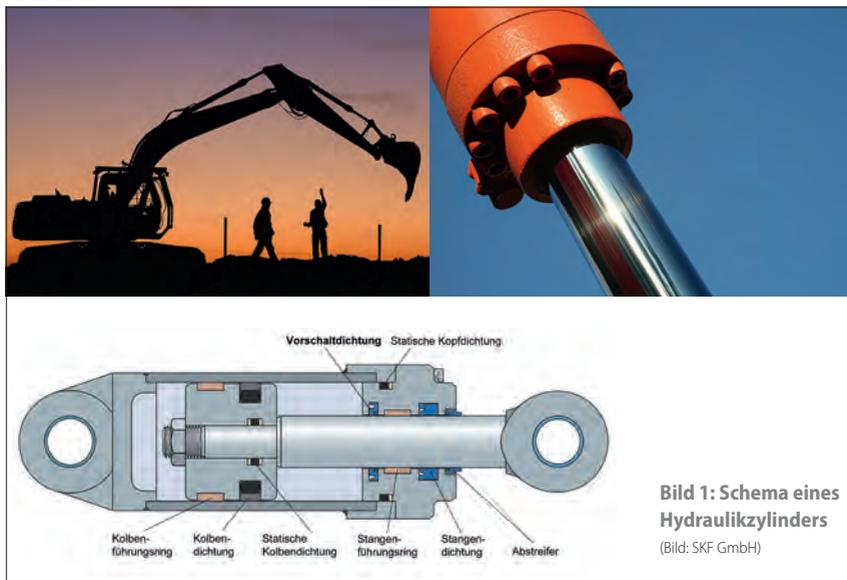


Bild 1: Schema eines Hydraulikzylinders

(Bild: SKF GmbH)

abdichtet bzw. das Eindringen von Verschmutzungen aus der Umgebung in das Hydrauliksystem verhindert (**Bild 1**).

Dabei hat die Vorschaltdichtung im Wesentlichen drei Hauptaufgaben zu erfüllen:

1. Absorption von möglichen Druckspitzen, die im Hydrauliksystem entstehen – wie z.B. bei Arbeiten mit einem Bagger
2. Rückführung von zwischen Vorschaltdichtung und Stangendichtung aufgebautem Druck zurück in das Hydrauliksystem
3. Erhöhung der Lebensdauer des Stangendichtungssystems

Ausführungsmöglichkeiten von Vorschaltdichtungen

Speziell bei Vorschaltdichtungen werden diverse Geometrievarianten und Werkstoffkombinationen verwendet. Die beiden vorwiegend verwendeten Geometrien unterscheiden sich wie folgt:

- O-Ring-aktivierte Stufendichtung als Vorschaltdichtung – diese Variante (**Bild 2**) wird vor allem in Leichtlast- und Mittellast-Hydraulikzylindern verwendet. Ein großer Vorteil dieser Variante besteht darin, dass verschiedene Materialkombinationen möglich sind. Das bedeutet: Hier kann, z.B. für Tieftemperaturanwendungen, als Vorspannelement ein O-Ring mit geeigneter Materialspezifikation verwendet werden,

um eine korrekte Funktion der Vorschaltdichtung auch bei niedrigen Einsatztemperaturen zu gewährleisten. Weiterhin besteht die Möglichkeit, den Gleitring aus PTFE oder aus einem thermoplastischen Elastomerwerkstoff, wie z.B. Polyurethan, herzustellen. Für diesen Dichtungstyp wurde mit X-ECOPUR® ein Hochleistungswerkstoff selbst entwickelt.

- Vorschaltdichtung mit Lippengeometrie und integriertem Stützring – diese Variante mit Lippengeometrie und integriertem Stützring (**Bild 3**) wird vor allem in Schwerlast-Hydraulikzylindern verwendet, da hier mit besonders hohen Drücken samt massiven Druckstößen und sogar -spitzen von über 600 bar gerechnet werden muss. Vorteil dieser Variante ist eine gesteigerte Lebensdauer durch einen integrierten Stützring, der einer Spaltextrusion bei hohen Drücken durch den Einsatz eines härteren Materials entgegenwirkt. Die Verwendung eines Stützringes ist jedoch immer ein Kompromiss, da dieser nicht nur erhöhte Aufmerksamkeit beim Einbau erfordert, sondern auch den Schmierfilm auf der Kolbenstange empfindlich beeinflussen kann.

Neben diesen Ausführungen gibt es natürlich noch zahlreiche weitere Konzepte mit und ohne Lippen bzw. Stützringen. Gemessen an den geschilderten drei Hauptaufgaben weisen diese jedoch keine individuellen Vorteile auf und sind deshalb nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchung. Stattdessen konzentrieren sich die weiteren Ausführungen auf grundlegende Unterschiede in der Funktionalität und deren Auswirkungen.

Funktionalität von Vorschaltdichtungen

Die Funktionalität von Vorschaltdichtungen steht im engen Zusammenhang mit dem Schmierfilm, der die Dichtkante passieren kann. Beim Ausfahren der Kolbenstange mit geringem Druck kommt es – im Vergleich zum druckbelasteten Einfahren, je nach

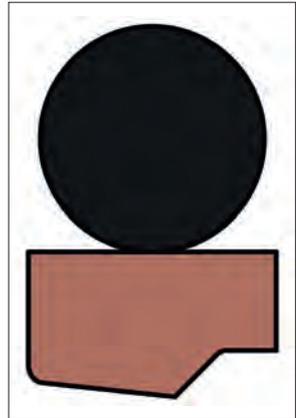


Bild 2: O-Ring-aktivierte Stufendichtung (Bild: SKF GmbH)

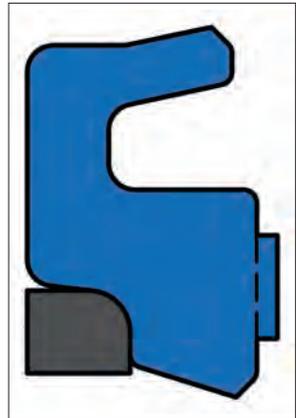


Bild 3: Vorschaltdichtung mit Lippengeometrie und integriertem Stützring

(Bild: SKF GmbH)

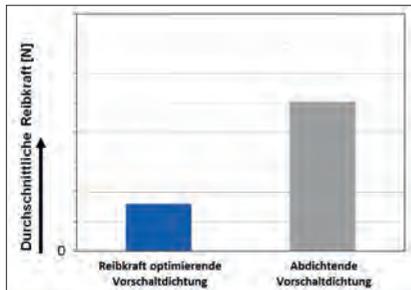


Bild 4: Reibkraftvergleich: reibungsoptimierende gegenüber abdichtender Vorschaltdichtung (Bild: SKF GmbH)

Geschwindigkeit und Ausführung der Dichtung – zu unterschiedlichen Schmierfilmdicken auf der Kolbenstange. Speziell bei Schwerlast-Hydraulikzylindern im Bereich der Mobilhydraulik mit hohen Drücken, sehr vielen Druckstößen und fordernden Geschwindigkeitsprofilen zeigen sich dadurch Auswirkungen auf das gesamte Stangendichtsystem.

Abdichtende Vorschaltdichtungen

Diese Vorschaltdichtungen besitzen eine sehr gute Dichtfunktion und nehmen

den gesamten Systemdruck sowie höhere Druckstöße, die aus dem System kommen, auf. Dadurch wird die Stangendichtung nicht druckbeaufschlagt und kann somit durch den Druck nicht beschädigt werden. Eine sehr gute Dichtheit bedeutet jedoch gleichermaßen einen sehr dünnen Schmierfilm, welcher in weiterer Folge zur Mangelschmierung der Stangendichtung und des Abstreifers führen kann. Solche Betriebszustände äußern sich möglicherweise zuerst in Ruckgleiten („Stick-Slip“), wobei die erhöhte Reibungstemperatur schlussendlich zu einer frühzeitigen thermischen Schädigung des Dichtungsmaterials führt.

Reibungsoptimierende Vorschaltdichtungen

Bei dieser Variante ist die Vorschaltdichtung nicht vollkommen dicht, sondern lässt einen deutlich dickeren Schmierfilm passieren und somit zur Stangendichtung gelangen. Je nach Betriebszustand kann es teilweise auch zu einem Druckaufbau zwischen Stangendichtung und Vorschaltdichtung kommen. Die Höhe des Druckaufbaus ist vom Dichtungsdesign der Vorschaltdichtung sowie von den Betriebsbedingungen – und hier besonders den Druck- und Geschwindigkeitsverhältnissen zwischen Ein- und Ausfahren der Kolbenstange – abhängig. Das Design einer solchen Vorschaltdichtung sollte so abgestimmt werden, dass der Druck zwischen Stangen- und Vorschaltdichtung nicht den Systemdruck erreicht, da ansonsten die Pufferfunktion der Vorschaltdichtung nicht mehr gegeben ist.

Der dickere Schmierfilm bietet der Stangendichtung eine deutlich bessere Schmierung und somit einen ruhigeren Lauf. Hierbei ist aber auch zu beachten, dass die verwendete Stangendichtung gute Dicht- und Rückfördereigenschaften besitzen muss, um das Gesamtsystem gut abzudichten.

Durch die Verteilung dieser Funktionen auf Vorschalt- und Stangendichtung fällt die Reibkraft des gesamten Stangendichtsystems viel geringer aus als bei der Summe nicht aufeinander abgestimmter Einzelkomponenten. Die Verringerung der Reibkraft wiederum resultiert in einer deutlichen Verlängerung der Lebensdauer des gesamten Stangendichtsystems, da die einzelnen Elemente erheblich weniger beansprucht werden.

In **Bild 4** wird die durchschnittliche Reibkraft aus ersten Untersuchungen auf einem Linearprüfstand als Vergleich zwischen reibungsoptimierender und abdichtender Vorschaltdichtung dargestellt. Hier ist die drastisch reduzierte Reibkraft des Stangendichtsystems mit reibungsoptimierender Vorschaltdichtung – bei ansonsten vollkommen gleichen Betriebsbedingungen – eindeutig zu erkennen.

In der Praxis gibt es Anwendungsfälle für beide Funktionskonzepte. Einerseits verursachen reibungsoptimierende Vorschaltdichtungen bei Erstausrüstungen einen viel geringeren Eintrag von Reibungsverlusten in das ganze System, was zu einer deutlichen Systemschonung und somit Lebensdauerverlängerung führt. Im Reparaturfall hingegen bieten Stangendichtungssysteme mit abdichtenden Vorschaltdichtungen mehr Sicherheit gegen Leckagen.

Analyse der verschiedenen Konzepte

Um die Funktionsweise der verschiedenen Konzepte zu überprüfen und deren Funktionalität im Stangendichtungssystem zu untersuchen, wurden im ersten Schritt Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf die Verformung der Dichtung, die Kontaktkräfte, die auf die Kolbenstange wirken, und auf den Kontaktkraftverlauf der dynamischen Dichtfläche auf die Kolbenstange gelegt.

Darüber hinaus wurde mit einem intern speziell entwickelten Simulationsprogramm, mit dem man die Dichtungsperformance von Lineardichtungen kalkulieren und ggf. mögliche Leckageprobleme abschätzen kann, eine Berechnung der Schmierfilmdicke beim Ein- und Ausfahren der Kolbenstange durchgeführt. Das Programm wird ebenso mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) gekoppelt, um das Verhalten der Dichtung in der Anwendung besser zu verstehen. Mithilfe dieser Berechnungen können selbst neuartige Lösungen innerhalb kürzester Zeit entwickelt werden.

Untersuchungen auf dem Linearprüfstand

Die Funktionalitäten und theoretischen Betrachtungen aus den Berechnungen wurden in weiterer Folge auf einem Kolbenstangen-Linearprüfstand (**Bild 5**) überprüft



Bild 5: Kolbenstangen-Linearprüfstand

(Bild: SKF GmbH)

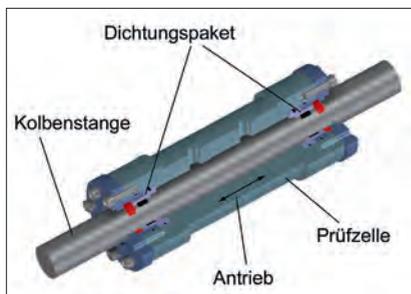


Bild 6: Schnittdarstellung der Prüfzelle

(Bild: SKF GmbH)

und bewertet. Der Prüfstand ist so konzipiert, dass sich eine Prüfzelle mit zwei Dichtungspaketen auf einer feststehenden Hydraulikstange bewegt (**Bild 6**). Hier lassen sich Druck und Temperatur des Hydrauliköls stufenlos regeln. Auch die in Hydrauliksystemen häufig vorkommenden Betriebszustände wie „hohe Beschleunigung“ oder „geringe Geschwindigkeit bis hin zum Stillstand“ können untersucht werden. Damit ist es möglich, bei frei wählbaren Parametern praxisrelevante Arbeitszyklen abzubilden. Während eines Prüflaufes werden – neben den Betriebsparametern Druck, Temperatur und Verfahrgeschwindigkeit – auch die dichtungsspezifischen Messwerte wie Reibkraft, Stangentemperatur und Leckage erfasst.

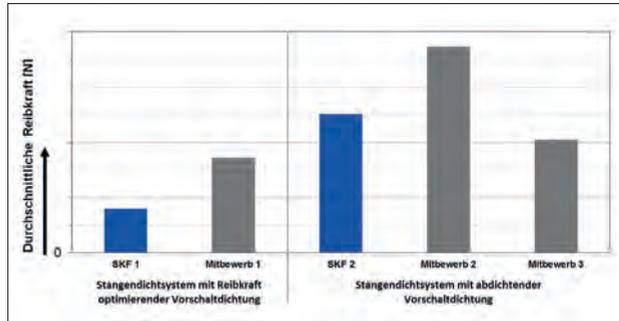
Zur Überprüfung der Funktionalität wurde ein Prüfzyklus entwickelt, der sehr stark an die tatsächlichen Betriebsbedin-

gungen eines Schwerlast-Mobilhydraulikzylinders angelehnt ist:

1. Einlaufphase bei konstanter Geschwindigkeit, jedoch abwechselnd hoher und niedriger Druck beim Ein- und Ausfahren.
2. Ein Parametertest simuliert eine 12-h-Schicht, inkl. zwei Systemabschaltungen nach je 4 h. Die Prüfung wird täglich drucklos begonnen und dann mit verschiedenen Geschwindigkeitsstufen und zusätzlichen Druckspitzen durchgeführt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Prüfstandsuntersuchungen, bei denen unterschiedliche marktübliche Stangendichtungspakete untersucht wurden, zeigen, dass Stangendichtsysteme mit reibungsoptimierenden Vorschaltdichtungen in Bezug auf die Gesamtreibkraft des Stangendichtungssystems signifikante Vorteile gegenüber den Stangendichtungssystemen mit abdichtenden Vorschaltdichtungen aufweisen (**Bild 7**). Bei den abdichtenden Systemen ist zu erkennen, dass die Reibkraft ein sehr hohes Niveau erreichen kann. Die Dichtheit der abdichtenden Vorschaltdichtung führt zwar zu einem nahezu leakagefreien Stangendichtungssystem, kann jedoch bei bestimmten

Bild 7: Reibkraftvergleich unterschiedlicher Stangendichtsysteme im Parametertest
(Bild: SKF GmbH)



Geschwindigkeits- und Druckkombinationen zu einer Mangelschmierung der Stangendichtung führen. Durch eine Mangelschmierung über einen längeren Zeitraum kann es zu einer thermischen Schädigung (**Bild 8**) und somit in weiterer Folge zu einem Ausfall der Stangendichtung kommen. Mangelschmierung äußerte sich bei den Prüfstandsuntersuchungen häufig in Ruckgleiten („Stick-Slip“) und damit einhergehenden lauten Quietschgeräuschen. Besonders das Ruckgleiten kann in der Anwendung zu Vibrationen führen und somit das gesamte Hydrauliksystem schädigen.

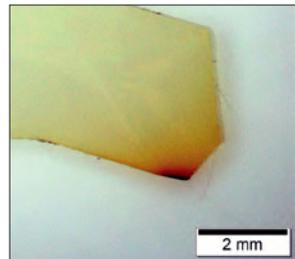


Bild 8: Thermische Schädigung der Dichtkante infolge Mangelschmierung (Bild: SKF GmbH)

Des Weiteren werden die abdichtende Vorschaltdichtung und insbesondere der Stützring durch die dauernde Druckbeaufschlagung mit Systemdruck – in Kombination mit den geringen Schmierfilmdicken, welche die Dichtkante passieren – einer hohen Belastung ausgesetzt. Diese Belastung kann je nach Design und Materialauswahl zu Spaltextrusion und/oder erhöhtem Verschleiß führen (**Bild 9**).

Bei Stangendichtsystemen mit reibungsoptimierender Vorschaltdichtung werden thermische Beschädigungen oder Verschleiß dank der erhöhten Schmierfilmdicke signifikant reduziert und somit wird die Lebensdauer maßgeblich verlängert. Insbesondere im Bereich der Instandhaltung, wenn ein Dichtsatz in ein gebrauchtes Gehäuse eingebaut wird, muss man mit Verschleiß an den Metallteilen und Führungen rechnen. Aus diesem Grund könnte es möglich sein, dass reibungsoptimierende Dichtsysteme eine zu große Schmierfilmdicke erzeugen und somit ein Druckaufbau zwischen Vorschalt- und Stangendichtung wahrscheinlicher wird. Durch einen erhöhten

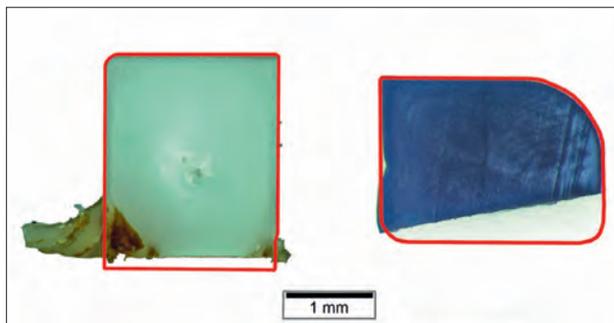


Bild 9: Spaltextrusion (links) bzw. Verschleiß (rechts) bei Stützringen von abdichtender Vorschaltdichtung m Vergleich zur ursprünglichen Geometrie (rote Linie)

(Bild: SKF GmbH)

Druckaufbau (= Systemdruck) zwischen den Dichtungen könnte die Vorschaltdichtung auch mögliche Druckstöße aus dem System nicht mehr abfangen und somit der Stangendichtung keinen Schutz mehr bieten.

Fazit

Vor allem in der Schwerlast-Mobilhydraulik ist es ratsam, im Stangendichtsystem eine Vorschaltdichtung zu verwenden, die – je nach Ausführung – unterschiedliche Aufgaben übernimmt. Dadurch kann die Vorschaltdichtung maßgeblich dazu beitragen, die Lebensdauer des gesamten Systems erheblich zu verlängern. Allerdings nimmt die Komplexität des Dichtsystems durch die Verwendung einer Stangen- und einer Vorschaltdichtung zu. Ergo ist es von entscheidender Bedeutung, die optimale Kombination dieser beiden Dichtungen zu eruieren, um durch ihr perfektes Zusammenspiel die gewünschten Performance-Steigerungen zu erreichen. Und dazu bedarf es einer genauen Betrachtung der jeweiligen Anwendungsparameter. Ferner ist die Auswahl des Dichtungspaketes auch davon abhängig, ob die Dichtungen in einem Erstausrüstungszylinder oder im Reparaturfall Verwendung finden, da die Abnutzung der Komponenten die Wirkungsweise der Dichtungen signifikant beeinflussen kann.

Temperaturverhalten eines Dichtsystems

Vollvalidiertes thermisches Netzwerk eines tribologischen Ersatzsystems für einen Radialwellendichtring

Bei der Betrachtung von Radialwellendichtringsystemen und entsprechenden Ersatzsystemen spielen die thermischen Umgebungseinflüsse eine große Rolle für das Reibungs- und Verschleißverhalten. Da die Temperaturen an bestimmten Stellen nur mit hohem Aufwand experimentell erfasst werden können, werden Berechnungsmethoden benötigt, um das Temperaturverhalten im Dichtsystem beschreiben zu können. Nachfolgend wird ein voll validierter numerischer Modellierungsansatz vorgestellt, der Aufschluss über die Temperaturvorgänge eines Ersatzsystems für Radialwellendichtringe (RWDR) bietet.

Die Temperaturverteilung im tribologischen System Radialwellendichtring ist sowohl bei der Simulation, als auch bei der experimentellen Betrachtung eine entscheidende Größe. Aufgrund der Wechselwirkungen mit Radialkraft, Kontakttemperatur und Reibung ist eine genaue Kenntnis der thermischen Umgebungsbedingungen entscheidend.

Die experimentelle Ermittlung des Temperaturverhaltens eines Dichtsystems ist aufgrund der messtechnisch schwer erfassbaren Stellen, z.B. im Kontakt zwischen Dichtkante und Gegenauflfläche, schwierig. FE-Simulationen oder CHT-Analysen (Conjunctive-Heat-Transfer) weisen hohe Rechenzeiten auf und eignen sich deshalb nicht für die Integration in andere Simulationsmodelle. Abhilfe bietet ein thermisches Netzwerk, eine Modellierungsmethode mit einem geringen Rechenaufwand. Erste Anwendung bei Radialwellendichtringen fand das thermische Netzwerk durch Upper [1] und Stakenborg und van Ostayan [2]. Weiterhin wurde diese Methode zur Beschreibung des thermischen Haushalts bei Wälzlagern [3], Schneckengetrieben [4] und Zahnradpaaren [5] angewendet.

Von Dipl.-Ing. Christoph Burkhart; , M. Sc. Julia Heimes, M. Sc. Dominik Weyrich, Jun. Professor. Dr.-Ing. Balázs Magyar, Professor Dr.-Ing. Bernd Sauer
Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik (MEGT) | www.mv.uni-kl.de/megt

Ein thermisches Netzwerk ist ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Temperaturverteilung in Bauteilen, die durch thermische Knotenpunkte diskretisiert sind. In Analogie zu einem elektrischen System, bei dem ein elektrischer Stromfluss aufgrund von Spannungsdifferenzen erzeugt wird, fließt bei einem thermischen Netzwerk ein Wärmestrom aufgrund der Temperaturdifferenzen zwischen zwei als isotherm angenommenen Knotenpunkten [5]. Unter Berücksichtigung der Maschen- und Knotenregel aus der Elektrotechnik kann durch Kopplung von thermischen Widerständen und Wärmekapazitäten mit den Verlustleistungen des Systems ein Differenzialgleichungssystem aufgestellt werden. Die numerische Lösung gibt Aufschluss über die stationären und instationären Temperaturvorgänge der in Knoten aufgeteilten Bauteile. Um die Beharrungstemperaturen für stationäre Belastungen berechnen zu können, wird ein lineares Gleichungssystem der Form

$$\underline{L} \cdot \vec{T} = \vec{P} \quad \text{Gl. 1}$$

aufgestellt, bei dem die Leitwertmatrix \underline{L} multipliziert mit dem gesuchten Temperaturvektor \vec{T} dem Verlustleistungsvektor \vec{P} entspricht. Die Leitwertmatrix beinhaltet alle Verbindungen der einzelnen Knotenpunkte. Bei der instationären Berechnung werden die zeitlich veränderlichen Knotentemperaturen erfasst. Die Wärmeübertragung zwischen den Knotenpunkten wird über thermische Leitwerte und parallel geschaltete Wärmekapazitäten gebildet. Durch die zusätzliche Betrachtung einer Wärmekapazitätsmatrix \underline{C} ergibt sich ein Differenzialgleichungssystem erster Ordnung.

$$\underline{L} \cdot \vec{T} + \underline{C} \cdot \dot{\vec{T}} = \vec{P} \quad \text{Gl. 2}$$

Die Gleichungssysteme der stationären und instationären Berechnung müssen iterativ gelöst werden, weil viele Wärmeübergänge im System temperaturabhängig sind. Die Lösung erfolgt mit geeigneten numerischen Methoden.

Das thermische Netzwerk ist eine Modellierungsmethode, die Temperaturen an messtechnisch schwer zu erfassenden Stellen vorhersagen kann und die dabei, mit geeigneten Lösungsverfahren, wenig Rechenzeit in Anspruch nimmt.

Das tribologische Ersatzsystem eines Radialwellendichtringes, ein Ringflächentribometer [6], wird in dieser Arbeit in Knotenpunkte diskretisiert und daraus ein parametrisches thermisches Netzwerk aufgestellt, das alle temperaturrelevanten Bauteile erfasst.

Ringflächentribometer

Grundidee

Die Entwicklung neuer Elastomermaterialien für Dichtungsanwendungen ist sehr zeit- und kostenintensiv. Um eine Aussage treffen zu können, ob z.B. ein neu entwickeltes Elastomer für die Verwendung als Radialwellendichtring (RWDR) geeignet ist, müssen i.d.R. teure RWDR-Prototypen hergestellt und in aufwändigen Dauerlaufversuchen im Hinblick auf ihr Reibungs- und Verschleißverhalten und die Schmierstoffverträglichkeit analysiert werden. Ein tribologisches Ersatzsystem für RWDR muss einem Zielkonflikt aus mehreren Anforderungen gerecht werden. Zum einen müssen die RWDR-spezifischen Kontaktbedingungen möglichst genau abgebildet werden und zum anderen muss die Geometrie der zu untersuchenden Probenkörper einfach gestaltet und mit geringem Aufwand herzustellen sein. Herkömmliche Stift-Scheibe-Tribometer oder Zwei-Scheiben-Prüfstände kommen hierfür nicht infrage, da die Kontakt- und Eingriffsverhältnisse nicht mit denen eines RWDR-Systems übereinstimmen. Aus diesem Grund wurde ein Ringflächentribometer (RFT) als tribologisches Ersatzsystem für RWDR [6] entwickelt. Mit dem RFT ist es möglich, unterschiedliche Materialien im Hinblick auf ihr Verschleißverhalten miteinander zu vergleichen. Weiterhin lassen sich Verträglichkeitsuntersuchungen von Schmierstoff und Elastomer durchführen.

Aufbau und Funktionsweise

Der Aufbau des RFT ist in **Bild 1** schematisch dargestellt. Als tribologische Kontaktpartner kommen Elastomer-Ringproben zum Einsatz, die auf einer nach DIN 3760 drallfrei geschliffenen Gegenauflfläche aus Stahl laufen [7]. Der Prüfkegel wird über eine spezielle Aufnahme auf die Antriebswelle montiert, welche mittels eines Riementriebes mit einem E-Motor verbunden ist und somit in Rotation versetzt wird. Über dem Prüfkegel befindet sich die Belastungseinheit, in der die Elastomer-Ringprobe verdrehfest eingespannt ist. Die Masse der Belastungseinheit kann durch das Auflegen definierter Gewichte variiert werden, wodurch die im Dichtkontakt wirkende Linienlast eingestellt werden kann. Zur Gewährleistung einer verschleißunabhängigen Belastung der Elastomerprobe während der Versuchslaufzeit ist die Belastungseinheit in axialer Richtung frei beweglich, jedoch über eine Passfeder verdrehfest geführt. Weiterhin besteht die Belastungseinheit aus einem Ölreservoir, welches sich über dem Stahlkegel befindet. Der darin befindliche Schmierstoff dient zur Schmierung des Dichtkontaktes und kann auf eine definierte Temperatur erwärmt werden.

Durch die Relativbewegung zwischen Prüfkegel und Elastomerprobe entsteht ein Reibmoment, das mittels einer Drehmomentmessnabe erfasst wird. Diese Messnabe

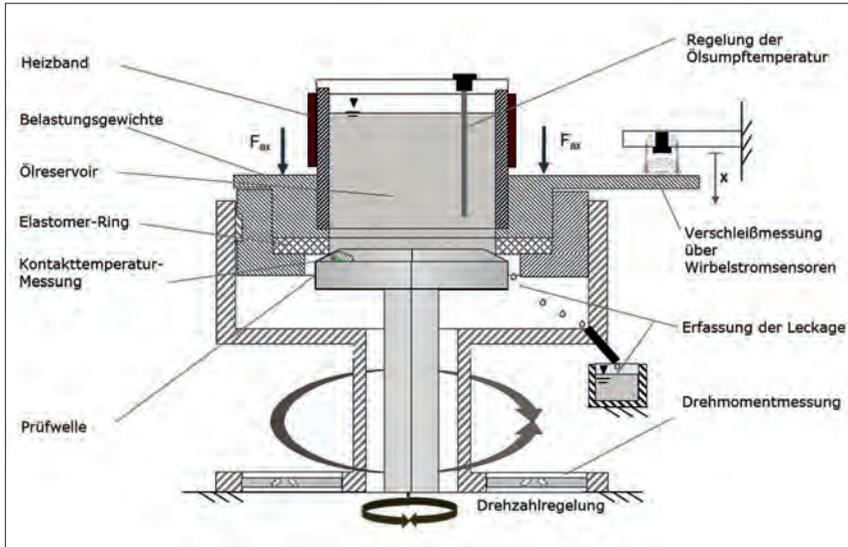


Bild 1: Schematische Darstellung des Ringflächentribometers

(Bild: Technische Universität Kaiserslautern)

ist über den äußeren Durchmesser verdrehfest montiert und auf dem inneren Durchmesser mit dem Prüftopf, inkl. Belastungseinheit und Elastomerprobe, verbunden. Das Reibmoment der Dichtung führt zu einer relativen Verdrehung der Messnabe. Das resultiert in einer Dehnung der Speichen innerhalb der Messnabe, welche über dort applizierte Dehnungsmessstreifen gemessen wird.

Weiterhin kann im Betrieb mithilfe von Wirbelstromsensoren, welche in axialer Richtung den Abstand zur Belastungseinheit erfassen, der Verschleißfortschritt von Welle und Dichtring dokumentiert werden. Durch Verschleiß am Elastomer und am Prüfkegel ändert sich die axiale Position der Belastungseinheit, welche mittels der Sensorik erfasst wird. Eine weitere Messgröße, welche während des Betriebes gemessen werden kann, ist die Temperatur unterhalb des Dichtkontaktes im Wellenkegel.

Thermisches Netzwerk des Ringflächentribometers

Nachfolgend wird der Aufbau des thermischen Netzwerkes des Ringflächentribometers erläutert. Grundlage der Modellerstellung ist hierbei das CAD-Modell des Prüfstandes, das in eine sinnvolle Anzahl von Knoten zerlegt wird. Die Anzahl und Auswahl der Knoten hängt davon ab, wie hoch die Genauigkeit des Modells sein soll. Je mehr

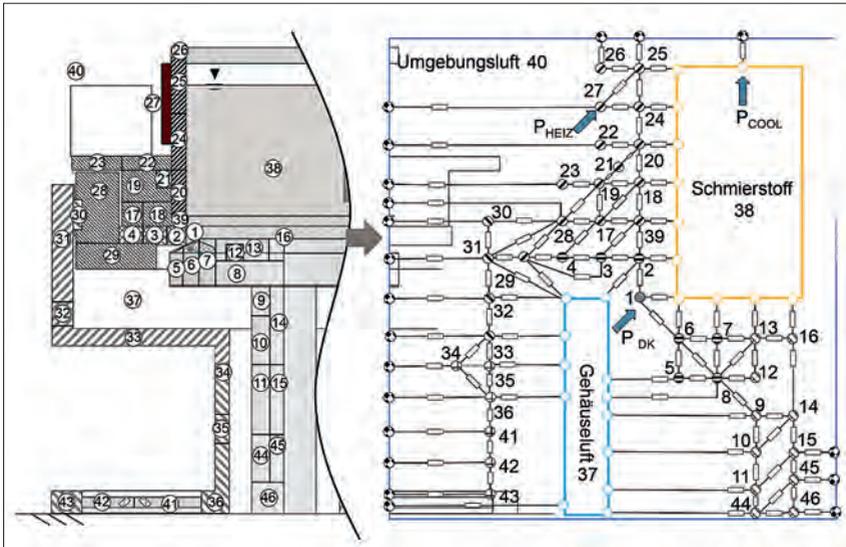


Bild 2: Ableitung des thermischen Netzwerkes (rechts) aus dem schematischen Aufbau des Prüfstandes (links). Aufgrund der Symmetrie reicht es aus, ein axialsymmetrisches Modell zu betrachten (Bild: Technische Universität Kaiserslautern)

Knoten das Modell aufweist, desto aufwändiger ist der Modellaufbau. Da mit einem thermischen Netzwerk vor allem Abschätzungen getroffen werden sollen, sollte bei der Knotenanzahl die Devise „so viel wie nötig, so wenig wie möglich“ gelten.

Das verwendete thermische Netzwerk des Ringflächentribometers ist in **Bild 2** zu sehen. Nach einer Analyse des Prüfstands mitsamt CAD-Modell wurde die dargestellte Diskretisierung der Prüfzelle gewählt. Das Netzwerk setzt sich aus verschiedenen Teilsystemen zusammen, wobei zusammenhängende Teile durch das gleiche Muster gekennzeichnet sind. Dazu zählen die Antriebswelle, die Prüfkörper, der Prüftopf, das Prüfgehäuse sowie die Drehmomentmessnabe. Ein Punkt steht für einen Knoten, dem jeweils eine Nummer zugewiesen wurde. Existiert eine Verbindung zu einem anderen Knoten oder findet ein Wärmeaustausch zwischen zwei Knoten statt, wird das mit einem Widerstand symbolisiert (**Bild 2**). Im Modell werden grundsätzlich zwei Arten von Wärmeübergängen berücksichtigt. Diese sind Strahlung und Wärmeleitung, wobei letztere in freie Konvektion, Zwangskonvektion und Leitung unterteilt wird. Die Strahlung wird aber nur bei Wärmeübergängen von Bauteilen in Kontakt mit Luft (z.B. drehende Wellen) berücksichtigt. Insgesamt wurde das Modell mit 45 Knoten-

punkten und 106 Wärmeübergängen diskretisiert, wobei die Umgebungsluft selbst nicht mitzählt. Sie dient einerseits als Wärmesenke und andererseits als Bezugsgröße für die temperaturabhängigen Leitwerte. Für jeden Wärmeübergang zwischen Bauteilen wird ein Leitwert definiert, wobei hier weiter zwischen temperaturabhängigen und temperaturunabhängigen Leitwerten unterschieden wird. Allgemein berechnet sich der Leitwert L aus dem Produkt der Kontaktfläche zwischen den interagierenden Bauteilen und der Wärmeübergangszahl α . Sie gibt nach [8] an welcher Wärmestrom \dot{Q} pro Fläche und Grad Temperaturdifferenz zwischen zwei beliebigen Bauteilen A und B übertragen wird.

$$\delta \dot{Q}_{AB} = \alpha \cdot (T_A - T_B) \cdot dA_{AB} \quad \text{Gl. 3}$$

Ein Beispiel für einen temperaturabhängigen Leitwert ist der Wärmeübergang zwischen dem Schmierstoff und dem Gehäuse. Ein Wärmeübergang zwischen Bauteilen im Gehäuse wird hingegen vereinfacht als temperaturunabhängig angenommen, da die Wärmeleitfähigkeit dort nur kleinen Änderungen durch die Temperatur unterliegt. Die Parametrisierung des Netzwerkes erfolgt anhand geometrischer Daten aus dem konstruktiven Aufbau des Prüfstandes. Dazu wurden alle Kontaktflächen, Bauteilhöhen und -breiten im Simulationsmodell hinterlegt. Weiterhin wurden alle verwendeten Materialien hinsichtlich ihrer Stoffdaten in [9] und [10] sorgfältig recherchiert und ebenfalls hinterlegt. Dazu zählen Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ und Wärmekapazität c_p bei konstantem Druck.

Zu Beginn einer Simulation werden auch die Betriebsbedingungen der Dichtung an das Modell übergeben, diese sind Drehzahl n , Linienpressung LP , Viskosität η und Dichte ρ des Prüfschmierstoffs, Ölfüllstand h sowie weitere Schmierstoffparameter. Neben den reinen Interaktionen zwischen den Bauteilen besitzt der Prüfstand auch Wärmequellen und -senken, die über den Verlustvektor P repräsentiert werden. Dazu zählen sowohl die Heizleistung, die am Knoten K27 aufgebracht wird, die Kühlleistung der Wasserkühlung, die direkt am Knoten K40 einwirkt, sowie die Reibleistung der Dichtung im Kontakt im Knoten K1. Für die Ermittlung von Reibmoment und Übertemperatur wurden die Gleichungen für das Gesamtreibmoment nach Engelke [11] implementiert. Es hängt von den Einflussgrößen Drehzahl n , Grenzreibung μ_0 , Temperatur T , Geometrie und $LastF_{rad}$ ab.

$$M_{ges} = \mu_0 \cdot F_{rad} \cdot r_{DK} + (T) \cdot \frac{b}{\sum R_p} \cdot r_{DK}^3 \cdot 2 \cdot \frac{\pi^2}{60} \cdot n \quad \text{Gl. 4}$$

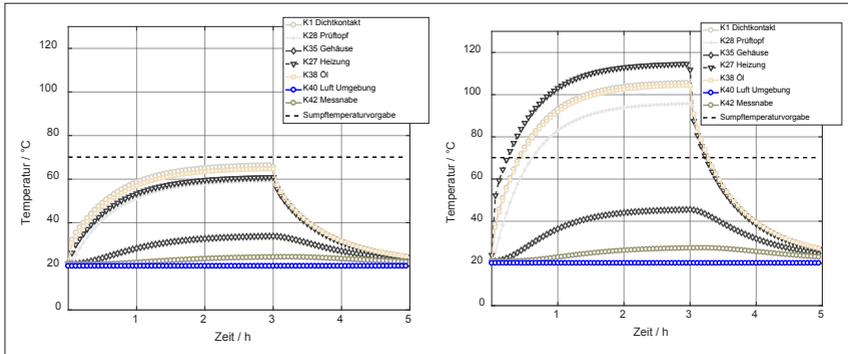


Bild 3: Aufheizen und Abkühlen des Prüfstands in der Simulation ohne (links) und mit Heizung (rechts). Abweichungen zur Sumpftemperaturvorgabe sind vorhanden (Bild: Technische Universität

Kaiserslautern)

Eine weitere Eigenschaft des Modells ist die Variation des Ölfüllstandes im Ölreservoir innerhalb bestimmter Grenzen bis zum max. Füllstand. Dort wird anhand eines Füllstandes in ml ermittelt, wie hoch das Öl im Gehäuse steht. Neben dem Füllstand kann auch der Schmierstoff selbst geändert werden. Das Viskositäts-Temperatur-Verhalten wird mit der Gleichung von Vogel [12] beschrieben. Dichte und Wärmeleitfähigkeit müssen gesondert vorgegeben werden.

Bild 3 zeigt das Verhalten ausgewählter Systempunkte des instationären Simulationsmodells beim Anfahren und Anhalten des Systems nach 3 h mit und ohne zusätzlicher Heizung. Anhand dieser Grafik lässt sich das Modell des RFT verifizieren. Es ist zu erkennen, dass Dichtkontakt und Heizung deutlich steiler ansteigen als die restlichen Knoten, bis sie die Beharrungstemperatur erreicht haben. Ein PT1-Systemverhalten aus der Regelungstechnik ist erkennbar [13]. Auch der Schmierstoff erfährt diese Erwärmung direkt. Knoten, die indirekt erwärmt werden, steigen langsamer an und erreichen eine Beharrungstemperatur, die unterhalb der Öltemperatur liegt. Knoten, die sehr weit von den Wärmequellen entfernt liegen, werden noch langsamer erwärmt und verlieren ihre Wärme auch entsprechend langsamer und später. Hier ist ein PT2-Systemverhalten nachweisbar.

Es fällt auf, dass bei konstanter Heizleistung die Öltemperatur über alle Maßen ansteigt, obwohl die Temperaturvorgabe bei 70 °C liegt. In Anlehnung an den realen Prüfstand wurden Heiz und- Kühlleistung variabel gelassen und können sich im Sinne eines einfachen P-Reglers je Iterationsschritt verändern, um auf die gewünschte

Öltemperatur zu regeln. Um die Vorgaben im Modell wie im Prüfstand umzusetzen, wurde eine Validierung durchgeführt, die im nächsten Abschnitt beschrieben ist.

Validierung des thermischen Netzwerkes

Die Funktionalität und Plausibilität des thermischen Netzwerkes konnte bereits gezeigt werden. Im nächsten Schritt geht es darum, das Simulationsmodell im Hinblick auf die real am Prüfstand existierenden Bedingungen hin nach [14] zu validieren. Genauer wird überprüft, ob das Modell in der Lage ist, die am Prüfstand gemessenen Werte zu erzielen, um davon ausgehend in Zukunft Vorhersagen über das Temperaturverhalten am Prüfstand zu treffen und so mögliche Verbesserungen einzuleiten.

Temperaturmessung

Zur Aufnahme von Daten für die Validierung wurden zunächst Temperaturmessungen an einer Prüfzelle unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Das geschah in zwei parallelen Arbeitsschritten, wobei zwischen der Temperaturerfassung an statischen und rotierenden Bauteilen unterschieden wird.

Erfassung der Gehäusetemperatur

Für die Erfassung der Temperatur an statischen Bauteilen des Prüfaufbaus wurden zunächst repräsentative Stellen an der Zelle ausgewählt, die auch im Simulationsmodell diskretisiert wurden, um später einen Vergleich zwischen Messung und Simulation ziehen zu können. Es handelt sich um die Knoten K17, K18, K26, K27, K28, K29, K31, K32, K33, K35 und K42. Bei der Erfassung stand auch die Temperaturverteilung des Drehmomentsensors im Fokus. Nach Auswahl der Messpunkte wurden die entsprechenden Bauteile an diesen Stellen mit Bohrungen (Durchmesser 1mm) versehen, in die Thermoelemente vom Typ K mit PFA-Isolierung mithilfe eines Hochtemperatur-2K-Klebers eingelassen wurden. Insgesamt wurde so die Temperatur an 14 verschiedenen Stellen der Prüfzelle gemessen. Zusätzlich dazu wurde während des Versuchs die Öltemperatur des Ölsumpfes kontinuierlich mit einem PT100-Sensor erfasst, der sich direkt im Ölsumpf (Knoten 38) befindet. Er ist gleichzeitig auch Teil des Regelkreises für die Öltemperaturregulierung. Die Erfassung der Messdaten erfolgte in Echtzeit synchron zu Reibmoment und Drehzahl.

Dichtkontakt

Die Erfassung der Temperatur an rotierenden Bauteilen erfordert etwas mehr Aufwand als die Messung der Gehäusetemperatur. Um eine Erfassung zu ermöglichen, wurde ein Telemetrie-System entwickelt, welches die Erfassung der Temperatur direkt unter der Oberfläche der Prüfzelle ermöglicht (Knoten K5, K6 & K7). Dazu wurden in

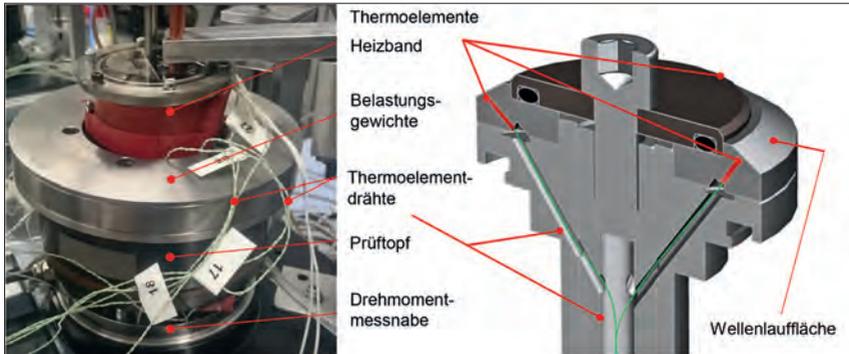


Bild 4: Prüfaufbau einer Testzelle mit Temperatursensoren für die Validierungsmessungen (links) – Wellenkegel mit Thermoelementen zur Messung der Temperatur unter der Oberfläche des Dichtkontaktes (rechts) (Bild: Technische Universität Kaiserslautern)

den Wellenkegeln an drei verschiedenen Positionen über den Umfang drei Bohrungen mit einem Durchmesser von 1 mm eingelassen (**Bild 4**). Die Bohrungen wurden so positioniert, dass die Spitze der Bohrung direkt auf die Durchmesser 48 mm, 50 mm und 52 mm zeigt. Die Spitze liegt dabei – abhängig von der Position – im Abstand von 270 bis 330 μm unterhalb der Lauffläche des Wellenkegels. In die Bohrungen wurden zur Erfassung der Temperatur unterhalb des Dichtkontaktes drei Thermolemente mit PFA-Isolierung vom Typ K eingelassen und verklebt. Die vorbereitete Welle wird dann so auf die Antriebswelle des Prüfstandes gesetzt, dass die Kanäle für die Drähte der Thermolemente mit dem Schacht in der Aufnahme und der Antriebswelle fluchten (**Bild 4**). Die Drähte werden dann in der angeflanschten Übertragungseinheit angeschlossen. Von hier erfolgt eine kontaktlose Übertragung mittels Bluetooth zum Empfänger und zu dem Messrechner, auf dem die Daten skaliert und weiterverarbeitet werden. Vor Inbetriebnahme der Einheit wurden die Thermolemente mit Eiswasser und siedendem Wasser kalibriert. Ein Vorteil dieses Systems ist die leichte Austauschbarkeit der Versuchswellen, deren variable Geometrie sowie die Tatsache, dass die Stelle der Temperaturmessung nahezu beliebig variiert werden kann.

Zyklus zur Validierung

In diesem Schritt wird die Validierung und damit die abschließende Parametrisierung des Modells wie in [15] durch Prüfstandsversuche am Ringflächentribometer vorangetrieben. Es wurden dafür Prüfwellen aus 16MnCr5 (1.7131) und eine Elastomerdichtung aus Fluorkautschuk (FKM) verwendet. Als Schmierstoffe kamen jeweils niedrig-

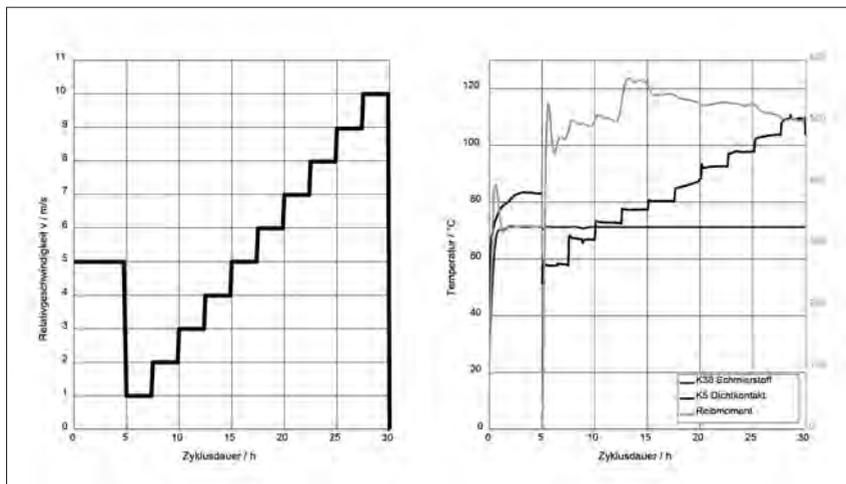


Bild 5: Relativgeschwindigkeit während der Prüfdauer (links) und sich ergebender Messschrieb aus Reibmoment, Öl- und Knotentemperaturen nahe des Dichtkontaktes der Prüfzelle während der Zyklusdauer (Bild: Technische Universität Kaiserslautern)

additivierte Poly- α -Olefine der Klassen SAE 0W-20 und ISO VG 220 sowie ein Polyglykol, ebenfalls aus der ISO VG 220 Klasse, zum Einsatz. Die Schmierstoffe besitzen außer Farbstabilisatoren keine Additive.

Zu diesem Zweck wurde ein Zyklus mit einer Gesamtlaufzeit von 30 h ausgewählt, bei dem die Probenkörper zunächst einen Einlauf bei mittlerer Relativgeschwindigkeit (5 m/s) über 100 km absolvieren. Danach wird die Drehzahl beginnend bei 1 m/s stufenweise in Schritten von 1 m/s auf 10 m/s erhöht. Jede Drehzahlstufe wird dabei für 2,5 h gehalten (**Bild 5**). Die Ölsumpftemperatur wurde während des Zyklus konstant auf 70 °C bzw. 100 °C geregelt. Die Anpassung der Heizleistung wurde dabei dem Regler überlassen. Die Messdaten wurden anschließend in zehn Blöcke unterteilt, die den Geschwindigkeitsstufen entsprechen. Zur Auswertung wurden die Bedingungen während einer Drehzahlstufe als konstant angenommen und die Temperatursignale für jeden Block gemittelt. Die ersten 20 min. nach einem Drehzahlwechsel wurden nicht berücksichtigt, da in diesem Bereich die Temperatur meist instationär war.

Validierung des Netzwerks

Beim ersten Abgleich der Messung mit der Simulation traten teilweise Abweichungen auf. Es wird drauf eingegangen, wie diese Abweichungen Schritt für Schritt behoben

wurden. **Bilder 6, 7 und 8** zeigen die simulierten (Sim) und gemessenen (Mess) Temperaturen an definierten Knotenpunkten im Modell nach der Validierung anhand der Temperaturen am Prüfstand, die unter realen Bedingungen gemessen wurden.

Aufgrund der Abweichungen zur Sumpftemperaturvorgabe (**Bild 3**) wurde der Leitwert L1-38 im Modell ähnlich zu [2] parametrisiert, sodass das Öl hauptsächlich über die Welle und nicht über den Dichtkontakt erwärmt wird. Die Öltemperaturvorgabe (K38) wird im Modell umgesetzt und die Sumpftemperatur auf einen konstanten Wert geregelt. Die Abweichung liegt dabei unter 0,1 K.

Ausgehend von einer konstanten Sumpftemperatur nach Vorgabe, wie im Prüfstand üblich, wurde die Berechnung des Dichtkontaktes validiert. Dazu wurde die Grenzreibung der Schmierstoffe ermittelt und die Routine für die Berechnung der Dichtkontakttemperatur implementiert. Alle weiteren Parameter in Gl. 4 sind geometrische und betriebstechnische Vorgaben und damit invariabel. In den **Bildern 6, 7 und 8** ist ersichtlich, dass dadurch die Temperatur unterhalb des Dichtkontakts im Wellenkegel (K5, K6, K7), sehr gut abgebildet wird. Die Abweichung liegt zwischen 1 bis 2 K. Die unterschiedliche Lage der Messstellen kann abgebildet werden. Auch die daran gekoppelte Simulation des Reibmomentes zwischen Dichtung und Wellenkegel bringt mit diesem Verfahren gute Näherungswerte.

Ausgehend von einem validierten Dichtkontakt und einer konstanten Ölsumpftemperatur war die Übereinstimmung mit der Prüftopftemperatur (K17, K18, K26, K27 & K28) ohne Änderungen im Modell bereits sehr gut. Es handelt sich bei den betreffenden Wärmeübergängen um direkte Wärmeleitung, welche anhand der geometrischen Daten gut modellierbar ist. Die gemessenen und simulierten Temperaturen liegen bis auf 1 bis 2 K (K17, K18, K28) beisammen. Lediglich an der Stelle der Heizung zur Temperierung des Ölbad (K26, K27) ist die Abweichung marginal größer. Die große Abweichung bei K23 in **Bild 6** rührte von einem losen Sensor, bei allen weiteren Messungen ist diese Abweichung nicht aufgetreten.

Die Temperaturverteilung im Prüftopf konnte aufgrund der hohen Modellgüte bereits ohne Anpassung gut abgebildet werden. Auch der Knoten K31 zeigte bereits ohne Anpassungen im Modell eine gute Übereinstimmung mit der Messung. Es kommt lediglich zu einer Abweichung von 3 K, auch weil die Temperatur an K28 bereits minimal geringer war. Bei der Modellierung der Isolierung (K32 & K35) wurde zunächst auf die vom Hersteller angegebene Wärmeleitfähigkeit $WL_{V_{150}}$ zurückgegriffen. Die simulierten Temperaturen lagen mit dieser $WL_{V_{150}}$ aber weit unterhalb der gemessenen

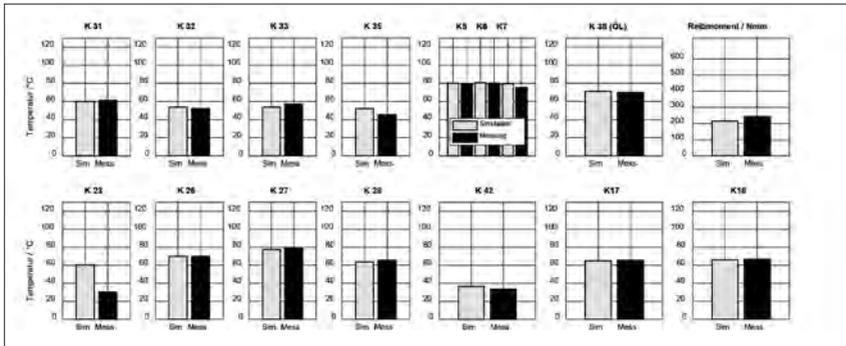


Bild 6: Ergebnisse von Messung und Simulation der Knotentemperaturen im Vergleich für das PAO ISO VG 32 bei 5 m/s Relativgeschwindigkeit, Sumpftemperatur von 70 °C und einer Pressung von 0,16 N/mm (Bild: Technische Universität Kaiserslautern)

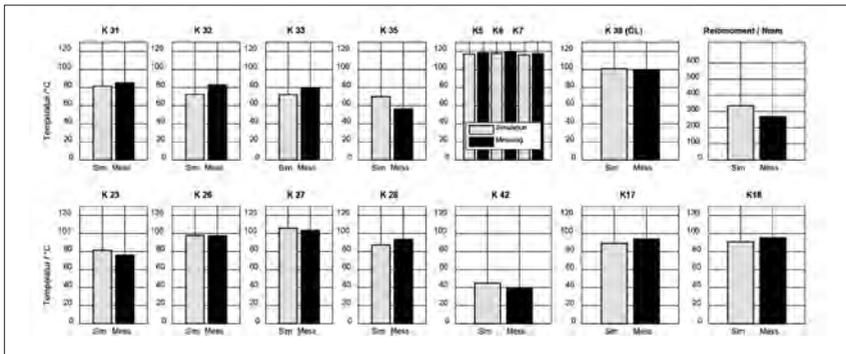


Bild 7: Ergebnisse von Messung und Simulation der Knotentemperaturen im Vergleich für das PAO ISO VG 220 Klasse bei 8 m/s Relativgeschwindigkeit, Sumpftemperatur von 100 °C und einer Pressung von 0,16 N/mm (Bild: Technische Universität Kaiserslautern)

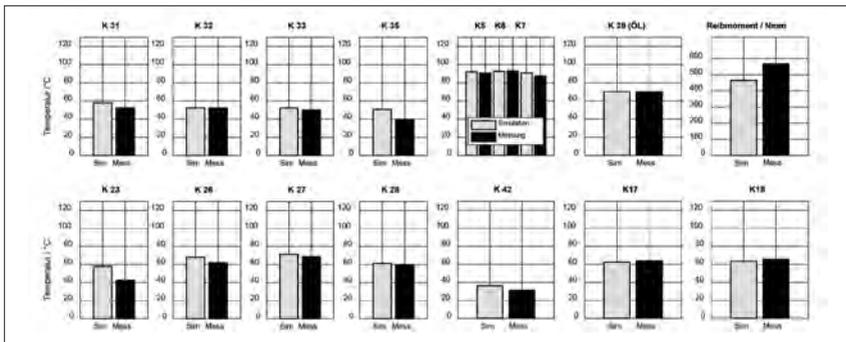


Bild 8: Ergebnisse von Messung und Simulation der Knotentemperaturen im Vergleich für das PG der ISO VG 220 Klasse bei 3 m/s Relativgeschwindigkeit, Sumpftemperatur von 70 °C und einer Pressung von 0,16 N/mm (Bild: Technische Universität Kaiserslautern)

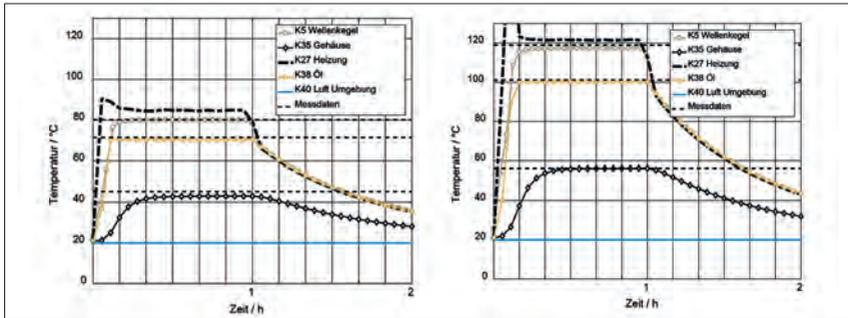


Bild 9: Ergebnisse für das instationäre validierte thermische Netzwerk bei Hochlauf und Stopp des Systems, links: Sumpftemperatur 70 °C, rechts: Sumpftemperatur 100 °C

(Bild: Technische Universität Kaiserslautern)

Temperaturen. Physikalisch ist dies korrekt, die Messwerte zeigten jedoch deutlich höhere Temperaturen. Bei einer Analyse des Prüfstandes fiel auf, dass viel Wärme von der Gehäuseluft und dem angrenzenden Wellensystem aufgrund der kompakten Bauweise des Prüfstandes auf das Gehäuse K33 übergeht. Diese Wärmestrahlung ist aber nicht im Modell abgebildet. Durch eine vergrößerte WLV_{ISO} konnte das Verhalten aber soweit kompensiert werden, dass Modell und Realität näher zusammenrücken, trotzdem finden sich hier die größeren Abweichungen. Trotz der kleinen Abweichungen an dem Gehäusetopf ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation an der Drehmomentmessnabe als gut zu bewerten (K42).

Die hohe Genauigkeit der Simulation nach der Validierung zeigt sich auch bei der instationären Berechnung der Knotentemperaturen. **Bild 9** zeigt das Aufheiz- und Abkühlverhalten beispielhaft für die Knoten K5, K27, K35, K38 und K40 bei unterschiedlichen Ölsumpftemperaturen. Die Knotentemperaturen nähern sich denen im stationären Zustand gemessenen Beharrungstemperaturen an.

Fazit

Das thermische Netzwerk ist eine einfache Methode, um das Temperaturverhalten komplexer dreidimensionaler Systeme zu beschreiben. Die simulierten Temperaturen in diesem System zeigen bereits mit dem aktuellen Modellstand eine sehr gute Übereinstimmung mit der gemessenen Temperatur am Prüfstand. Trotz der überschaubaren Anzahl an Knoten ist es gelungen, ein thermisches Modell zu entwickeln, welches in der Lage ist, die Temperaturverteilung am kompletten Ringflächentribometer nachzustellen und sogar für andere Betriebsbedingungen vorherzusagen. Viele der im Modell hinterlegten Parameter (ca. 500 Stück) mussten aufgrund von fehlenden Informationen abgeschätzt werden. Legt man bei jedem Parameter nur eine Unsicherheit von 10% zugrunde und nimmt an, dass die Temperaturverteilung neben

Geometrie und Materialkennwerten auch von vielen anderen Faktoren abhängig sein kann, so kann eine Optimierung und Feinabstimmung des Netzwerks zu noch genaueren Temperaturentscheidungen führen. Mit dem Modell können nun folgende Aussagen getroffen werden:

- Ermittlung, Abschätzung und Vorhersage der Temperaturverteilung am Prüfstand für verschiedene Schmierstoffe, Füllstände und Betriebspunkte (Drehzahl, Pressung)
- Gezielte und schnelle Optimierung der Wärmeabführung im Dichtkontakt/Prüfstand durch einfache Anpassungen am Modell. Veränderung der Wärmeströme im Modell und am Prüfstand

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung der Forschung innerhalb der Projekte MA 6719/1-1 und KO 1220/26-1: „Verschleiß von Stoffpaarungen im Dichtkontakt“.

Literatur

- [1] Upper, G.: Dichtlippentemperatur von Radial-Wellendichtringen. Theoretische und experimentelle Untersuchung, Universität Karlsruhe (TH) Dissertation. Karlsruhe 1968
- [2] Stakenborg, M. u. Ostayen, R. von: Radial lip seals, thermal aspects. Paper III(iv). In: Dowson, D. (Hrsg.): Tribological design of machine elements. Tribology series, Bd. 14. Amsterdam, New York: Elsevier for the Institute of Tribology Leeds University and Institut national des Sciences appliquées de Lyon 1989
- [3] Stahl, T.: Einfluss von Drehzahl- und Lastkollektiven auf die Entwicklung von Reibmoment und Temperatur in Wälzlagern. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2011. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, Bd. 412. Düsseldorf: VDI-Verl. 2011
- [4] Sucker, J.: Entwicklung eines Tragfähigkeitsberechnungsverfahrens für Schraubradgetriebe mit einer Schnecke aus Stahl und einem Rad aus Kunststoff. Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2013. Schriftenreihe / Institut, Bd. 13,4. Bochum: Selbstverl. der Ruhr-Univ 2013
- [5] Geiger, J. S.: Wirkungsgrad und Wärmehaushalt von Zahnradgetrieben bei instationären Betriebszuständen. Dissertation. FZG, Nr. 204
- [6] Gastauer, T.: Vergleichende Reibungs- und Verschleißuntersuchung durch Experiment und Simulation an Elastomeren für Dichtungsanwendungen in der Antriebstechnik. FVA Heft Nr. 578 I
- [7] Deutsche Norm DIN 3760 Radial-Wellendichtringe 1996
- [8] Böckh, P. v. u. Wetzel, T.: Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015
- [9] Kabelac, S. (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas. [Berechnungsunterlagen für Druckverlust, Wärme- und Stoffübergang]. VDI Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- [10] Deutsche Edelstahlwerke: Werkstoffdatenblatt 16MnCr5, 2017. www.dew-stahl.com, abgerufen am: 21.08.2017
- [11] Engelke, T.: Reibverhalten von RWDR Einfluss der Elastomer-Schmierstoff-Kombination auf das Betriebsverhalten von Radialwellendichtringen, Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Universität Hannover, Dissertation, Hannover 2011

- [12] Noack, G.: Zur Erfassung der Viskosität-Temperatur-Abhängigkeit von Schmierölen durch die Vogelsche Gleichung. *Schmiertechnik und Tribologie* 20 (1973) 3, S. 74 - 80
- [13] Lunze, J. (Hrsg.): *Regelungstechnik 1. Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer 2013
- [14] VDI 2206; Juni 2004. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*
- [15] Bactavatchalou, R., Bock, E., Frölich, D., Heimes, J., Kaiser, F., Langner, T., Morgenstern, S., Magyar, B. u. Sauer, B.: Parametrisches thermisches Netzwerk zur Simulation der Temperaturverteilung eines RWDR-Prüfstandes. *Tibometrie*. In: GfT Gesellschaft für Tribologie e.V. (Hrsg.): *Reibung, Schmierung und Verschleiß*. 58. Tribologie-Fachtagung 2017, 25. - 27. September 2017 in Göttingen : Fachvorträge, wissenschaftliche Poster, DFG Abschlusskolloquium SPP1551. *Reibung, Schmierung und Verschleiß, Forschung und praktische Anwendungen* : 58. Tribologie-Fachtagung, 26. - 28. September 2017 in Göttingen / Hrsg. u. Vertrieb: Gesellschaft für Tribologie e.V. ; CD-ROM. Aachen: GfT Gesellschaft für Tribologie e.V 2017

Raum für Austausch Ideen. Wissen. Kontakte.



**In unseren Fachseminaren und -foren zeigen Ihnen
Experten Lösungsalternativen auf – auch Inhouse**

www.isgatec.com > Akademie

Ihre Fragen beantwortet Stefanie Wüst
Tel.: 0049 (0)621-7176888-2

ISGATEC®
AKADEMIE

RWDR neu interpretiert

Steigerung der Leistungsfähigkeit von elastomeren Kontaktdichtungen

Radialwellendichtringe (RWDR) sind in sehr vielen Anwendungen auf der ganzen Welt als bewährtes Dichtkonzept weitverbreitet. Mit steigenden Anforderungen in den Anwendungen wird die Leistungsgrenze bestehender RWDR immer wieder erreicht und überschritten.

Um den Anforderungen gerecht zu werden, kommen Design- und Werkstoffentwicklungen zum Tragen, die im Wesentlichen dem Prinzip RWDR folgen (**Bild 1**). Grundsätzlich steigt bei den in den Anwendungen immer weiter verschärften Bedingungen die Belastung auf den Dichtungswerkstoff – mit der Folge von Rissbildung und/oder Verschleiß an Dichtprofil und Gegenlauffläche.

Erhöhte Temperaturen aus der Anwendung und dem Energieeintrag der Dichtung im Kontaktbereich der Welle führen zusätzlich zu Ölkohlebildung, die dann im Bereich der dynamischen Dichtkante abgelagert wird und als harter, abrasiver Werkstoff die Verschleißspuren an den benannten Stellen exponentiell erhöht. Um die bekannten Verschleißmechanismen bei Wellendichtringen zu vermeiden, muss ein völlig anderes, neuartiges Konzept betrachtet werden.

Bei der hier vorgestellten Wellendichtung wird ganz aktiv der Austausch von dem anliegenden Medium gefördert mit der Folge, dass im Dichtkontaktbereich ein ständiger Umlauf an Druckmedium entsteht. Dieser Umlauf dient der Spülung im Dichtbereich und der Wärmeabfuhr über das Fluid. Durch das neue Funktionsprinzip können Verschleiß und daraus abgeleitet die Lebensdauer deutlich verbessert und erweitert werden.

Bild 2 veranschaulicht die Verzerrungshypothese mit den Verschleißstrukturen. Bei rotierender Welle treten durch die axial gerichteten Verschleißstrukturen Reibschubspannungen auf, welche entsprechend der Pressungsverteilung asymmetrisch verzerrt werden. Aufgrund der asymmetrischen Verzerrung entsteht eine entgegenge-

Von Dr.-Ing Mandy Wilke, Technology Specialist Fluid Power Europe; Holger Jordan, Technical Manager Marketing Europe
Trelleborg Sealing Solutions | www.tss.trelleborg.com/de

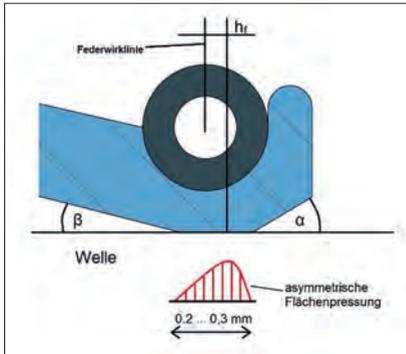


Bild 1: Vergrößerte Darstellung einer RWDR-Dichtkante [1]

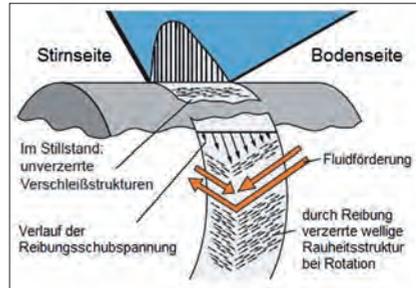


Bild 2: Verzerrungshypothese [1]

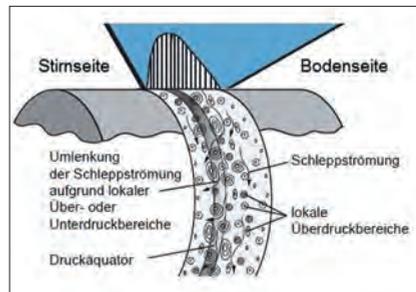
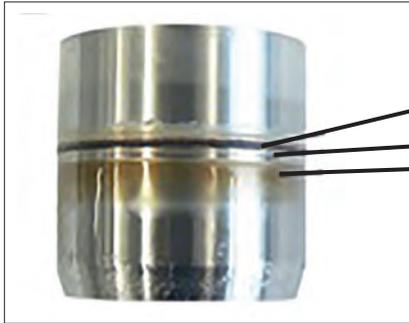


Bild 3: Seitenstromhypothese [2]

setzte Mikropumpwirkung, die das Fluid in den Dichtkontakt fördert. Die Pumpwirkung ist in Richtung der Stirnseite größer, sodass in diese Richtung ein Förderstrom entsteht [1].

Die Seitenstromhypothese erläutert, dass es trotz einer zufällig verteilten Rauheitsstruktur zu einer Dichtwirkung und einer Flüssigkeitsförderung durch den Dichtspalt kommt. **Bild 3** stellt die Seitenstromhypothese schematisch dar. Aufgrund von zufällig angeordneten Rauheitserhebungen auf der RWDR-Dichtkante ergeben sich lokale mikroskopische Druckfelder. Bei einer rotierenden Welle wirkt auf das Fluid vor einer Rauheitserhebung ein Feld mit hohem und nach der Erhebung eines mit geringem Druck. Somit wird das Fluid einem ständigen Druckwechsel ausgesetzt und dadurch abgelenkt oder angesaugt. An dem Pressungsmaximum, in **Bild 3** dargestellt durch den Druckäquator, kann das Fluid angesichts des lokal hohen Druckes in beide Richtungen strömen. Aufgrund des flacheren Druckgradienten, hervorgerufen durch die stärker abfallende Flächenpressung, strömt mehr Fluid auf die Stirnseite als anders herum.



Ölkohle
Welleneinlauf
Verfärbung

Bild 4: Beispiel für Welleneinlauf mit Ölkohle, Verfärbung (Bild: Trelleborg Sealing Solutions)

Bewertung		Beschreibung	Beispielaufnahmen
3	starke	Risse sind ohne Dehnung der Laufspur sichtbar	
2	mittlere	Risse sind nach Dehnung bleibend sichtbar	
1	leichte	Risse sind nach Dehnung nicht sichtbar	
0	keine	Es sind keine Risse bei Dehnung sichtbar	

Bild 5: Bewertungstabelle bei Rissbildung am Elastomer [3]

Bewertung		Beschreibung	Beispielaufnahmen
3	verhärtete Schicht	nicht zerstörungsfrei (Elastomer) zu entfernen	
2	entfernbar	kann noch zerstörungsfrei entfernt werden	
1	leicht entfernbare	leicht entfernbare (durch Abwischen)	
0	keine	keine Ölkohle festzustellen	

Bild 6: Bewertungstabelle bei Ölkohle am Elastomer [3]

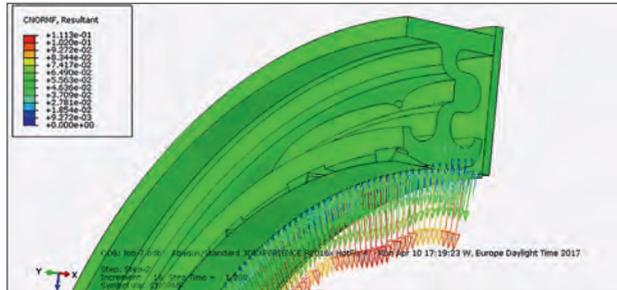


Bild 7: Radialkraftverteilung am Umfang (Bild: Trelleborg Sealing Solutions)

Eine Lebensdauerverkürzung, bedingt durch Reibungsverluste, ist neben einer mangelnden Schmierung in der Kontaktfläche der Dichtpartner vor allem auf zu hohe Temperaturentwicklungen aufgrund von fehlendem Wärmeabtransport sowie eine ungeeignete Materialpaarung der Dichtpartner zurückzuführen. Die Schäden am System fallen dabei unterschiedlich aus, treten jedoch häufig in Kombination auf. Typische Beschädigungen an der RWDR-Dichtstelle sind:

- Verfärbung der Dichtkante
- Ölkohlebildung am Dichtkontakt
- Risse an Dichtkante
- Blasenbildung an Dichtkante
- Welleneinlauf und Ablagerungen von Ölkohle an der Welle (**Bild 4**)

Die verschiedenen Schadensbilder an RWDR-Systemen können meist auf eine falsche Auslegung der Einflussfaktoren zurückgeführt werden. Deshalb ist es wichtig, die Schadensbilder zu analysieren und angemessen zu bewerten. Die **Bilder 5 und 6** zeigen Beispiele für bekannte Schadensbilder und eine geeignete Bewertung dieser.

Neuer Ansatz

Das neuartige Wellendichtringkonzept ist darauf ausgelegt, die Leistungsparameter gegenüber bestehenden RWDR zu verbessern. Erreicht werden soll dies durch den aktiven Fluidaustausch im Dichtkontakt, hervorgerufen durch die Strömungskanäle und die neuartige Geometrie des Dichtungshalses. Durch eine Variation der Radialkraft am Umfang der Kontaktstelle zur dichtenden Welle kann ein erheblicher Volumenstrom erzeugt werden, der einen kontinuierlichen Ölaustausch im Bereich der Dichtkante sicherstellt (**Bild 7**). Das neue Konzept ist modular aufgebaut, um unterschiedliche Anforderungsprofile in den verschiedenen Anwendungen zu erfüllen. So können eine zusätzliche Staublippe ergänzt oder ein stabilisierender Ring für die Eignung einer Druckbelastung eingesetzt werden (**Bild 8**). Die Möglichkeiten der einzelnen Modul-

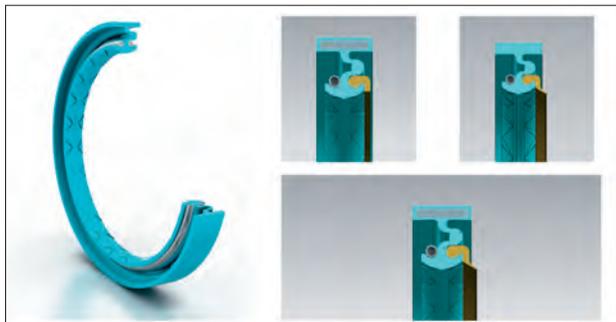


Bild 8: Modulare Aufbau des neuen Wellendichtringkonzeptes (Bild: Trelleborg Sealing Solutions)

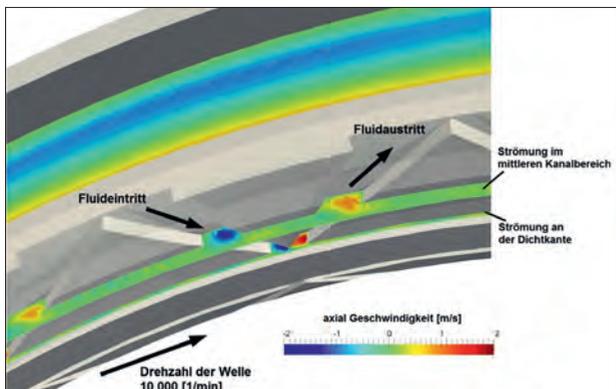


Bild 9: Strömungsverhalten in den kritischen Bereichen (Bild: Trelleborg Sealing Solutions)

kombinationen können – je nach Betriebsbedingunge – individuell angepasst werden. Drücke bis 2 MPa oder mehr lassen sich je nach Auslegung des Stützkörpers realisieren.

Über eine CFD-Simulation (**Bild 9**) wird die über die Kanäle ausgetauschten Volumenströme berechnet. Abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit wurde hier für einen Wellendurchmesser von 50 mm bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 26 m/s ein Volumenstrom von 25 l/h ermittelt bei einer mittleren Geschwindigkeit in den Kanalöffnungen von 1,25 m/s.

Die FEA- und CFD-Simulationen konnten die theoretischen Überlegungen hinsichtlich der verbesserten Laufeigenschaften der neuen Rotationsdichtung bestätigen. Vergleichsrechnungen zu einem herkömmlichen Radialwellendichtring zeigen eine insgesamt höhere Geschwindigkeit und deutlich höhere Sekundärgeschwindigkeiten, die zu einem verbesserten Fluidtransport in Richtung Dichtspalt führen. Der Fluidaustausch

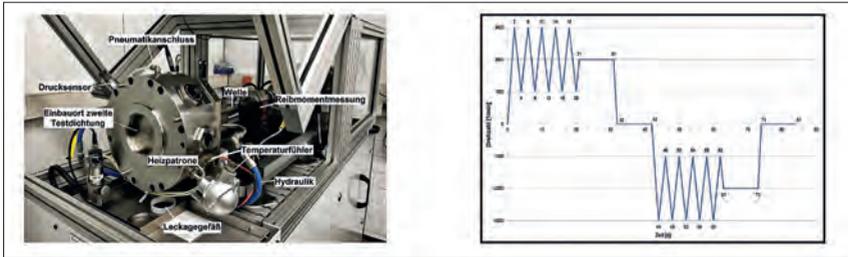


Bild 10: Prüfaufbau und exemplarisches Lastkollektiv (Bild: Trelleborg Sealing Solutions)

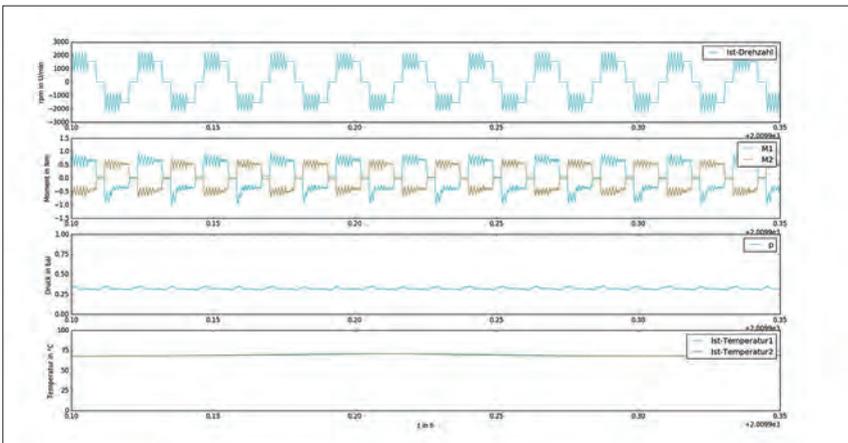


Bild 11: Reibmomentverlauf des beispielhaften Lastkollektivs (Bild: Trelleborg Sealing Solutions)

aufgrund der neuartigen Geometrien ist sehr hoch und ist ausreichend, um der thermischen Überlastung an der Dichtkante entgegenzuwirken. Die vielversprechenden Ergebnisse der Simulationsreihen sind in verschiedenen Versuchen untersucht worden.

Die Versuche wurden an verschiedenen Prüfständen durchgeführt, welche jeweils definierte Lastkollektive durchlaufen, wie diese aus den Anwendungen bekannt sind [5]. Hierfür sind die Prüfstände speziell für einen bestimmten Belastungsfall, wie z.B. hohe Drehzahlen, Druckbelastung oder dynamische Drehzahlwechsel, ausgelegt. Der Grundaufbau ist jedoch sehr ähnlich und unterscheidet sich lediglich in den Leistungsdaten. Im Folgenden ist der Aufbau eines exemplarisch gewählten Rotationsprüfstands dargestellt. Die **Bilder 10, 11 und 12** zeigen die Ergebnisse von Reibmomenten und Verschleiß der Dichtung und der Welle.

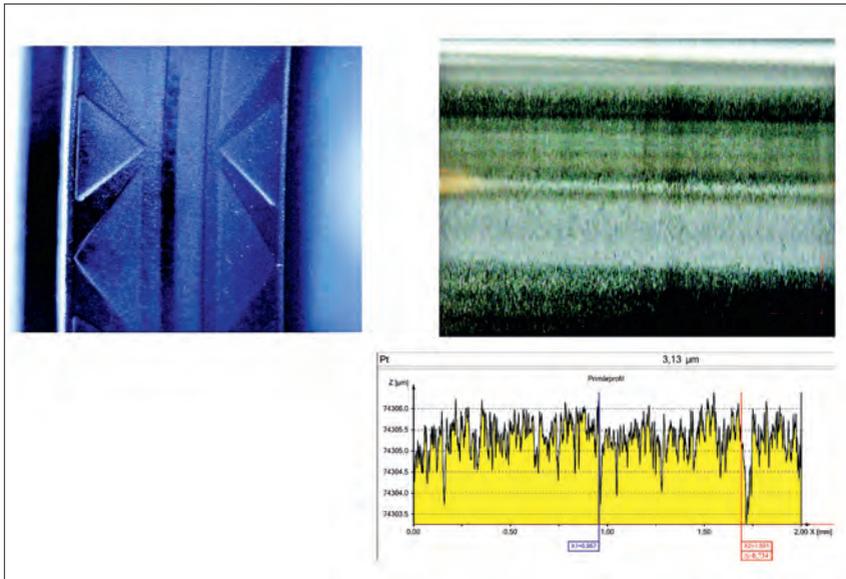
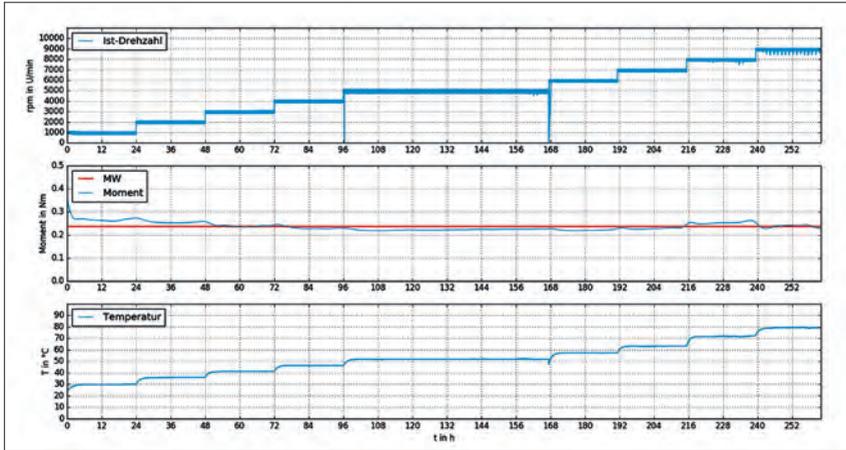


Bild 12: Reibmomentverlauf und Verschleißbilder von Dichtung und Welle über kontinuierlich steigende Umfangsgeschwindigkeiten (Bild: Trelleborg Sealing Solutions)

Literatur

- [1] Müller, Heinz Konrad (1990): Abdichtung bewegter Maschinenteile. Funktion - Gestaltung - Berechnung - Anwendung, Waiblingen
- [2] Kammüller, M. (1986): Zum Abdichtverhalten von Radialwellendichtringen, Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente
- [3] Petuchow, Arthur, Wollesen, Volkert, Estorff, Otto von (2014): Validierung einer Funktionsüberprüfung und Erarbeitung einer Methode zur Erfassung des Reibwertes μ in Abhängigkeit von variierenden Betriebsparametern. DGMK-Forschungsbericht 738, Hamburg
- [4] Baumann, Matthias (2017): Abdichtung drallbehafteter Dichtungsgegenläufigflächen – Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen, Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente
- [5] Hüttinger, Alexander et al. (2016): Neues Prüfverfahren für dynamische Dichtungen von Getriebemotoren. In: Dichtungstechnik Jahrbuch 2016



Raum für Aktuelles
Impulse. Wissen. Kontakte.

Up-to-date im Bereich Dichten. Kleben. Polymer.
sind Sie mit dem monatlichen Newsletter
[i] ISGATEC Impulse

www.isgatec.com

Kostenlos abonnieren
unter www.isgatec.com

ISGATEC[®]
Dichten. Kleben. Polymer.

Geräusche an Gleitringdichtungen

Eine Ursachenanalyse und Ansätze zur Vermeidung

Ungünstige Schmierverhältnisse an technischen Bauteilen, insbesondere im Mischreibungszustand, können selbsterregte periodische, aperiodische oder stochastische Bauteilschwingungen erzeugen, die wiederum über das gesamte abzudichtende System auf freie Bauteiloberflächen übertragen werden können und dort zu Schallemissionen führen. Typische Erscheinungen von harmonischen und disharmonischen Schallemissionen, nämlich Töne, Klänge oder Geräusche, zeigt Bild 1. Gleitringdichtungen können unangenehme quietschende, pfeifende, heulende, zwitschernde, brummende oder andere Geräusche entwickeln. Kfz-Kühlwasserpumpen-Dichtungen können, z.B. unter spezifischen Betriebszuständen insbesondere im Leerlauf der Verbrennungs-Motoren in Verbindung mit hohen Temperaturen nach einer bestimmten Betriebszeit von einigen hundert Stunden (nach einem „unnormalen“ Einlauf bei unsachgemäßer Überhitzung), unangenehme Geräusche verursachen. Solche Geräuscentwicklungen sind aber auch im Zusammenhang mit drehzahlgeregelten Pumpen bei der Abdichtung wässriger (insbesondere niederviskoser) Medien und dort bei niedrigen Drehzahlen und wiederum hohen Temperaturen bekannt oder treten bei Pumpen wie z.B. für Wasch- oder Spülmaschinen mit kleinen Wellendurchmessern und damit bei geringen Umfangsgeschwindigkeiten auf. Im Rahmen der vorliegenden Betrachtung soll eine mögliche Ursache-Wirkungs-Kette aufgezeigt werden und sollen mögliche Lösungsansätze dazu geboten werden.

Aus der Zeit von vor ca. 100 Jahren stammt das erste Patent einer Gleitringdichtung. Die technisch sinnvolle Umsetzung des Patents konnte aber erst in der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg erfolgen, nachdem entsprechende hoch belastbare (harte) Werkstoffe zur Verfügung standen, um der für viele Gleitringdichtungen typischen Mischreibung und den damit verbundenen Verschleißvorgängen zu widerstehen. Der grundsätzliche Aufbau sowie die Funktion einer Gleitringdichtung haben sich allerdings in der Zwischenzeit nicht verändert. Die ursprüngliche Erfindung einer Stirnflächendichtung, vergleichbar zur modernen Gleitringdichtung, ist also alt. Ein hoch effektiver Drosselspalt mit selbst einstellender sehr kleiner Spalthöhe h drosselt den abzudichtenden Druck ge-

Von Professor Dr.-Ing. Peter Waidner
Werkstofftechnik, Dichtungstechnik, Fakultät für angewandte Naturwissenschaften und Mechanik,
Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW) | www.hm.edu

genüber der Umgebung ab und minimiert dabei den austretenden Volumenstrom (die Leckage) des abdichtenden Fluids. Im Betrieb entsteht infolge der Drehbewegung allerdings Reibung zwischen den beiden Stirnflächen.

Grundelemente einer Gleitringdichtung

Die fünf geometrischen Grundelemente jeder Gleitringdichtung sind bis heute mehr oder weniger unveränderte integrale Bestandteile. **Bild 2** zeigt anhand eines Beispiels einer rotierenden Einzeldichtung mit Kegelfeder den grundsätzlichen Aufbau einer Gleitringdichtung und die Grundelemente. Die untere Hälfte der Dichtung liegt unterhalb der Symmetrieachse und ist als Halbschnitt nicht dargestellt. Der zu betrachtende reibende Dichtspalt liegt zwischen Gleit- und Gegenring.

Man unterscheidet in der allgemeinen Literatur nach berührenden und berühungslosen Dichtungen. Dabei werden berührungslose Dichtungen mit definierten offenen, wenn auch sehr engen Spalten und bei Bewegung mit entsprechendem tribologischem Verhalten der reinen Flüssigkeitsreibung angenommen und alle anderen Dichtungen als berührend bezeichnet. Gleitringdichtungen werden zwar im Allgemeinen den berührenden Dichtungen unter Zugrundelegung von Grenzreibung zugeordnet, können aber unter bestimmten Betriebsbedingungen auch berührungsfrei mit minimaler Spalthöhe betrieben werden. Wasserabdichtende Gleitringdichtungen laufen meist im Übergangsbereich zwischen berührend und berührungslos und arbeiten dann unter Mischreibungszustand bzw. elasto-hydrodynamischer Schmierung. Elasto-hydrodynamik (EHD) als spezielle Form der Grenzschmierung tritt im Kontakt extrem hochbelasteter bewegter Oberflächen auf. Die EHD-Theorie berücksichtigt neben den hydrodynamischen Grundgleichungen nach Newton auch die mikroelastische Verformung der in Kontakt stehenden Körper.

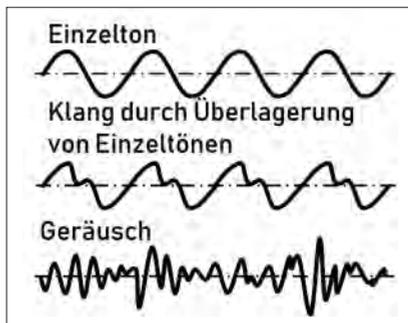


Bild 1: Abgrenzung Ton – Klang – Geräusch
(Bild: HAW München)

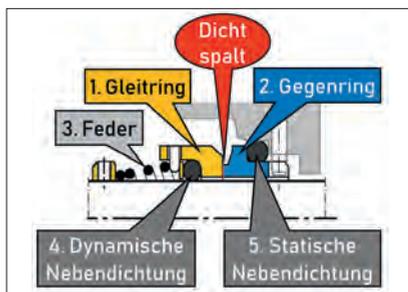


Bild 2: Beispielhafter Halbschnitt einer Gleitringdichtung mit Kegelfeder mit den fünf Grundelementen einer Gleitringdichtung
(Bild: HAW München)

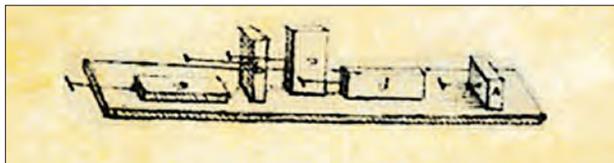


Bild 3: Zeichnung von Leonardo da Vinci (1480) zur Unabhängigkeit der Reibung von der Fläche
(Bild: Leonardo da Vinci)

Charakteristisch für die EHD-Schmierung ist eine Verengung des Schmierpalts am Ende der Kontaktzone und daraus abgeleitet eine lokale Druckerhöhung. Kompromisse hinsichtlich Leckage und Reibleistungsverlusten sind immer nötig. Diese gehen aber oft mit einer Einbuße an Zuverlässigkeit/Lebensdauer einher.

Die Gleitringdichtung als hoch effektiver Drosselspalt – Beherrschung der Leckage, der primären Aufgabe einer Dichtung

Die völlige Vermeidung von Leckagen an dynamischen Einzeldichtstellen ist unter wirtschaftlichen Aspekten meist unmöglich und häufig auch nicht sinnvoll. Wellenabdichtungen von Pumpen sind in verfahrenstechnischen Anlagen nach aktuellen statistischen Erhebungen von Anlagenbetreibern nach den Armaturen mit geringem Abstand Leckageverursacher Nummer zwei. Schätzt man das Leckagevolumen über einen bestimmten Betrachtungszeitraum ab, so ergeben sich bei wenigen Tropfen pro Stunde (mit einem durchschnittlichen Tropfenvolumen von 0,01 bis 0,05 ml je nach Flüssigkeit) minimale Leckagevolumen. Basierend auf Untersuchungen im Vorfeld [1] wird VDI 2440 auch im Rahmen der TA Luft angewandt und lässt für eine ordnungsgemäß laufende Gleitringdichtung üblicher Bauform (nicht entlastet) und Größe (Nenndurchmesser 33 mm) sowie Betriebsbedingungen (3.000 min^{-1} , Wasser, Druck $< 16 \text{ bar}$) z.B. 1 ml/h (0,001 l/h) zu. Dies entspricht etwa einem Tropfen alle zwei Minuten. Eine übliche Berechnung nach Herstellerverfahren ergab allerdings bereits damals für moderne Gleitringdichtungen mit den bis heute üblichen Gleitwerkstoffen eine weitaus geringere Leckage im davon einstelligen Prozentbereich und weniger als des in VDI 2440 definierten Wertes.

Reibung von Gleitringdichtungen – die Kehrseite der Medaille

Die Reibung in Gleitringdichtungen folgt den konventionellen grundlegenden Reibungsgesetzen der trockenen und geschmierten Reibung. Eine ausführliche erweiterte Betrachtung der Reibungsgesetze zeigt, dass statische und kinetische Reibung dieselbe atomphysikalisch-chemische Herkunft haben, nämlich den reaktionskinetischen Auf- und Abbau physikalisch-chemischer Bindungskräfte von mehr oder weniger gesättigten Oberflächen, und daher von den klassischen Reibgesetzen nicht getrennt betrachtet werden können.

Die umfassenden fundamentalen Gesetze trockener Reibung

Kinetische trockene Reibung ist bekannterweise nach *Leonardo da Vinci* nach **Bild 3** unabhängig von der Größe der gesamten reibenden Kontaktfläche A , solange eine wahre Kontaktfläche existiert. Für die Übertragung auf Gleitringdichtungen spielt daraus abgeleitet für Trockenlaufdichtungen die Gleitflächenbreite eine untergeordnete Rolle.

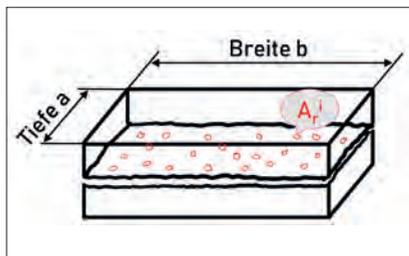


Bild 4: Bauteiloberfläche und wahre Kontaktfläche (Bild: HAW München)

Dies wird erklärbar, da die wahre (reale) reibende Kontaktfläche A_r nach **Bild 4** wegen der Summe der Formabweichungen und damit der wenigen verbleibenden diskreten Kontaktbereiche (im mathematischen Teilgebiet der Topologie ist ein topologischer Raum diskret, wenn alle Punkte isoliert sind, also wenn in einer hinreichend kleinen Umgebung des Punktes keine weiteren Punkte liegen) erheblich kleiner ist als die geometrische Bauteiloberfläche A . Durch eine Vergrößerung der Bauteilabmessungen nimmt die Anzahl der Kontaktbereiche nicht zu, sondern nur die räumliche Verteilung.

$$A = a \cdot b \ll \sum A_r^i$$

Die Losbrechkraft (der Übergang von statischer zu kinetischer Reibung) wächst nach Untersuchungen von Coulomb auf Basis einer Grundkraft mit der Stillstandszeit nach **Bild 5** und temperaturabhängig infolge logarithmischer Diffusions- und Kriechvorgänge gemäß den Fickschen Diffusions-Gesetzen an.

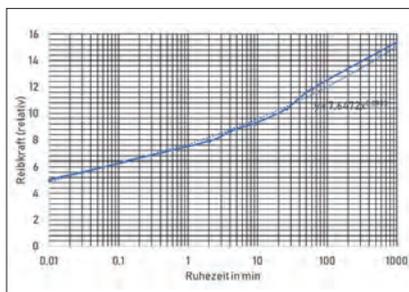


Bild 5: Statische Reibkraft für Eiche gegen Eiche, geschmiert durch Talg, abhängig von der Ruhezeit nach Versuchen von Coulomb – typische logarithmische Abhängigkeit (Bild: HAW München)

Das kontinuierliche Wachstum nach einer Arrhenius-Funktion – die Arrhenius-Gleichung beschreibt näherungsweise eine quantitative Abhängigkeit bei physikalischen

und vor allem chemischen Prozessen, bei denen auf molekularer Ebene eine Aktivierungsenergie überwunden werden muss – der wahren Kontaktfläche A_r beginnt bei der ersten Berührung der Körper auf atomarer Basis – zeitlich im Subnanosekundenbereich – und hört auch nach sehr langer Ruhezeit nicht auf. Die Kontaktfläche A_r nähert sich (vergleichbar zu den Atomdiffusionsbewegungen in Sinterprozessen) der Bauteilfläche A immer weiter asymptotisch an, erreicht sie aber nie. Bei der Übertragung auf Gleitringdichtungen wird erklärbar, dass, insbesondere bei gleichen keramischen Gleitflächenwerkstoffen, nach längerer Stillstandszeit das Losbrechmoment beim Anfahren der Maschine erheblich größer werden kann. Technisch begegnet man diesem Phänomen durch herstellbedingtes Aufrauen einer der Gleitflächen.

Die Losbrechkraft (Festkörper-Hafttreibkraft F_{Rh}) zweier Bauteile kann, abhängig von der Materialpaarung, die Größe der Normalkraft F_N infolge von chemischen Bindungskräften bis zur Erreichung der Werkstoff-Festigkeitsgrenze überschreiten. Trotzdem gilt die übliche Gleichung:

$$F_{Rh} = \mu_h \cdot F_N$$

Mit der bekannten Beziehung für den Reibwinkel α'

$$\mu = \sin \alpha'$$

Die Reibzahl μ übersteigt mit obiger Betrachtung mathematisch unmöglich für den entsprechenden Reibungswinkel α' den Wert von 1. Die Materialien verbinden sich in stabilen granularen Atomgittern. Identische Werkstoffe und extrem hohe Oberflächengüte begünstigen dabei die Bildung starker chemischer Bindungen. Umgangssprachlich nennt man den Vorgang „Kaltverschweißen“.

Bei einer tangentialen Beanspruchung der Kontakte der einzelnen Berührungsstellen der wahren Kontaktfläche durch Schub (typisch für Reibvorgänge) tritt zunächst elastische Deformation im Kristallgitter in der wahren Kontaktfläche A_r und anschließend i.d.R. im Sinne der Atomphysik nach und nach über die Kontaktflächenanteile zunehmend ‚partielles‘ statisches Gleiten bereits dann auf, bevor „makroskopisches“ dynamisches Gleiten der Bauteile einsetzt. Makroskopisch plastische Deformation ist wegen der keramischen Struktur moderner Gleitwerkstoffe für Gleitringdichtungen mit fehlenden Versetzungen werkstofftechnisch ausgeschlossen. Der Koeffizient der statischen Reibung μ_h ist also bekannterweise infolge der Reaktionskinetik chemischer Bindungen größer als der der kinetischen Reibung μ_g . Kinetische Reibung (nach

Leonardo da Vinci ist wiederum wegen der Reaktionskinetik (ständiger Abbau und Aufbau) chemischer Bindungen weitgehend unabhängig von der Gleitgeschwindigkeit, aber abhängig von der Temperatur.

Die tangentialen elastischen Deformationen der Oberfläche der wahren Kontaktfläche ist Basis für die Theorie der Elastohydrodynamik (eher bekannt aus der Tribologie von Wälzlagern).

Wenn sich schließlich ein Körper makroskopisch bewegt, ist die kinetische Reibkraft proportional und senkrecht zu der Normalkraft. Die atomphysikalische elastisch-plastische Deformation ist aufgrund des dissipativen Hysterese-Verhaltens verlustbehaftet und führt daher zur Erwärmung.

Der Unterschied zwischen dem statischen (haftenden) μ_h und kinetischen (gleitenden) μ_g Reibkoeffizient erscheint als relativ: Der Übergang vom statischen zum beginnenden Gleitkontakt ist kontinuierlich. Das atomare Abgleiten der einzelnen, wahren Kontaktpunkte erfolgt nach und nach. Die allgemein angenommene „Haftreibung“ entpuppt sich daher als Gleitreibung mit extrem kleiner Geschwindigkeit.

Reibung hängt über diese Phänomene hinaus von der gesamten mikro- und makrogeometrischen Beschaffenheit der kontaktierenden Oberfläche sowie von der chemischen Absättigung der Werkstoffe ab. Bei Vakuumreibung (vollständig) oder bei Tieftemperaturreibung (wegen reduzierter Feuchtigkeitsaufnahme) entfällt die chemische Absättigung weitgehend. Die dann auftretende Reibzahl erscheint makroskopisch höher.

Die gesamten Reibvorgänge werden durch adhäsive Einflüsse von Schmierstoffen (geschmierte Grenzschicht-Reibung mit Wechselwirkung des Schmierstoffs mit der abgesättigten Bauteiloberfläche) zusätzlich beeinflusst. Hier soll aber auf diesen Umstand nicht näher eingegangen werden. Insbesondere muss aber, z.B. für Abdichtung von Kühlflüssigkeiten bei Kraftfahrzeugkühlsystemen mit den immer vorhandenen Rostschutzinhibitoren (Phosphate und Silikate), mit erheblichen Grenzschichtaufbauten mit nachhaltigem Einfluss, insbesondere auf die im Zusammenhang mit der Geräuschentwicklung wichtige Elastohydrodynamik, im Übergangsbereich zur Flüssigkeitsschmierung gerechnet werden.

Für den betrachteten Fall der Geräuschentwicklung durch Gleitringdichtungen sind ausschließlich Mischreibung und elastohydrodynamische Schmierung im Grenz-

reibungsbereich zu betrachten. Ein zeitlich bedingter Aufbau einer molekularen Grenzschicht auf den Gleitflächen ist zu berücksichtigen und kann neben typischen Einlaufverschleißvorgängen als eine mögliche Erklärung für die zeitlich verzögerte Erscheinung der Geräuscentwicklung dienen.

Das physikalische Newtonsche Gesetz der Flüssigkeitsreibung

Das hydrodynamische Verhalten einer perfekt gefertigten Gleitringdichtung bei höherer Gleitgeschwindigkeit und/oder höherer Viskosität des abzudichtenden Mediums (im Sinne eines Schmierstoffs) mit technisch glatten Oberflächen mit ihrer natürlichen minimalen Welligkeit und Rauheit ist insgesamt konsistenter und daher für den Betrieb einer Gleitringdichtung im Allgemeinen vorzuziehen. Die Dichtung wird dann unter reiner Flüssigkeitsreibung basierend auf Makro- (welligkeitsbedingter) und Mikro- (granularbedingter) Hydrodynamik betrieben und ist dann weitgehend abhängig von der reinen viskositätsbedingten Scherreibung der Flüssigkeit.

Innerhalb eines geschlossenen/ununterbrochenen Fluidfilms ist die Scherspannung τ an jedem Punkt linear proportional zum lokalen Schergeschwindigkeitsgefälle.

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dh}$$

Voraussetzung für diese einfache hydrodynamische Betrachtung nach Newton ist der Parallelspalt einer Gleitringdichtung mit seiner ideal glatten und ebenen Oberfläche und einer über die gesamte Oberfläche konstanten Spalthöhe h . Der Proportionalitätsfaktor entspricht der dynamischen Viskosität η und ist in diesem Fall konstant. Laminare Strömung im Dichtspalt in Umfangsrichtung wird angenommen. Zu betrachtende Reynoldszahlen liegen erfahrungsgemäß im ein- bis niedrigen zweistelligen Bereich und damit weit unter einer relevanten Grenzbedingung zum turbulenten Bereich. Tatsächlich weicht die Oberfläche aber von diesen Idealvorstellungen durch „Kantenabfall“ von 1 μm und erheblich weniger (quer über die Gleitfläche von innen nach außen oder umgekehrt) in lateraler Richtung (lateral = lateinisch lateralis, deutsch seitlich, – steht für seitlich in anatomischer Hinsicht oder seitwärts) sowie durch Umfangswelligkeit mit einer Welligkeitsamplitudenhöhe im Bereich von 0,1 μm und weniger ab. Die einfache technische Ableitung für die Newtonsche Scherspannungshypothese dieses physikalischen Gesetzes für Gleitringdichtungen lautet:

$$\text{Scherspannung } \tau = \frac{\text{Geschwindigkeitsgefälle } u \cdot \text{Viskosität } \eta}{\text{selbsteinstellende kontaktfreie Spalthöhe } h}$$

Reib/Schmierzustand	Schmierfilmparameter	Spalthöhe h_{\min}
Reine Grenzflächenreibung	$\Lambda < 0,05$	$h \ll 10^{-9} \text{ m}$
Grenzflächenreibung (Übergang) (Boundary Lubrication)	$\Lambda < 1$	$5 \cdot 10^{-9} \text{ m} \leq h \leq 1 \cdot 10^{-8} \text{ m}$
Mischreibung (Mixed Lubrication)	$1 < \Lambda < 3$	$1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \leq h \leq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
Elastohydrodynamische Schmierung (Elastohydrodynamic Lubrication)	$3 < \Lambda < 10$	$1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \leq h \leq 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
Hydrodynamische Schmierung (Fluid Lubrication)	$10 < \Lambda < 100$	$h \gg 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

Tabelle 1: Reib/Schmierzustände, Schmierfilmparameter und zugehörige Spalthöhe

(Quelle: HAW München)

Die Umfangsgeschwindigkeit u und damit das lineare Gefälle du/dh zwischen stationärem und rotierendem Gleitring und Gegenring ist unter der Voraussetzung bekannter Spalthöhe h bekannt.

Die minimale Spalthöhe h_{\min} im üblichen elastohydrodynamischen Betrieb einer Gleitringdichtung kann für den Parallelspalt mit der üblichen Betrachtung über die technischen Oberflächenrauheiten R_a für die beiden Ringe (Gleit- und Gegenring) abgeschätzt werden:

$$h_{\min} = \Lambda \cdot \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$$

In der Literatur findet man geschwindigkeitsabhängige übliche Werte für Λ **Tabelle 1**. Die Einschätzung über die unterschiedlichen Reibverhältnisse innerhalb der Gleitflächen von Gleitringdichtungen erfolgt nach der allgemeingültigen Theorie für Dichtungen über die Hydrodynamische Kennzahl (Gümb)

$$G = \frac{\eta \cdot \omega}{\kappa \cdot \Delta p}$$

Man findet die bekannten Einflussgrößen:

- Viskosität η (verlustbehafteter Verschiebewiderstand der Moleküle in der Flüssigkeit)
- Geschwindigkeit (indirekt über die Drehfrequenz ω) und
- im Nenner den üblichen belastenden Spaltdruck $p_m = \kappa \cdot \Delta p$ – die über den Belastungsfaktor κ übersetzte, den Gleitring belastende abzudichtende Druckdifferenz Δp .

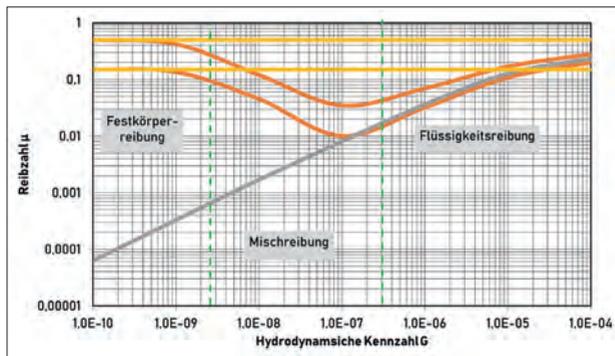


Bild 6: Übliche Darstellung der Reibzahl μ , abhängig von der Hydrodynamischen Kennzahl G für Gleitringdichtungen (Bild: HAW München)

Hohe Viskosität (mit einer Varianz der für Gleitringdichtungen üblichen abzudichtenden Medien über mehrere Größenordnungen) und hohe Drehzahlen sowie niedriger Druck ergeben hohe Werte der hydrodynamischen Kennzahl G im hydrodynamischen (rechten) Bereich. Der Belastungsfaktor κ mit seinen üblichen Werten von 0,65 bis max. üblicherweise 3 hat lediglich untergeordnete Bedeutung. Bei der nach **Bild 6** später folgenden üblichen Darstellung für die Reibzahl μ sind gewisse praxisrelevante (vereinfachende) Anpassungen durchgeführt worden und der typische Betriebsbereich von Gleitringdichtungen ist gekennzeichnet.

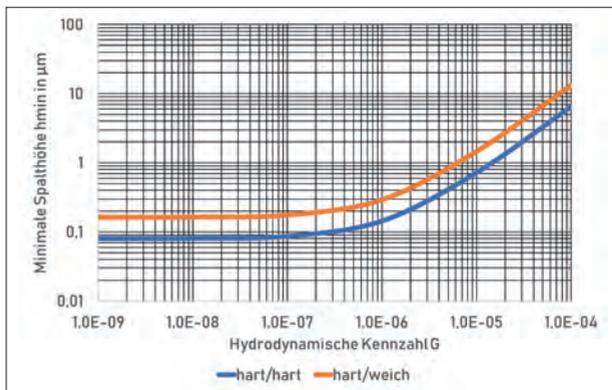
Für Gleitringdichtungen muss also die Schmierfähigkeit und damit die Viskosität des abzudichtenden Mediums für die Ermittlung der Schmier- bzw. Dichtspalthöhe berücksichtigt werden (**Bild 7**), da nicht wie bei Gleitlagern von einheitlichem Schmieröl ausgegangen werden kann, und für die minimale Dichtspalthöhe h_{\min} kann mit guter Näherung eine praxisrelevante Abschätzung über die hydrodynamische Kennzahl G (Gümbelzahl) erfolgen:

$$h_{\min} = (1 \cdot 10^6 \cdot G + 1,25) \cdot \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$$

Die Gleitgeschwindigkeit in Umfangsrichtung in Verbindung mit hoher viskoser Verlustleistung führt zur reibungsbedingten Temperaturerhöhung und damit zur Reduzierung der lokalen Viskosität η im Betrieb im Dichtspalt gegenüber der abzudichtenden Umgebung und kann Verdampfung im Dichtspalt mit entsprechendem Zweiphasenzustand verursachen. Die Temperaturerhöhung im Dichtspalt gegenüber dem abzudichtenden Zustand liegt erfahrungsgemäß, abhängig von der Gesamtkonstruktion und den Einbaubedingungen (vom geometrischen Einbaumfeld), bei

Bild 7: Typische Werte der minimalen hydrodynamischen Spalthöhe von Gleitringdichtungen für typische Hart/hart- und Hart/weich-Werkstoffpaarungen

(Bild: HAW München)



„normalen“ Betriebsbedingungen für durchschnittliche wasserabdichtende Gleitringdichtungen bei ca. 5 bis 15 °C. Bei gegenüber dem Umgebungszustand überhitztem Flüssigkeitszustand kann Verdampfung auch durch den Druckabfall ohne weitere Energiezufuhr bei Erreichung des lokalen Dampfdrucks im Dichtspalt auftreten. Ein Zweiphasenzustand beeinflusst den Betriebszustand nachhaltig negativ durch eine Verlagerung des Betriebspunktes von Flüssigkeitsreibung hin zu Misch- bzw. Grenzreibung. Der Zweiphasenzustand ist kompressibel und dämpft Schwingungen weniger gegenüber der reinen Flüssigkeit.

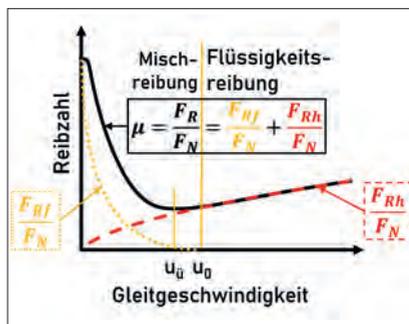


Bild 8: Prinzip des Stribeck-Diagramms

(Bild: HAW München)

Reibungszustände werden allgemein im folgenden bekannten Stribeck-Diagramm (**Bild 8**) mit der Gesamt-Reibzahl μ , der Geschwindigkeit u , der Normalkraft F_N , der gesamten Reibkraft F_R mit ihren Komponenten der Festkörperreibung F_{Rf} und der hydraulischen Reibung F_{Rh} dargestellt. u_0 stellt die Übergangsgeschwindigkeit am „Ausklippunkt“ zum berührungsfreien rechten Ast der Kurve dar. Im Bereich insbesondere von unterhalb u_0 bis u_0' , aber auch noch darunter tritt Elastohydrodynamik (mit den bekannten elastischen Verzerrungen der granularen Oberflächenstruktur der Gleitflächen [2], [3]) mit der Bildung von granularen Mikrogleitschuh auf. Bei u_0 liegt im Allgemeinen die kleinste komplett berührungsfreie Spalthöhe vor.

Unter dichtungstechnischen Gesichtspunkten ist dieser Betriebspunkt wegen geringster Leckage bei gleichzeitig geringer Verlustleistung (kleine Reibzahl) erstrebenswert. Ab u_0 zu höheren Geschwindigkeiten tritt nur noch viskose Reibung auf. Die Gesamt-Reibzahl μ stellt nach den üblichen Ableitungen, wie in der folgenden Gleichung dargestellt, ein gewichtetes Mittel der Reibzahlen für Festkörperreibung μ_f und Flüssigkeitsreibung (hydrodynamische Reibung) μ_h dar:

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} = \mu_f \cdot \left(1 - \frac{F_{Rh}}{F_N}\right) + \mu_h \cdot \frac{F_{Rh}}{F_N}$$

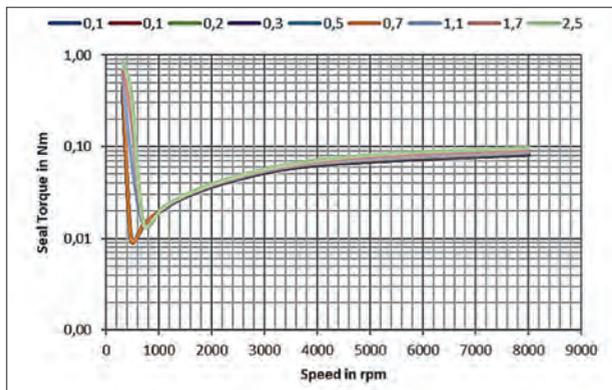
Die klassische Reibungstheorie und das Verhalten nach Sommerfeld (beschrieben durch die Stribeck-Kurve, siehe dazu beispielhaft **Bild 9**, gelten selbstverständlich, auch für Gleitringdichtungen. Reibvorgänge in Gleitringdichtungen sind aber charakterisiert durch die eigendynamische Spaltgeometrie (Parallelspalt oder Spalt mit lateralem Kantenabfall sowie betriebszustandsabhängige selbst einstellende Mikrospaltwelligkeit) mit selbst einstellender Spalthöhe zwischen Gleit- und Gegenring. Berücksichtigt werden muss darüber hinaus die extreme Scherbeanspruchung des abdichtenden Fluids als Schmiermittel im Dichtspalt. Rheologische Eigenschaften mit Scherverzähung mit strukturbildenden Vorgängen oder Scherentzähung mit Strukturzerstörung abweichend vom Newtonschen Verhalten müssen berücksichtigt werden. Beide Vorgänge können sowohl zeitabhängig (Thixotropie oder Rheopexie) als auch reversibel bzw. irreversibel sein.

Die durch Reibvorgänge an der Gleitfläche von Gleitringdichtungen verursachte Reibleistung kann anteilmäßig aus Festkörper- (F_{Rf}) und Flüssigkeitsreibungskraft (F_{Rh}) additiv abgeleitet werden. Für die vorliegende Betrachtung der Geräuschentwicklung steht aber nicht die Herleitung der Verlustleistung, sondern ausschließlich das vom Autor [4] dargestellte, bis heute von Gleitringdichtungs-Herstellern verwendete grundsätzliche Reibverhalten von Gleitringdichtungen nach **Bild 6** im Vordergrund, da sich die Geräuschentwicklung ausschließlich auf den Übergangsbereich (Misch- zu Flüssigkeitsreibung) bezieht.

Pumpendichtungen zur reinen Wasserabdichtung und zur Abdichtung wässriger Medien in der Feinchemie laufen, abgesehen von hochoptimierten Maschinen, überwiegend im Mischreibungsgebiet. Typische Mischungsverhältnisse von Kühlflüssigkeiten (ca. 50/50 Wasser/Glykol) in Kraftfahrzeuganwendungen oder für übliche Sperrmedien für Doppelgleitringdichtungen führen zu einer gewollten Verlagerung der Betriebspunkte über den Ausklinkpunkt bei u_0 hinaus in den rechten Ast der Berührungsfrei-

Bild 9: Typischer Verlauf einer Stribeck-Kurve für eine Kfz-Kühlwasserpumpendichtung (Scharparameter ist der Systemdruck)

(Bild: HAW München)



heit mit kleinster möglicher Spalthöhe. Erhöhte Betriebstemperatur bis zu 115 °C und höher wie z.B. in modernen Verbrennungsmotoren verringert allerdings die Betriebsviskosität und kann den Betriebspunkt wieder zurück in den elasto-hydrodynamischen Übergangsbereich mit der Möglichkeit der Geräuschentwicklung verlagern. Eine Modellvorstellung über die resultierende Werkstoffbelastung bei Grenzspaltbildung zeigt [5].

Man erkennt aus dem Kurvenverlauf den typischen Betriebsbereich für Festkörper- (Grenzreibung), Misch- und Flüssigkeitsreibung. Die Darstellung, insbesondere die Breite und der Verlauf eines „üblichen Bereiches für Gleitringdichtungen (GLRD)“, entspricht den Hüllkurven einer Sammlung [4] vieler Untersuchungen aus der Literatur. Auch nach heutigen Erkenntnissen hat sich der grundsätzliche Verlauf nicht geändert. Neuere Erkenntnisse und erweiterte Berechnungen zeigen allerdings, dass der „Abfall“ innerhalb der Mischreibung für eine spezifische Dichtung in ausgewählten Anwendungen wesentlich steiler ist [6] (**Bild 10**).

Die horizontale Achse der hydrodynamischen Kennzahl G ist – im Gegensatz zur Stribeck-Kurve nach **Bild 8** – in für dichtungstechnische Belange üblicher logarithmischer Darstellung erfolgt, um den Bereich kleiner Kennzahlen deutlicher herauszustellen. Der Kurvenverlauf für die Reibzahl für flüssige (hydrodynamische) Reibung wird dadurch nahezu linear. Als übliche Berechnungsgröße wird die Viskosität des abzudichtenden Mediums herangezogen. Die Abweichung vom linearen Verlauf im oberen Bereich der Kurve berücksichtigt die dort auftretende Absenkung der Viskosität im Dichtspalt infolge der dann nennenswerten Scherreibung und die zunehmende Spalthöhe infolge des hydrodynamischen „Aufschwimmens“. In der berührungsfreien

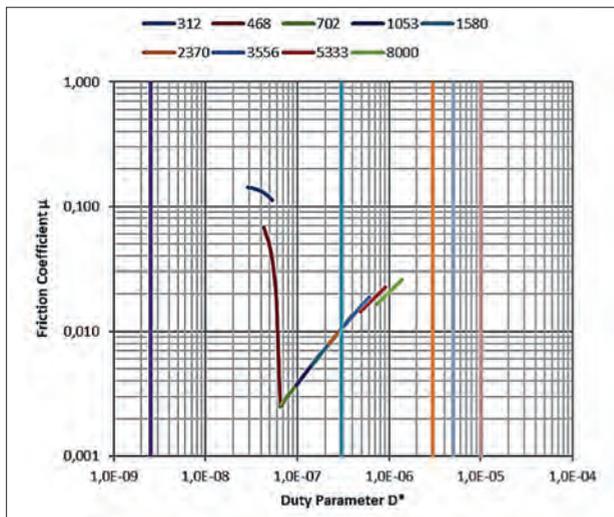


Bild 10: Beispiel des Simulationsergebnisses einer Kühlwasserpumpen-Dichtung für Kfz-Anwendung mit Parallelspalt (Scharparameter ist hier die Drehzahl)

(Bild: HAW München)

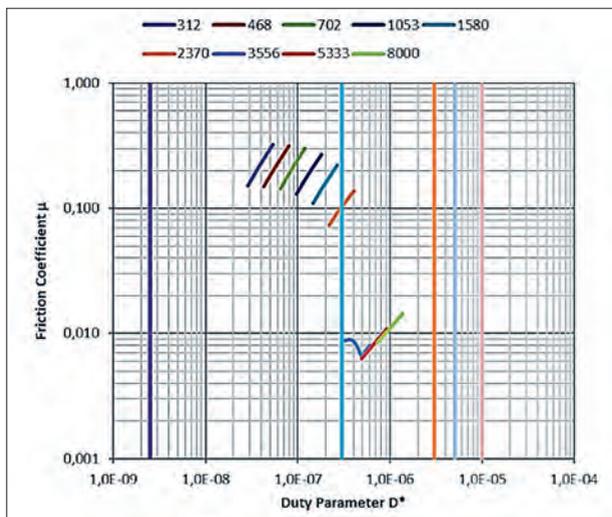
Flüssigkeitsreibung ist die Spalthöhe direkt abhängig von den Betriebsbedingungen und selbsteinstellend. Bei zunehmender Kennzahl nimmt die Spalthöhe infolge hydrodynamischer Effekte für Parallelspalte und geringer Abweichungen davon stark zu. Im Diagramm von **Bild 10** entsteht dadurch scheinbar ein Knick.

Im Bereich der Festkörper- und Mischreibung (im linken Ast der Kurve) liegt ein berührender Grenzspalt vor. Die mittlere Spalthöhe ändert sich dort infolge von Reibungs- und Strömungsvorgängen nur geringfügig. Sie ist in erster Näherung nach **Bild 7** vom geometrischen Mittel der Oberflächenrauheiten geprägt und wird durch einen gewissen Anteil aus Oberflächenverformungen beeinflusst. Kontinuierliche Anpassung und Verschleiß müssen aber berücksichtigt werden, was dann zu stochastischem Verhalten der Gleitringdichtungen führen muss. Als stochastisches Verhalten bezeichnet man, dass sich bei Wiederholung desselben Vorgangs nur manchmal dasselbe Verhalten wiederholt und dessen Eintreten für den Einzelfall nicht vorhersehbar ist.

Die allgemeine Betrachtung nach **Bild 9** gilt ausschließlich für den Parallelspalt mit planparallelen Dichtflächen – bei lateralem Kantenabfall mit resultierender partieller hydrostatischer Entlastung treten, insbesondere bei entlasteten Dichtungen mit $\kappa < 1$, bei den niedrigen Werten der Hydrodynamischen Kennzahl im linken Ast nach **Bild 11** erhebliche Abweichungen des Kurvenverlaufs auf. Der rechte Ast wird aber weniger nachhaltig beeinflusst.

Bild 11: Beispiel des Simulationsergebnisses einer Kühlwasserpumpen-Dichtung für Kfz-Anwendung mit $0,5\ \mu\text{m}$ konvergentem Kantenabfall (Scharparameter ist hier die Drehzahl)

(Bild: HAW München)



Die Betriebsbereiche der Hydrodynamischen Kennzahl (Gümbelzahl) G nach **Bild 9** von durchschnittlichen Gleitringdichtungen bzw. Abbildung **Bild 10** oder **Bild 11** für eine spezielle Anwendung für eine Kfz-Kühlwasser-Anwendung können erfahrungsgemäß folgendermaßen abgegrenzt werden:

- Bis $2,5 \cdot 10^{-9}$ tritt weitgehend Festkörperreibung (Coulombsche Reibung) auf. Es gelten die fundamentalen Reibungsgesetze von Haft- und Gleitreibung (gekennzeichnet in **Bild 6** durch die beiden horizontalen Geraden und Reibzahlen von 0,15 bis 0,50 für übliche Gleitwerkstoffe). Die Spaltflächen passen sich kontinuierlich an \rightarrow dauerhaft (kurzfristig) ist daher weitgehend mit Parallelspalt zu rechnen. Erfahrungsgemäß liegen infolge sehr stark variierender Reibverhältnisse ständige Änderungen der Oberflächentopographie vor.
- Bis $3 \cdot 10^{-7}$ tritt Mischreibung auf. Der Schmierfilm ist teilweise unterbrochen. Die Gleitflächen gleichen sich feinverschleißend langsam an und nehmen dann stabilisierend weitgehend und näherungsweise Parallelspaltform an. Dieser Einlaufvorgang kann mehrere tausend Stunden dauern. Die Leckage nimmt währenddessen kontinuierlich tendenziell ab. Teilweise periodisch wechselnde Reibverhältnisse nach dem bekannten thermohydrodynamischen Modell für Gleitringdichtungen [4] und [7] sowie schwankende Leckagen können trotzdem auftreten. Dieser Betriebsbereich ist für durchschnittliche Pumpendichtungen für wässrige Medien typisch.
- Bis $3 \cdot 10^{-6}$ spricht man im Flüssigkeitsreibungsbereich von hoch belasteten Dichtungen. Hydrodynamisch berührungsfreier Betrieb herrscht bei Parallelspaltformen

vor. Die Leckagen sind weitgehend konstant. Einlauf der Dichtungen findet nicht statt. Liegt Kantenabfall mit hydrostatischer Druckentlastung vor, so stellt sich keine oder nur sehr geringe hydrodynamische Spaltdruckbildung ein. Der Kurvenverlauf flacht sich dadurch ab.

- Bei $5 \cdot 10^{-6}$ liegt erfahrungsgemäß die Grenzbedingung von ordnungsgemäßer Flüssigkeitsreibung. Die Reibzahl für reine Flüssigkeitsreibung erreicht wieder den Wert der Grenzreibung (Mischreibung an der Grenze zur Festkörperreibung).
- Bis $1 \cdot 10^{-5}$ besteht bei Ölabdichtungen Blistering-Gefahr durch extreme lokale Temperaturspitzen nach der Blitztemperaturhypothese (siehe dazu [8], S. 223) infolge des lokalen Zusammenbruchs des ununterbrochenen Schmierfilms (Schmierfilmbriß) mit lokalen Mikrokontakten.
- Darüber besteht die Gefahr der Rheodestruktion – einem scherzeitabhängigem irreversiblen Fließverhalten – d.h. einer mechanischen Zerstörung der Moleküle infolge von Scherspannungen im Dichtspalt mit der Folge einer Bildung von amorpher Ölkohle oder anderer Ablagerungen (chemische Verbindungen infolge von Polymerisation) auf der Gleitfläche. Dieser Betriebsbereich setzt sehr hohe Viskosität in Verbindung mit hohen Drehzahlen voraus, wie z.B. bei hochviskosen Kohlenwasserstoffen, oder z.B. bei unterschiedlichen Zuckeranwendungen bei der Schokoladenherstellung oder Fruchtverarbeitung.

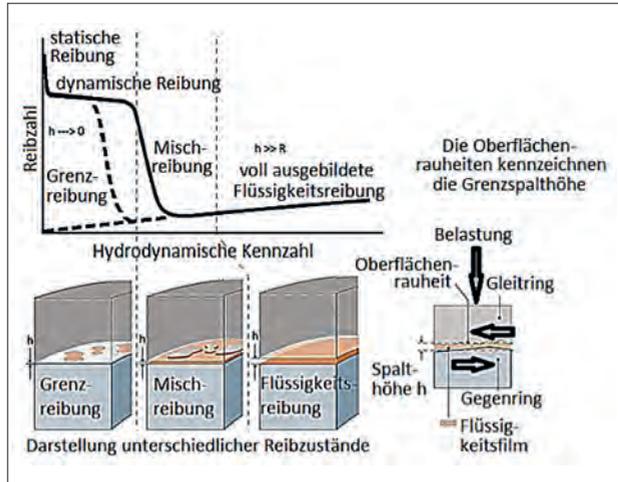
In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass im Bereich von $1 \cdot 10^{-8}$ bis $1 \cdot 10^{-7}$ und dort insbesondere im elastohydrodynamischen Bereich des Kurventiefpunkts nachhaltige strukturelle Veränderungen der Bauteiloberfläche infolge der Reibung in Verbindung mit Verschleiß erfolgen können:

- Im Übergangsbereich am Ausklinkpunkt (Tiefpunkt der Reibungskurve) tritt die kleinste selbsteinstellende Spalthöhe vergleichbar mit dem berührenden Grenzspalt auf.
- Geräuschentwicklung an Gleitringdichtungen tritt insbesondere in diesem Betriebsbereich auf. Kennzeichnend ist dort der Steilabfall des Diagramms.

Abschließende Betrachtung des gesamten Reibungsverlaufs

Bild 12 zeigt detaillierter eine schematische Modellvorstellung des Reibverhaltens von Gleitringdichtungen mit Bezug zu einer bildlichen Darstellung unterschiedlicher Reibzustände. Die beiden beschriebenen Äste des Reibverhaltens müssen kontinuierlich ohne Sprungfunktion ineinander überführt werden. Der Übergangsbereich mit Steilabfall, insbesondere die Steigung des Steilabfalls, hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Im Tiefpunkt der Kurve als zentralen Übergangsbereich der Mischreibung tritt der spannende, aber für die Betrachtung der Geräuschentwicklung maßgebliche Bereich der Elastohydrodynamik auf.

Bild 12: Stribeck-Kurve und zugehörige Reibzustände an Gleitringdichtungen Schall- und Geräuschentwicklung
(Bild: HAW München)



Geräusche entstehen durch atomare Schwingungen. Benachbarte Atome oder Moleküle werden in (mechanische) Schwingung versetzt und eine Schallwelle pflanzt sich fort. Sie breitet sich dreidimensional aus. Schallwellen werden an Phasengrenzen, z.B. Bauteiloberflächen, reflektiert, verstärkt oder abgeschwächt. Bei der Reflektion oder beim Phasenübergang ändert sich die Schallgeschwindigkeit, aber nicht die Schallfrequenz. Verschiedene Schallwellen können sich überlagern, sich dadurch verstärken, auslöschen oder zu Schwebungen führen.

Die Schallausbreitung

Die Schallausbreitung (Übertragung) erfolgt:

- Ungedämpft über Körperschall (im Festkörper) durch direkte Leitung der mechanischen Schwingungen über dreidimensionale Atom- oder Molekularschwingungen (Longitudinal- und Transversalschwingungen).
- Weitgehend ungedämpft über Ausbreitung in Flüssigkeiten durch Longitudinalwellen durch das übertragende Medium. Flüssigkeiten in abgedichteten Systemen können über weite Strecken Schall wegen der Inkompressibilität des Fluids nahezu ungedämpft übertragen. Geringfügige Dämpfung der Flüssigkeit wird durch die Viskosität beeinflusst.
- Gedämpft über Luftschall über Molekularbewegungen durch Longitudinalwellen.

In hydraulischen Systemen, wie z.B. dem gesamten Kühlsystem eines Kraftfahrzeugs oder z.B. dem Heizungssystem von Wohngebäuden, ist oftmals der Schall an gegenüber der Schallquelle weit entfernten Stellen erst hörbar. Die Schallquellen-Analyse ist

Material	Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle in m/s	Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle in m/s	Dichte in kg/m ³
Wasser	1480	-	1000
Luft	333	-	1,29
Plexiglas	2730	1430	1180
Stahl	5920	3250	7850
Aluminium	6320	3130	2700

Tabelle 2: Beispiele von Werkstoffkennwerten zur Schallausbreitung (Quelle: HAW München)

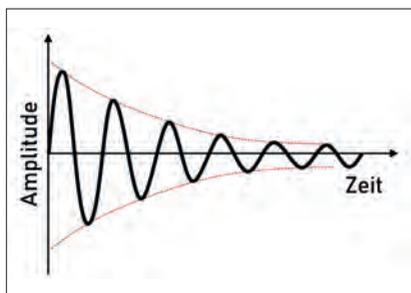


Bild 13: Amplitudenverlauf einer gedämpften Schwingung (Bild: HAW München)

dann oftmals schwierig. Schallwellen breiten sich nach **Tabelle 2** in Gasen etwa vier- bis fünfmal langsamer und verlustreicher (gedämpfter) aus als in Flüssigkeiten und Festkörpern, weil die Abstände zwischen den Atomen bzw. Molekülen in Gasen größer sind und sich leicht ändern können (Kompressibilität der Gase). Schall ist im Vakuum wegen fehlender Moleküle nicht übertragbar. Daher ist dort kein Schall hörbar.

Die Lautstärke (der Schallpegel) des Schalls lässt sich als Schalldruck über seinen Pegel in Dezibel (dB) messen. Sie nimmt bei Körperschall oder in einer Flüssigkeit mit dem Quadrat der Entfernung wegen der kegelförmigen Ausbreitung ab. Bei der Schallpegelabnahme an der Luft im Freifeld sind wesentliche absorbierende Einflüsse zu berücksichtigen. In der Praxis zeigt sich für Luftschall eine Schallpegelabnahme von ca. 5 dB bei einer Entfernungsverdopplung. Die zeitliche Abnahme der Amplitude A bei einer gedämpften Schwingung folgt nach **Bild 13** mit dem Dämpfungsfaktor δ weitgehend der bekannten logarithmischen Abhängigkeit:

$$A(t) = e^{\delta t} \cdot A_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Das menschliche Gehör nimmt aus dem Schallpegel die Druckschwankungen wahr. Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde bestimmt die Frequenz f in Hertz (Hz), also die „Tonhöhe“:

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi}$$

Je höher eine Frequenz der Schallwelle, desto höher die Tonempfindung. Die Wirkung der Geräusche wird jedoch je nach Hörer unterschiedlich empfunden. Geräusche nach **Bild 1** setzen sich aus mehreren Tönen (Frequenzen) mit „chaotischen“, teilweise periodischen Schwingungsmustern zusammen.

Nicht jeder Schall eines schwingungsfähigen Körpers ist für den Menschen nach **Bild 14** hörbar. Hörbarer Schall muss eine Lautstärke zwischen der Hörschwelle und der Schmerzgrenze haben und die Frequenz muss zwischen 20 Hz und 20 kHz betragen. Schall mit Frequenzen von unter 20 Hz kann trotzdem menschlich als unhörbar empfunden werden. Er tritt z.B. bei Erdbeben oder bei Schwermaschinen (z.B. Rüttelplatten) auf. Typische Geräusche von Gleitringdichtungen liegen bei 500 bis 8.000 Hz. Sie liegen damit im hörbaren Bereich. Tiefe Frequenzen werden als Brummen, mittlere als Pfeifen bis Quietschen und höhere eher als kaum mehr wahrnehmbares Zwitschern empfunden. Kammerton a liegt z.B. bei 440 Hz, typisches Vogelgezwitscher geht bis ca. 15 kHz.

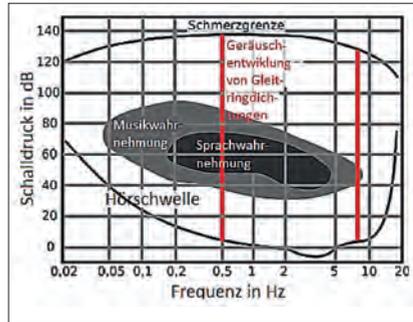


Bild 14: Die Hörfläche des Menschen mit eingezeichneter Hörschwelle (untere Kurve)

(Bild: HAW München)

Bild 14 bezieht sich auf den physikalischen Schalldruckpegel in dB SPL (Dezibel Sound Pressure Level). Bei individuellen Audiogrammen wird i.d.R. ein bewerteter Schalldruckpegel dargestellt, bei dem die allgemein gültige Hörschwelle die Nulllinie bildet. Für die Schallerzeugung und -ausbreitung sind folgende Komponenten erforderlich:

- Eine Schallquelle – ein Körper, der mechanische Schwingungen erzeugt (in der vorliegenden Betrachtung die Gleitringdichtung).
- Ein Lautsprecher – ein selbstständig schwingungsfähiges, meist Schalldruck verstärkendes, häufig membranartiges Element (wie z.B. Gehäuseteile von Pumpen), das zur Übertragung an die Umgebung dient.
- Ein Übertrager – ein „schallleitendes“ elastisches Medium. Der Übertrager kann sowohl zwischen Schallquelle und Lautsprecher als auch zwischen Lautsprecher und menschlichem Ohr sein.

Das schwingungsfähige System

Gleitringdichtungen sind systemdynamisch nichtlineare, verlustbehaftete (dissipative), offene Systeme. Selbst unter stationärer Bewegung mit konstanter Geschwin-

digkeit kann wegen der Adams-Martin-Instabilität ein solches System instabil werden. Solche Instabilitäten können bekannterweise zu erhöhtem Verschleiß führen, aber auch zur Bildung unerwünschter Mikrostrukturen von reibenden Oberflächen.

Der Stick-Slip-Effekt ist meist technisch unerwünscht, aber nicht immer vermeidbar. Negative Auswirkungen können bei Führungen, Lagern oder anderen reibenden Maschinenelementen, wie z.B. Bewegungsspindeln, beobachtet werden und führen neben der unerwünschten Geräuschentwicklung zu Schwingungsschäden an den Bauteilen infolge von Dauerbrüchen oder Riffelbildung von Linearführungen an den reibenden Oberflächen oder Polygonisation von Rädern im Rad-Schiene-Kontakt. Störgeräusche wie das Quietschen der Tafelkreide, ratternde Scheibenwischer oder Bremsenquietschen ([9], [10] S. 181 ff, [8] S. 197 ff., [11] oder [12]) sind reichlich untersucht und darüber hinaus sind auch weitere Beispiele dieses Phänomens allgemein bekannt. Ist eine Vermeidung des Stick-Slip-Effekts durch entsprechende Schmierung nicht möglich, so kann durch eine Veränderung der schwingungstechnischen Kennwerte (Feder und/oder Masse) sowie eine schwingungsdämpfende Konstruktion oder die Wahl von Werkstoffen mit Eigendämpfung die Wirkung abgemildert werden.

An Gleitringdichtungen führen Stick-Slip-Effekte neben der Geräuschentwicklung und typischen Schäden an den drehmomentübertragenden Teilen zu unerwünschten Poliervorgängen mit:

- unerwünschter Glättung der Gleitflächen (Reduzierung der Oberflächenrauheit)
- Reduzierung der elastohydrodynamischen Druckbildung im Dichtspalt (infolge einer Reduzierung der natürlichen Gleitflächenwelligkeit), verbunden mit einer nachhaltigen Veränderung des Verlaufs der charakteristischen Kurve der Reibzahl
- Verlagerung des Betriebspunktes aus dem reinen hydrodynamischen Bereich in Richtung des elastohydrodynamischen Ausklinkpunktes und damit in den Bereich des Steilabfalls, z.B. infolge von strukturbildenden oberflächigen Ablagerungen, etwa durch Rostschutzinhibitoren
- Mikro Kavitation im Dichtspalt

Einfaches Einmassen-System – Grundlagen

Bei einem Schwingungsvorgang eines aus Masse und Energiespeicher bestehenden mechanischen Translations- oder Drehschwingungssystems wird vorhandene Energie regelmäßig periodisch von einer Energieform in eine andere gewandelt – nämlich kinetische in potenzielle Energie und umgekehrt. Freie ungedämpfte Schwingung entsteht, wenn weder Energie zu- noch abgeführt wird. Das System führt stationäre Eigenschwingung mit der nur vom System selbst abhängigen (natürlichen) Eigenfre-

quenz ω_n aus. Verliert der Oszillator bei jedem Schwingvorgang einen Anteil an Energie, so liegt nach **Bild 13** gedämpfte Schwingung vor. Bei linearer, geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung (z.B. aus Newtonscher viskoser Reibung, die typisch für Öl- oder Gasdämpfer oder für die Dämpfungseigenschaft von Elastomeren ist) nimmt die Schwingungsamplitude A nach einer geometrischen Reihe ab.

Die gewöhnliche Differenzialgleichung 2. Ordnung eines ebenen Schwingers mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung lautet:

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + c \cdot x = 0$$

mit m als Masse, b als Dämpfungskonstante, c als Federkonstante und x als Wegkoordinate oder in der Normalform:

$$\ddot{x} + \frac{b}{m} \cdot \dot{x} + \frac{c}{m} \cdot x = 0$$

Für Drehschwingungen wird konsequent die Translationsmasse m durch das Massenträgheitsmoment J und der Weg x durch den Drehwinkel φ ersetzt. Die Winkelgeschwindigkeit ω wird dann:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi}$$

und die Winkelbeschleunigung α :

$$\alpha = \dot{\omega} = \ddot{\varphi}$$

Die weitere Betrachtung und Erklärung soll sich der Einfachheit halber auf den typischen linearen Oszillator beschränken. Die wissenschaftlich exakte Lösung steht nicht im Vordergrund, sondern die Erklärung der real existierenden Phänomene. Auf die detaillierte mathematische Lösung der Differenzialgleichung und die mathematische Diskussion der Ergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet und auf die allgemeine Literatur zu Schwingungen verwiesen:

- Die realen Schwingungen von Gleitringdichtungen sind komplexer mehrdimensionaler Natur.
- Die Phänomene der Schwingungen an Gleitringdichtungen und daraus resultierende Geräuschentwicklung sowie abgeleitete Abhilfemaßnahmen sind allerdings mit dieser Vereinfachung genauso erklärbar.

Für den Dämpfungsfaktor δ ergibt sich:

$$\delta = \frac{b}{2 \cdot m}$$

und für die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz ω_n :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

Die gedämpfte Eigenkreisfrequenz ω_d wird damit:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \delta^2}$$

Eine für Gleitringdichtungen angestrebte gedämpfte Schwingung mit zeitlich abnehmender Amplitude nach **Bild 13** tritt auf für:

$$b < 2 \cdot \sqrt{c \cdot m}$$

Die gesamte Dämpfung b ist damit abhängig von der „Eigendämpfung“ des Systems, beinhaltet aber durch Überlagerung insbesondere auch die Dissipation der Elastomere, gekennzeichnet durch deren Rückprallelastizität, sowie die in Relation geringe Eigendämpfung der Gleitwerkstoffe (insbesondere im Fall einer Hart-weich-Gleitwerkstoffpaarung die Dämpfung der Kohle), die hydraulische Dämpfung des geschlossenen hydrodynamischen Schmierfilms (sofern im berührungsfreien Betrieb im rechten Ast der Stribeck-Kurve vorhanden) und eventuelle konstruktive Zusatzdämpfer der Gleitringdichtung. Für c ist die resultierende dreidimensionale Gesamtfedersteifigkeit des Systems einschließlich der nichtlinearen schwingungsgeschwindigkeitsabhängigen Federcharakteristik der dynamischen Nebendichtungen (axial und infolge der Torsion) einzusetzen, also nicht nur die axiale Federrate der mechanischen Anpressfeder der Gleitringdichtung. Eine gefährliche Schwingung nahe der Eigenfrequenz kann technisch nur auftreten, wenn der schwingungstechnische Verlust (der Dämpfungsfaktor δ) klein ist:

- Ein Betrieb nahe der Eigenfrequenz sollte möglichst vermieden werden.
- Physikalische Systeme von Gleitringdichtungen sind aufgrund der Reibung von dynamischen Nebendichtungen (O-Ringe) bei Pusher-Dichtungen bzw. interner Dämpfung der Elastomere immer mehr oder weniger gedämpft.
- Die materialbedingte Dämpfung von Gummibälgen oder insbesondere von Gummimembranen ist aufgrund der geringen Schwingschnellen bei kleinen Amplituden stark limitiert.

- Metallfaltenbälge haben bei Axialbewegungen durch Volumenverdrängung der engen Zwischenräume zwischen den Falten bei der Abdichtung von Flüssigkeiten eingebaute „Hydraulik-Dämpfer“.
- Nahezu ungedämpfte Systeme mit Metallfaltenbalg-Nebendichtungen für den Einsatz von Gasabdichtungen müssen unbedingt zusätzliche mechanische Dämpfer enthalten.
- Rollbalg-Nebendichtungen von Gleitringdichtungen haben geringe hydraulische Dämpfung aufgrund der großen Abstände zwischen den Rollen.

Feder-Masse-System einer Gleitringdichtung

Das Feder-Masse-Dämpfersystem einer Gleitringdichtung als Mehrmassen-Schwinger mit seinem schwingungstechnisch komplexen chaotischen Verhalten ist Erreger für die Geräuschentwicklung, kann aber auch selbst bei außenliegender Anordnung (typischerweise bei trockenlaufenden Gleitringdichtungen) Übertrager und Lautsprecher an die Umwelt sein. Bei innenliegenden Gleitringdichtungen muss die Erregerschwingung über das System über Schalleitung durch Körperschall oder Schalleitung durch das abzudichtende Medium sowie Resonanz an eine freie schwingungsfähige Oberfläche übertragen werden. Erst von dort wird dann der Schall an die Umgebung emittiert.

Bild 15 zeigt links schematisch den Halbschnitt einer typischen stationären Gummi-balg-Gleitringdichtung (konstruktive, für die Betrachtung der Geräuschentwicklung nicht relevante Details sind vernachlässigt) für Kraftfahrzeugkühlwasserpumpen mit ihren Grundbestandteilen:

1. stationärer Gleitring – axial nachstellend
2. rotierender Gegenring
3. mechanische Feder
4. dynamische Nebendichtung des Gleitrings
5. statische Nebendichtung des Gegenrings
6. die erforderlichen metallischen Teile zur Herstellung einer montagefertigen Einheit (ohne Nummerierung in **Bild 15**)

Die stark vereinfachte Anwendung einer Modellvorstellung des schwingungsfähigen Systems einer Gleitringdichtung zeigt **Bild 15 rechts**. Zwischen Gleit- und Gegenring ist der Schmierpalt angedeutet. Für überlagerte dreidimensionale dreh- und translatorische Schwingungen sind die Massen-Trägheitsmomente J_1 (oder entsprechende Masse m_1) für den Gleitring 1, J_2 (oder entsprechende Masse m_2) für den Gegenring 2, mechanische Feder 3 mit Hookeschem Federverhalten c_3 , Nebendichtung 4 für den Gleitring und Nebendichtung 5 für den Gegenring mit typisch elastisch-viskoelas-

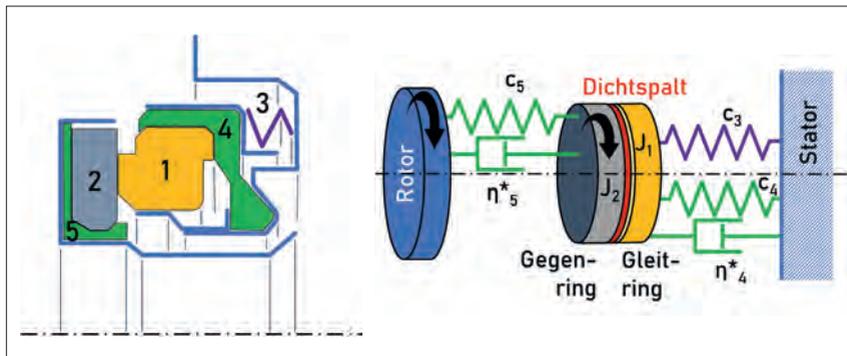


Bild 15: Schwingungstechnisches System einer Kfz-Kühlwasserpumpen-Gleitringdichtung

(Bild: HAW München)

tisch-pseudoplastischem Verhalten nach einem typischen Materialmodell für Elastomere (z.B. dem Burger Modell) mit der Federcharakteristik c_4 und c_5 sowie den viskosen Dämpfungen η_4^* und η_5^* dargestellt. Für die Nebendichtungen 4 und 5 muss sowohl eine axiale als auch rotatorische Deformation bzw. Schwingung angenommen werden. Gleit- und Gegenring werden vereinfachend als starr angenommen.

In der Realität von Gleitringdichtungen treten auch noch fremderregte Taumelbewegungen durch eine konstruktiv bedingte Schrägstellung der Anlagefläche der Wellenhülse auf sowie extern angeregte räumliche Schwingungen.

Selbsterregte Schwingung

Bei der selbsterregten Schwingung wird der Dämpfungswert b in der Differenzialgleichung 2. Ordnung maßgeblich. Diese selbsterregte Schwingung ist bei Dichtungen typischerweise dadurch gekennzeichnet, dass die Haftreibung zwischen bewegter Masse und Untergrund größer ist als die Gleitreibung und dass die Gleitreibung mit zunehmender Relativgeschwindigkeit auch noch abnimmt. Die gedämpfte Eigenkreisfrequenz ω_d wird aufgrund geringer Dämpfung dann zur Eigenkreisfrequenz ω_n selbst.

Neben äußeren Einflüssen und damit Rückwirkungen aus Anlagen sind selbsterregte Schwingungen von Bauteilen häufig Ursache von Geräuschentwicklungen in der Technik. Herkömmlich wird der bekannte Stick-Slip Effekt als Ursache herangezogen. Voraussetzung für typischen Stick-Slip ist allerdings eine schleichende Bewegung mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten von meist unter 0,1 m/s und ein ständiger Wechsel zwischen Haften und Gleiten.

Für den normalen Betrieb von Gleitringdichtungen kann wegen der notwendigerweise schleichenden Geschwindigkeit bis auf Ausnahmen hier nicht auf das Phänomen des Stick-Slip zurückgegriffen werden. Ein Ansatz bildet darüber hinaus aber der Drag-Stick-Slip-Effekt. In diesem Zusammenhang sei ausdrücklich auf eine Vielzahl von Veröffentlichungen von Popov zu diesem Themenkreis hingewiesen, die u.a. der Literaturliste zu entnehmen sind [14].

Nachfolgend sollen nun einige Ansätze der Simulation für ein verbessertes Verständnis zur Geräuscentwicklung an Gleitringdichtungen geboten werden, um dann im Folgenden Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Fremderregte Schwingung

Die Amplitude nimmt bei fremderregter Schwingung durch externe Energiezufuhr stetig zu, bis sie – für viskos zunehmende Dämpfung – überproportional mit der Amplitude (Schwingschnelle) die Energiezufuhr kompensiert oder bis das System sich selbst zerstört (Resonanzkatastrophe). Ein erster Hinweis auf diese viskose Dämpfungseigenschaft von Elastomeren gibt uns der ansonsten für dichtungstechnische Belange ungünstige hohe Druckverformungsrest von bestimmten Elastomeren.

Bei einer erzwungenen Schwingung eines schwingungsfähigen Systems wird durch eine externe periodische Anregung durch eine Kraft $F(t)$ oder ein Moment $M(t)$ bei Drehschwingungen nach einem Einschwingvorgang allmählich eine stationäre Schwingung unabhängig von der Eigenfrequenz ω_n , sondern abhängig von der Erregerfrequenz ω_a mit dem Frequenzverhältnis ausgeführt. Die Differenzialgleichung 2. Ordnung wird zu:

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + c \cdot x = F(t)$$

Der Schwingungsausschlag des Oszillators $A(\omega)$ in Relation zur Anregungsamplitude A_a kann, insbesondere nahe der Eigenfrequenz ω_n , mit der Erregerfrequenz ω_a bei einem Frequenzverhältnis von $\omega_a/\omega_n = 1$ bei schwacher Dämpfung nach **Bild 16** um ein Vielfaches größer sein als die Erregung selbst, verdeutlicht durch die dimensionslose schwingungstechnische Vergrößerungsfunktion G :

$$G = \frac{A(\omega)}{A_a}$$

Der Oszillator schwingt theoretisch gleich- oder gegenphasig mit dem externen Erreger mit einer zeitlich konstanten Amplitude. Bei nur schwacher Dämpfung b nimmt

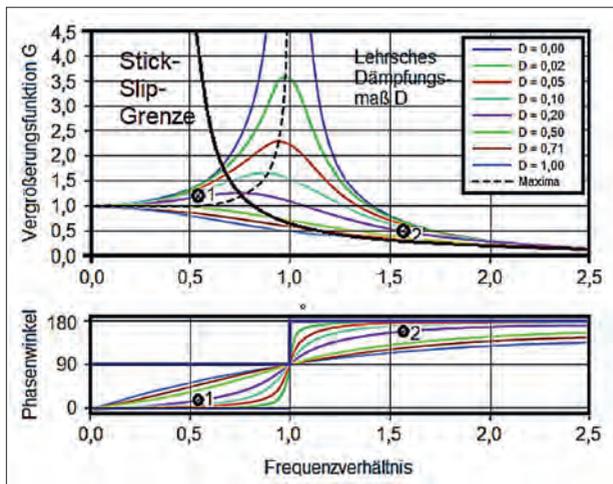


Bild 16: Vergrößerungsfunktion und Phasenwinkel von erzwungenen Schwingungen

(Bild: HAW München)

die Amplitude $A(\omega)$ große Werte an, wenn die Anregung nahe der Eigenfrequenz liegt. Die Dichtung wird hörbar laut. Die Dämpfung wird üblicherweise durch das dimensionslose Lehrsche Dämpfungsmaß D charakterisiert. Für mechanische Schwingungen berechnet sich das Dämpfungsmaß zu:

$$D = \frac{b}{2 \cdot \sqrt{c \cdot m}}$$

Es entsteht Resonanz. Man findet in **Bild 16** zwei Beispiele (1 und 2) der Zuordnung eines Phasenwinkels zur Vergrößerungsfunktion G für die Amplitudenüberhöhungen und den Phasenverlauf für ein beispielhaftes Lehrsches Dämpfungsmaß $D = 0,20$. Die Diagrammverläufe setzen aber theoretisch die freie Beweglichkeit des Oszillators unter Berücksichtigung der Dämpfung voraus. Irgendwelche viskose Reibung stellt die entsprechende Newtonsche (geschwindigkeitsproportionale) Dämpfung dar. Solange aber die Haftbedingung nicht überschritten wird, schwingt der Oszillator mit dem Erreger starr gekoppelt und damit phasengleich (ohne Phasenwinkel) mit. Die Vergrößerungsfunktion ist dort in der Praxis außer Kraft gesetzt. Beim Übergang von Haft- in Gleitreibung an der Stick-Slip-Grenze entsteht eine Sprungfunktion mit entsprechendem Phasenwinkel.

Im Beispiel 1 entsteht aufgrund der Haftreibung kein Stick-Slip. Der Oszillator schwingt mit dem Erreger gleichphasig mit derselben Amplitude mit. Ab der Erreichung der Stick-Slip-Grenze entsteht Relativbewegung bei Gleichlauf mit Phasenwinkel unter

90°. Bei einem überkritischen Phasenwinkel von über 90° muss infolge der gegenläufigen Bewegung immer Stick-Slip auftreten.

Im Beispiel 2 entsteht bei gegenläufigem Phasenwinkel bei gleicher Dämpfung wie in Beispiel 1 ($D = 0,20$) Stick-Slip. In allen Fällen überkritischer Anregung kommt der Oszillator (in unserem Fall die Gleitringdichtung) gegenüber dem Erreger „außer Tritt“. Bei kleinen Vergrößerungsfunktionen, insbesondere bei Frequenzverhältnissen über ca. 1,4, schwingt der Oszillator immer mit sehr kleinen Amplituden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit entstehen daher im Beispiel 2 mit einer Vergrößerungsfunktion von $D = 0,50$ keine hörbaren Geräusche. Selbst ungedämpfter Zustand mit $D = 0,00$ erscheint unkritisch.

Die obige Betrachtung gilt für schwingende Anregung und damit nicht für Gleitringdichtungen mit kontinuierlicher Rotationsbewegung. Die Betrachtung dient ausschließlich der grundsätzlichen Erklärung und kann auf Stick-Slip-Vorgänge mit schleichender Geschwindigkeit langsam laufender Gleitringdichtungen übertragen werden.

Kritisch für eine mögliche Geräuschentwicklung mit entsprechend hohen Amplituden sind nur die Bedingungen oberhalb der Stick-Slip-Grenze bis überkritisch oberhalb der Eigenfrequenz und dort aber nur bis zu einem Frequenzverhältnis bis max. 1,5, jeweils in Verbindung mit geringer Dämpfung $D < 0,71$. Der in der Realität vorhandene kritische Bereich für Geräuschentwicklung erscheint für Gleitringdichtungen stark begrenzt. Ein Indiz dafür ist, dass Geräuschentwicklung an Gleitringdichtungen zwar ein bekanntes, aber sehr seltenes Phänomen ist.

Resonanz bei erzwungener Schwingung von Gleitringdichtungen

Bei rotierenden, nicht sorgfältig ausgewuchteten Maschinenteilen gibt es bekannterweise eine kritische Drehzahl, bei der die Massen-Kräfte das schwingungsfähige Feder-Masse-System zur Resonanz und zur Selbstzerstörung der Welle anregen. Wellen müssen daher – aufgrund der schwachen Eigendämpfung – unter- bzw. überkritisch betrieben werden. Die Frequenz des Anregungsimpulses entspricht in diesem Fall der Wellendrehfrequenz. Das Durchfahren der kritischen Drehzahl muss bei überkritischem Betrieb sowohl bei der Beschleunigung als auch beim Abbremsen der Maschine schnell durchlaufen werden.

Das verstärkte Mitschwingen eines schwingungsfähigen Systems unter zeitlicher Einwirkung einer Anregung ist also Resonanz. Eine periodische Anregung muss dafür

theoretisch gleich oder ein ganzzahliges Vielfaches der Eigenfrequenz des Systems sein, wobei technisch insbesondere Gleichheit kritisch ist. Der Resonanzfall entsteht dann, wenn die periodische Energiezufuhr und Speicherung geringfügig größer als die Dämpfung ist. Die Schnelligkeit des „Aufschaukelns“ hängt von diesem Überschuss ab. Bei genügender Dämpfung:

$$D < \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,71$$

zeigt sich zunächst ohne zerstörerische Auswirkung ein ausgeprägtes Maximum (man spricht für $D \geq 0,71$ von ‚übergedämpfter‘ Schwingung) mit der Folge der Amplitudenresonanz mit:

$$\omega_a = \sqrt{1 - 2 \cdot D^2} \cdot \omega_n$$

Bei geringer Dämpfung:

$$D \ll 0,5$$

tritt Resonanz mit erheblicher Amplitudenüberhöhung auf. Hörbare Auswirkungen treten allerdings wegen der Hörschwelle erst bei erheblicher Amplitudenüberhöhung auf.

Zur Verhinderung der zerstörenden Resonanzkatastrophe bzw. Vermeidung der Geräusentwicklung kann – den obigen Überlegungen folgend – die Gleitringdichtung unter- oder überkritisch betrieben werden, die Eigenfrequenz des Oszillators durch Veränderung der Masse oder Federsteifigkeit geändert oder die Dämpfung an den jeweiligen Fall angepasst werden. Im wenig stabilen „dämpfungslosen“ bzw. bereits im „dämpfungsarmen“ Zustand schaukelt sich das System unter ungünstigen Voraussetzungen der Resonanz zu periodischen (unter Erzeugung eines Tons oder Klangs) oder chaotischen (unter Erzeugung von Geräusch) Schwingungen auf. Die Selbstanregung einer Gleitringdichtung beruht auf einer Kombination aus der Wellendrehfrequenz und auf Stick-Slip-Vorgängen. Die Erreichung der Hörschwelle wird selbst bei dämpfungsarmem Zustand abhängig vom Dämpfungsmaß erst nach einer gewissen Einschwingzeit erreicht:

- Typische hörbare Geräusche von Gleitringdichtungen haben Frequenzen von 500 bis 8000 Hz.
- Typische Geräusentwicklungen an Gleitringdichtungen für Kühlwasserpumpen treten in der Praxis im Leerlauf der Verbrennungsmotoren auf, also infolge der Antriebsriemenübersetzung mit Drehzahlen der Pumpen bei ca. 600 bis 900 min⁻¹ (ent-

sprechend 10 bis 15 1/s), und sind damit eigentlich unhörbar.

- Typische Makro-Welligkeiten der Gleitflächen von Gleitringdichtungen scheiden von vornherein als Erklärung aus.

Es stellen sich aber auch Fragen:

- Gibt es zur Erzeugung von Geräuschen regelmäßige Strukturen der Gleitringoberfläche mit einer Wiederholrate (Frequenz) von 500 Hz : 15 1/s = 33,3 bis 8.000 Hz : 10 1/s = 800, die eine notwendige synchrone Anregungsfrequenz erzeugen könnten?
- Warum treten die Geräusche erst nach Betriebszeiten von über 150 Stunden auf?

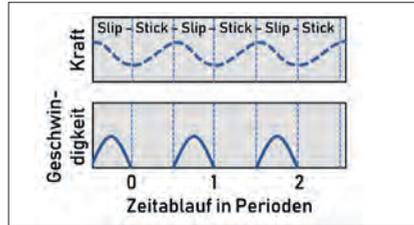


Bild 17: Federkraft und Geschwindigkeit als Funktion der Zeit bei Stick-Slip-Bewegung (Bild: HAW München)

Ist das System bezüglich kleiner Störungen relativ „übergedämpft“ und mit einem Dämpfungsmaß $D > 0,71$ stabil, kann eine stationäre Bedingung mit kleiner freien Amplitudenüberhöhung nach **Bild 16** erreicht werden. Typische Stick-Slip-Bewegung tritt dann zwar auf, die Amplitudenüberhöhung ist aber gering. Die Gleitringdichtung ist „ruhig“. Verändert sich aber zeitabhängig das Dämpfungsmaß (z.B. durch „Verhärtung“ der Elastomere, z.B. durch längerzeitige Überhitzung) – durch Veränderung der Rückprallelastizität, so kann nach einer definierten Betriebszeit Geräuschentwicklung auftreten. Damit könnte die erforderliche „Inkubationszeit“ von 150 h erklärbar werden.

Stick-Slip Verhalten, der Übergang von statischer zu kinetischer Reibung als Ursache für reiberregte Schwingungen und Geräusche

Ist die relative Geschwindigkeit der Bewegung eines Körpers relativ zu seiner Unterlage nach **Bild 17** teilweise Null, tritt Stick-Slip-Bewegung (Ruckgleiten) auf. Unter Resonanzbedingungen können dann selbst bei minimaler Anregung große Amplituden bis hin zur Resonanzkatastrophe entstehen. Stick-Slip-Vorgänge können sich aber auch ohne resultierende große Amplitudenüberhöhung entwickeln. Erst ab einer gewissen Amplitude entstehen daraus hörbare Geräusche.

Statische und kinetische (Grenz-)Reibung haben abweichende Reibungskoeffizienten (Coulomb 1736-1806). Der Reibungskoeffizient der typischen Werkstoffpaarung SiC - SiC (= Silizium-Carbid – weitverbreiteter harter Werkstoff für Gleitringdichtungen) kann nach Literaturangaben mit guter Genauigkeit als 0,60 für trockene statische „Bewegungs“-Reibung (Losbrechreibung nach kurzer Ruhezeit) und als 0,35 für

Reibungszustand	Typischer Reibungskoeffizient (gemäß allg. Literatur)
Trockene statisch Reibung (je nach Ruhezeit)	0,2 ... 1,2
Grenzreibung	0,1 ... 0,3
Mischreibung	0,01 ... 0,1
Vollständig geschmierte hydrodynamische Reibung	0,01 ... 0,2

Tabelle 3: Reibungszustände und Reibzahlen (Quelle: HAW München)

trockene kinetische Reibung (Gleitreibung) angenommen werden. Die Reibzahl für SiC – HC (= Hard Carbon – üblicher Kohlewerkstoff für Gleitringdichtungen) ist nach gutem Ingenieurstandard geringfügig niedriger, der Effekt ist aber derselbe. Geschmierte Reibung (typischerweise für Wasserschmierung mit Mischreibung) kann für beide Gleitwerkstoffkombinationen mit im Mittel 0,025 für niedrige Gleitgeschwindigkeiten angenommen werden.

Trocken- bzw. Grenzreibung kann verschiedene Arten von Instabilität in mechanischen Systemen erzeugen, die ein an sich stabiles System bei Abwesenheit von Schmierstoff oder auch unter ungünstiger Schmierbedingung (wie z.B. bei Verdampfungsvorgängen im Dichtspalt) in die Instabilität treibt. Diese Instabilität kann verursacht werden durch eine Abnahme der Reibkraft bei steigender Gleitgeschwindigkeit oder bei konstanter Geschwindigkeit durch einfache dynamische Effekte von zwei aufeinander gleitenden elastischen Materialien (Adams-Martins-Instabilität). Dieser Effekt wurde ursprünglich 1995 von George G. Adams [13] und João Arménio Correia Martins für glatte Oberflächen entdeckt und wurde später auch für periodisch raue Oberflächen nachgewiesen.

Reiberregte Schwingungen können auch einer kontinuierlichen Bewegung beim Drag-Stick-Slip überlagert werden. Beim Drag-Stick-Slip werden mittlere konstante Geschwindigkeit Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge oszillierend überlagert. Am Grenzbereich der Mischreibung zur elasto-hydrodynamischen Schmierung wird bei Gleitringdichtungen mit Reibzahlen von 0,10 zu 0,01 in der Praxis unter bestimmten Betriebszuständen ebenfalls Geräuschentwicklung festgestellt.

Der Unterschied der Reibzahl der statischen und kinetischen Reibung (Reibungsgesetz von Coulomb) ist ein spezieller Fall der geschwindigkeitsabhängigen Reibkraft mit der Auswirkung auf das Stick-Slip-Verhalten. Bei langsamen Schleichbewegungen ($u \approx 0$) ist für typische Gleitwerkstoffe von Gleitringdichtungen die Reibkraft:

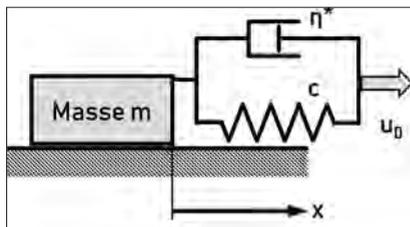


Bild 18: Klassisches bewegtes Feder-Masse-Dämpfersystem (Bild: HAW München)

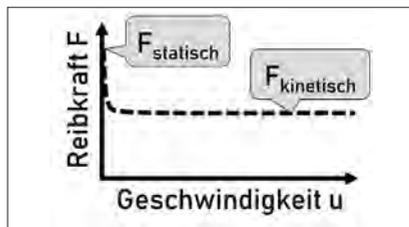


Bild 19: Reibgesetz mit einer spontanen Abnahme der Reibkraft von statischer zu kinetischer Reibung (Bild: HAW München)

Kinetische Reibkraft = Kinetische Reibzahl (0.35) · Normalkraft

Die Reibkraft fällt unmittelbar bei Bewegungsbeginn (vgl. dazu auch die Stribeck-Kurve in **Bild 12**) auf nahezu die Hälfte ab:

Statische Reibkraft = Statische Reibzahl (0.60) · Normalkraft

Der Körper mit der Masse m nach **Bild 18** befindet sich ursprünglich in Ruhe. Wenn die Kraft F auf den Körper der Masse m in Bewegungsrichtung zunimmt, spannt sich die Feder c solange, bis die Kraft die statische Reibkraft erreicht. Der Körper wird beschleunigt und bewegt sich. Der Körper wird nun mit der Geschwindigkeit u_0 gezogen. Die Reibkraft nimmt nach **Bild 19** spontan ab. Unter bestimmten Geschwindigkeitsbedingungen (abhängig von der Kraft F , der Beschleunigung der Masse m und der Reibung) holt der Körper die Bewegung ein und die Feder wird vollständig entspannt. Sowohl die Beschleunigung als auch die Verzögerung werden durch die geschwindigkeitsproportionale Dämpfung η^* abgemildert. Der Körper kommt zum Stillstand und der Zyklus beginnt erneut. Beispielhaft ist der Vorgang in **Bild 17** gezeigt. Der Effekt ist über η^* grundsätzlich geschwindigkeits- und beschleunigungsabhängig. Folgende Voraussetzungen müssen für Stick-Slip-Verhalten einer Gleitringdichtung erfüllt werden:

- eine Schleichdrehzahl von nahezu Null
- ein Abfall des Reibkoeffizienten zwischen Haft- und Gleitreibung
- der Abfall von statischer zu kinetischer Reibung ist systembedingt immer steil, aber: Je steiler, umso größer ist die Auswirkung, die Steilheit wird durch η^* geprägt
- ein kleines Massenträgheitsmoment J der Gleitringe, bezogen auf die Rotationsachse z , muss eine hohe Beschleunigung ermöglichen:

$$J_z = \frac{m \cdot r_m^2}{2}$$

beide Einflüsse (Masse und Durchmesser) folgen einem resultierenden Fluch der Miniaturisierung.

- Kritische (kleine) Dämpfung η^* muss vorliegen.
- Der Betrieb muss nahe der Eigenfrequenz f_n sein.

Um Stick-Slip auf jeden Fall zu vermeiden, sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Ein unterkritischer oder überkritischer selbsterregter Betrieb mit genügend Abstand zur Eigenfrequenz des Gesamtsystems gewährleistet in Verbindung mit entsprechender Dämpfung η^* den sicheren Betrieb. Die Eigenfrequenz ist aufgrund der Komplexität des Systems mit guter Genauigkeit nahezu nicht einschätzbar. Die Eigenfrequenz ist ein Ausschlusskriterium, das bei drehzahlvariablem Betrieb nicht immer zu gewährleisten sein wird. Schlüssel zum Erfolg ist daher die Eigendämpfung.
- Ein großes Massenträgheitsmoment J verringert die Gefahr des Stick-Slip-Effekts.

Stick-Slip-Bedingung kann ausschließlich bei Schleichgeschwindigkeit, im Trockenreibungszustand oder bei Mangelschmierung (z.B. niederviskose Medien, wie z.B. niedrig siedende Kohlenwasserstoffe oder beginnende Verdampfung) auftreten. Stick-Slip-Bedingung muss aber nicht – wie oben gezeigt – unmittelbar und unabhängig zur Geräuschentwicklung führen.

Spezielle reibungsbedingte dynamische Instabilität durch Drag-Stick-Slip wird z.B. als Ursache für das Phänomen des Bremsenquietschens angenommen. Auslöser ist das scheibenförmige Design moderner Brems Scheiben, die sich dann periodisch zu wellenförmigen Ausbuchtungen in Umfangsrichtung elastisch verformen.

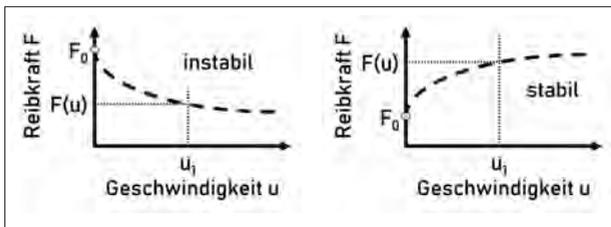
Gleit- und Gegenringe moderner Gleitringdichtungen zeigen ebenfalls immer mehr solche scheibenförmige Geometrie mit reduzierter axialer Dicke bei gleichbleibender Gleitflächenbreite. Dies ist ein weiterer Fluch der Miniaturisierung.

Sind damit aber Strukturen – wie dargestellt – mit min. 33,3 bis 800 Wellenamplituden am Umfang denkbar? Sicherlich nicht.

An dieser Stelle soll nun lediglich grundsätzlich bezüglich möglicher Schallerzeugung von Gleitringdichtungen hinsichtlich des Drag-Stick-Slip-Verhaltens analysiert werden, ohne wegen der Komplexität des Systems zu sehr ins Detail zu gehen. Zur Erklä-

Bild 20: Typischer Verlauf von Kraft-Geschwindigkeit-Diagrammen in tribologischen Systemen

(Bild: HAW München)



zung dient zunächst ein einfaches makroskopisches bewegtes Feder-Masse-Dämpfersystem nach **Bild 18**: Für ein solches System eines Einmassen-Schwingers gilt die klassische Bewegungsgleichung mit konstanter Dämpfung b .

In der Realität ist die dämpfende Reibkraft des flüssigkeitsgefüllten Dichtspalts (Viskose Reibung η^*) bzw. Dissipation der Elastomerwerkstoffe, abweichend von den klassischen Reibungsgesetzen, abhängig von der Geschwindigkeit. Für ein System ohne Dämpfer ($b = 0$) hängt die Stabilität eines Systems von der makroskopischen Geschwindigkeit nach **Bild 20** ausschließlich von der abhängigen Kraft $F(u)$, nämlich dem Gradienten der Kurve ab. Ein negativer Gradient (**Bild 20 links**) führt zur Instabilität, da die abnehmende Reibkraft zu einem Kräfteüberschuss und damit zu einer Beschleunigung führt.

Der dynamische Charakter des gesamten Systems hängt – wie gezeigt – zunächst ausschließlich von der Eigenfrequenz ω_n des Systems ab. Das System eines Einmassen-Schwingers mit der Masse m und der resultierenden gesamten Federsteifigkeit c kann stabil sein, wenn es hinsichtlich seiner Anregung unter- oder überkritisch betrieben wird. Instabilität kann durch Dämpfung b (mit entsprechendem Dämpfungsmaß D) unterbunden werden.

Was geschieht aber, wenn die Eigendämpfung des Gesamtsystems der Gleitringdichtung zeitabhängig verloren geht? Hochviskose Eigenschaften (hohe Viskosität langkettiger Kohlenwasserstoffe) des abzudichtenden Mediums im Dichtspalt in Verbindung mit Inkompressibilität flüssiger Phasen dämpfen Schwingungen wirkungsvoll. Allerdings kann von einem geschlossenen wirkungsvoll dämpfenden Schmierfilm (im Sinn der geschwindigkeitsabhängigen Newtonschen Dämpfung) lediglich im hydrodynamischen Ast des Gümbel-Diagramms ausgegangen werden. Die dämpfende Wirkung des Dichtspalts ist daher im betrachteten Fall der Elastohydrodynamik lediglich eingeschränkt wirksam.

Verdampfungsvorgänge mit teilweiser Kompressibilität der Gasphase beeinflussen bekannterweise die Schwingungsanfälligkeit von Gleitringdichtungen nachhaltig negativ.

In Gleitringdichtungen sind mit gewissen Einschränkungen die Gleitwerkstoffe selbst aber, insbesondere Elastomer-Nebendichtungen, aufgrund ihres Werkstoffverhaltens, wirkungsvolle Dämpfer aufgrund der Rückprallelastizität.

Drag-Stick-Slip-Verhalten

Dieses Verhalten wurde in der jüngsten Vergangenheit, insbesondere bei der Erdbenenforschung und im Einsatz von Tieflochbohrungen, untersucht. Dazu liegt eine Vielzahl von Forschungsarbeiten vor, die aber hier nicht näher betrachtet werden sollen. Die Bewegungserscheinung bei Drag-Stick-Slip ist vergleichbar zum Stick-Slip-Verhalten. Der Körper kommt allerdings nicht vollständig zur Ruhe, sondern überholt lediglich den Erreger, entschleunigt und wird durch die erhöhte Reibung im Kurvenverlauf des Gümbeldiagramms (negativer Gradient) im Dichtspalt dann wieder beschleunigt. Vereinfacht ausgedrückt ist die Voraussetzung für Drag-Stick-Slip an Gleitringdichtungen:

- Drag-Stick-Slip setzt einen Steilabfall des Reibungsdiagramms bei nennenswerter Geschwindigkeit voraus. Ein Steilabfall tritt im Bereich der „Stribeck-Kurve“ (des Gümbel-Diagramms) im Mischreibungsgebiet, insbesondere an der Grenze zur Elastohydrodynamik, auf.
- Elastohydrodynamische Vorgänge treten im Übergangsbereich nahe des Ausklinkpunktes auf. Dabei treten minimale Kontakte der wahren Kontaktfläche nach **Bild 4** auf.
- Instationäre Reibvorgänge (beschrieben in der Literatur über „puffende Leckage“) im Übergangsbereich von Grenzreibung zur reinen Flüssigkeitsreibung, bei denen sich, z.B. zeitlich abhängig, Schmierzustände einstellen, die weder typische Mischreibung noch reine Flüssigkeitsreibung ausbilden können, begünstigen Drag-Stick-Slip. Solche Übergangsbereiche sind bekannt bei beginnender Verdampfung im Dichtspalt, bei der es zu kurzzeitigen Mikrokontakten kommt, und bei Phasengemischen aus Flüssigkeit und Gas (gasbeladene Medien, Kavitationsbeginn in Pumpen).

Der Drag-Stick-Slip kann selbsterregt auftreten. Zufällig entstehende Riffel-Strukturen auf Basis Adams-Martin-Instabilitäten können Auslöser sein, sind aber wegen der Werkstoffhärte eher unwahrscheinlich in Gleitringdichtungen. Prandtl-Tomlinson-Strukturen könnten aber selbst verursachte systembedingte Schwingungsanregung mit entsprechender Anregungsfrequenz verursachen.

Prandtl-Tomlinson-Modell für trockene Reibung – eine Anwendung für Gleitringdichtungen

Grundlage des Prandtl-Tomlinson-Modells [15] für Reibungsmechanismen auf atomarer Skala ist eine resultierende periodische Anregung. Das Prandtl-Tomlinson-Modell beschreibt eindimensional viele wesentliche Eigenschaften der trockenen Reibung:

- Zur Bewegung muss eine bestimmte Mindestkraft aufgebracht werden (Haften).
- Die Gleitreibung ist aufgrund der Kontinuität kleiner als die Haftreibung.
- Wird die Kraft während der Bewegung reduziert, so bewegt sich der Körper trotzdem aufgrund seiner Massenträgheit weiter.
- Der Körper kommt infolge der ‚Reibung‘ (Eigendämpfung b des Systems) zum Stillstand.

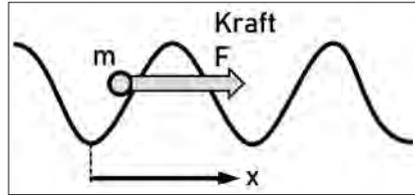


Bild 21: Prandtl-Tomlinson-Modell eines Massenpunktes in einem periodischen Potenzial (Bild: HAW München)

Prandtl [16] betrachtete eine eindimensionale Bewegung eines Massenpunktes m (für Gleitringdichtungen die Masse des Gleit- und/oder Gegenrings) (Bild 21) in einem periodischen Potenzial mit einer Wellenzahl k (Periode) und einer geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung η^* (Eigendämpfung, aber auch z.B. anteilig die Viskosität/Scherreibung des abdichtenden Mediums. Ein Dämpfungselement der Gleitringdichtung ist der Flüssigkeitsfilm. Schmierfilme mit Gasbestandteilen infolge von Verdampfung oder Gaseintrag zeigen infolge ihrer Kompressibilität deutlich reduzierte Dämpfungseigenschaften) unter Einwirkung von N im Sinne einer Kraft in Umfangsrichtung der Gleitringdichtung. Mit einer Umfangs-Laufkoordinate x (entsprechend einem Umfangswinkel φ im Bogenmaß), der Masse m sowie N ergibt sich:

$$F(x) = m \cdot \ddot{x} + \eta^* \cdot \dot{x} + N \cdot \cos(k \cdot x)$$

oder die Bewegungsgleichung:

$$m \cdot \ddot{x} = F(x) - \eta^* \cdot \dot{x} - N \cdot \cos(k \cdot x)$$

An der Gleichung ist die notwendige periodische Struktur sowie die Dämpfungseigenschaft η^* (der geschwindigkeitsabhängige Newtonsche Reibungsverlust) erkennbar, ohne die eine Bewegung aufgrund der Massenträgheit niemals zum Stillstand kommen würde.

Grenzfallbetrachtungen

Befindet sich der Körper m im Ruhezustand (sowohl \dot{x} als auch \ddot{x} sind 0) nach **Bild 21** in der Gleichgewichtstieflage bei $x = 0$ der Prandtl-Tomlinso-Struktur, so verschiebt er sich unter Einwirkung der Kraft $F(x)$ in den Punkt mit der Koordinate x nach:

$$F(x) = N \cdot \cos(k \cdot x)$$

Eine technische mathematisch reale Lösung existiert nur für $F(x) < N$. Die statische Losbrechkraft (die systemische Maximalkraft bzw. Haftkraft) F_{Rh} ist daher:

$$F_{Rh} = N$$

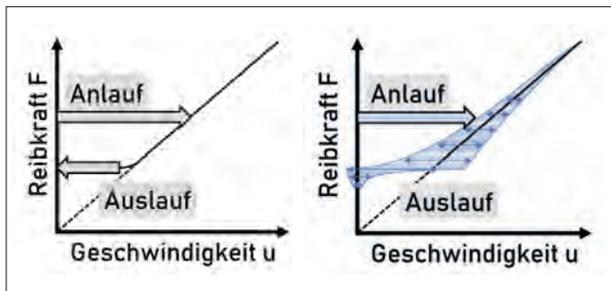
Damit erhält die Winkelfunktion die Bedeutung des Reibwinkels. Bei einer größeren Kraft F (mit Kraftüberschuss gegenüber der Haftreibungskraft nach **Bild 22 links**) beginnt der Körper sich zu bewegen. Die Geschwindigkeit bleibt konstant, solange sich die Kraft nicht ändert. Nach Reduzierung der Kraft bleibt der Körper ab einer bestimmten Kraft unter der typischen Hystereseerscheinung von Haft- und Gleitreibung wieder stehen.

Jede makroskopische Bewegung ist nach dem Prandtl-Tomlinson-Modell unter atomphysikalischen mikroskopischen Gesichtspunkten eine Überlagerung von konstanter Basisbewegung und periodischer dreidimensionaler Schwingung (eine Drag-Stick-Slip-Bewegung). Dargestellt in **Bild 22 rechts** ist lediglich die Komponente in Bewegungsrichtung. Theoretisch entsteht bei der Stillsetzung ein in **Bild 22** nicht dargestelltes Überschwingen über die Nulllinie. Auf makroskopischer Ebene empfindet man diese minimale dreidimensionale überlagerte Schwingung normalerweise nicht. Dieser mikroskopische Bewegungszustand kann auf alle Geschwindigkeiten übertragen werden, bei dem einer mittleren messbaren Geschwindigkeit ein minimaler periodischer Anteil überlagert wird. Bei in der Praxis relevanter großer Dämpfung kann im Sinne einer „übergedämpften“ Bewegung der Trägheitsterm vernachlässigt werden. Für Geräuschentwicklung nötige Anregungsamplituden entstehen dabei wahrscheinlich nicht. Die Bewegungsgleichung für die Geschwindigkeit wird dann zu:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \frac{F(x)}{\eta^*} - \frac{N}{\eta^*} \cdot \cos(k \cdot x)$$

Im technisch unmöglichen dämpfungslosen Grenzfall ($\eta^* = 0$) bewegt sich der Körper ohne eine äußere Kraft unter Berücksichtigung des Energieerhaltungssatzes mit kons-

Bild 22: Makroskopisches Reibungsgesetz mit geschwindigkeitsproportionaler Reibung (links) sowie Prandtl-Tomlinson-Modell mit zeitlich linearer Steigung der Kraft (rechts)
(Bild: HAW München)



tantem \dot{x} unendlich weiter. Bei minimaler Dämpfung muss aber zur Aufrechterhaltung der Bewegung lediglich eine kleine Kraft aufgebracht werden.

Periodische Strukturen von Gleitringdichtungen

Das Prandtl-Tomlinson-Modell kann makroskopisch insbesondere für Reibungsvorgänge von technischen Oberflächen mit regelmäßigen Strukturen mit einer Periode k (Gestaltabweichungen 3. Ordnung – Gestaltabweichung nach DIN 4760:1982) herangezogen werden, die durch die spanende Herstellung mit konstantem Vorschub entstehen (Riffelbildung oder regelmäßige Rillen) oder – wegen seiner atomistischen Betrachtungsweise – für Werkstoffe mit sehr gleichmäßiger granularer Oberflächenstruktur (Gestaltabweichung 5. Ordnung) und dort speziell, wenn die Strukturen der beiden Dichtringe sich in der Periode decken. Dann entstehen am gesamten Umfang gleichmäßige minimale dreidimensionale Anregungen.

Natürliche sattelförmige Welligkeiten (typischerweise 2 bzw. 3-Punkt Welligkeiten) werden durch den Betrieb unter Einlaufbedingungen nach typischer Einlaufzeit von mehreren hundert Stunden erzeugt. Die Ursache ist zwar grundsätzlich auf Basis der elastischen Verformungen und Einlaufverschleißvorgängen erklärbar [17], ist aber bis heute geschlossen wissenschaftlich nicht geklärt. Für die Ursache der Geräuschentwicklung kann diese Struktur aber wie bereits erwähnt nicht herangezogen werden. Die axialen Dichtflächen von Gleitringdichtungen können aufgrund ihrer Herstellung durch Läppen und Polieren in der 3. Ordnung regelmäßige (periodische) Strukturen – typischerweise über Kreuz angeordnet – haben. Die Strukturen entstehen aus den Kreisbewegungen auf der Läpp- und/oder Poliermaschine. Die Wellenzahl ist undefiniert, da die Bewegung der Gleitringe auf der Läpp- und Polierscheibe zufällig ist. Die Wahrscheinlichkeit der Deckungsgleichheit der Strukturen der beiden Ringe ist eher gering.

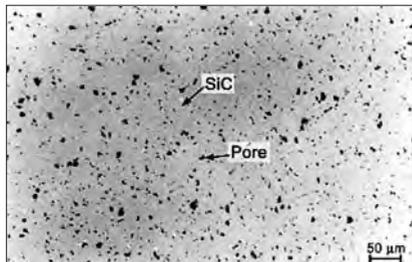


Bild 23: Schliffbilder von unterschiedlichen

SiC-Werkstoffen (Bild: http://www.keramverband.de/brevier_dt/3/4/3/3_4_3_1.htm)

Relevante Strukturen 5. Ordnung (Granulare Strukturen) treten in der Praxis bei Gleitringdichtungen auf Basis der Herstellung dann auf, wenn gleiche Werkstoffe für Gleit- und Gegenring verwendet werden. Prandtl-Tomlinson-Strukturen (Mikro-Riffelbildung) können selbstverstärkend durch Stick-Slip-Vorgänge (bei schleichender Drehzahl) im Betrieb durch „Einlaufen“ erzeugt werden. Bekannterweise tritt Geräuschentwicklung an trockenlaufenden Gleitringdichtungen erst nach einer gewissen Einlaufzeit auf.

Typische Gleitwerkstoffe (**Bild 23**) zeigen im Schliffbild unter dem Lichtmikroskop auf einer Mikroskala (schwer erkennbare) quasi regelmäßige Strukturen für ein Prandtl-Tomlinson-Modell. Im Rahmen des Gefügedesigns werden Tribologie-Werkstoffe bei der Herstellung mit vorzugsweise einheitlichen mittleren Korngrößen verwendet. Darüber hinaus unterscheiden sich die Gefügestrukturen zwischen SiC und HC deutlich, was zu geringeren Anregungen bei Hart-weich-Werkstoffpaarungen führen könnte. Die Werkstoffpaarung SiC-HC ist daher wahrscheinlich weniger schwingungsanfällig für Umfangsschwingungen gegenüber SiC-SiC mit identischen Werkstoffen. Die Praxis zeigt, dass Gleitringdichtungen mit unterschiedlichen Werkstoffen für Gleit- und Gegenring (auch wenn sie beide aus SiC sind) grundsätzlich weniger zu Geräuschemissionen neigen.

Resultierende Schwingungen in Gleitringdichtungen

Gleitringdichtungen sind typische Mehrmassenschwinger mit nahezu beliebig vielen Freiheitsgraden. Die Anregung über Stick-Slip (typisch für Trockenlauf) oder Drag-Stick-Slip (typisch für EHD-Schmierung im Übergangsbereich der Stribeck-Kurve und bei strukturbildenden Medien) ist systembedingt dreidimensional. Eine Vorhersage von selbsterregten Schwingungen ist wegen der Komplexität nach heutigen Erkenntnissen nicht möglich:

- Die Überlegungen zum Prandtl-Tomlinson-Modell der periodischen Anregung lässt sich ohne Einschränkungen auf die granulare Struktur und/oder herstellbedingte Strukturen der Gleitringoberfläche übertragen.
- Die für die tribologischen Eigenschaften notwendigen Mikrogleitschuhe (Körner) der sehr homogenen Kornstruktur des typischen SiC für Gleitringdichtungen liegen

in einer Größenordnung von 50 bis 100 μm und können daher unter EHD-Bedingung mehrdimensionale Schwingungsanregungen nach dem Modell von Prandtl-Tomlinson verursachen.

- Bei einem mittleren Dichtungsdurchmesser von z.B. 20 mm für Kfz-Kühlwasserpumpendichtungen können entsprechende Anregungspunkte am Umfang entstehen. Notwendig sind – wie gezeigt – ca. 33,3 bis 800. Typische Grobkornstrukturen entsprechen dieser Modellvorstellung.
- Auf Basis des Prandtl-Tomlinson-Modells entsteht somit eine Anregungsfrequenz im Hörbereich.
- Die typische Miniaturisierung der Gleitringe durch Massenreduzierung begünstigt die Schwingungsanregung. Für zukünftige Konstruktionen sollte daher eine verbesserte Abstimmung des Dämpfungsverhaltens der Nebendichtungen beachtet werden.

Dämpfung

Die materialbedingte Eigendämpfung von Gleit- und Gegenringen ist gering. Dies ist z.B. am hellen Klang zu erkennen, wenn man einen SiC-Gleitring durch Anklöpfen zu Schwingungen anregt. Für einen störungsfreien Betrieb einer Gleitringdichtung muss also typischerweise ein anderes dämpfendes Element vorhanden sein. Als „eingebaute Dämpfung“ sind insbesondere die Elastomer-Nebendichtungen zu sehen. Werkstoffbedingt haben alle Elastomere Eigendämpfung – charakterisiert über die Rückprallelastizität (bzw. den Druckverformungsrest) und die Härte.

Werden Gleitringdichtungen längere Zeit bei zu hohen Temperaturen betrieben, verhärten Nebendichtungen erfahrungsgemäß und verlieren die notwendigen Werte der Rückprallelastizität.

Selbstverstärkend kann die systembedingte Verlustleistung (durch Stirnflächenreibung) der Gleitringdichtung mit entsprechender interner Temperaturerhöhung selbst betrachtet werden. Ursache für solche hohe Temperatur ist insbesondere unzureichender Abstand vom Verdampfungspunkt des abzudichtenden Mediums oder unzureichende Kühlung der Dichtung.

Genauer zum gesamten Wärmehaushalt einer Gleitringdichtung muss dazu im Einzelfall betrachtet werden. Messungen an durch Geräuscentwicklung auffälligen Gleitringdichtungen zeigten aber eine Verhärtung der Nebendichtungen.

Abschließende Betrachtung der Ursachen zur beispielhaften Geräuschentwicklung an Kraftfahrzeug-Kühlwasser-Pumpen

Der Betrieb der Dichtung liegt im Bereich des Tiefpunktes des Gümbeldiagramms und damit im Bereich der elasto-hydrodynamischen Schmierung. Mögliche Abhilfe bietet der Betrieb bei höheren Gümbelzahlen im Bereich der Hydrodynamik:

$$G = \frac{\eta \cdot \omega}{\kappa \cdot \Delta p}$$

- Grund-Viskosität η des abzudichtenden Mediums ist niedrig, d.h., Wasser-Glykol-Gemisch mit reduziertem Glykol-Gehalt (z.B. durch unzulässiges Nachfüllen des Kühlsystems ausschließlich mit Wasser)
- verringerte Viskosität des Wassers-Glykols-Gemischs (Kühlflüssigkeit) bei hohen Temperaturen bis 115 °C. Moderne Motoren werden wegen der Effizienzsteigerung zunehmend mit höheren Temperaturen betrieben.
- Drehzahl der Pumpen niedrig, z.B. geringe treibstoffsparende Motor-Leerlaufdrehzahl von 450 min⁻¹
- niedriges Übersetzungsverhältnis des Riementriebs für die Pumpe
- erhöhte Systemdrücke im geschlossenen Kühlsystem für den notwendigen Abstand zum Siedepunkt

Der Betrieb der Gleitringdichtung liegt im Bereich der Eigenfrequenz. Mögliche Abhilfe sind ein unter- bzw. überkritischer Betrieb

$$\omega_n = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

- ungünstige geringe Masse infolge der Miniaturisierung
- hohe Federsteifigkeit (axiale Steifigkeit und Drehsteifigkeit)

Überhitzung der Gleitringdichtung mit der mittelfristigen Folge der Verhärtung der Nebendichtungen, Verhärtung führt zur Reduzierung der Eigendämpfung. Eine mögliche Abhilfe ist ein ausgewogenes Temperatur-Druck Verhältnis (üblicherweise mindestens $\Delta T > 10K$ Abstand von der Dampfdruckkurve im Kühlsystem):

- unzulässiger Druckabbau im direkten Dichtungsumfeld durch ungünstige Strömungsvorgänge (z.B. im Radseitenraum)
- Dampfblasen am Außendurchmesser der Gleitfläche durch mangelhafte Wärmeübertragung. Dies verursacht reduzierte Wärmeabfuhr (Wärmeübergang), erzeugt Mangelschmierung der Gleitflächen durch Zweiphasengemisch und den mangelhaften Abzug möglicher Dampfblasen durch die Entlastungsbohrungen.

- Unzureichender Druckaufbau im Kühlsystem zur Sicherstellung des Abstands von der Siedekurve von mindestens 10 K. Druckkontrolle im System zur Vermeidung von spontanem Druckabfall. Dies entsteht durch ein zu geringes Füllvolumen an unterer Grenze des Füllstands des Kühlsystems, mangelhafte Druckhaltung des Druckbegrenzungsventils und Druckverluste des Kühlsystems durch Leckagen an beliebigen Dichtstellen.
- Beginnende Kavitation im Zulaufbereich der Pumpe durch ungünstige Gestaltung des Kühlkreislaufs, z.B. durch Kavitationsvibrationen an der Dichtung, Kavitationsblasenschlepe im Dichtungsraum, mangelhafte „Entlüftung“/Beseitigung der Kavitationsblasen durch die Ausgleichsbohrungen sowie unzureichenden Druckaufbau der Pumpe mit Abnahme des Volumenstroms bis hin zum Strömungsabriss infolge der Zweiphasenströmung.
- Siedebeginn an überhitzten Motorbereichen oder durch ungünstige Strömungsführung im Hydrauliksystem verbunden mit Einschleppen von Dampfblasen in den Dichtungsraum mit der Folge der Mangelschmierung.
- Unzureichende dauerhafte selbsttätige Entlüftung des Kühlsystems, z.B. durch Erzeugung von Luftblasen, mit der Folge von Mangelschmierung der Gleitringdichtung.
- Verdampfung im Dichtspalt infolge des Druckabfalls bei Überhitzung mit der Folge von Mangelschmierung der Gleitflächen.

Mangelhafte gesamte Dämpfung δ des schwingungsfähigen Systems infolge von zunehmender Verhärtung der Elastomere durch Überhitzung infolge von Mangelschmierung

$$\delta = \frac{\eta^*}{2 \cdot m}$$

durch langzeittemperaturabhängige verringerte Eigendämpfung η^* der Nebendichtungswerkstoffe (Verlust an Rückprallelastizität), Beeinflussung der gedämpften Eigenfrequenz

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \delta^2}$$

Ist das Lehrsches Dämpfungsmaß D zeitabhängig zu klein, bietet $D > 0,10$ Abhilfe

$$D = \frac{\eta^*}{2 \cdot \sqrt{c \cdot m}}$$

Zusatzdämpfer wären eine optionale Lösung.

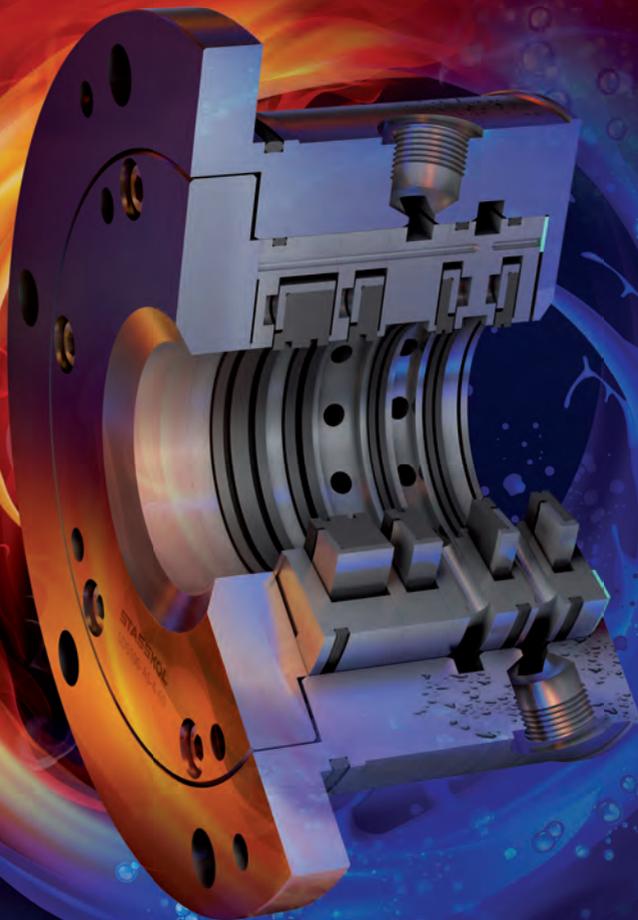
Literatur

- [1] J. Deininger, R. Peis, R. Kauer und K. Strohmeier, „Auswahlkriterien für Wellendichtungen unter Berücksichtigung von flüssiger und gasförmiger Leckage,“ VDI Bericht 2440, 1998
- [2] T. Sperrfechter, „Keramische Bauteile im elasto-hydrodynamischen Kontakt“, Bd. IKM 024, Karlsruhe: Institut für Keramik im Maschinenbau, Universität Karlsruhe, 1998
- [3] H. J. Leeuwen und M. J. W. Schouten, „Die Elasto-hydrodynamik: Geschichte und Neuentwicklungen,“ VDI Bericht Nr. 1207, 1995
- [4] P. Waidner, „Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen,“ Institut für Maschinenelemente und Gestaltungslehre, Bericht Nr. 26, Stuttgart, 1987
- [5] P. Waidner, „Grenzbelastung von Werkstoffen für Gleitringdichtungen - Eine Modellvorstellung und Simulationsmöglichkeiten,“ in XX. Dichtungskolloquium, A. Riedl, Hrsg., Steinfurt, Vulkan Verlag, 2017, pp. 114-130
- [6] P. Waidner, „Auswirkung von drehzahlgeregelten Antrieben für Pumpen auf das Betriebsverhalten von Gleitringdichtungen - eine Herausforderung für die Zukunft,“ in International Sealing Conference - Internationale Dichtungstagung, Stuttgart, 2016
- [7] T. G. Doust und A. Parmar, „Transient thermoelastic effect in a mechanical face seal,“ in 11th International Conference on Fluid Sealing, Cannes, 1987
- [8] V. L. Popov, „Kontaktmechanik und Reibung – von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik“, 3. Auflage Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [9] N. M. Ghzaly, M. R. E.-. Sharkawy und I. Ahmed, „A Review of Automotive Brake Squeal Mecanisms,“ Journal of Mechanical Design and Vibration, Bd. Vol. 1, Nr. Nr. 1, pp. 5 - 9, 2014.
- [10] V. L. Popov, „Kontaktmechanik und Reibung – Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik“, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- [11] J. Grudzinsky, W. Kissing und L. Zaplata, „Untersuchungen selbsterregter Reibungsschwingungen mit Hilfe eines numerischen Simulationsverfahrens,“ Technische Mechanik, Heft 1, pp. 7 - 14, 1992
- [12] M. Kröger, M. Neubauer und K. Popp, „Experimental Investigation on the Avoidance of Sel-excited Vibrations,“ Philosophical Transactions of the Royal Society A, pp. 785 - 810, 2008
- [13] G. G. Adams, „Self-Excited Oscillations of Two Elastic Half-Spaces Sliding With a Constant Coefficient of Friction,“ Journal of Applied Mechanics, Bd. 62(4), pp. 867-872, 1995
- [14] mech2.pi.tu-berlin.de/popov/reibungsphysik_ws0607/.../Kapitel-Stick-Slip-Korr11.pdf
- [15] G. A. Tomlinson, „A Molecular Theory of Friction,“ The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazin and Journal of Science, Bd. Vol. 7 (46 Supplement), p. 905, 1929
- [16] L. Prandtl, „Ein Gedankenmodell zur kinetischen Theorie der festen Körper,“ ZAMM, Bd. 8, pp. 85-106, 1928
- [17] A. O. Lebeck, Principles and Design of Mechanical Face Seals, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991
- [18] Grundfos, „www.grundfos.com,“ 01 2018. [Online]. Available: machining.grundfos.com/media/16608/shaftseal_chapter4.pdf

SDS100

STASSKOL DynamicSeal

Shaft seal for high pressure gas application · more efficient
easy to assemble · shorter installation length · less expensive



STASSFURT
GERMANY

HOUSTON
USA

www.stasskol.de

STASSKOL

SEALING EXPERTS SINCE 1920

Blasen auf Radialwellendichtringen

Eine immer häufigere Schadensursache

Federvorgespannte Elastomer-Radialwellendichtringe werden zum Abdichten von rotierenden Wellen in allen Bereichen des Maschinen- und Fahrzeugbaus verwendet. Die Dichtung ist millionenfach genutzt und erprobt. Basierend auf ihrer hervorragenden statischen Abdichtung und dem aktiven dynamischen Dichtmechanismus funktionieren sie oftmals lebenslang ohne Probleme. Wie auch immer, den tribologischen Beanspruchungen sind auch Grenzen gesetzt. Werden diese Grenzen überschritten, entsteht ein Schaden. Nach den Definitionen der Schadensanalyse [1] ist der Schaden einer Dichtung die Leckage.

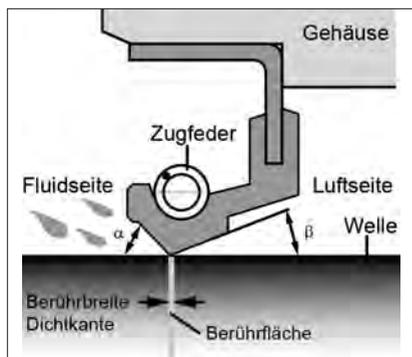


Bild 1: Radialwellendichtung

(Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

Das tribologische System, also die "Dichtung", besteht aus den vier Systempartnern Dichtelement, Gegenauflfläche, abzdichtendes Fluid und dem Umgebungsfluid (oftmals Luft). Auf diese wirken im Sinne einer tribologischen Systembetrachtung die tribologischen Beanspruchungen wie z.B. Relativgeschwindigkeit, Temperatur und weitere Einflüsse. Um das jeweils beste Dichtsystem auswählen zu können, ist es notwendig zu wissen, wie das System funktioniert und wie sich die verschiedenen Systempartner gegenseitig beeinflussen.

Um das beste System für die längste Betriebsdauer und höchste Zuverlässigkeit auswählen zu können, müssen die Schadensursachen der Dichtsysteme für die verschiedenen Anwendungen bekannt sein. Der Schaden „Leckage“ an Radialwellendichtungen (**Bild 1**) entsteht immer aus einem Primärschaden an einem der Systempartner. Solche Primärschäden entstehen z.B. durch hohen Verschleiß an Dichtring (**Bild 2 links**) oder Welle oder durch Überhitzung des Elastomers des Dichtringes mit oder ohne Ölkoh-

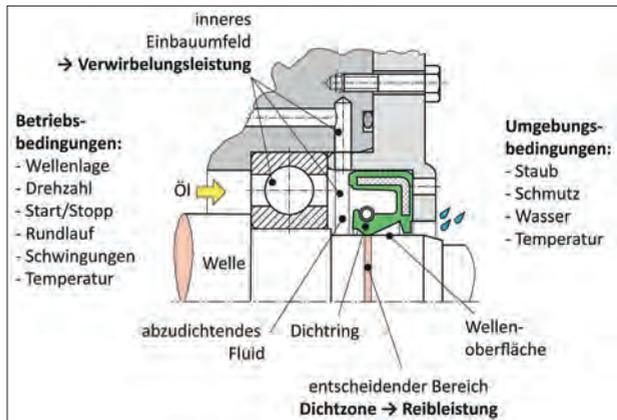
Von Dr.-Ing. Frank Bauer und Professor Dr.-Ing. habil. Werner Haas
 Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA) | www.ima.uni-stuttgart.de
 Der Beitrag wurde im 11th EDF/Prime Workshop [13] auf Englisch erstveröffentlicht.



Bild 2: Primärschäden an der Dichtkante – Bild links und Mitte [3] (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

Bild 3: Tribologisches System "Dichtung"

(Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))



lebildung (**Bild 2 Mitte**). Eine weitere Schadensursache kann die Elastomer-Fluid-Inkompatibilität sein. Durch eine chemische Schädigung kann die Dichtkante quellen oder es können sich, wie in **Bild 2 rechts**, Blasen bilden. Die typischen Schäden an Elastomer-Radialwellendichtringen wurden in [2] ausführlich vorgestellt. Nachfolgend wird der immer häufiger auftretende Schadensmechanismus „Blasenbildung“ diskutiert. Es werden die Entstehung, die Schadensanalyse und die Einflüsse auf die Funktion der Dichtung detailliert besprochen. Mit dem Wissen über den Primärschaden „Blasenbildung“ und dessen Analyse kann der Anwender die Dichtungsumgebung, das abzdichtende Fluid oder den Dichttring und dessen Material modifizieren und somit für ein zuverlässiges Dichtsystem sorgen.

Dichtsystem

Das komplexe tribologische System "Dichtung" (**Bild 3**) besteht aus dem Grundkörper in Form eines Dichtelements (**Bild 4**), dem Gegenkörper in Form der Welle, dem abzdichtenden Fluid, dem inneren Umgebungsumfeld, der Umgebung mit dem Umgebungsfluid und den Betriebsbedingungen.

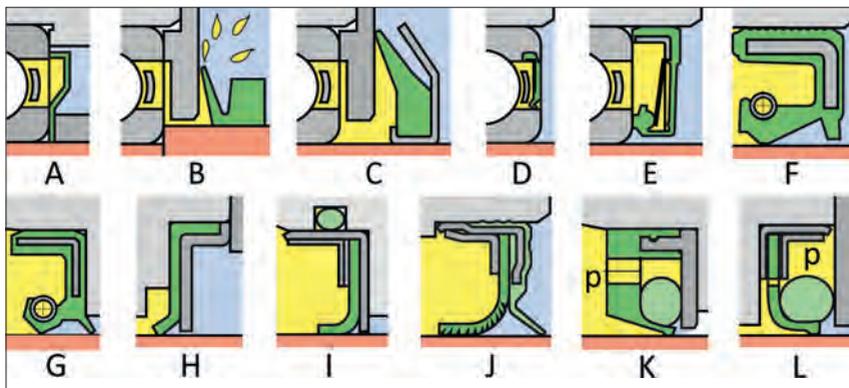


Bild 4: Dichtelemente zum Abdichten von rotierenden Wellen (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

Der wichtigste Bereich ist die Tribokontaktzone, die Dichtzone. Diese Dichtzone (**Bild 3**) besteht zwischen dem Dichtelement und der Welle und ist im Neuzustand ca. 100 μm breit. Durch Verschleiß kann die Berührbreite mehrere 100 μm breit werden und trotzdem kann die Dichtung noch dicht sein. Auch wenn es sich um eine Verschleißfläche auf dem Dichtelement handelt, wird diese üblicherweise als Dichtkante bezeichnet.

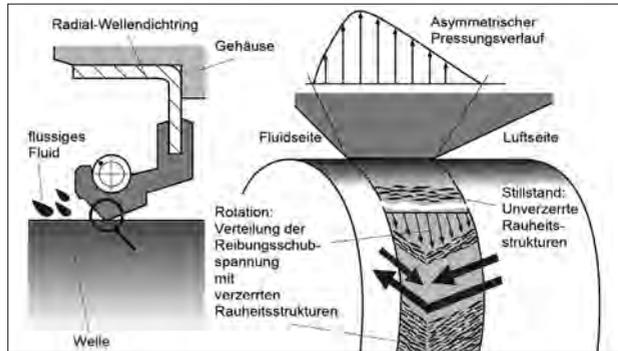
Bild 4 zeigt verschiedene Dichtelemente für die Abdichtung von rotierenden Wellen. A-E sind die Lager-Schutzdichtungen, G und H sind PTFE-Manschettendichtungen, I bis K zeigen komplexere PTFE-Dichtungen für höhere Betriebsanforderungen, L ist eine PTFE-Manschettendichtung mit Spirallinien und M eine axial-wirkende Gleitringdichtung. Nachfolgend wird der immer häufiger vorkommende Primärschaden „Blasenbildung“ am Dichtelement „Federvorgespannter Elastomer-Radialwellendichtung“, kurz RWDR (Skizze F) gezeigt.

Federvorgespannter Elastomer-Radialwellendichtung

Während einer spezifischen Phase mit dem Einlaufverschleiß „laufen“ Dichtkante und Welle zusammen ein. Dabei werden die scharfen Spitzen der Wellenoberfläche verschliffen. Weiterhin wird die glatte Spritzhaut der Dichtkante verschliffen. Nach dem Einlaufverschleiß kann man Rauheitsstrukturen auf dem Elastomer der Dichtkante finden (**Bild 5**). Aufgrund des weichen Elastomers ist die Dichtung im Stillstand dicht, da das Elastomer die Rauheitsstrukturen der Wellenoberfläche verschließt. Aufgrund der verschiedenen Winkel an der Dichtkante auf der Fluid- und Luftseite und der Lage

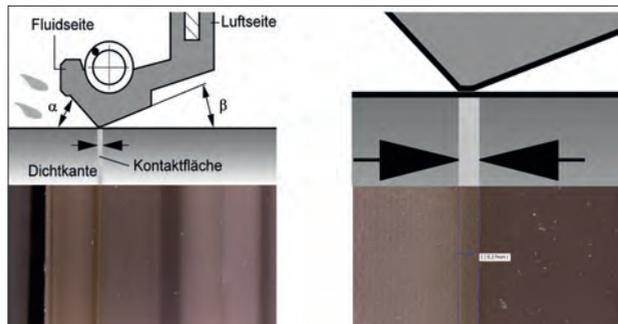
Bild 5: Funktion – Rückfördermechanismus (Bild:

Universität Stuttgart, Institut für
Maschinenelemente (IMA))



**Bild 6: Optimal
gleichmäßig und fein
verschlissene
Dichtkante in der
Draufsicht** (Bild: Universität

Stuttgart, Institut für
Maschinenelemente (IMA))



der Zugfeder herrscht im Kontakt eine asymmetrische Pressungsverteilung mit verschiedenen Gradienten an der Dichtkante [4].

Wenn die Welle rotiert wird, werden die elastomeren Rauheitsstrukturen analog zur asymmetrischen Pressungsverteilung durch die Reibung verzerrt. Diese angewinkelt verzerrten Strukturen wirken wie Mikropumpen. Die Strukturen auf der Fluidseite pumpen die Flüssigkeit – oftmals Öl – in die Dichtzone. Dadurch ist die Dichtkante gut geschmiert und es kann durch Rauheit zum hydrodynamischen Abheben der Dichtkante kommen. Da sich dabei das Dichtelement verformt, handelt es sich um elasto-hydrodynamische Schmierung (EHD). Durch die vollständige Trennung der Dichtkante und Welle wird Verschleiß verhindert und das System arbeitet langzeitfunktionsicher. Die Strukturen auf der Luftseite pumpen das Öl zurück auf die Fluidseite. Somit herrscht ein ständiger Austausch von Öl, die Dichtzone wird gekühlt und das Dichtsystem ist dicht. Dieser aktive Rückfördermechanismus funktioniert sehr gut, solange nicht das abzudichtende Fluid, die Kontaktgeometrie der Dichtkante, die Umgebung der Tribokontaktzone, das Beanspruchungskollektiv oder das weiche und elastische Elastomer verändert oder geschädigt werden.

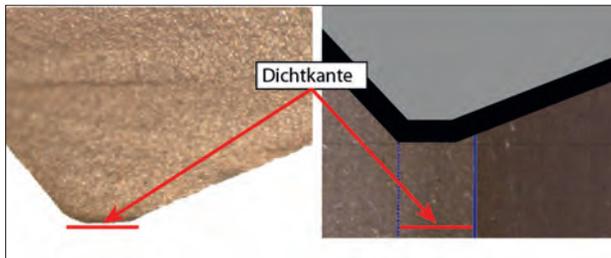


Bild 7: Querschnitt durch die weiche Dichtkante und Vergrößerung des Bildes 6 rechts, Schadenmechanismen

(Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

Im **Bild 6** ist ein Beispiel in zwei Vergrößerungen einer perfekt eingelaufenen Dichtkante (FKM) nach einem 240-h-Dauerlauf mit einer Ölumpftemperatur von 120 °C und einer Umfangsgeschwindigkeit von 13,5 m/s dargestellt.

Im **Bild 7 links** ist der Querschnitt der Dichtkante und in **Bild 7 rechts** nochmals eine Vergrößerung aus **Bild 6 rechts** dargestellt. Es sind keinerlei Fehler oder Schäden und nicht einmal eine unkritische Verfärbung erkennbar. Vielmehr hat die Oberfläche die gleiche Struktur neben der Dichtkante – elastisch und verformbar.

Schadenmechanismen

In verschiedensten Feldausfällen und Forschungsprojekten wurden die Schadenmechanismen an der Dichtkante von Radialwellendichtungen untersucht. Die hauptsächlich auftretenden Schadenmechanismen zeigt **Tabelle 1**.

Veröffentlichungen zu Schadensanalysen von Radialwellendichtungen

Alle genannten Schäden können in allen Bereichen des Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbaus gefunden werden. Allerdings sind nur wenige Veröffentlichungen über Schadensanalysen im Bereich der Radialwellendichtungen verfügbar, z.B. in [5] und [6]. In [7] und [8] sind die Bilder aus [5] zitiert. Weitere Erkenntnisse des Autors zum Thema sind zum Beispiel in [2] und [9] veröffentlicht.

Generelle Meinung über Blasen

Generelle Meinung und Wissen bezüglich Blasen sind:

- Blasen bilden sich ausschließlich auf der Luftseite der Dichtkante
- Blasen bilden sich ausschließlich bei Dichtringen aus dem Elastomer FKM
- Blasen bilden sich ausschließlich bei Verwendung von Synthetik-Ölen

Es gibt eine Vielzahl von Theorien über die Bildung von Blasen. Allerdings konnte bisher niemand hinreichend genau erklären, warum und wie sich die Blasen bilden.

Schaden	Schadensursache
Mechanisch	
Extensiver Verschleiß	Schlechte Schmierung
Asymmetrischer Verschleiß	Exzentrischer Einbau
Rauer Verschleiß, Ausbrüche	Raue Oberfläche oder Partikel
Umlaufende Riefen in der Dichtkante	Partikel
Hohlriefe auf der Luftseite der Dichtkante	Druck
Thermisch	
Ölkohle auf der Dichtkante oder der Luftseite	Überhitzung
Verhärtung und Verkokung der Dichtkante	Überhitzung
Axiale Risse in der verhärteten Dichtkante	Überhitzung und mechanische Überdehnung
Thermo-chemisch	
Quellen	Öl-Elastomer Inkompatibilität
Deformation	Öl-Elastomer Inkompatibilität
Axiale Risse in der weichen Dichtkante	Öl-Elastomer Inkompatibilität
Blasen	Öl-Elastomer Inkompatibilität

Tabelle 1: Schadensmechanismen an der Dichtkante von Radialwellendichtringen

(Quelle: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

Wissenschaftliche Veröffentlichungen über Blasen

Wissenschaftliche Veröffentlichungen über Blasenbildung sind kaum zu finden. Die einzige Dissertation, die sich hauptsächlich mit Blasen beschäftigt, ist von Schulz [10] an der TUHH erstellt worden. Er untersuchte die Entwicklung von Blasen und entwickelte verschiedene Hypothesen und stellte den Mechanismus vor. Eine Hypothese für die Blasenentwicklung ist:

1. Thermo-chemische Inkompatibilität des Fluor-Elastomers und der Additive im Öl (meist Amine).
2. Molekülketten werden geschwächt und zerstört.
3. Mechanische Beanspruchung aufgrund Reibung.
4. Ermüdungsrisse bilden sich entlang der zerstörten Molekülketten von der Ölseite unter der Dichtkante zur Luftseite.
5. Ein mechanischer Vorgang führt zur Füllung und zum Aufblähen der Blase.
6. Die Wände der Blase werden durch das Fluid verhärtet und bleiben auch ohne Fluid formstabil.

In seinen Prüfstandsuntersuchungen führten nicht alle der fünf untersuchten Öle zur Blasenbildung. Besonders das Öl ohne Additive führte nicht zur Blasenbildung. Er folgerte: „Bei höheren Temperaturen sind einige der Additive chemisch nicht kompatibel mit dem Elastomer“.

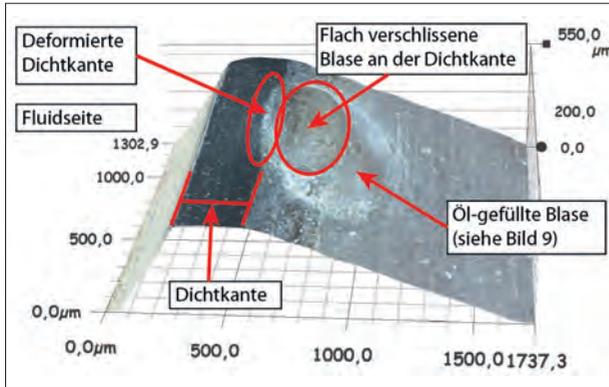


Bild 8: Verhärtete Dichtkante mit Blase auf der Luftseite und unter der Dichtkante in der Dichtzone (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))



Bild 9: Öl-Ausfluss nach dem Aufstechen der Blase aus Bild 8 zu verschiedenen Zeitpunkten (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

Die Hypothese kann mit Wissen über statistische Öl-Elastomer-Einlagerungsversuche (z.B. [11]) und Schulz's eigene Einlagerungsversuche mit Elastomer-Radialwellendichtungen bestätigt werden:

Bei statischen Einlagerungsversuchen können keine Blasen an den Testkörpern gefunden werden. Das beweist, dass die anderen von ihm untersuchten Thesen wie Verdampfung, Osmose oder Diffusion nicht zielführend sind. Ausschließlich die Hypothese, welche den dynamischen Pumpmechanismus einschließt, führt zu einem Erklärungsansatz. Heutzutage kann dieser Schadensmechanismus in immer mehr realen Anwendungen und in immer mehr dynamischen Öl-Elastomer-Kompatibilitätstests am Komponentenprüfstand gefunden werden.

Zielsetzung

Die eigenen Untersuchungen und Schlussfolgerungen bestätigen Schulz's Erkenntnisse und erweitern das Wissen über Blasen, deren Bildung und Verhalten in der Lebenszeit einer Dichtung. Mit diesem Wissen kann die Dichtungs-, Additiv- und

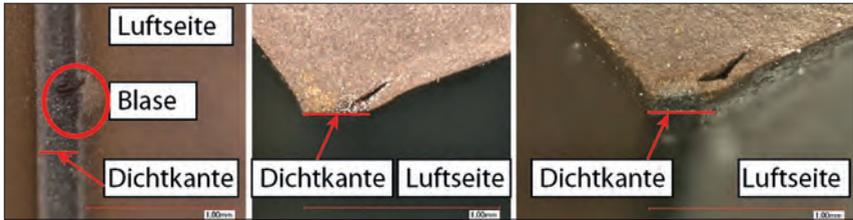


Bild 10: Blasen im Querschnitt (links und Mitte Blase 1, rechts Blase 2) (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

Ölindustrie systematisch untersuchen, welche Kombinationen im Tribosystem zu Blasen führen und wie Blasen verhindert werden können.

Blasen

Eine Blase ist ein Hohlraum unter der Elastomeroberfläche. Elastomer-Radialwellendichtringe werden im Spritzgießverfahren hergestellt. Auf der Luftseite der Dichtkante ist daher immer die glatte robuste und in sich geschlossene Spritzhaut vorhanden. Bei einigen Typen verbleibt die Spritzhaut auf der Ölseite („fertig gespritzte Dichtkante“), bei anderen wird die Dichtkante abgestochen und es verbleibt das offenporige Elastomer. Nach einer Einlaufphase liegt bei beiden Typen das offenporige Elastomer mit den Strukturen auf der Dichtkante auf der Welle auf.

Bei den gestochenen Typen wird der Verschleiß der Spritzhaut auf der Ölseite also vorweggenommen. Diese Typen funktionieren von Beginn an besser und zuverlässiger.

In **Bild 8** ist ein 3D-Bild einer Dichtkante mit Blase dargestellt. Zusätzlich zur Blase ist die Dichtkante durch thermische Einwirkungen komplett verfärbt und verhärtet. Es ist kein weiches und verformbares Elastomer erkennbar. Die Blase auf der Luftseite der Dichtkante ist komplett aufgepumpt mit Öl. Die Oberseite der Blase ist flach und geht in die Dichtkante über. Die Ursache hierfür ist, dass die Blase schon so groß ist, dass sie mit der Dichtkante auf der Welle auflieg und verschliss. Nach dem Ausbauen des Dichtringes steht die Blase sogar über die Dichtkante vor und verformt diese. Nach dem Aufstechen der Blase mit einer Nadel in **Bild 9** ist deutlich erkennbar, wie das Öl ausfließt und das Volumen kleiner wird. Im Gegensatz zu Schulz's Untersuchungen konnte der Autor selten eine Formstabilität des weichen Elastomers erkennen.

In **Bild 10 links** ist eine andere Blase in der Draufsicht dargestellt. Diese Blase wurde im Querschnitt aufgeschnitten **Bild 9 Mitte**. Nach dem Ausfließen des Öles wird das

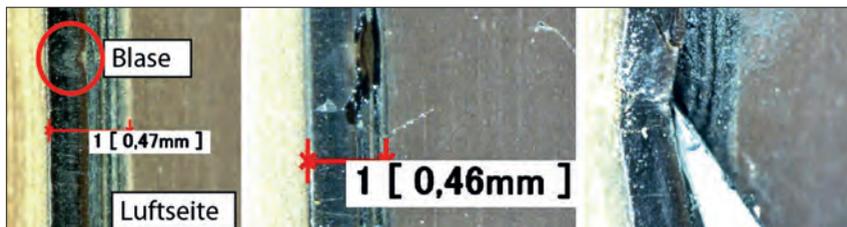


Bild 11: Blase unter der Dichtkante (links), nach dem Aufstechen (Mitte) und nach Deformation mit einer Nadel (rechts) (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))



Bild 12: Öl-gefüllter Riss als Kanal zu einer Blase (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

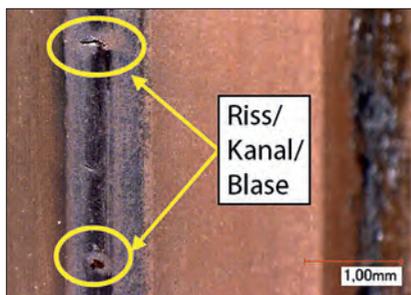


Bild 13: Beispiel von Blasenbildungen unter der Dichtkante aus Feldausfällen (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

Volumen wieder klein und es ist nur noch ein kleiner Spalt zu erkennen. Trotz Reinigung mit Aceton fließen weiterhin geringe Mengen Öl aus. Es lässt sich gut sehen, dass sich die Blase nicht nur auf der Luftseite, sondern auch unter der Dichtkante befindet. Im rechten Bild ist eine weitere Blase mit einem größeren Volumen des Spaltes im Querschnitt dargestellt.

Bild 11 links zeigt eine Blase direkt unter der verformten Dichtkante. Es zeigt sich keine Deformation auf der Luftseite. Nach dem Aufstechen fließt das Öl aus und das Volumen wird kleiner, die Dichtkante ist nicht mehr angehoben **Bild 11 Mitte**. Sobald man die Blase mit einer Nadel deformiert (**Bild 11 rechts**), kann man die verhärtete und verkockte Dichtkante analysieren. Es ist deutlich erkennbar, dass das Elastomer nicht mehr weich und elastisch ist und somit die Funktion nicht mehr erfüllen kann.

Bild 14: Blasenausprägung abhängig von der Wellendrehrichtung (Bild: Universität

Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

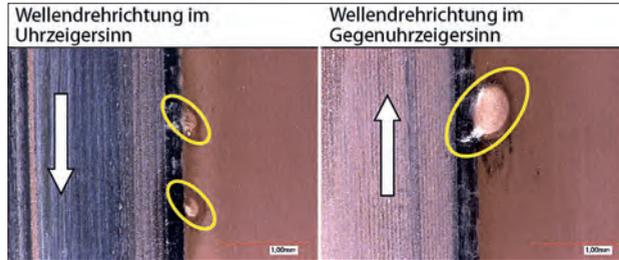


Bild 12 zeigt einen Ermüdungsriß/Kanal in der Oberfläche der Dichtkante, welcher zu einer kleinen Blase auf der Luftseite führt. Nach dem Reinigen mit Aceton (links) fließt nach kurzer Zeit permanent Öl aus dem Kanal (Mitte und rechts). Dies belegt die Theorie, dass die Blasen von der Ölseite durch die zu Kanälen erweiterten Ermüdungsrisse aufgepumpt werden. Meist sind diese Kanäle nicht sichtbar und liegen unter der Dichtkante. In diesem Fall ist die Dichtkante jedoch so stark verschlissen, dass der Kanal freigelegt wurde.

Bild 13 zeigt zwei Risse/Kanäle/Blasen unter der Dichtkante, welche durch Verschleiß während der Laufzeit freigelegt wurden. Dieser Primärschaden am Dichtelement führte zum Schaden des Dichtsystems – es trat Leakage aus.

Erweiterte Theorie

Es gibt keinen klaren Unterschied zwischen den Ermüdungsrisse, den Kanälen und den Blasen. Sobald die Ermüdungsrisse mit Öl vollgepumpt werden, entstehen daraus die Kanäle. Diese bilden sich weiter fort und werden über die Zeit immer größer und pumpen sich schlussendlich zu einer Blase auf.

Bild 14 bestätigt die Theorie: Im linken Bild ist eine im Uhrzeigersinn gelaufene Dichtkante dargestellt. Im rechten Bild ist eine Dichtkante im Gegenuhrzeigersinn gezeigt, welche unter den exakt gleichen Bedingungen gelaufen ist. Die Blasen sind offensichtlich in Richtung der Drehrichtung ausgeprägt.

Sobald sich eine Blase ausgebildet hat (**Bild 15 links**) und die Dichtung noch in Betrieb ist, wird sie kontinuierlich weiter aufgepumpt, bis die Blasenoberfläche Kontakt zur Welle hat. Ab diesem Zeitpunkt wird die Oberfläche durch die Wellenoberfläche verschlissen, bis die Blase (Mitte; gleiche Dichtkante, andere Blase) schließlich aufbricht und ausläuft. Dadurch entsteht ein dauerhaft offener Kanal von der Öl- zur Luftseite. Im Gegensatz zur verhärteten und verkockten Oberfläche auf der Dichtkante kann man am Rand der Blase noch weiches unverfärbtes Elastomer erkennen.



Bild 15: Beispiel von Blasenbildung unter der Dichtkante im Feldeinsatz (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

Ist die Blase unter der Dichtkante und bereits aufgebrochen, kann sich aufgrund der hohen Temperatur in der Dichtzone Ölkohle in der aufgeplatzten Blase bilden (rechts; gleiche Dichtkante, weitere Blase).

Aus diesen Erkenntnissen lassen sich weitere Fakten ableiten:

1. Blasen können sich auch auf der Ölseite bilden (**Bild 16**).
2. Blasen können auch auf fertig gespritzten Dichtkanten mit Rückförderstrukturen entstehen (**Bild 17**).
3. Blasen können auch bei NBR-Dichtringen auftreten (**Bild 18**).
4. Wenn man dynamische Öl-Elastomer-Verträglichkeitstests mit den gleichen Dichtringen unter denselben Bedingungen durchführt, zeigen einige Öle Blasenbildung, andere Öle jedoch nicht. Dies gilt auch, wenn die gleichen Grundöle verwendet werden.
5. Mit unadditivierten Ölen traten in keinem Prüflauf und in keinem Projekt am Institut Blasen auf. Diese unadditivierten Öle werden häufig für AiF- und DFG-Projekte verwendet und es bestehen Erfahrungen über mehrere tausende Tests. → Die Additive sind ursächlich für den Schadensmechanismus "Blasenbildung".
6. Wenn man dynamische Öl-Elastomer-Verträglichkeitstests mit den gleichen Dichtringen unter denselben Bedingungen und den gleichen Öl-Additiv-Mischungen durchführt, beeinflusst die Temperatur entscheidend, ob die Molekülketten geschädigt werden (→ Blasenbildung) oder nicht.
7. Schon eine Temperaturreduzierung von 5 K kann Blasenbildung vermeiden!

Erweiterte Hypothese zur Blasenbildung

Die Hypothese von Schulz ist verständlich und mit den Bildern in diesem Beitrag bestätigt. Dennoch kann die Hypothese erweitert und verfeinert werden. Die erweiterte Hypothese zur Blasenbildung lautet:

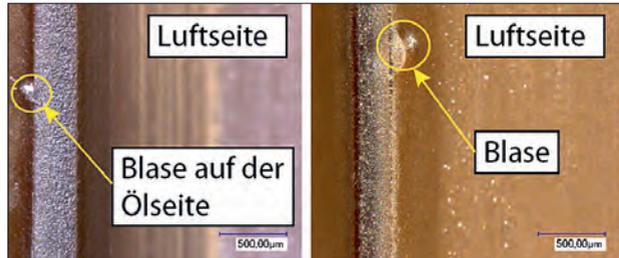


Bild 16: Blasen auf demselben Dichtringtyp nach dynamischen Prüfläufen unter gleichen Bedingungen ($p = 0,1 \text{ MPa}$, $v = 16 \text{ m/s}$, Ölsumpftemperatur 130 °C) (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

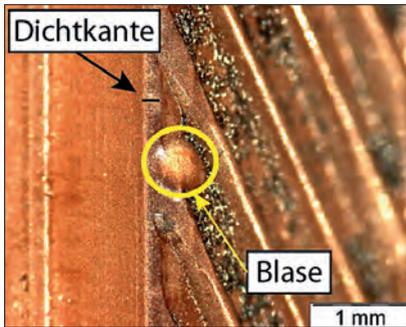


Bild 17: Blasen zwischen hydrodynamischen Rückförderstrukturen (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

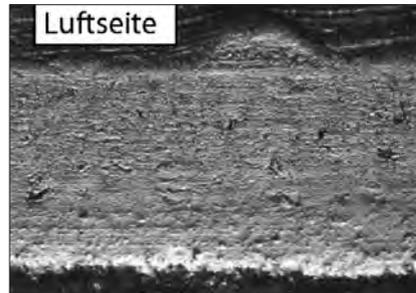


Bild 18: Blase auf einer NBR-Dichtkante auf der Luftseite, entstanden während Förderwerttests mit Polyglykol-Öl [12] (Bild: Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA))

1. Thermo-chemische Inkompatibilität des Elastomers und der Additive im Öl bei höheren Temperaturen.
2. Molekülketten werden geschwächt und zerstört.
3. Mechanische Beanspruchung aufgrund Reibung.
4. Ermüdungsrisse bilden sich entlang der zerstörten Molekülketten.
5. Ein Ermüdungsriss wird zu einem Kanal und im nächsten Zeitschritt zu einer Blase.
6. Öl wird aufgrund des Pumpmechanismus der Dichtung mechanisch aus der Dichtzone in die Ermüdungsrisse, Kanäle und schließlich in die Blase gepumpt.
7. Die Blase platzt aufgrund der robusten Spritzhaut nicht auf und wird kontinuierlich größer.
8. a) Die Dichtkante wird deformiert und angehoben und die Funktion ist gestört
→ Leckage.

b) Sobald ein Kanal oder eine Blase die Welle kontaktieren kann diese verschleifen und dadurch geöffnet werden → Leckage.

Bestätigte Fakten in diesem Zusammenhang sind:

- Ermüdungsrisse führen zu Kanälen und zu Blasen (zu nachfolgenden Zeiten).
- Blasen bilden sich nicht nur auf der Luftseite, sondern auch unter der Dichtkante und sogar auf der Ölseite.
- Blasen treten bei Dichtringen mit FKM- und NBR-Materialien auf.
- Blasen entstehen nur bei höheren Temperaturen. Oftmals wird gleichzeitig die Dichtkante thermisch geschädigt.

Die daraus abgeleitete Annahme ist:

- Blasen treten nur auf, wenn Additive verwendet werden, niemals bei der Verwendung von unadditivierten Ölen.

Fazit

Blasen sind ein Primärschaden an Elastomer-Radialwellendichtringen – durch eine Öl-Elastomer-Unverträglichkeit hervorgerufen. Dieser Schaden tritt ausschließlich im dynamischen Betrieb bei hohen Temperaturen und nur mit speziellen Additiven auf. Die Blase wird durch den Pumpmechanismus des Dichtsystems aufgepumpt. Dies geschieht durch die Kanäle, die sich aufgrund der zerstörten Molekülketten bilden.

Literatur

- [1] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI): VDI 3822: Schadensanalyse - Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse: Beuth. November 2011.
- [2] Bauer, F.; Haas, W.: Failure Analysis of Elastomeric Lip Seals. ICEFA 5, The Hague, Netherlands, Juli 2012, 2012.
- [3] Schmucker, S.; Haas, W.: Gestaltung von Lastkollektiven zur Untersuchung von Radial-Wellendichtungen. 15th International Sealing Conference (ISC), Stuttgart, Germany, October 7 - 8, 2008; Ebelsbach: Leithner Media Production, 2008, S. 87-96 - ISBN 3000258841.
- [4] Müller, H. K.; Nau, B. S.: Fluid sealing technology. Principles and applications, New York: M. Dekker, 1998, - ISBN 9780585128573.
- [5] Prem, E.; Vogt, R.: The Simmering - Basics for preventing damage. Firmenschrift, Freudenberg Simrit GmbH & Co. KG, Weinheim, 2008.
- [6] Dinzborg, B.: Ölkohleaufbau bei dynamischen Wellendichtringen .Evolution, URL: <http://evolution.skf.com/de/lkohleaufbau-bei-dynamischen-wellendichtringen/>. [abgerufen am 26.06.2018].
- [7] VDMA Fachverband Fluidtechnik: Dichtsysteme für fluidtechnische Anwendungen. Schadensatlas, Fachverband Fluidtechnik im VDMA e.V.
- [8] Flitney, R.: Seals and Sealing. Handbook, 6. Auflage, Waltham, USA: Butterworth-Heinemann, 2014, - ISBN 978-0-08-099416-1.

- [9] Bauer, F.: Dichtungen. VDI-Forum Schadensbilder kennen - Pkw-Getriebe zuverlässig auslegen, Karlsruhe, 15. / 16.02.2017, 2017.
- [10] Schulz, F.: Untersuchungen zur Bläschenbildung bei Radialwellendichtringen aus Fluor-Elastomer bei der Abdichtung von Öl. Dissertation, 2000, Technische Universität Hamburg-Harburg, ISBN 3-8265-7755-8.
- [11] Braun, J.: Aktuelle Elastomerverträglichkeitstest-Standards - eine kritische Betrachtung. 16th International Sealing Conference (ISC), Stuttgart, 12./13.10.2010; Ebelsbach: Leithner Media Production, 2010 - ISBN 3000325239.
- [12] Klaiber, M.: Influence of additives in synthetic oils in radial lip seals. 65th STLE annual meeting, Las Vegas, USA, May 16-20, 2010: Society of Tribologists and Lubrication Engineers, 2010.
- [13] Bauer, F.; Haas, W.: Blisters on Radial Lip Seals - A More and More Frequent Failure Mode. 11th EDF/Pprime Workshop, Poitiers, France, 9/2012, 2012.

Leistungssteigerung bei Dichtsystemen – durch optimierte Schmierfilmbildung zwischen Dichtung und Gegenläufige

Steigende Anforderungen in hydraulischen Anwendungen stellen dynamische Dichtsysteme unter den Aspekten Verschleiß und Lebensdauer vor steigende Herausforderungen. Ein Lösungsansatz ist das Lubrication Management, was verschiedene Untersuchungen belegen.



Bild 1: Dichtung – optimiert für dynamische Anwendungen (Bild: REIFF Technische Produkte GmbH)

Eine wesentliche Herausforderung bei der Abdichtung bewegter Maschinenteile stellen bekanntermaßen Dichtheit und Lebensdauer dar. Mehr und mehr kommt die Effizienzbetrachtung in den Focus, da Dichtstellen i.d.R. „Reibstellen“ sind, die den Gesamtwirkungsgrad einer Maschine und damit auch die Gesamtkosten beeinflussen. Die in den Anwendungen auftretende Bandbreite der Anforderungen von Dichtheit, Lebensdauer

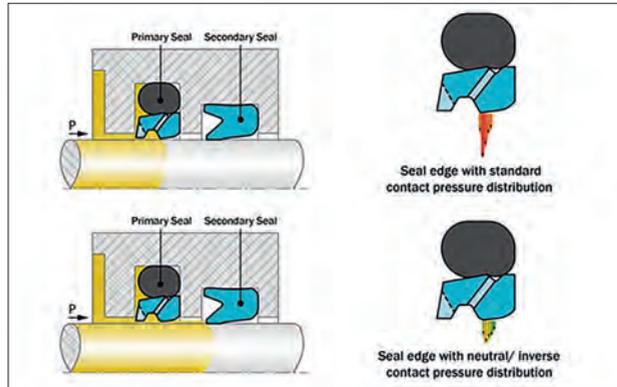
und Verlustleistung ist groß und variiert meist mit Werkstoff und Design der Dichtung oder der Dichtsysteme. Für die beschriebenen Themen ist aber immer die Reibung eine maßgebliche und zunehmend wichtige Einflussgröße [1, 2].

In den Anwendungen kommen die Einflussgrößen der Dichtungen (**Bild 1**) mit den Einflussgrößen der Hardware zusammen. Immer mehr werden auch die üblicherweise verwendeten Chrombeschichtungen durch alternative Beschichtungsverfahren ersetzt, die für bestehende Dichtsysteme aufgrund ungünstiger Topographie zu erhöhtem Verschleiß und in der Folge zu einem frühzeitigen Ausfall führen können.

Der Haupteinflussbereich auf Reibung, Verschleiß und damit Lebensdauer liegt bei den dynamischen Abdichtungen im Dichtspalt. Im Kontaktbereich zwischen Dich-

**Bild 2: Vergleich:
Dichtung mit
herkömmlicher
Kontaktpressungsver-
teilung zu Dichtung
mit Lubrication
Management-Konzept**

(Bild: Trelleborg Sealing Solutions)



tung und Gegenauflfläche hängen die tribologischen Verhältnisse und damit das Reib- und Verschleißverhalten wesentlich von den Schmierbedingungen ab, weshalb eine Optimierung dieser mit einer Anpassung an die jeweilige Belastung der Einzellemente grundsätzlich auf der Hand liegt. Das Prinzip des Lubrication Managements denkt diese grundsätzlichen Zusammenhänge einen Schritt weiter und passt die Schmierfilmbildung im Dichtsystem an die Belastung der Einzellemente an. Betrachtet man die theoretischen Zusammenhänge für die Schmierfilmdicke zwischen Dichtung und Gegenauflfläche, so ist die Schmierfilmdicke grundsätzlich direkt abhängig vom Gradienten der Kontaktpressung. Durch ein Reduzieren des Gradienten beim Ausfahren der Pleuelstange werden der Verlauf und die Höhe des Schmierfilms im Dichtspalt so beeinflusst, dass durch verbesserte Schmierung die Belastung der Dichtung verringert wird. So wird sichergestellt, dass die Gradienten im Kontakt mit der Gegenauflfläche flach verlaufen und eine optimale Schmierung zulassen (Bild 2).

Im Verbund eines Stangendichtsystems, z.B. für einen hydraulischen Aktuator, wird eine Primärdichtung immer mit dem höchsten Druck beaufschlagt und erfährt somit auch die stärkste Belastung. Wenn nun gleichzeitig extrem dünne Schmierfilme erzeugt werden, kann das System an Leistungsgrenzen gebracht werden, die für Wirkungsgrad, Lebensdauer und Effizienz limitierender Faktor sind. Mit einem verbesserten Schmierfilmbot an der hoch belasteten Primärdichtung, die ein integriertes Rückschlagventil aufweist, kann die Leistungsgrenze in Bezug auf Reibung und damit Verschleiß, Lebensdauer und Effizienz deutlich verschoben werden.

Beim Einsatz von Lubrication Management wird die Primärdichtung besser geschmiert und zusätzlich der Sekundärdichtung ein optimierter Schmierfilm angebo-

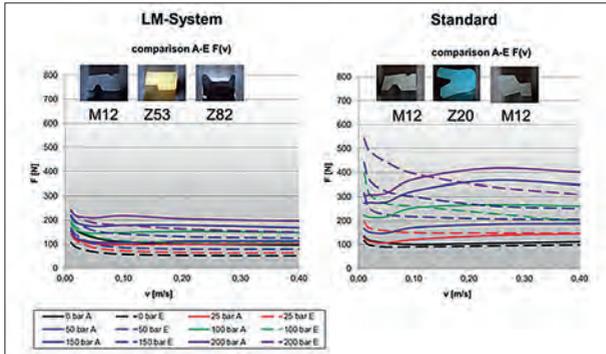


Bild 3: Reibkraftwerte von Dichtsystemen im Vergleich (Bild: Trelleborg Sealing Solutions)

ten, sodass insgesamt eine Reduzierung der Belastung des gesamten Dichtsystems, also Primär- und Sekundärdichtung, sogar bei gesteigerten Betriebsparametern in der Anwendung erreicht wird [1, 2]. Dieses Prinzip kann für jede Art von Dichtungswerkstoff angewendet werden.

Untersuchungsergebnisse

Die Vorteile sind auch bei Reibkraftmessungen nachweisbar. **Bild 3** zeigt vergleichend die Reibkraftmesswerte eines Standard-Dichtsystems und eines Dichtsystems mit Anwendung des Lubrication Managements an der Primärdichtung (PTFE LM) für verschiedene Geschwindigkeiten und Drücke. Im kausalen Zusammenhang mit der gemessenen deutlich reduzierten Reibung sind die resultierenden Vorteile im Verschleißverhalten der Primärdichtung sichtbar. Ein weiterer Vorteil zeigt sich insbesondere auch bei Kurzhubanwendungen (10 mm Hub / 25 MPa / 4mm/s / 80 °C / 1 Mio. Lastwechsel) im Verschleißverhalten der Sekundärdichtung und ist in der Folge im Einlaufverhalten der Gegenauflflächen logisch erklärbar (**Bild 4**). Es konnte an der Gegenauflfläche weder im Bereich der Primärdichtung noch im Bereich der Sekundärdichtung eine messbare Änderung der Rauheitskennwerte festgestellt werden.

Der Vorteil des Lubrication Managements zeigt sich auch bei hochfrequenter Belastung. Der Vorspannungsverlust der Primärdichtung und der Sekundärdichtung nach einem Hochfrequenzbelastungstest (1/20 Hz, 5 MPa und 80 °C) über 288 h ist in **Bild 5** vergleichend dargestellt.

Im Rahmen der reduzierten Belastung des kompletten Tribosystems kann auch von einer Steigerung der Robustheit gesprochen werden, was dann bei der Verwendung von z.B. Verschleiß fördernden Topographiestrukturen einer Gegenauflfläche sehr

Bild 4:
Gegenlauf-fläche
nach Kurzhubtest mit
1 Mio. Doppelhüben
[1, 2]

(Bild: Trelleborg Sealing
Solutions)

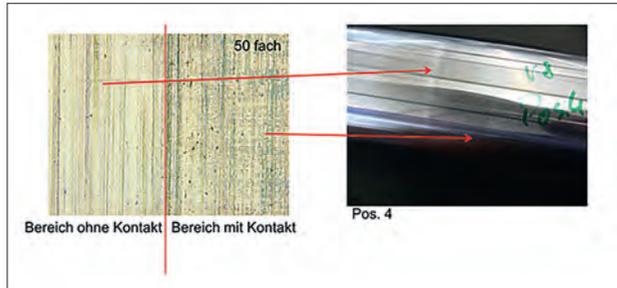


Bild 5:
Gegenauflfläche nach
Kurzhubtest mit
1 Mio. Doppelhüben
[1, 2]: Vorspannungs-
verluste von Primär
und Sekundärdichtung
[1, 2]

(Bild: Trelleborg Sealing
Solutions)

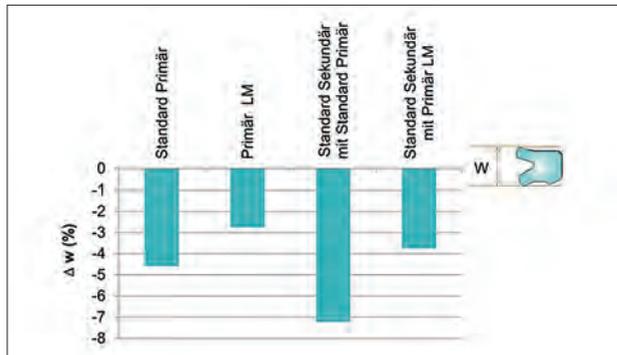
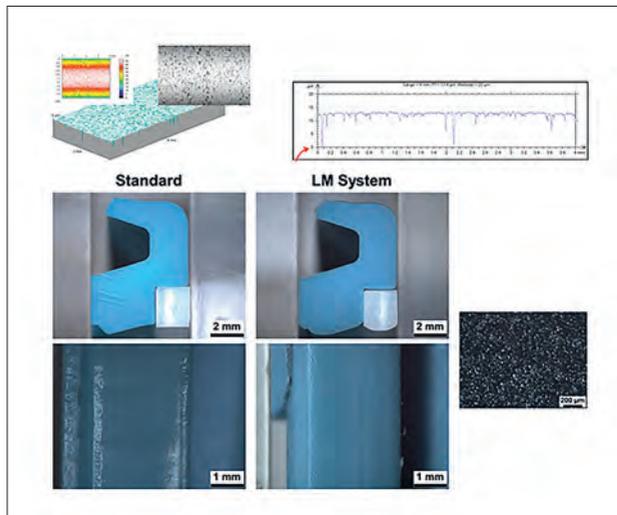


Bild 6:
Dichtungsverschleiß
(Polyurethan) im
Vergleich auf einer
 Al_2O_3 -Kolbenstange
[1, 2]

(Bild: Trelleborg Sealing
Solutions)



positiv für die Standzeit des Dichtsystems zum Tragen kommt. Beispielhaft wird hier eine Al_2O_3 -beschichtete Kolbenstange für die entsprechende Versuchsreihe eingesetzt. Die Topographie der verwendeten Kolbenstange zeigt die typische Struktur dieser Art von Beschichtungen, die Rz Werte liegen hier bei ca. $2,5\ \mu\text{m}$.

Bild 6 zeigt eine 3-D, taktil gemessene Oberflächenstruktur in Draufsicht und Schnitt. Die Profil- und Verschleißbilder der Versuchsichtungen, die mit dieser Oberfläche getestet wurden, belegen die positive Auswirkung des flachen Gradienten der Kontaktpressung.

Fazit

Grundsätzlich kann Lubrication Management mit allen Dichtungswerkstoffen ausgeführt werden und erweitert die entsprechenden Leistungsgrenzen der jeweiligen Werkstoffgruppen erheblich. Auch große Durchmesser sind für gedrehte Ausführungen in z.B. PTFE- oder UHMPE-Compounds keine Schwierigkeit.

Literaturverzeichnis

- [1] Wilke, M.; Jordan H.: Steigerung des Leistungsvermögens translatorischer Dichtungen durch Schmierfilmoptimierung im Dichtsystem. In: O+P Fluidtechnik für den Maschinen- und Anlagenbau, 4/2016, S. 70 – 73, ISSN 0341-2660, 2016
- [2] Wilke, M.; Jordan H.: Optimierte Tribologie im Dichtspalt zwischen Dichtung und Gegenlauf- fläche. In: Dichtungstechnikjahrbuch 2017, S. 212 – 217, ISBN 978-3-946260-00-4, 2016

Eigene Dichtungslösungen optimieren Hydraulikzylinder

Werkstoff-Know-how eröffnet neue Wege

Für die Funktion von Hydraulikzylindern haben Dichtungen eine zentrale Bedeutung. Und wenn Dichtungstechnik und Dichtelemente, die sonst vorwiegend am Markt beschafft werden, an ihre Grenzen kommen, geht man auch mal eigene Wege – bei der Entwicklung neuer Dichtsysteme und ihrer Prüfung. Das Ziel ist dabei immer, eine hohe Standzeit mit Dichtungen zu erreichen, die wenig Leckage und geringe Reibung aufweisen.

Besondere Anwendungen lassen sich oft mit konventionellen Dichtungen nicht zuverlässig abdichten. So ist man immer wieder gefordert, Dichtelemente selbst zu entwickeln. Nach der Entwicklung der Ringspaldichtung Servofloat® vor vielen Jahren folgte nun die Entwicklung der Dichtung Servoseal®. Diese Entwicklung war durch den stetigen Kompetenzaufbau bei der Anwendungsberatung im Zylinderbau und durch die langjährige Erfahrung beim systematischen Prüfen von Dichtungen möglich. Das Know-how im

Engineering von Prüfständen ist seit vielen Jahren so gewachsen, dass man inzwischen nicht nur in der Dichtungstechnik Hersteller und Anwender ist, sondern auch im Bereich Dichtungsprüfstände. Diese sind für die verschiedensten Prüfarten mit linearer oder rotativer Bewegung für den Markt verfügbar.

Selber prüfen steigert die Kompetenz

Neben der konzeptionellen Entwicklung von Servoseal® bedurfte es der praxisnahen Prüfung im Versuchsfeld. Hierzu wurde ein eigenentwickelter und -gebauter Dichtungsprüfstand (Bild 1) verwendet, der Dichtungs- und Führungssysteme auf deren



Bild 1: Dichtungsprüfstand, um das Zusammenspiel von Dichtungs- und Führungssystemen mit Gegenaufläichen zu prüfen (Bild:

Herbert Hänchen GmbH & Co. KG)



Bild 2: Speziell entwickelte Dichtungsträger

(Bild: Herbert Hänchen GmbH & Co. KG)



Bild 3: Besonderheit der neuen Dichtung ist der Rückhaltering aus Carbon (Bild: Herbert Hänchen GmbH & Co. KG)

(Bild: Herbert Hänchen GmbH & Co. KG)

Eignung im Zusammenspiel mit den Gegenläufigen überprüfbar. Dieser Universalprüfstand besteht aus vier unabhängig voneinander betriebenen Achsen, die jeweils zwei Prüfstangen bewegen. In speziellen Prüfkammern befinden sich die zu prüfenden Stangendichtringe, im vorliegenden Fall der Servoseal®. Durch die Verwendung von speziellen Dichtungsträgern (**Bild 2**) kann nahezu jede Dichtung in diese Prüfkammern eingebaut und in sehr umfangreichen und komplexen Tests geprüft werden. Durch die breit gefächerten Möglichkeiten, die die eigenentwickelte Software bietet, können dabei verschiedene Prüfscenarien anwendungsnah abgebildet werden. So lassen sich Sinusschwingungen oder frei parametrierbare Kurven fahren. Abhängig von den Bewegungsparametern wie Geschwindigkeit oder Beschleunigungen und von Fluideigenschaften können die Funktionsparameter online gemessen werden. Die Leckage wird im Becherglas erfasst und kumuliert dokumentiert. Reibkräfte können direkt über spezielle Kraftaufnehmer, die an der Prüfstange eingebaut sind, gemessen werden. So ist eine genaue Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Dichtung für jeden Betriebspunkt möglich. Denn neben der Prüfung der Leckage ist insbesondere die Reibkraft ein entscheidendes Prüfkriterium. Sowohl bei lang- als auch bei kurzhubigen Bewegungen, bei hoch- und niederfrequenten Oszillationen musste die neue Dichtung auf ihre Eignung hin geprüft werden. Diese Parameter beschreiben jeweils die Grenzen von klassischen berührenden Dichtungen bzw. von Drosselspaltdichtungen.

Eine neue Dichtungsstruktur

Servoseal® besteht aus einem dynamisch dichtenden Kunststoffring mit einem integrierten Rückhaltering aus H-CFK®, der eine zu starke Anpressung der Dichtung an die Dichtungslaufläche verhindert (**Bild 3**). Die Haft- und Gleitreibung der Dichtung liegt nur geringfügig über den Werten der Drosselspaltsysteme, der Ringspaltdichtung

	Differential-Zylinder Reihe 120, 160, 300	Gleichlauf-Zylinder Reihe 120, 300	Gleichlauf-Zylinder Reihe 320
	 Frequenz ≤ 7 Hz	 Frequenz ≤ 25 Hz	 Frequenz = unbegrenzt
	Amplitude > 6 mm Stangenleckage: keine Verschleiß: vorhanden Reibung: druckabhängig		
	Amplitude = unbegrenzt Stangenleckage: sehr gering Verschleiß: sehr gering Reibung: sehr gering, nicht druckabhängig		
	Amplitude = unbegrenzt Stangenleckage: vorhanden Verschleiß: keiner Reibung: keine		
			Amplitude = unbegrenzt Stangenleckage: vorhanden Verschleiß: keiner Reibung: keine

Bild 4: Dichtungssysteme am Verschluss beim Einsatz in unterschiedlichen Baureihen

(Bild: Herbert Hänchen GmbH & Co. KG)

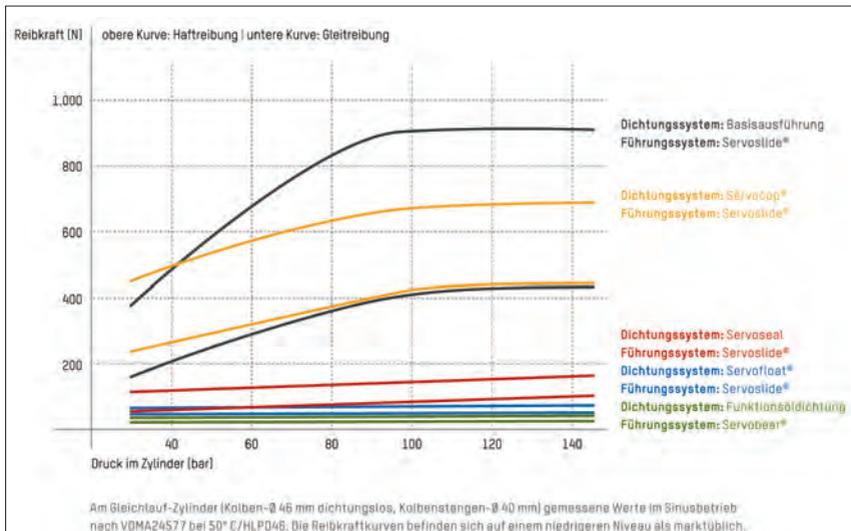


Bild 5: Je geringer der Abstand zwischen Haft- und Gleitreibung desto kleiner ist der Stick-Slip-Effekt. Je flacher die Kurve, desto unabhängiger ist die Reibkraft vom Druck. Bei diesen Parametern ist das Verhalten von Servoseal dem von Drosselspaldichtungen ähnlich

(Bild: Herbert Hänchen GmbH & Co. KG)

Servofloat® oder dem hydrostatischen Lager Servobear® und weit unter den Werten herkömmlicher berührender Dichtsysteme (**Bilder 4 und 5**). Die Dichtung kann bei minimaler Reibung an der Kolbenstange und auch am Kolben eingesetzt werden. Sie ist sowohl für die Prüfzylinder-Baureihe 320 als auch für die Hydraulikzylinder-Baureihe 300 und 120 erhältlich und kann in vielen Anwendungen Drosselspalt dichtungen ersetzen oder diese bei anderen Anwendungen ergänzen. Gerade so erschließen sich technisch und wirtschaftlich neue Möglichkeiten. Energieeffiziente Anwendungen, extrem kurzhubige Amplituden oder Vibrationen im Dauerbetrieb, hohe Leichtgängigkeit und wenig Reibung ohne Funktionsöl – all das sind Einsatzbereiche für diese Dichtung.

Alternative zum klassischen berührenden Dichtsystem

Damit steht eine berührende Dichtung ohne die Nachteile konventioneller Dichtungssysteme zur Verfügung. Bei einer klassischen Servocop®-Dichtung z.B. presst der hydraulische Druck die Dichtungsringe wie Stufenring und Nutring auf die Gegenauflfläche, was zu einer hohen Dichttheit bei guten Laufeigenschaften führt. Reibung und Verschleiß der Dichtungen steigen aber mit zunehmendem Druck. Vor allem können Stick-slip-Effekte auftreten, die eine leichtgängige Bewegung des Zylinders erschweren. Werden über einen längeren Zeitraum Amplituden gefahren, die kleiner sind als die Breite der Primärdichtung, kann der Schmierfilm unter der Dichtkante abreißen. Denn hier ist die Bewegung zu kurz, um neues Fluid als Schmierstoff zwischen Dichtung und Lauffläche zu fördern. Das führt zu Verschleißerscheinungen sowohl auf den Dichtflächen als auch auf den Gegenauflflächen von Zylinderrohr oder Kolbenstange, indem sich die Dichtung in die Lauffläche eingräbt und dabei die metallischen Bauteile und die Dichtung selbst beschädigt. Dieser Effekt tritt mit der neuen Dichtung nicht auf, da der H-CFK-Rückhaltering eine zu starke Anpressung verhindert.

Die passende Baureihe für den Einsatz

Für hochdynamische Anwendungen mit großen Seitenkräften ist die massiv ausgeführte Prüfzylinder-Baureihe 320 unerlässlich, um die mechanische Steifigkeit des Zylinders hochzuhalten. Diese Baureihe erlaubt auch die direkte Montage von Speichern und Regelventilen an den Zylinder, was hohe Beschleunigungen ermöglicht. Für dynamische Prüfanwendungen mit Schwingungen bis 25 Hz können aber auch die schlankeren Reihen 120 oder 300 eingesetzt werden, entweder in Gleichlaufausführung oder – bis zu einer Grenze von 7 Hz – auch in Differenzialausführung. Durch Verwendung des neuen Dichtungssystems lassen sich jetzt die Einsatzmöglichkeiten der Baureihen hinsichtlich der Reibeigenschaften und Amplituden verschieben. So ist es in vielen Anwendungen möglich, auf die schlankeren Reihen 120 oder 300 zu wechseln.

Schon heute sind durch die hochpräzisen Bauteile der Reihe 320 Drosselspaldichtungen am Kolben und an der Kolbenstange möglich, was nahezu unbegrenzte Einsatzmöglichkeiten bietet. Aber auch in dieser Reihe bietet Servoseal® Vorteile. So kann z.B. der funktionsbedingte Leckölstrom der Drosselspaldichtung am Kolben auf ein Minimum reduziert werden, was den Antrieb energetisch deutlich verbessert. Bei den schlanken Reihen 120 oder 300 war am Kolben bisher eine berührende Dichtung erforderlich, was die Einsatzgrenzen auch bei Verwendung von Drosselspaldichtungen an der Stange reduziert hat. Daher waren bislang z.B. kurzhubige Bewegungen mit solchen Zylindern nicht möglich. Anwender, die nicht hochdynamisch fahren, aber kleine Amplituden haben, nutzen bereits die Möglichkeit, auf diese schlankere Baureihe umzusteigen, und sparen in Summe damit Kosten. Nicht nur in der Anschaffung des Zylinders, sondern auch im kompletten Handling.

Raum für Austausch
Ideen. Wissen. Kontakte.



© Fotolia/RAWpixel.com

**Jetzt
anmelden und
netzwerken!**

In unseren Fachseminaren und -foren zeigen Ihnen Experten Lösungsalternativen auf – auch Inhouse

- Polymere Werkstoffe: Eigenschaften und Grenzen (Silikon, TPE, PU, Elastomere etc.)
- Spezifikation von Werkstoffen
- Schadensanalysen von Dichtungen
- Statische und Dynamische Dichtsysteme
- Klebetechnik, DIN 2304
- Flüssigdichtsysteme, Dosiertechnik
- Qualitätsmanagement
- u.v.m.

www.isgatec.com > Akademie

Ihre Fragen beantwortet Stefanie Wüst
Tel.: 0049(0)621-71 768 88-2

ISGATEC[®]
AKADEMIE

Leckage um bis zu 50% verringern

Weiterentwicklung von berührungslosen Wellendichtungen

Berührungslos arbeitende Wellendichtungen findet man in vielen Anwendungen der Energie-, Verfahrens- und Antriebstechnik. Neben den Drossel-Labyrinthdichtungen, die im klassischen Turbinenbau zum Einsatz kommen, werden zur Abdichtung von Gasen Drosselspalt-dichtungen mit Kohleschwimmringen eingesetzt, die ein wesentlich günstigeres Leckageverhalten zeigen [1]. Ausgehend von Standard-Kohleschwimmringdichtungen wurde eine neue Wellendichtung konzipiert. Die Leckagen konnten dabei um bis zu 50% reduziert werden. Ein neues Dichtringdesign mit breiteren Dichtringen und einer optimierten Ringgeometrie verbessert die Dichteffizienz.

Berührungslose Dichtungen weisen gegenüber anderen Dichtungsprinzipien einige Vorteile auf. Oft werden keine zusätzlichen Bauteile auf der Welle montiert, was zusätzliche Wellenschwingungen minimiert. Weiterhin ist die Reibleistung der Dichtung äußerst gering. Die thermische Beanspruchung durch Reibung bleibt auch bei sehr hohen Drehzahlen begrenzt. Dementsprechend niedrig ist auch die Energieaufnahme. Neben axialen Bewegungen der Welle, wogegen dieses Dichtungsprinzip weitgehend unempfindlich ist, können auch radiale Bewegungen in gewissen Grenzen ausgeglichen werden.

Naturgemäß ist das Leckageverhalten von berührungslosen Dichtungen schlechter als bei Kontaktdichtungen. Gerade deshalb ist die Optimierung des Leckageverhaltens besonders wichtig. Leckagen bedeuten, abhängig vom Einsatzfall, einen Verlust von wertvollen, ggf. auch umweltschädlichen Prozessgasen, den Verbrauch von kostenintensiven Sperr- und Spülgasen und letztlich auch einen Mehrverbrauch an Energie durch einen verschlechterten Wirkungsgrad der Gasverdichtung in Kompressoren.

Im Gegensatz dazu beschränkt der zur Verfügung stehende Einbauraum die mögliche Anzahl der Dichtelemente und erschwert damit das Erreichen einer hohen Dichteffizienz.



Bild 1: Schwimmringdichtung SDW 20 ND-Ausführung, im Vordergrund radial geschnittene Kohleringe (Bild: STASSKOL GmbH)



Bild 2: Schwimmringdichtung SDK 40 mit radial geschnittenen Kohleringen in Kammerausführung (Bild: STASSKOL GmbH)

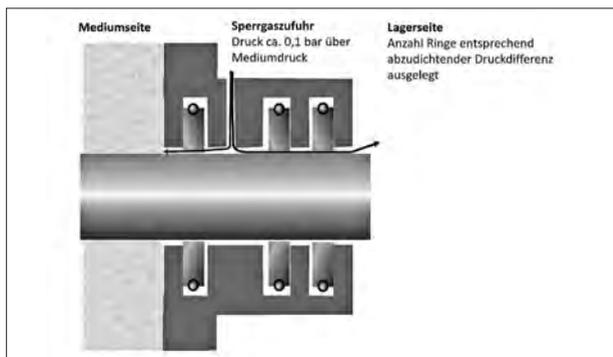


Bild 3: Schema einer Dichtung mit Sperrgas (Bild: STASSKOL GmbH)

Industriestandards für berührungslose Kohleschwimmringdichtungen

Kohleschwimmringdichtungen für geringe Drücke

Für niedrige und mittlere Druckbereiche werden radial geschnittene Dichtringe eingesetzt. Diese können ohne Demontage der Welle eingebaut werden. Je nach Dichtungstyp sind auch die Dichtungsgehäuse geteilt ausgeführt, was den Austausch von Dichtungselementen weiter vereinfacht. Eine entsprechende Dichtung ist in **Bild 1** vorgestellt. **Bild 2** zeigt eine Kammerausführung, die im Druckbereich bis ca. 20 bar eingesetzt werden kann. Die geteilten Kohleringe werden von Schlauchfedern zusammengehalten und gegen Verdrehen gesichert.

Abhängig von der abzudichtenden Gasart bzw. der Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen werden die Dichtungen für Gassperrung typischerweise mit Stickstoff ausgeführt (**Bild 3**).

Kohleschwimringdichtungen für höhere Drücke

Für höhere Drücke sind die segmentierten Kohleringe nicht geeignet. Hier werden einteilige Ringe verwendet, die je nach Druck- und Temperaturbereich der Dichtung bandagiert werden. Um den jeweiligen Druckbereichen standzuhalten, sind die Dichtungsgehäuse generell gekammert ausgeführt. In **Bild 4** ist eine typische Kohleschwimringdichtung für Druckbereiche bis 160 bar dargestellt. Diese Dichtungen sind modular aufgebaut. Die Anzahl der benötigten Ringe hängt von der abzudichtenden Druckdifferenz ab. Dies führt, gerade im Bereich höherer Drücke, zu erheblichen Baulängen, welche sich durch eventuell erforderliche Sperrgasanschlüsse bzw. Zwischenabsaugungen weiter vergrößern.



Bild 4: Schwimringdichtung SDK 80 für Hochdruckanwendungen, Ausführung mit bandagierten Kohleringen (Bild: STASSKOL GmbH)

Weiterentwicklung einer Schwimringdichtung hinsichtlich Reduktion des Einbauraumes

Entwicklungsaufgabe und Problemlösung

Die Aufgabe bestand darin, eine gegenüber der im **Bild 4** dargestellten Standardausführung kompaktere Hochdruckdichtung zu entwickeln, welche trotz geringerer Abmessungen ein gleichwertiges oder besseres Leckageverhalten aufweist. Die abzudichtenden Parameter sind:

- Medium: Prozessgas
- Druck: 40 bar
- Temperaturbereich der Maschine: 0°C bis 150°C

Bei der Wahl der geeigneten Ringform ist zunächst offensichtlich, dass breitere Ringe bei gleichbleibender Dichtlinie ein kompakteres Design ermöglichen. Bei den bisher verwendeten Ringen mit einer Breite von ca. 5 mm bzw. 6 mm werden für 25 mm Dichtlinie sechs Stahlkammern benötigt, die die axialen Abmessungen der Dichtung maßgeblich bestimmen. Durch Zusammenlegung von einzelnen Ringen zu einem breiteren Dichtring entfällt eine Vielzahl dieser Kammern, was zu einer kürzeren Bauweise (**Bild 5**) führt. Die Verringerung der Anzahl der Kammern bietet auch den Vorteil, dass die sekundären Leckagen, welche sich an den statischen und sich berührenden Teilen der Dichtung ausbilden, drastisch verringert werden können.

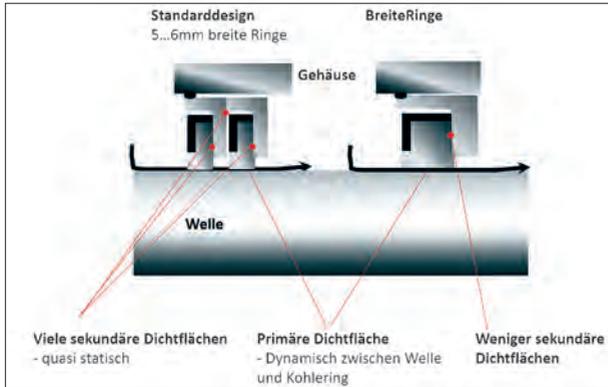


Bild 5: Verringerung der sekundären Dichtflächen durch Ausführung breiterer Ringe

(Bild: STASSKOL GmbH)

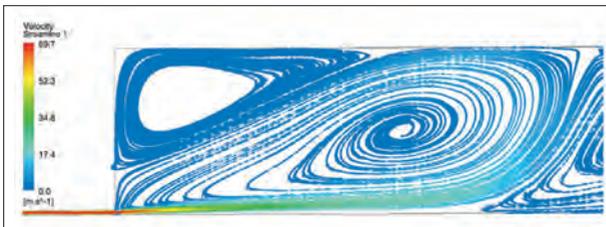


Bild 6: CFD-Berechnung der Strömung in einer Nut

(Bild: STASSKOL GmbH)

Da die Spaltweite zwischen Welle und Kohlering zur Erzielung geringer Leckagen jedoch sehr klein sein soll, sind der axialen Breite der Dichtringe Grenzen gesetzt. Andernfalls führen Winkelabweichungen, welche einerseits durch die Einbauverhältnisse der Dichtung, andererseits durch nicht vermeidbare Fertigungstoleranzen der Dichtungsteile begründet sind, zum dauerhaften Kontakt zwischen Kohlering und Welle bzw. zum Verklemmen des Dichtringes. Die Einbaubedingungen des konkreten Anwendungsfalls erlauben eine maximale Ringbreite von 15 mm bzw. 10 mm, welche den sicheren Einsatz unter allen Betriebsbedingungen ermöglicht.

Der Dichtring selbst soll der Strömung einen möglichst großen Widerstand entgegenzusetzen. Um die geeignete Ausführung festzulegen, muss zunächst die Strömungsform im Dichtspalt bestimmt werden. Dies erfolgt mithilfe der Reynoldszahl:

$$Re = \frac{2 \dot{m} h}{A \eta} \quad (1)$$

Dabei steht \dot{m} für den Gasmassstrom im Dichtspalt, h für die Spaltweite, A für die gesamte Spaltfläche und η für die dynamische Viskosität des Gases. Bei einteiligen Ringen

ist eine Mindestspaltweite von ca. 30 µm erforderlich, um das Verklemmen der Kohleringe auf der Welle zu verhindern.

Im oben genannten Betriebspunkt beträgt die Reynoldszahl in der Standardausführung mit fünf Dichtringen etwa 20.000. Dies bedeutet, dass die Strömung kein laminares Profil mehr aufweist [2] und die Trägheitskräfte die Strömung dominieren. Eine Minimierung der Leckage ist damit am effektivsten über Labyrinthnuten zu erzielen, in welchen der abzudichtende Druckunterschied mehrmals über Geschwindigkeitsaufbau des Gases abgebaut wird.



Bild 7: Ringe mit verschiedener Nutausführung und -anzahl für Leckageuntersuchungen

(Bild: STASSKOL GmbH)

Es wurden mehrere Nutformen experimentell sowie mit CFD untersucht, um die erforderlichen Nutabmessungen zu bestimmen (**Bilder 6 und 7**). Einerseits sollen für eine hohe Effektivität möglichst viele Nuten eingebracht werden können, andererseits ist die Wirkung kleiner Nuten durch Spaltüberbrückung gemindert. Neben den strömungstechnischen Aspekten der Nutgestaltung ist auch die mechanische Festigkeit ein entscheidender Faktor bei der Festlegung der Nutgeometrie.

Aus der Vielzahl von Versuchen und Rechenergebnissen hat sich ergeben, dass die Ausführung von zwei breiten Nuten die höchste Dichteffizienz gewährleistet.

Weiterentwickelte Dichtung und Testergebnisse

Die neu entwickelte Dichtung SDS 100 besteht aus zwei Dichtringen mit 15 mm bzw. 10 mm axialer Breite. Es ist ein Anschluss für Sperrgas vorhanden. Zur Sperrung wird Stickstoff verwendet. Die **Bilder 8 und 9** zeigen eine Gegenüberstellung der Standardausführung und der neu entwickelten Dichtung. Ein Testmuster wurde auf dem hauseigenen Prüfstand im direkten Vergleich mit der Standardausführung getestet (**Bild 10**). Die technischen Daten des Testmusters sind:

- Wellendurchmesser: 45 mm
- Wellenwerkstoff: Mn16Cr5 mm Wolframcarbid beschichtet
- Dichtungsausführung: Zwei Dichtringe 15mm und 10 mm axiale Breite
- Werkstoff Dichtringe: Elektrographit mit Antimonimprägningung
- Drehzahl der Welle: 10.000 min⁻¹

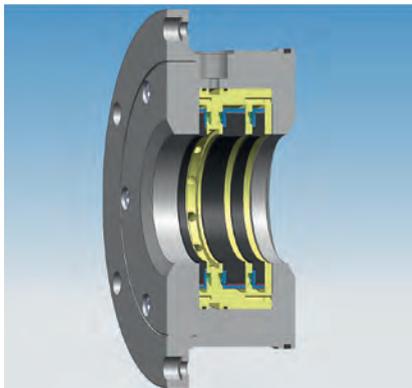


Bild 8: Neu entwickelte Schwimmringdichtung SDS 100 (Bild: STASSKOL GmbH)

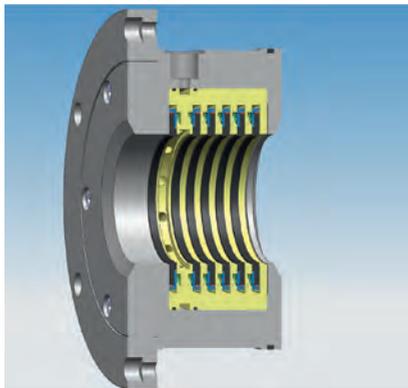


Bild 9: Standardausführung einer Hochdruckdichtung in Kammerausführung
(Bild: STASSKOL GmbH)

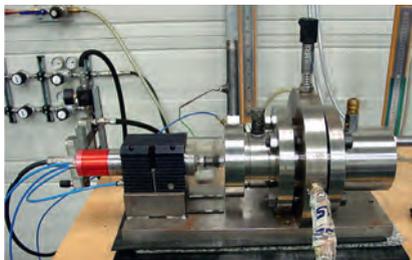


Bild 10: Prüfstand für Wellendichtungen
(Bild: STASSKOL GmbH)

Die Standardausführung wurde mit fünf Ringen mit einer Breite von jeweils 5mm bestückt.

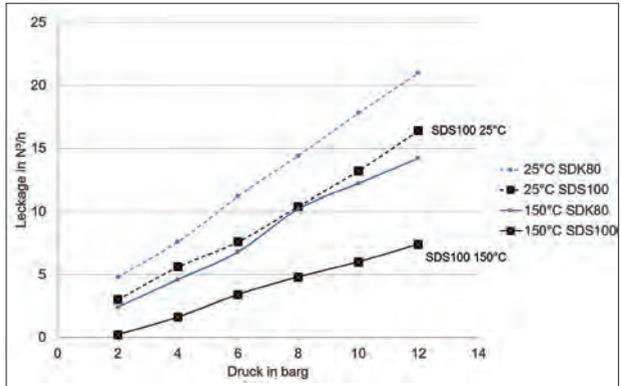
In **Bild 11** sind die Messergebnisse der neu entwickelten Dichtung denen der Standardausführung gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass die Leckagen teilweise bis zu 50% zurückgehen. Dafür ist einerseits die zusätzliche Dichtwirkung einer weiteren Einschnürung und andererseits die drastische Reduktion der sekundären Leckagen verantwortlich.

Die Reduktion der Leckage mit steigender Betriebstemperatur ist ein typisches Verhalten der Kohleschwimmringdichtungen. Die thermische Ausdehnung der Welle, welche meist aus Stahlwerkstoffen gefertigt ist, liegt wesentlich über der thermischen Ausdehnung von Kohlewerkstoffen:

ε Stahl: 11 x 10⁻⁶/K (Kohlenstoffstahl) 16 x 10⁻⁶/K (Edelstahl)
ε Elektrographit: 3 x 10⁻⁶/K bis 4,5 x 10⁻⁶/K

Der Spalt zwischen Welle und Kohlering ist daher bei der maximalen Betriebstemperatur am geringsten, was sich in der kleinsten Leckage äußert.

Bild 11: Vergleich der gemessenen Leckagen der neu entwickelten Dichtung SDS100 gegenüber der Standardausführung SDK80 bei 25 °C sowie 150 °C, Ringe ohne Titanmäntel (Bild: STASSKOL GmbH)



Bei den einteiligen Ringen der Hochdruckdichtungen muss dieses Verhalten bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Die Ringe werden auf die maximale Betriebstemperatur ausgelegt. Dabei muss ein Mindestspalt berücksichtigt werden, welcher die Einbaubedingungen von Welle und Dichtung sowie das Anfahrverhalten der Maschine berücksichtigt. Die Temperaturempfindlichkeit kann verringert werden, wenn die Ringe mit Metallmänteln bandagiert werden, da die Metallmäntel die thermische Ausdehnung der Kohlerringe erhöhen und damit das Ausdehnungsverhalten der Ringe dem der Welle angleichen [1, 3, 4]. Um die Zentrierwirkung des fließenden Leckgasstromes, welche den Kohlerring berührungslos auf der sich drehenden Welle gleiten lässt, möglichst wenig zu beeinträchtigen, werden Bandagen aus Titan verwendet (Bild 12).



Bild 12: Neu entwickelte Dichtung SDS 100 in der Ausführung mit titanummantelten Dichtringen (Bild: STASSKOL GmbH)

Die vorgestellte Dichtung befindet sich derzeit in der erfolgreich verlaufenden Betriebserprobung beim Kunden. Die Reduktion der Leckagen im Betrieb konnte bereits bestätigt werden. Gegenüber der Standardausführung erweist sich die Montage der Dichtung als einfacher, da weniger Teile vorhanden sind.

Sie kann für beliebige Gase adaptiert und an verschiedenste Einbaubedingungen wie Sperr- bzw. Spülgasanschlüsse oder Zwischendruckabsaugungen angepasst werden. Gegebenenfalls muss die Ringbreite für die konkreten Einsatzbedingungen der abzudichtenden Maschine modifiziert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Aus dem bestehenden Industriestandard für Kohleschwimringdichtungen wurde eine Wellendichtung mit dem Ziel der Reduktion von Leckagen weiterentwickelt. Die Beurteilung der Einbaubedingung ergab, dass die Ringbreite wesentlich erhöht werden konnte. Dies ermöglichte eine Optimierung der Drosselwirkung der Dichtringe durch eine spezielle Nutgeometrie und eine Reduktion von sekundären Leckagen innerhalb der Dichtung. Sowohl auf dem hauseigenen Prüfstand als auch bei der Felderprobung hat sich eine Reduktion der Leckagen um bis zu 50% ergeben. Die weiterentwickelte Dichtung kann an verschiedenste Einsatzbedingungen angepasst werden.

Literatur

- [1] Müller, H. K., *Abdichtung bewegter Maschinenteile*, Medienverlag Ursula Müller, Waiblingen 1990
- [2] Sigloch, H., *Technische Fluidmechanik*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2014
- [3] Müller, H.K., *Dichtungstechnik*, Institut für Maschinenelemente Universität Stuttgart, 9. Auflage 2015
- [4] American Petroleum Institute, *Axial and Centrifugal Compressors and Expander – Compressors*, API Standard 617, 8th Edition 2014



Flüssigdichtsysteme

>> Material und Applikation aus einer Hand: RAMPF entwickelt und produziert sowohl Dichtungssysteme als auch Misch- und Dosieranlagen.

Höchste Qualität für Computertomographen & Co.

Blasenfreier Verguss von Hochspannungskondensatoren für die Medizintechnik

Der deutsche Kondensatorhersteller Fischer & Tausche Capacitors (FTCAP) hat mit einem neuen Vergussprozess die Basis für weiteres Wachstum geschaffen: Bei der Produktion von Hochspannungskondensatoren, die auch für medizinische Anwendungen zum Einsatz kommen, sorgt eine leistungsfähige Vakuumanlage für einen blasenfreien Verguss und damit deutliche Produktivitäts- und Qualitätszuwächse.

Von der Fotokamera bis zum Herzschrittmacher, vom Hybrid-Rennauto bis hin zum solarbetriebenen Schiff: Kondensatoren sind aus Industrie und Alltag kaum mehr wegzudenken. In elektrischen Systemen sorgen sie u.a. dafür, dass Spannungsspitzen geglättet und Fehlströme eliminiert werden. Bei Blitzanwendungen – z.B. in Radarfallen oder bei professionellen Blitzgeräten in Fotostudios – dienen Kondensatoren als elektrische Energiespeicher. Nach dem Aufladen auf eine bestimmte Spannung sind sie in der Lage, Verbraucher mit hohem, kurzzeitigem Leistungsbedarf anzutreiben. In Flugzeugen sorgen die passiven Bauteile u.a. für die Energieversorgung der Brems- und der Onboard-Systeme. Auch im Bereich der E-Mobilität kommen Kondensatoren zum Einsatz, hier dienen sie z.B. zur Stromversorgung der Elektromotoren und zur EMV-Reduzierung.

Schutz vor Teilentladungen und Überschlägen

Um die steigende Nachfrage nach seinen Produkten bewältigen zu können, erweiterte der Kondensatorhersteller seine Fertigungsstätten erst kürzlich um eine 600 m² große Halle. Speziell für die Fertigung von Hochspannungskondensatoren für die Medizintechnik wurde zudem ein neuer Vergussprozess etabliert. In der Medizintechnik kommen Kondensatoren mit Nennspannungen von mehr als 120 kV u.a. in Compu-

Von André Tausche¹, Geschäftsführer; Andreas Arlt², Vertriebsingenieur; Sebastian Piller³, Abteilungsleiter Technologiezentrum

¹ Fischer & Tausche Capacitors FTCAP GmbH | www.ftcap.de

² WEVO-CHEMIE GmbH | www.wevo-chemie.de

³ Scheugenpflug AG | www.scheugenpflug.de

tertographen oder Röntengeräten (**Bild 1**) zum Einsatz. Sie glätten den Wechselstrom in Hochspannungskaskaden und gewährleisten so eine gute Strahlqualität. Die Kondensatoren müssen hier höchste Anforderungen in Bezug auf Sicherheit, Funktionalität und Lebensdauer erfüllen. Mit den bisherigen Vergussanlagen war dies jedoch nur unter hohem Aufwand zu erreichen.

Um bei Filmkondensatoren für Hochspannungsanwendungen optimale Vergussqualität und somit auch eine zuverlässige Funktion über ihre gesamte Lebensdauer hinweg sicherzustellen, ist ein Verguss unter Vakuum zwingend erforderlich (**Bild 2**). Dieses Verfahren schützt die Bauelemente nicht nur vor schädlichen äußeren Einflüssen wie Feuchtigkeit, Staub oder aggressiven Chemikalien. Ein Vakuumverguss verhindert darüber hinaus auch, dass Luft- bzw. Gasblasen mit dem Vergussmedium im Kondensatorgehäuse eingeschlossen werden. Im späteren Betrieb können diese Einschlüsse Teilentladungen verursachen, die die umgebende Isolierung schädigen und schließlich zu Überschlägen führen. Dies hätte schwere bis irreparable Schäden am Endgerät und damit auch beträchtliche wirtschaftliche Kosten zur Folge. Um den hohen Qualitätsansprüchen gerecht werden zu können, ist neben einer cleveren Prozessführung auch eine ausgereifte Anlagentechnik erforderlich. Maßgeblich sind hier sowohl die vor- und nachgelagerten Prozessschritte als auch eine Materialaufbereitung und -förderung unter Vakuum. Unter Berücksichtigung sämtlicher Einflussgrößen lässt sich so die notwendige Blasenfreiheit sowie ein effektiver Schutz vor Feuchtigkeit über den gesamten Prozess hinweg gewährleisten.



Bild 1: In der Medizintechnik werden Hochspannungskondensatoren u.a. in Computertomographen, Röntengeräten oder Kernspintomographen verwendet

(Bild: stock.adobe.com_ Trish23)



Bild 2: Für eine zuverlässige Funktion über ihre gesamte Lebensdauer müssen Hochspannungskondensatoren unter Vakuum vergossen werden – hier im Bild ein vergossener Filmkondensator

(Bild: Scheugenpflug AG)

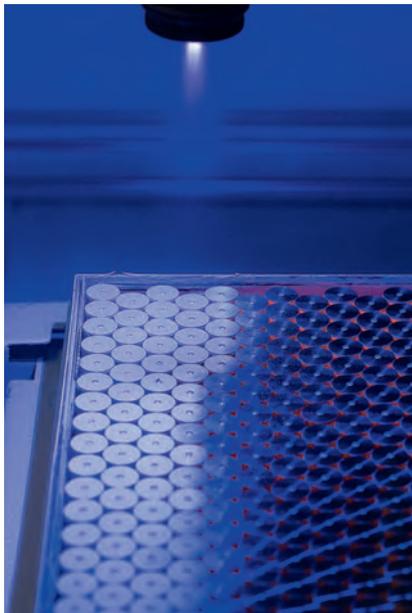


Bild 3: Beim Schoopieren werden die seitlich herausragenden Filmenden des Wickels mittels einer Sprühmetallisierung elektrisch kontaktiert. Als Kontaktmetalle kommen Zinn, Zink und/oder Aluminium zum Einsatz

(Bild: FTCAP GmbH)

Exkurs: Herstellung von Folienkondensatoren

Die Basis für die Produktion von Folienkondensatoren bildet eine „Mutterrolle“ aus Kunststoffolie. Diese wird unter Vakuum ein- oder beidseitig mit einer nur wenige Atomlagen dicken Schicht aus Aluminium oder Zink bedampft. Die Spannungsfestigkeit des späteren Kondensators hängt vom Dielektrikum ab: Für höhere Spannungen sind dickere Dielektrika notwendig. Die metallisierte Mutterrolle wird anschließend in kleinere Rollen geschnitten. Je nach Bauart des Kondensators definiert die Breite bzw. Höhe dieser kleineren Rollen die Abmessungen. Im nächsten Schritt werden zwei metallisierte Folienrollen mit Versatz übereinandergewickelt, sodass jeweils eine Kante der Metallisierung aus einer der beiden Seitenflächen des Wickels herausragt. Bei Box-Kondensatoren wird der Wickel dann in einem zusätzlichen Prozessschritt mittels Druck geplättet. Darauf folgt die „Schoopierung“: Hier werden die seitlich herausragenden

Filmenden mittels einer Sprühmetallisierung elektrisch kontaktiert (**Bild 3**). Beim anschließenden Ausheilen oder „Burn-in“ legt man eine geeignete Spannung an den schoopierten Wickel, womit eventuell vorhandene Fehlstellen an der Folie ausgebrannt werden. Auf diesen Schritt folgt das Anschweißen bzw. Anlöten der Anschlusspins an die schoopierten Seitenflächen der Wickel. Diese werden dann in einem Gehäuse platziert und blasenfrei unter Vakuum vergossen. Der Verguss verhindert, dass Feuchtigkeit in die Wicklungen kriecht und sorgt für die notwendige Langzeitstabilität des Kondensators. Im letzten Prozessschritt folgt schließlich die elektrische Endkontrolle: Hier wird jeder Kondensator auf die Einhaltung des spezifizierten Kapazitätswertes, des Verlustfaktors und der Impedanz getestet. Um Kriechströme beim Messen zu verhindern, führt man die Messungen ausschließlich in vollklimatisierten Räumen bei geringer Luftfeuchtigkeit durch.

2K-Epoxid mit hoher Dauertemperaturbeständigkeit

Vor der Entscheidung für eine passende Anlagentechnik für den neuen Vergussprozess stand die Suche nach dem passenden Vergussmaterial. Für „normale“ Kondensatoren werden Gießharze auf Basis von Polyurethan (PU) verwendet. Da die Hochspannungskondensatoren im Betrieb allerdings mit Flüssigkeiten wie Transformatoröl in Kontakt kommen, sind hier Epoxidharze besser geeignet.



Bild 4: Links: mit Feuchtigkeit versetztes, aufgeschäumtes PU, rechts: korrekt unter Vakuum aufbereitetes und vergossenes PU

(Bild: Scheugenpflug AG)

Polyurethane bieten grundsätzlich ein sehr breites und vielseitig modifizierbares Eigenschaftsspektrum. Das macht sie zu einer beliebten und in der industriellen Produktion häufig eingesetzten Stoffgruppe. Weiterhin zeichnen sich PU-Vergussmassen durch eine gute maschinelle Verarbeitbarkeit, einen relativ geringen Volumenschwund sowie eine moderate Beweglichkeit nach der Aushärtung aus. Polyurethane sind allerdings z.T. empfindlich gegen Feuchtigkeit und müssen deshalb adäquat gelagert und vor dem Verguss unter Vakuum aufbereitet werden (**Bild 4**).

Im Vergleich dazu zeichnen sich Epoxidharze durch eine gute Temperaturstandfestigkeit, eine geringe Brennbarkeit und hohe Glühdrahtbeständigkeit aus. Durch ihre hohe Härte, ihren hohen E-Modul und die gute mechanische Stabilität in ausgehärtetem Zustand eignen sich diese Vergussmaterialien zudem gut für Bauteile, die in anspruchsvollen Betriebsumgebungen eingesetzt werden. Auch die geringe Feuchtigkeitsaufnahme sowie die hohe chemische Beständigkeit von Epoxid sind zentrale Eigenschaften für die vorliegende Anwendung.

Im Zuge verschiedener Tests erbrachte das heißhärtende 2K-Epoxidharz WEVOPOX 8260 FL/WEVODUR 1018 die gewünschten Ergebnisse. Es zeichnet sich vor allem durch eine hohe Dauertemperaturbeständigkeit sowie ein günstiges Fließ- und Imprägnierverhalten aus. Auch dank seines hohen Vernetzungsgrads, der daraus resultierenden Härte sowie der geforderten geringen Wasseraufnahme eignet es sich optimal für den Verguss von Hochspannungskondensatoren. Nach Abschluss der Tests wurde das Epoxidharz nochmals modifiziert, um es noch genauer an die vorliegende Anwendung anzupassen und die Handhabung zu optimieren.



Bild 5: Mit professionellem Equipment und einem Team aus Vergussexperten können im Technologie- und Anwenderzentrum des Systemanbieters praxisgerechte Lösungen entwickelt werden – hier der Verguss unter Vakuum (Bild: Scheugenpflug AG)



Bild 6: Das Vakuumdosiersystem VDS U (hier mit Aufbereitungs- und Förderanlage A310) eignet sich aufgrund seiner drei Verfahrenen für den Verguss mehrerer Teile in einem Durchgang sowie bei schwierigen Bauteilgeometrien und komplexen Vergussprogrammen

(Bild: Scheugenpflug AG)

Seriennahe Lösung dank vorbereitender Dosierversuche

Um die optimale Anlagentechnik für den geplanten Vergussprozess zu ermitteln, führten die Projektpartner gemeinsam vorbereitende Dosierversuche im hauseigenen Technologiezentrum des Systemlieferanten durch. In diesem Zuge konnten der Materialpartner und der Systemlieferant auch auf Erfahrungen aus einem früheren, gemeinsamen Projekt zurückgreifen, das mit einem sehr ähnlichen Material umgesetzt worden war. Dosierversuche sind grundsätzlich zu empfehlen, wenn neue Dosierprozesse etabliert oder neue Materialien eingesetzt werden sollen. Zusammen mit einem Team aus Vergussexperten können hier bereits vor dem Serienhochlauf grundlegende Fragen geklärt werden – vom bestmöglichen Equipment bis hin zu den erreichbaren Taktzeiten (Bild 5).

Im Zuge der Dosierversuche erzielte die Vakuumdosieranlage VDS U die geforderten Ergebnisse in Bezug auf die notwendige Blasenfreiheit sowie die Wiederholgenauigkeit des Vergusses. Das Universalsystem eignet sich insbesondere für die Serienproduktion mittlerer und großer Bauteile. Auch im Falle schwieriger Teilegeometrien oder komplexer Vergussprogramme ist die VDS U das System der Wahl. Die Anlage basiert auf den standardisierten Bausteinen eines Sys-

tembaukastens. Dieser orientiert sich an den Plattformstrategien der Automobilindustrie und bietet Anwendern höchste Flexibilität bei kurzen Lieferzeiten sowie eine attraktive Preisgestaltung. Auch im Falle sehr beengter Fertigungsumgebungen erlau-

ben die modularen Bausteine eine für die jeweilige Anwendung maßgeschneiderte, bedarfsgerechte Anlagenplanung.

Ein System für alles

Kleinserien und Sonderanfertigungen machen einen bedeutenden Teil des Portfolios des Kondensatorherstellers aus. Deshalb setzt man vorwiegend auf manuelle und teilautomatisierte Prozesse. Beim bestehenden Fokus auf kleinere und mittlere Serien macht eine vollautomatisierte Produktionsumgebung auch wenig Sinn. Hier kommt es vielmehr auf Arbeitsplätze an, die sich schnell und unkompliziert umbauen lassen. Das setzt vor allem eine Anlage voraus, die die notwendige Flexibilität bietet. Mit der VDS U (Bild 6) sind diese Anforderungen erfüllt. Die Vakuumanlage eignet sich insbesondere für Anwendungen mit einer großen Bauteilvielfalt: Dank der 400 x 300 mm großen, verfahrbaren Palettschublade können Teile mit den unterschiedlichsten Größen und Geometrien in einer Anlage vergossen werden. Die drei Verfahrrachsen der VDS

U erlauben zudem den Verguss mehrerer Bauteile in einem Durchgang. Das sorgt für kurze Zykluszeiten – bei gleichzeitig höchster Vergussqualität.

Flexibilität ist auch mit Blick auf die erforderlichen Vergussmengen gefragt: Die Kondensatoren variieren oft stark in Bezug auf ihre Größe und Form. Die Qualität des Vergusses muss dabei natürlich gleichbleibend hoch sein – ob nun 2 g Material vergossen werden oder 100 g. Zur Ausbringung exakter und reproduzierbarer Materialmengen kommt deshalb der bewährte Dos P016-Kolbendosierer (Bild 7) zum Einsatz. Dieser deckt nicht nur ein breites Anforderungsspektrum ab, mit ihm lassen sich auch druck-, feuchtigkeits- oder scherempfindliche Vergussmedien schonend dosieren, ohne Veränderungen des Materials befürchten zu müssen. Um beim verwendeten



Bild 7: Der robuste und vielseitig einsetzbare Dos P016 sorgt dank seiner exakt dimensionierten Dosierzylinder für die Ausbringung präziser, reproduzierbarer Materialvolumina bzw. ein jederzeit konstantes Mischungsverhältnis bei 2K-Materialien

(Bild: Scheugenpflug AG)

Epoxidharz optimale Fließeigenschaften zu erreichen, wurde der Dosierer zusätzlich mit einer Dosierkopf- und einer Mischrohrheizung ausgestattet. Diese erwärmen das Material kurz vor dem Verguss, reduzieren so seine Viskosität und sorgen auf diese Weise auch bei komplexen Geometrien für reproduzierbare und blasenfreie Vergussergebnisse.

Die Aufbereitung und Förderung des Epoxids zur Vergussanlage übernimmt eine A310. Mit diesem System lassen sich größere Mengen an selbstnivellierenden Vergussmaterialien prozesssicher aufbereiten und fördern. Zudem verfügt diese Anlage über eine integrierte Vakuumfunktion, mit der sich Luftblasen im Medium bereits bei der Aufbereitung entfernen lassen. Dies ist wichtig, um beim späteren Vergussprozess Blasenfreiheit gewährleisten zu können. Durch Umwälzen und Zirkulieren wird einer Sedimentation der im Material enthaltenen Füllstoffe vorgebeugt. Hermetisch abgedichtete Materialleitungen, Pumpen und Ventile verhindern zudem die Wiedereinbringung von Luft während des Förderprozesses.

Zweistufige Aushärtung im Wärmeofen

Die zu vergießenden Kondensatoren werden manuell in die Anlage eingebracht und die Vergusskammer bis auf einen Wert von 20 mbar evakuiert. Je nach Größe werden die Gehäuse der Hochspannungskondensatoren daraufhin in einem oder mehreren Schritten mit dem Epoxidharz gefüllt. Gerade bei größeren Kondensatoren wird ein mehrstufiger Verguss benötigt, um die erforderliche Blasenfreiheit zu gewährleisten. Dabei wird eine bestimmte Menge an Material unter Vakuum in das Gehäuse dosiert, sodass der darin befindliche Wickel gänzlich mit Vergussmedium bedeckt ist. Bei der anschließenden Belüftung der Vakuumkammer wird das Epoxid durch den Druckaufbau noch tiefer in vorhandene Winkel und Spalten gepresst. Nach einer ersten Aushärtung des Materials erfolgt schließlich der Auftrag einer finalen Deckschicht.

Dem Verguss schließt sich eine optische Prüfung der Bauteile durch den Anlagenbediener an. Automatisiert lässt sich die Höhe des Vergusses in den Gehäusen nicht so leicht überprüfen, da sich schon die Filmdicke des Wickels innerhalb eines gewissen Toleranzbereichs bewegt. Die Materialschicht über dem Wickel sollte eine bestimmte Mindestdicke aufweisen, wenngleich eine leicht schwankende Füllhöhe hier kein Problem darstellt. Bei der abschließenden Aushärtung im Wärmeofen wird das vergossene Epoxid über 2 h bei 80 °C sowie über weitere 6 h bei 110 °C vernetzt.

Fazit

Aufgrund der intensiven Zusammenarbeit von System- und Materiallieferant sowie Endanwender konnte ein leistungsfähiger und präzise an die Anforderungen angepasster Vergussprozess realisiert werden. Der neue Vakuumprozess hat sich für den Kondensatorhersteller in mehrfacher Hinsicht gelohnt. Dank der ausgereiften Anlagentechnik kann mit einem blasenfreien Verguss höchste Qualität für die Anwender der Elektronikbauteile gewährleistet werden. Der automatisierte Vergussprozess erlaubt es zudem, auch höhere Stückzahlen problemlos zu bedienen. Das war vorher nicht möglich. Im Zuge des Projekts konnten zudem umfangreiche Erfahrungswerte aus der Materialverarbeitung und Prozesstechnik genutzt werden, die den Prozesshochlauf nachhaltig unterstützen.

Raum für Ergebnisse

Recherche. Wissen. Netzwerk.



©iStock.com/PeopleImages

**Das Online-Portal für den Bereich
Dichten. Kleben. Polymer.,
das Sie täglich effektiv unterstützt**

www.isgatec.com > Netzwerk

Was vermissen Sie?

Impulse an: skiefer@isgatec.com

ISGATEC[®]
NETZWERK

Kontinuierlich abdichten – ohne Zwischenlagerung

Mit Mold'n Seal getrennte Prozesse effizient kombinieren

Mit der angebrochenen Ära Industrie 4.0 steht nicht nur das Internet der Dinge im Vordergrund, sondern auch höchst mögliche Flexibilität in der Fertigung an Stelle konventioneller Massenfertigung. Dabei stehen die Fertigungskonzepte und -methoden bei den Kunststoff und Metall verarbeitenden Zulieferbetrieben der OEM ständig auf dem Prüfstand, effizient zu sein. Mit der Einführung des neu entwickelten Inline-Produktionsverfahrens Mold'n Seal konnte der Automobilzulieferer Weidplas eine effiziente Fertigung bei hoher Stückzahl auf kleinstem Raum realisieren.

Zielvorgabe war, unterschiedliche Fertigungsschritte in einer Inline-Fertigung zu integrieren, ohne den Produktionsprozess unterbrechen zu müssen und Spritzgussteile zwischenzulagern. Zusätzlich wurde gefordert die Teile, die im Autoinnenraum verbaut werden, mit einer emissionsarmen Schaumdichtung abzudichten. Vor diesem Hintergrund beauftragte der Automobilzulieferer einen Spritzgussmaschinenhersteller sowie einen Systemlieferant und Prozessspezialist für das Dichtungsschäumen, Kleben und Vergießen von Industrieteilen. Es galt bei diesem Projekt die Prozesseffizienz der gesamten Teileproduktion zu maximieren, Ausschuss zu minimieren und damit Produktionskosten zu senken. Ein Weg dahin konnte durch die Prozessintegration verschiedener Fertigungsschritte in einer Produktionszelle – dem Spritzgießen der Teile und dem Abdichten unmittelbar im Anschluss – erreicht werden.

Beide Zulieferunternehmen haben bei der Projektumsetzung eng zusammengearbeitet. Der Spritzgussmaschinenhersteller lieferte die Spritzgussanlage und das Entnahmergerät sowie den Sechs-Achs-Roboter. Eine Kühl- und Aushärtestrecke sowie ein Förderband übernehmen die Transportaufgaben in der Anlage. Für die Dosierung der emissionsarmen Schaumdichtung gemäß der FIPFG- (Formed in-place foam gasket) Dichtungstechnologie kommt die Misch- und Dosieranlage DM 402 mit dem Präzisionsmischkopf MK 625, in der Prozessausführung Mold'n Seal zum Einsatz. Die in vie-

Von Florian Kampf, Senior Marketing Manager Kommunikation & PR
Sonderhoff Holding GmbH | www.sonderhoff.com

Bild 1: Die Mold'n Seal-Anlage im Werk von Weidplas in Rüti mit Spritzgussanlage, Entnahmegerät, Sechs-Achs-Roboter sowie Misch- und Dosieranlage

(Bild: Sonderhoff Holding GmbH)



len Industrien eingesetzte FIPFG-Dichtungstechnologie ermöglicht es, Dichtungsmaterial in einem vollautomatischen Applikationsprozess direkt auf Bauteile konturgenau aufzutragen, wo sie zur Schaumdichtung bei Raumtemperatur ausreagiert.

Die Dosieranlage kann flexibel auf die jeweilige Fertigungssituation des Kunden, die Konstruktion des zu beschäumenden Bauteils sowie auf das Eigenschaftsprofil der Dichtungsrezeptur eingestellt werden. Die Anlagenperipherie besteht aus einer automatischen Nachfüllstation, die die beiden Materialkomponenten der emissionsarmen Schaumdichtung in die jeweiligen Druckbehälter der Dosieranlage fördert.

Integration der Prozesse Spritzgießen und Abdichten von Bauteilen in einer Fertigungszelle

Das eigenentwickelte Mold'n Seal-Verfahren sieht eine Maschinenkonfiguration vor, mit der die Prozesse Spritzgießen mit dem unmittelbar daran anschließenden Dichtungsschäumen der Bauteile in einer Inline-Fertigung kombiniert werden. Dabei sind Spritzguss- und Dosieranlage sowie Handlingroboter in einer Fertigungszelle auf einer kompakten Stellfläche von ca. 70 m² platziert (**Bild 1**).

Durch die Kombination der Spritzgießanlage mit der Misch- und Dosieranlage können bei diesem Projekt Platz, Zeit und Kosten eingespart werden. Im Ergebnis ist ein höherer Fertigungs-Output bei geringeren Stückkosten möglich. Aufgrund der hohen geforderten Stückzahlen war ein unterbrochener Prozess mit der Zwischenlagerung von Bauteilen keine Option. Daher war diese vollintegrierte und ganzheitliche Inline-Anlage die einzig richtige und effizienteste Lösung.

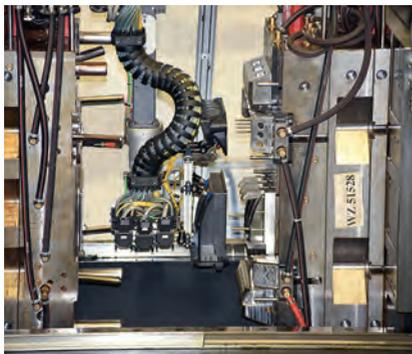


Bild 2: Die Entnahme der Bauteile aus dem geöffneten Werkzeug der Spritzgussanlage durch den Entnahmeroboter (Bild: Sonderhoff Holding GmbH)

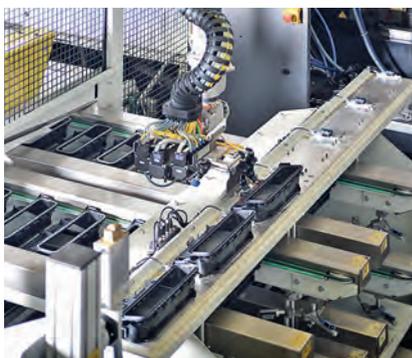


Bild 3: Nach einem Positionswechsel von der Plasmadüse zur Ablage-/Wechselaufnahme legt der Roboter das Bauteil in die Warteposition für die weitere Bauteilbearbeitung ab (Bild: Sonderhoff Holding GmbH)

Dichtungsschäumen im Spritzgießtakt

Die Herausforderung für den Einsatz des Mold'n Seal -Verfahrens bei diesem Projekt bestand darin, die Rezeptur für den Low-Emission Schaum so zu formulieren, dass der Aufschäumprozess zur Bildung einer Schaumdichtung an den vorgegebenen Spritzgießzyklus angepasst abläuft. Mit den sehr schnell reagierenden Fast-Cure Schaumdichtungen FERMAPOR® K31 Low-Emission konnte die Bauteilapplikation im Spritzgießtakt erfolgreich umgesetzt werden. Schon nach 2 bis 3 min. bei Raumtemperatur ist die Oberfläche der Schaumdichtung klebfrei und die beschäumten Bauteile können zügig weiter verarbeitet werden. Auf gepufferte oder vorproduzierte Spritzgussteile und eine teure Zwischenlagerung kann daher verzichtet werden. Auch sind dank der kurzen Klebzeit nur kurze Austakt- oder Transferbänder erforderlich. Aufgrund der hohen Reaktivität des sehr schnell reagierenden Low-Emission-Schaumsystems kühlt ein Temperiergerät die Materialleitungen von den Vorratsbehältern bis zum Mischkopf der Dosieranlage.

Abdichtung mit emissionsarmen Schaumdichtungen

Kunststoffbauteile und ihre Abdichtungen dürfen selbst bei extremen Temperaturen, wie sie im Fahrzeuginneren bei direkter Sonneneinstrahlung im Sommer häufig vorherrschen, keine Schadstoffe ausstoßen, die ab einer bestimmten Menge eine Gesundheitsgefährdung hervorrufen könnten. Hierbei sind vor allem die Volatile Organic Compounds (VOC) zu nennen, die bei zu hohen Luftbelastungen oft Irritationen von Augen, Nase, Rachen und der Haut

oder allergische Wirkungen hervorrufen können. Leichtflüchtige organische Verbindungen wie Lösemittel, Weichmacher, Stabilisatoren oder bestimmte Additive sind nicht immer fest eingebunden in die Molekülstruktur von Kunststoffen und können daher langsam an die Oberfläche von Kunststoffbauteilen diffundieren und somit an die Luft gelangen.

Das bei der prozessintegrierten Fertigung eingesetzte Low-Emission Schaumdichtungssystem FERMAPOR® K31-LE erfüllt die in dieser Anwendung gesetzten Anforderungen der OEM-Prüfvorschrift für formgeschäumte, weichelastische Schaumstoffe auf Polyurethanbasis. Dort ist der Zielwert für die VOC-Emission bei 100 µg pro Gramm/g Polyurethan festgelegt.

Integration vieler Einzelschritte in einer Fertigungszelle

Mit der Mold'n Seal-Prozessintegration wurde ein möglichst hoher Automatisierungsgrad in einer Fertigungszelle umgesetzt. Eine der Herausforderungen war sicherlich, dass das Bauteil auf beiden Seiten, oben und unten, eine Schaumdichtung aufweist und die Oberflächen vor dem Schaumauftrag zuerst aktiviert werden müssen. Um deutlich zu machen, wie viele einzelne Prozesse in der Mold'n Seal Fertigungszelle teilweise parallel ablaufen, werden sie nachfolgend näher beschrieben.

Die Bauteile werden mit einem Zweifach-Werkzeug im Spritzgießverfahren produziert. Nach dem Spritzgießen öffnet sich das Werkzeug und der Entnahmeroboter entnimmt aus den Kavitäten zwei Spritzgussteile (**Bild 2**) und verfährt damit zum Förderband, um dort ein Teil zur Weiterverarbeitung in der Montagestation abzulegen. Das verbleibende Spritzgussteil wird an einer Plasmadüse zur Plasma-Aktivierung der Bauteil-Unterseite positioniert. Dadurch wird die Haftung der Schaumdichtung auf dem Bauteil verbessert.

Nach der Plasmavorbereitung legt der Entnahmeroboter das Bauteil zur weiteren Bearbeitung in die Warteposition ab (**Bild 3**). Sodann fährt er erneut zur Spritzgießanlage, um dort zu warten bis sich das Werkzeug öffnet und erneut zwei Teile zu entnehmen.

Parallel dazu greift der Sechs-Achs-Roboter das an der Ablage-/Wechselaufnahme abgelegte Bauteil mit der plasmaaktivierten Unterseite und verfährt zum Mischkopf MK 625 der Dosieranlage DM 402. Dort positioniert er das Bauteil unter die Mischkopfdüse zum Beschäumen der bereits plasmaaktivierten Oberfläche (**Bild 4**).

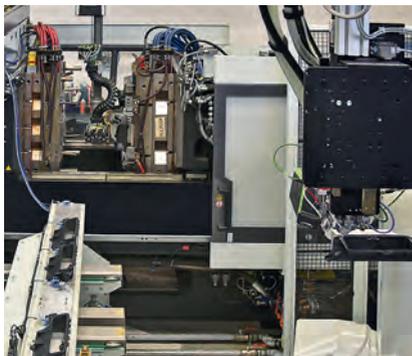


Bild 4: Der Sechs-Achs-Roboter hält das Bauteil zum Dichtungsschäumen unter den Mischkopf MK 625

(Bild: Sonderhoff Holding GmbH)



Bild 5: Der Mischkopf dosiert den Dichtungsschaum präzise in die Nut des Bauteils

(Bild: Sonderhoff Holding GmbH)

Der Mischkopf MK 625 der Mold'n Seal-Anlage dosiert den Low-Emission Dichtungsschaum präzise in die Nut des Bauteils (**Bild 5**).

Danach bewegt der Sechs-Achs-Roboter das Teil mit der nach oben zeigenden, beschäumten Seite zur Plasmadüse, um die unbeschäumte Oberfläche mit Plasma zu aktivieren. Im Anschluss fährt er wieder zum Mischkopf, um den Low-Emission Dichtungsschaum auf der zweiten Seite zu applizieren. Der Sechs-Achs-Roboter legt sodann das fertig beschäumte Bauteil auf der Kühl- und Aushärtstrecke ab und entnimmt wieder ein neues Teil von der Ablage-/Wechselaufnahme.

Lückenlose Qualitätskontrolle

Die Mold'n Seal-Anlage bei Weidplas lässt sich dank eines einfachen und durchgehenden Bedienkonzepts sicher und ergonomisch gut bedienen. Aktive Funktionen und Zustände werden durch Leuchten der Taster signalisiert. Anwählbare Funktionen/Zustände werden durch Blinken der Taster signalisiert. Alle Störungen, Prozessparameter und deren Änderungen werden von der Mold'n Seal Anlage dokumentiert und sind so jederzeit nachvollziehbar. Zur Separierung von Bauteilen, die nicht den definierten Qualitätsstandards entsprechen (NIO-Teile), wurde ein Fördersystem in das Gesamtkonzept integriert, das über Rutschen die NIO-Teile aus der Schutzumhausung der Fertigungszelle abführt. Aber die letzte Kontrolle hat der Maschinenführer der Mold'n Seal-Anlage, der auch die Qualität der Bauteilverarbeitung überprüft (**Bild 6**).

Fazit

Durch die Integration der Prozesse Spritzgießen und Beschäumen kann so deutlich Zeit in der gesamten Fertigung eingespart werden. Die Montage und Weiterverarbeitung der Bauteile kann dadurch früher beginnen. Durch den hohen Automatisierungsgrad in der Mold'n Seal-Fertigungszelle fallen außerdem geringere Personalkosten an und im Ergebnis ist ein höherer Fertigungs-Output bei geringeren Stückkosten möglich.

Die Produktion bei Weidplas in Rüti (CH) läuft mittlerweile auf Hochtouren. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor bei der Realisierung des Projektes war, dass jede der beteiligten Firmen in ihrem Fachbereich das Optimum herausgeholt hat. Durch die hohe verfahrenstechnische Kompetenz und langjährige Expertise der Projektbeteiligten konnte die Vereinbarkeit der herausfordernden Materialeigenschaften, gepaart mit einem modularen und kompakten Anlagenkonzept, an einem Hochlohnstandort wie der Schweiz erfolgreich umgesetzt werden.



Bild 6: Der Maschinenführer der Mold'n Seal-Anlage überprüft die Qualität der Bauteilverarbeitung

(Bild: Sonderhoff Holding GmbH)

Ein Konzept für viele Anwendungen

Flexible Anlagentechnik für flexibel geschäumte 1K-PUR-Dichtungen auf Basis eines Materials

Industrielle Produktionsprozesse stellen häufig sehr unterschiedliche Anforderungen an Material und Dosieranlage. Bei Gütern, die in großen Stückzahlen hergestellt werden, steht die Produktivität mit präziser Applikation und Reproduzierbarkeit im Vordergrund. Darüber hinaus sollen aber häufig verschiedene Bauteile unterschiedlichster Geometrien und Dichtungsanforderungen auf derselben Anlage produziert werden. Stillstandszeiten durch Umrüsten der Anlage sollen dabei selbstverständlich möglichst gering gehalten werden. Ein 1K-PUR-Dichtungskonzept aus Schaumdosieranlage und dem entsprechenden Material zeigt einen Lösungsansatz auf.

Innerhalb der Verfahren zum In-situ-Auftrag flüssiger, geschäumter Dichtungen (FIPFG=Formed In-Place Foam Gaskets) nimmt die 1K-PUR-Technologie eine Sonderstellung ein. Hier wird das Dichtungsmaterial (**Bild 1**) in einem ersten Schritt mithilfe einer Schäumenanlage physikalisch geschäumt und als formstabile Dichtraupe appliziert. Die Aushärtung der reaktiven Masse erfolgt im darauffolgenden Schritt per Wärmeeintrag in einem Ofen innerhalb weniger Minuten. Durch diese Trennung von Schaumgenerierung und Aushärtung ergeben sich einige Vorteile gegenüber klassischen mehrkomponentigen Dichtungssystemen:

- feinporiger Schaum mit einer überwiegend geschlossenzelligen Struktur
- hohe Präzision selbst bei kleinen Dimensionen ohne Nut (< 1,5 mm)
- 3D-Applikation möglich
- klebfrei direkt nach dem Ofen
- Verbau nach Abkühlung des Bauteils möglich
- unterschiedliche Raupendimensionen in einer Anwendung realisierbar
- schnelle Abänderung der Materialeigenschaften durch Variation des Luftanteils
- hohe Prozesssicherheit und Auslastung des Equipments (> 95 %)
- kein Spülen oder Wechseln des Dosierkopfs bei Applikationspausen
- kein Anfall von Sondermüll

Von Dr. Andreas Brück, Leiter Materialentwicklung; Dr. Frank Kukla, geschäftsführender Gesellschafter CeraCon GmbH | www.ceracon.com

Grundkonzept der Anlagentechnik

Die Aufbereitung der zähflüssigen PUR-Rohmasse zum Schaum erfolgt, insbesondere bei der CeraFLOW®-Anlagentechnik (Bild 2), nach folgendem Prinzip: Zunächst wird die Rohmasse durch eine Schöpfkolbenpumpe aus dem Materialgebinde gesaugt und über eine Leitung zur eigentlichen Schäumenanlage gefördert. Hier wird eine Kolbenpumpe mit dem Rohmaterial gefüllt. Anschließend fördert diese das aufzuschäumende Material mit definiertem Druck und konstanter Fördergeschwindigkeit zu einem Hochdruck-Gasinjektionsventil. Mithilfe dieses Ventils werden in den Materialstrom kleine Gasblasen injiziert. Als Arbeitsgas kann dazu Druckluft verwendet werden. Der Luftdruck muss hierfür höher als der Materialdruck am Ort der Gasinjektion sein und in einem definierten festen Verhältnis zum Materialdruck stehen. Üblicherweise liegt der Gasdruck bei 120 bis 140 bar. Der hohe Gasdruck wird direkt in der Anlage mit einem Verdichter erzeugt, sodass eine spezielle Versorgung mit z.B. Gasflaschen entfällt. Die Prozessluft wird zudem in der Anlage über einen Lufttrockner und Feinfilter aufbereitet, sodass ein üblicher Druckluftanschluss genügt.



Bild 1: Der Querschnitt zeigt die überwiegend geschlossenzellige Struktur des CeraPUR®-Materials (Bild: CeraCon GmbH)

Der Materialstrom mit den injizierten Gasblasen durchläuft anschließend einen mechanischen Homogenisierer, der für eine gleichmäßige Verteilung der Luftbläschen sorgt. Durch den herrschenden Materialdruck von ca. 100 bar in Verbindung mit einer hohen Materialviskosität entsteht so ein Zwei-Phasen-Gemisch, das durch die extreme Kompression der Gasbläschen auch über mehrere Tage stabil bleibt und sich

Bild 2: Schematische Darstellung des Anlagenprinzips der CeraFLOW®-Technologie

(Bild: CeraCon GmbH)

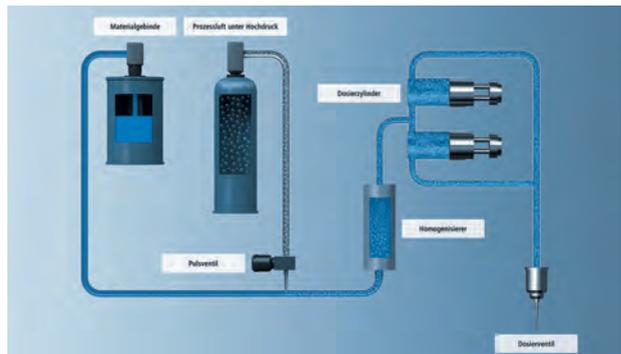




Bild 3: Die Schöpfkolbenpumpe transportiert das Dichtmaterial zur CeraFLOW®-Anlage und wird dann über Industrieroboter auf das Bauteil aufgebracht

(Bild: CeraCon GmbH)

nicht entmischt. Mit diesem Gemisch werden in einem letzten Schritt der Aufbereitung dann Präzisions-Dosierkolbenpumpen mit servoelektrischem Antrieb gefüllt, die die für die anschließende Applikation des Schaumes nötige Austragsleistung und Dosiergenauigkeit bringen.

Durch entsprechende Sensorik und Steuerungstechnik lassen sich sowohl der Materialdurchsatz als auch der Gasstrom exakt erfassen und regeln. Der Gasanteil im Material und damit die Schaumdichte wird durch diese Technologie zu einem reproduzierbar und prozesssicher festzulegenden Parameter.

Der eigentliche physikalische Aufschäumvorgang erfolgt direkt beim Auftragen des unter Druck stehenden Gas-Material-Gemisches aus dem Dosierventil. Beim Austreten aus der Düsenöffnung entspannt sich das Material spontan auf Umgebungsdruck und die eingeschlossenen Gasblasen expandieren schlagartig. Im Ergebnis entsteht direkt bei der Applikation ein Schaum, der zwar noch flüssig und nicht vernetzt ist, aber bereits sein endgültiges Volumen besitzt und durch die thixotrope Einstellung des Materials seine Form behält. Da der Schaum bei diesem Verfahren ohne temperaturabhängige chemische Reaktion entsteht, sind die Geometrie des applizierten Schaumes und seine Dichte nicht von der Temperatur des Materials und des Bauteils, auf dem der Schaum aufgetragen wird, abhängig. Darüber hinaus erlaubt das Verfahren, die Schaumdichte stufenlos einzustellen, was eine maximale Flexibilität hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten eröffnet, weil die Schaumdichte und die resultierende Stauchhärte bzw. die Verpressungskräfte in der Dichtungsanwendung unmittelbar zusammenhängen.

Die Schaumanlagentechnik (**Bild 3**) ist immer Teil einer Automatisierung der Dichtungsapplikation. Hier kann entweder das Dosierventil ortsfest installiert sein und die Bauteile werden von einem Industrieroboter mit Greifer geführt. Diese Lösung

empfiehlt sich bei kleinen Bauteilen und komplexen dreidimensionalen Dichtungsverläufen, bei denen auf mehreren Bauteilseiten Schaum aufgetragen werden soll. Die Alternative dazu ist ein bewegtes Dosierventil und fixierte Bauteile, was eher bei flächigen 2D-Anwendungen zum Einsatz kommt bzw. dann, wenn die zu applizierenden Dichtungen von einer Bauteilseite her zugänglich sind.

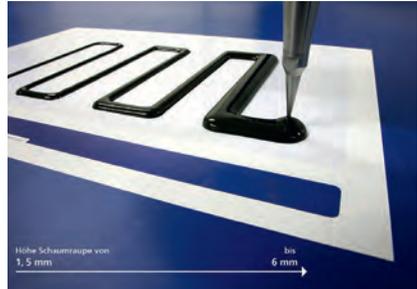


Bild 4: Die Anpassung der Dimension der Schaumraupe erfolgt über die Dosierleistung und nicht über die Bahngeschwindigkeit

(Bild: CeraCon GmbH)

Problemstellung beim Kunden und Lösungen in der Anwendung

Die Flexibilität der 1K-PUR-Schaumtechnologie lässt sich am besten anhand ausgewählter Dichtungslösungen aus der Praxis zeigen.

Abdichten von Blenden für Pkw-B-Säulen:

Beim Abdichten von Kunststoffblenden für Pkw-B-Säulen besteht die Aufgabenstellung sowohl darin, Bauteile gegenüber der Karosserie abzudichten, als auch darin, Windgeräusche bei hoher Geschwindigkeit zu dämpfen. Zudem sollen die Blenden mit möglichst geringem Kraftaufwand montiert werden können, um einen Verzug der Teile zu verhindern. Mehrere Eigenschaften der 1K-PUR-Schaumtechnologie machen diese zur bevorzugten Lösung dieser Aufgabenstellung. Wie in der Automobilzulieferindustrie üblich, soll die Produktion mit hohem Automatisierungsgrad bei möglichst geringem Personaleinsatz laufen. Daher ist eine der Forderungen, den Spritzgussprozess direkt mit der Schaumapplikation zu verknüpfen. Da in der 1K-PUR-Schaumtechnologie die Bauteiltemperatur eine untergeordnete Rolle spielt, können die noch heißen spritzfrischen Teile direkt durch einen Roboter aus dem Werkzeug entnommen und mit den nötigen Schaumdichtungen versehen werden. Die auf der Bauteilrückseite zu applizierenden Dichtungen haben weiterhin extrem unterschiedliche Querschnitte. Neben einer langen Dichtung mit großem Querschnitt muss noch eine nur wenige Zentimeter lange, sehr kleine Dichtung mit 2 mm Höhe aufgetragen werden. Bei gleichbleibender Austragsleistung einer Dosiereinrichtung können solche unterschiedlichen Geometrien nur durch verschiedene Applikationsgeschwindigkeiten realisiert werden. In diesem Fall ist der Unterschied aber zu groß, um dies mit Industrierobotern zu realisieren. Hier bietet die 1K-Technologie mit den CeraFLOW®-Anlagen eine einfache Lösung. Sowohl die Servoantriebe der



Bild 5: Dreidimensionale Bauteile, wie z.B. Rollengehäuse von Koffern, können in einem Zug beschäumt werden (Bild: CeraCon GmbH)

Dosierkolbenpumpen als auch das Dosierventil lassen sich flexibel und innerhalb von 0,5 bis 1,5 s auf Dosierleistungen zwischen 0,15 g/s und 10 g/s automatisch umstellen, sodass auf dem gleichen Bauteil die unterschiedlichsten Dichtungsquerschnitte mit dem gleichen Dosierventil appliziert werden können (**Bild 4**). Die geforderten geringen Verbaukräfte erreicht man durch eine niedrige Schaumdichte, was durch einen erhöhten Anteil an Luft im Schaum erreicht werden kann.

Abdichten von Rollengehäusen von Reisekoffern:

Eine besondere Herausforderung im Bereich der Konsumgüter ist die Abdichtung von Rollengehäusen hochwertiger Reisekoffer (**Bild 5**). Diese Gehäuse sitzen an den unteren Ecken der Koffer, sodass die drei abzudichtenden Bauteilflächen jeweils senkrecht aufeinander stehen. Es wird also eine Dichtungstechnik benötigt, die bei freier Applikation auf X-, Y- und Z-Ebene möglichst in einem Zug aufgetragen werden kann, ohne dass die aufgetragene Dichtung herabläuft oder sich auf dem Bauteil verschiebt. Diese Aufgabenstellung kann nur mit stark thixotropierten Materialien, wie z.B. CeraPUR® 1K-Polyurethanen, gelöst werden, die in diesem Fall in der Großserie eingesetzt werden. Durch die thixotrope Eigenschaft steigt unmittelbar nach der Applikation die Materialviskosität so stark an, dass kein Verlaufen der geschäumten, aber flüssigen Dichtung mehr stattfinden kann, bis sie durch den darauffolgenden thermischen Prozess ausgehärtet ist. Diese Eigenschaft ermöglicht eine maximale Flexibilität im Hinblick auf die Konstruktion möglicher komplexer dreidimensionaler Dichtungsgeometrien. Im Extremfall kann die Vorder- und Rückseite eines Bauteils in einem Dosiervorgang mit Dichtungsschaum versehen werden. Durch eine geeignete Automatisierung muss dann ein berührungsfreier Transport der Teile bis in den thermischen Aushärtprozess sichergestellt sein.

Abdichten von Pkw-Rückleuchten:

Anhand der Dichtungsanwendung bei Pkw-Rückleuchten (**Bild 6**) kann der flexible Einsatz von 1K-PUR-Materialien in Hinsicht auf die Verkettung mit vor- und nachgeschalteten Produktionsschritten in automatisierten Fertigungsanlagen erläutert werden. In diesem Fall werden die Gehäuse der Rückleuchten vor Erreichen der Schäu-

manlage mit elektronischen Komponenten in einer mechanischen Montageeinheit versehen, um dann im Linientakt in die Dosieranlage eingeschleust zu werden. Hier erfolgt zunächst eine Vorbehandlung der abzudichtenden Flächen mit Atmosphärendruck-Plasma, um die Haftung des Dichtungsschaumes zu erhöhen. Anschließend erfolgt der Dichtungsauftrag mit einem 6-Achs-Industrieroboter vollautomatisch. Die verschiedenen Bauteilvarianten mit unterschiedlichen Dichtungsverläufen werden von der Anlage automatisch erkannt und die entsprechenden Applikationsprogramme abgerufen.



Bild 6: Abdichten von Pkw-Rückleuchten

(Bild: CeraCon GmbH)

Nach dem Dichtungsauftrag erfolgt der Transport zu einem vertikalen Industrieofen, der den PUR-Schaum bei 80 °C aushärtet und zugleich die Kunststoffbauteile tempert, um innere Spannungen abzubauen. Unmittelbar danach erfolgen ein Dichtigkeitstest und weitere Montageschritte. Da das eingesetzte 1K-PUR-Material bereits nach 5 min. fertig vernetzt ist, können die applizierten Dichtungen direkt im Anschluss im nachfolgenden Dichtigkeitstest belastet werden, was bei mehrkomponentigen PUR-Schaumsystemen nur nach wesentlich längerer Aushärtezeit möglich ist. Längere Aushärtezeiten bei gleichbleibender Taktzeit bedeuten aber, dass eine Vielzahl an Bauteilen in der Fertigungslinie gepuffert werden muss, was einen erheblichen Platzbedarf erfordert.

Der zusätzliche Prozessschritt der Aushärtung in einem Thermosystem, welcher zunächst als Nachteil erscheint, entpuppt sich bei genauerer Betrachtung zum einen als Garant für die gleichbleibende Produktqualität, unabhängig von äußeren Einflüssen wie Bauteil- bzw. Umgebungstemperatur und Feuchtigkeit. Zum anderen ist er unabhängig für eine schnelle und platzsparende Verkettung weiterer Produktionsschritte in einer hochautomatisierten Fertigungslinie.

Dichtwirkung des Materials

Die Dichtwirkung der ausgehärteten CeraPUR® F15-Schaumraupe ergibt sich durch einen hohen Anteil an geschlossenen Zellen, durch die hydrophoben Anteile des Grundmaterials sowie durch die Verpressung der Raupe zwischen den beiden abzudichtenden Gegenstücken (typischerweise 20 bis 70% der Raupenhöhe; im Idealfall wird bereits eine ca. 50%ige Verpressung bei der Bauteilauslegung eingeplant). Das nicht verpresste, geschäumte Material zeigt nach einer 24-h-Lagerung unter Wasser eine



Bild 7: Selbst eine beschädigte Oberfläche der Schaumraupe hält noch dicht (Bild: CeraCon GmbH)

Gewichtszunahme von weniger als 4%. Die einzigartige Schaumstruktur und ihre Auswirkung fällt vor allem bei beschädigter Außenhaut auf. Selbst eine wie in **(Bild 7)** dargestellte, der Länge nach zerschnittene Schaumraupe zeigt nach der Wasserlagerung lediglich eine Aufnahme von < 10 Gewichts%, ohne sich vollzusaugen. Die maximale Wasseraufnahme bei einem Prozess mit Aufschäumfaktor 3 liegt bei 200 Gewichts%. Nach weiteren 24 h bei Raumtemperatur und Luft ist das Wasser nahezu vollständig verdunstet.

Nicht nur eine „angekratzte“ Dichtraupe kann bei klassischen Dichtsystemen auf PUR-Basis zu einer Undichtigkeit führen, sondern auch Temperaturen unter dem Gefrierpunkt können zu einem Ein- bis Durchbruch von (Eis-)Wasser führen. Das Material zeigt hier keinerlei äußere Veränderungen und mit 10% eine vergleichsweise sehr geringe Gewichtszunahme.

Flexible Anwendung

Die beschriebene Präzision und Flexibilität der hier vorgestellten 1K-PUR-Technologie ergibt sich aus dem Zusammenspiel der Schäumenanlage und dem zu schäumenden Material. Die Eigenschaften der ausgehärteten Schaumraupe können über einen weiten Bereich durch den an der Schaumdosieranlage einstellbaren Luftanteil präzise variiert werden. Dadurch lässt sich das Raumgewicht von CeraPUR® als Vollmaterial mit ca. 1060 g/l bis zu ca. 260 g/l einstellen. Hierbei wird oft vom Aufschäumfaktor (oder auch Aufschäumgrad) gesprochen, d.h. auf welches Volumen das Vollmaterial vervielfacht werden kann; z.B. Faktor 3 = 1 Teil Material + 2 Teile Luft. Da es sich hier um ein weichelastisches Material handelt, hat die Änderung der Dichte einen direkten Einfluss auf die Härte **(Bild 8)**.

Die Bestimmung der Härte mit einem Shore-Messgerät ist einfach und schnell und die verschiedenen Materialien können so gut miteinander verglichen werden. Bei einer Dichtung fallen allerdings neben der Materialhärte die Dimensionen, die Form und die gesamte Auflagefläche der Raupe sowie der Grad der Verpressung zum abzudichtenden Gegenstück ins Gewicht. Daraus entstehen die in der Anwendung aufzuwendenden Verbau- und Verpressungskräfte.

Bild 8: Zusammenspiel aus Luftanteil und resultierender Härte

(Bild: CeraCon GmbH)

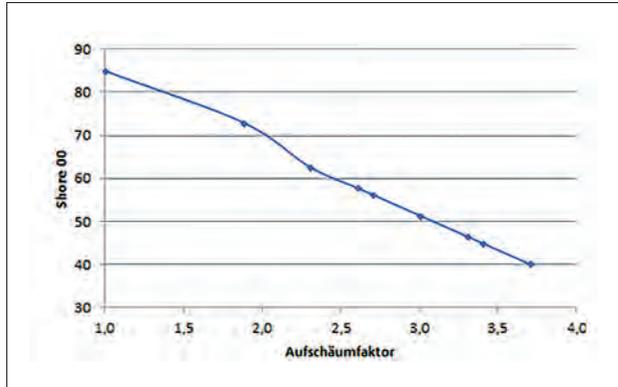
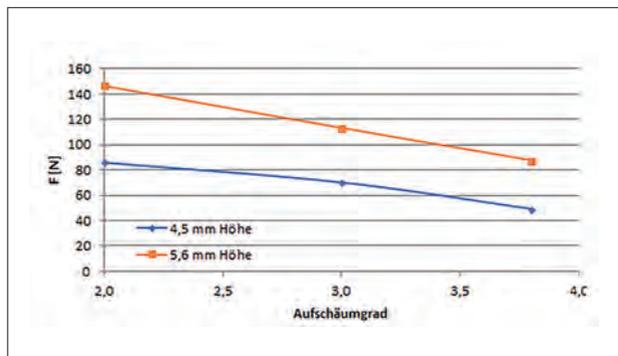


Bild 9: Zusammenspiel aus Luftanteil, Raupendimension und aufzuwendender Kraft zum Erreichen einer 50%igen Verpressung

(Bild: CeraCon GmbH)



Zum Vergleich wird in **(Bild 9)** das Zusammenspiel aus Luftanteil, Raupendimension (halbrundes Raupenprofil; Höhe : Breite = 1 : 2) und aufzuwendender Kraft für eine 50%ige Verpressung dargestellt. Durch die Flexibilität des Gesamtsystems lässt sich ein Kompromiss für den jeweiligen Anwendungsfall relativ einfach ermitteln und Schutzklassen bis IP 67 können je nach Bauteilkonstruktion erreicht werden.

Neben der Härte lässt sich auch die Robustheit der Dichtungsraupe über den Luftanteil regulieren. Dies ist z.B. wichtig, wenn es beim Verbau zu einer seitlichen Scherbelastung auf die Dichtung kommt und sie dadurch in Mitleidenschaft gezogen werden kann. Je nach eingebrachtem Luftanteil kann die Zugfestigkeit von ca. 2.167 bis 368 kPa (nach EN ISO 1798) eingestellt werden. Die Bruchdehnung liegt gleichzeitig im Bereich von ca. 300%.

Allgemeine Voraussetzungen

Ob ein Material für eine spezielle Anwendung geeignet ist, hängt i.d.R. von mehreren Faktoren ab. In einem ersten Schritt reicht hierbei oft eine allgemeine Abschätzung. Die Underwriter Laboratories (UL) betrachten gängige Kenngrößen eines Materials und fassen diese in einer Prüfnorm zusammen, um dann eine allgemeine Evaluierung für bestimmte Anwendungsfelder abzugeben. Zelluläre Elastomerdichtungen werden z.B. nach den Normen UL 157 für Dichtungen und Dichtungsringe und UL 50 E speziell für den Einsatz in Gehäusen für Elektroanlagen betrachtet. Durch Bestimmung der Zugfestigkeit vor und nach der Schnellalterung im Ofen, der Evaluierung der Flexibilität bei tiefen Temperaturen und der Bestimmung des Druckverformungsrests kann CeraPUR® F15 in einem Bereich von -40 °C bis + 90 °C grundsätzlich empfohlen werden (auch wenn die spezifische Anwendung selbstverständlich im Einzelnen betrachtet werden muss). Dies ist eine wichtige Voraussetzung für den Vertrieb von Elektrogeräten in den USA, Kanada und Mexiko.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die 1K-PUR-Technologie zur Applikation von CeraPUR® F15 ein überaus präzises sowie flexibles Dichtungskonzept bietet. Eine große Besonderheit dabei ist, dass mit einem einzigen Material eine große Bandbreite an Anwendungen abgebildet werden kann. Dies macht den Einsatz sowohl bei der Abdichtung in Großserie als auch bei ständig wechselnden Kleinserien nicht nur möglich, sondern auch benutzerfreundlich.

E-Mobility basiert auch auf prozesssicherer Dosiertechnik

Die Exzentrerschnecken-Technologie in optimierten technischen Lösungen

E-Mobility ist nicht nur ein gesellschaftliches Thema, sondern auch eine technische Herausforderung, bei der sich das Dosieren von Dichtungen, Klebstoffen, Wärmeleitpasten, Elektrolytlösungen etc. immer mehr zu einer Schlüsseltechnologie entwickelt. Dies führt u.a. dazu, dass heute neue Lösungen auf Basis einer bewährten Technologie entwickelt werden.

Mobilität gehört zu den alltäglichen Annehmlichkeiten. Die Unterstützung des Menschen durch Fahrzeuge und motorisierte Transportmittel bedeutet persönliche Unabhängigkeit, Zeitersparnis, rationelle Arbeitsteilung, optimale Versorgung mit Nahrungsmitteln und Gütern aus aller Welt, Reisen uvm. Plötzlich auftretende Einschränkungen, wie z.B. durch ein defektes Auto, werden mindestens als sehr hinderlich und unangenehm empfunden, teilweise führen sie sogar zu finanziellen Verlusten bei gewerblicher Nutzung.

Neue Industrien mit neuen Herausforderungen

Die wesentliche Frage nach einer nachhaltigen Energieversorgung ist spätestens seit der Jahrtausendwende in aller Munde. Die endliche Verfügbarkeit von fossilen Brennstoffen führt zu umfangreichen Studien und Forschungsprojekten nach Alternativen. Daraus entstand die Planung eines nachhaltigen und klimaschonenden Verkehrssystems auf Basis der besten „alltagstauglichen“ und wirtschaftlich realisierbaren Ergebnisse. Elektrische Bahnen, Elektroautos, -motorroller, -motorräder, -dreiräder, batteriebetriebene Busse, Elektrolastkraftwagen und -fahrräder sind nur einige wenige Beispiele der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten elektrischer Antriebe. Vielen gemeinsam ist die Verwendung von Batteriepacks zur Vorratsspeicherung der notwendigen Elektrizität. Neueren Marktanalysen zufolge soll bereits 2025 jeder zehnte Neuwagen ein E-Auto sein und die Neuproduktion von Autos mit Verbrennungsmotoren soll in den Folgejahren sogar vollständig eingestellt werden [1]



Bild 1: Exzentrerschneckentechnologie: Jede einzelne Dispenserkammer fördert ein exakt definiertes Medienvolumen und dient gleichzeitig als Dichtlinie in Richtung Pumpeneingangs- und ausgangsseite

(Bild: ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH)

Ein wesentlicher Baustein innerhalb des Herstellungsprozesses für elektrisch angetriebene Fahrzeuge ist die eingesetzte Dosiertechnik. Diese kommt in verschiedenen Fertigungsstufen zum Einsatz. Die Vereinfachung der Dosieranwendung, die Vermeidung von zusätzlichen Arbeitsschritten und die Reduzierung der Materialkosten bei gleichzeitiger Erhöhung des Produktionsvolumens sind die erklärten Ziele. Verbinden, Vergießen, Fügen, Abfüllen und Dichten sind nur einige Anwendungsbereiche. Es werden multifunktionale Fluide und Pasten entwickelt,

die in unterschiedlichen Variationen gewünschte Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Oberflächenhärte, UV-Beständigkeit, elektrische Isolation, Härtings- bzw. Gelierzeit, thixotrope Einflüsse miteinander kombinieren. Die Dosierung dieser Materialien wird in 1K- und 2K-Anwendungen ausgeführt. Zusätzlich müssen abrasive, schersensitive, chemisch aggressive und reaktionsfreudige Fluide reproduzierbar und prozesssicher dosiert werden. Als entscheidender Faktor für die Qualität des Endprodukts dürfen die spezifischen Charakteristika aller verwendeten Dosiermedien jedoch keinesfalls beeinträchtigt werden.

Exzentrerschnecken-Technologie für beste Qualität mit voller Kostenkontrolle

Die Exzentrerschneckenpumpe arbeitet mit der Technik des Endloskolben-Prinzips und bietet so eine kontinuierliche Non-Stop-Dosierung. Die Kombination von Rotor und Stator mit definierten Förderkammern in den Dispensern erlaubt eine volumetrisch präzise, scherarme und nahezu pulsationsfreie Dosierung (**Bild 1**). Abrasive, schersensitive oder hochgefüllte Materialien können so unbeschädigt appliziert werden. Die Rotation der Exzentrerschnecke ist sowohl vorwärts als auch rückwärts möglich und bietet einen programmierbaren Rückzug für einen definierten Fadenabriss ohne Nachtropfen. Auch diese hohe Präzision mit einer Wiederholgenauigkeit $\geq 99\%$ wird durch das definierte Fördervolumen in den einzelnen Kammern zwischen Rotor und Stator erreicht. Die Sedimentation von Füllstoffen bei unterschiedlicher Dichte innerhalb der Pumpe wird durch den gleichmäßigen Volumenstrom in der Endloskolbenpumpe verhindert. Exzentrerschneckenpumpen sind ebenfalls für drucksensitive Medien geeignet, die z.B. Polymer- oder Glashohlkugeln enthalten, und auch für Anwendungen mit Fluiden bis zu mehreren Mio. mPas oder mit thixotropen Materialien.

In 2K-Anwendungen können Mischungsverhältnisse von bis zu 100:1 oder auch Materialien mit geringen Topfzeiten problemlos verarbeitet und direkt dosiert werden. Die Exzentrerschnecken-Technologie erlaubt hohe Standzeiten der Dosierkomponenten für eine bessere Energieeffizienz und einen reduzierten Wartungs- und Instandhaltungsaufwand. Eine perfekte Versorgung der Dosierstelle wird durch eine direkte und schonende Entnahme des Materials und eine konstante Versorgung ebenfalls mittels Exzentrerschneckenpumpen erreicht. Die zu verarbeitenden Fluide, die eine Vorbehandlung benötigen, können zur Homogenisierung und Entgasung in einen Materialpuffer gefördert werden, um von dort aus der Dosierpumpe zugeführt zu werden. In allen nötigen Prozessschritten der Dosieranwendung kann bereits vorab durch die Bestimmung des Ablaufs der Kostenrahmen definiert werden. Vorversuche in Laboren des Customer & Innovation-Centers bieten die Optimierung der gesetzten Parameter. Nachfolgend können die Lebenszykluskosten für die verschleißarme Exzentrerschneckentechnologie bestimmt werden.

Batteriezellen- und Batteriepackfertigung

Batteriehersteller stehen aufgrund der rasant steigenden Nachfrage vor höchst anspruchsvollen Anforderungen: Produktionskapazitäten müssen bei gleichzeitiger Gewährleistung bester Qualitäts- und Sicherheitsstandards der Batterien stetig erhöht werden. Es werden höhere Speicherkapazitäten in kleineren und leichteren Bauformen mit schnelleren Ladezeiten benötigt. Gleichzeitig ist ein schonender Umgang mit den vorhandenen und zu verarbeitenden Ressourcen notwendig. Die Hersteller setzen auf Modularisierung und Standardisierung für mehr Effizienz in der Batterieherstellung. Anwendungen in der Batteriezell- und Batteriepackfertigung können mit den Exzentrerschneckenpumpen komfortabel bedient werden: Verguss- und Klebeapplikationen für die Montage der einzelnen Batteriezellen in den Montagehilfen oder an Kontaktierungselementen sowie Materialien mit kombinierten Eigenschaften können problemlos verarbeitet werden. Damit Batteriesysteme dauerhaft in einem hohen Wirkungsgrad arbeiten können, ist u.a. ein zuverlässiges Wärmemanagement notwendig. 1K- und 2K-Wärmeleitpasten an elektronischen Bauteilen, einzelnen Zellen und kompletten Batteriepacks werden zur Wärmeableitung dosiert – auch als gefüllte oder abrasive Materialien. Die Exzentrerschnecken-Technologie erlaubt lange Standzeiten und weist einen geringen Verschleiß in der Verarbeitung auf.

Weitere Anwendungen sind z.B. die hochgenaue Beschichtung der Leiterfolien mit Slurry-Pasten. Diese ist einer der Schlüsselprozesse bei der Herstellung von Batterien. Der kontinuierliche Dosierprozess nach dem Endloskolben-Prinzip erlaubt einen hochgenauen Auftrag von niedrig- bis hochviskosen Materialien (bis zu 7 Mio. mPas).



Bild 2: Füllen einer Batteriezelle mit Elektrolytlösung (Bild: ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH)

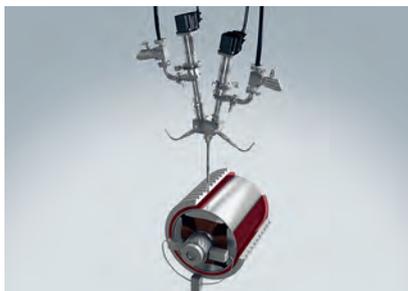


Bild 3: Verguss einer Imprägnierung auf eine Spule (Bild: ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH)

Ebenso können die Dispenser in bereits vorhandene Dosieranlagen einfach integriert werden. Ein weiterer Schritt im Dosierprozess ist das Füllen von Batteriezellen mit Elektrolytlösungen (**Bild 2**). Das Material kann durch die Exzentrerschneckentechnologie ohne Luftbeaufschlagung abgefüllt werden. Bei einer Wiederholgenauigkeit von >99% wird ein optimales Ergebnis erzielt.

Bonding- und Potting-Anwendungen in der E-Mobility

Elektromotoren sollen bei gleichzeitiger Verbesserung des Wirkungsgrades kleiner und leistungsfähiger werden. Die dafür benötigten Magnete werden für die Verbindung mit dem Blechpaket aufgrund der Prozessoptimierungen nicht mehr herkömmlich geklemmt oder bandagiert, sondern ohne Lufteinschluss verklebt. Im E-Motor werden zum Schutz der Wicklungen von Stator und Rotor Imprägnierungen aufgebracht (**Bild 3**). Stromführende Bauteile werden zuverlässig mit dem Trägeruntergrund ohne Beeinträchtigung der elektrischen Leitfähigkeit verbunden. Elektronik- und Steckergehäuse, Flat-Flex-Cable und andere Elektronikbauteile werden mit einem Schutzmaterial gegen Feuchtigkeit, Verschmutzungen oder Vibrationen vergossen (**Bild 4**). Zur Verbindung der Gehäuse wiederum werden Klebe- und Dichtungsmaterialien dosiert (**Bild 5**). Bei allen Anwendungen werden Kombinationen verschiedener Materialien mit unterschiedlichen Materialeigenschaften zur Wärmeableitung gefordert (**Bild 6**). Die Exzentrerschneckentechnologie bietet hervorragende Möglichkeiten, die komplexen Charakteristika der viskosen Fluide absolut schonend zu dosieren. Die Dispenser gewährleisten ein sicheres und luftblasenfreies Materialhandling ohne Nachtropfen, auch bei niedrigen Viskositäten. 1K- und 2K-Dosierungen können flexibel und leicht steuerbar eingesetzt werden. Bei der Verwendung von z.B. Glashohlkugeln im Fluid werden diese absolut schonend dosiert. Auch minimalste Dosiermengen werden mit höchster Reproduzierbarkeit appliziert.



Bild 4: 1K-Underfill-Dosierung von elektronischen Bauteilen (Bild: ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH)



Bild 5: Raupenauftrag für strukturelle Verklebung mit gleichzeitigem Abdichten (Bild: ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH)

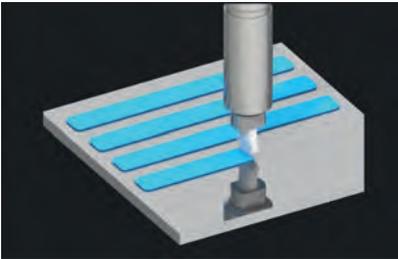


Bild 6: Wärmeleitpasten-Auftrag mittels Breitschlitzdüse zur Wärmeableitung in Batteriepacks (Bild: ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH)

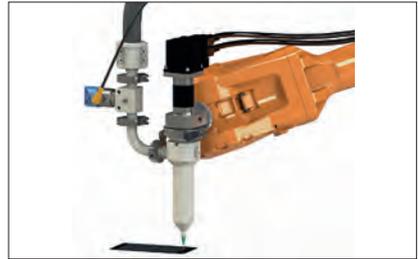


Bild 7: Metallfreier Dispenser – montiert an einem 6-Achs-Roboterarm (Bild: ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH)

Metallfreier Dispenser für hoch reproduzierbare Ergebnisse in der E-Mobility

Die E-Mobility mit allen neuen und veränderten Produktionsstufen entwickelt eine Vielzahl an neuen Aufgaben und erfordert eine enge Abstimmung zwischen allen beteiligten Herstellern – von den Materialien bis hin zu den Produktionsschritten. Für spezielle Dosieranwendungen in der E-Mobility wurde der metallfreie Dispenser entwickelt (**Bild 7**). Diese Polymerpumpe mit einem besonderen Dichtungsgehäuse enthält eine metallfreie Rotorwelle. Der Dispenser eignet sich vor allem für die prozesssichere Verarbeitung von sehr reaktionsfreudigen Materialien wie Schwefelsäure, anaerob reagierenden Acrylaten und Elektrolyten. Um chemische Reaktionen wie Aushärtung oder Kristallisation während des Dosierens zu vermeiden, besteht im Dispenser keinerlei Kontakt zwischen Fluid und Metall im materialberührenden Bereich. Bei der Auswahl der Werkstoffe für diesen speziellen Dispensertyp stand vor allem die chemische Beständigkeit sowie die höchste Beständigkeit gegen physikalische Abnutzung durch abrasive Materialien im Fokus. Die permanenten Neu- und Weiterent-

wicklungen der viskosen Materialfluide in unterschiedlichster Ausprägung müssen ständig in Laborversuchen und Feldtests erprobt und zur Serienreife geführt werden. Diese intensive Zusammenarbeit und der ständige Informationsaustausch zwischen Material- und Anlagenhersteller werden genutzt, um zusammen mit den Erfahrungen der Anwender eine stetige Optimierung in allen Bereichen zu erreichen. Denn: Die Ansprüche der Industrie sind hoch, für ein professionelles Fertigungsergebnis jedoch absolut realistisch. Das gemeinsame Erfahrungspotenzial wird in Kompetenzschulungen vor Ort an der Produktionsstätte vermittelt. Das Ziel ist eine nachhaltige Weiterentwicklung mit besten Qualitätsstandards.

Eine positive Zusammenarbeit zwischen dem Kunden, dem Material- und der Dosier-technikhersteller ermöglicht die Qualifizierung geeigneter Lösungen von der Materialauswahl bis zur Implementierung in den Dosierprozess. Die umfassende Beratung führt zu einer konsequenten Entwicklung einer hoch reproduzierbaren Dosieranwendung, die zur Erhöhung von Produktionsraten und Prozesssicherheit beiträgt – mit voller Kostenkontrolle.

Literatur

[1] Richard Rondell, Physiker und Verfasser der Dissertation „Investigations on a Packaging Technology for PCB Integrated Power Electronics“ zitiert im Interview <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/elektromobilitaet-der-durchbruch-kommt-2022-a-1166688.html>

Klebertechnik



>> ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH – Dosieranlagen und -komponenten für anspruchsvolle Dosiermedien in der E-Mobilität

Mischqualität sicher vorhersagen

Neues Tool zur Simulation

Zuverlässige Vorhersagetools und genaue Messverfahren sind unerlässlich für eine innovative und schnelle Produktentwicklung. Im Falle von Mischanwendungen fehlt es handelsüblichen Simulationswerkzeugen an der notwendigen Geschwindigkeit und Genauigkeit. Daher wurde ein Tool zur zuverlässigen Vorhersage der Mischqualität entwickelt.

Mischvorgänge finden überall um uns herum statt – auf der Erde, in der Atmosphäre, in den Ozeanen und sogar in unserem Körper. Die Reduzierung der Inhomogenität und das Mischen unterschiedlicher Stoffe ist auch ein wesentlicher Bestandteil vieler Prozesse in der chemischen, pharmazeutischen, Bau-, Nahrungsmittel- und allgemeinen Industrie. Der effiziente Einsatz von Zwei- und Mehrkomponenten-Materialien braucht neue Mischlösungen. Die Entwicklung von Verfahren und Systemen zum Austragen, Kontrollieren und Optimieren von Mischvorgängen ist ein wichtiger Bestandteil der Expertise von Anbietern von Misch- und Austragsgeräten.

Das Aufkommen neuer Werkstoffe in vielen Bereichen und Branchen in den vergangenen Jahrzehnten macht neue Produktions- bzw. Applikationsverfahren erforderlich. Gleichzeitig hat die Verwendung von Mehrkomponenten-Lösungen für Füll-, Dicht- und Klebeaufgaben erheblich zugenommen. Heute nutzen zahlreiche Kunden hoch effiziente Lösungen zum Mischen und Auftragen verschiedener Dicht- und Klebstoffe. Die Produkte decken eine breite Palette von Anwendungen ab, die vom Gesundheits- bis zum Bauwesen und vom Heimwerken bis zur industriellen Fertigung reichen.

Mit dem zunehmenden Einsatz von 2K-Materialien geht auch die Suche nach effektiveren und zuverlässigeren Applikationssystemen weiter. Bei der erfolgreichen Anwendung von Mehrkomponenten-Materialien ist und bleibt das Mischsystem ein entscheidendes Element. In bestimmten Anwendungen können die Art der Mischung und die Mischgüte einen starken Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Produkts haben, weshalb eine hohe Präzision erforderlich ist.

Von Dr. Samira Jafari, Head Strategic Innovation Sulzer Mixpac; Joachim Schoeck, Mixing and simulation specialist
Sulzer Mixpac Ltd. | www.sulzer.com



Bild 1: Statischer Mischer für Bauanwendungen

(Bild: Sulzer Mixpac Ltd.)

Bild 2: Statischer Mischer für Dentalanwendungen

(Bild: Sulzer Mixpac Ltd.)

Bild 3: Dynamischer Mischer für Dentalanwendungen

(Bild: Sulzer Mixpac Ltd.)

Laminarer Mischvorgang

Heute stehen statische Mischer in verschiedenen Ausführungen für laminare Mischvorgänge zur Verfügung (**Bild 1 und 2**). Diese kompakten Geräte sind kostengünstig und benutzerfreundlich, können aber bei Komponenten mit stark unterschiedlichen Materialeigenschaften, z.B. unterschiedlicher Viskosität, zu einem suboptimalen Ergebnis führen. Gleiches gilt, wenn von einer Komponente wesentlich mehr verwendet wird als von der anderen. Für solche anspruchsvollen Anwendungen werden häufig dynamische Mischer bevorzugt (**Bild 3**). In diesen erzeugen schnell rotierende Flügel hohe Scherkräfte und ermöglichen so ein präzises Mischen und Austragen. Die beweglichen Teile dieser Mischer rotieren mit bis zu 1.500 min^{-1} , wobei die Axialgeschwindigkeit des Materials im Mischer nur wenige cm/s betragen kann. Auch hier stehen verschiedene dynamische Mischer für die anspruchsvollsten Mischaufgaben in verschiedenen Bereichen – von Autoreparaturwerkstätten bis hin zu Zahnarztpraxen – zur Verfügung.

Produktoptimierung durch Simulation

Benötigen Anwender neue Mischlösungen für ihre speziellen Anforderungen, sind möglichst kurze Entwicklungszyklen gefragt. Eines der am häufigsten genutzten internen Verfahren zur Simulation von Strömungen und deren zeitlicher Änderung ist Computational Fluid Dynamics (CFD). Damit können komplexe Phänomene wie Mehrphasenstrom-Wechselwirkungen, Phasenumwandlung, Fluid-Struktur-Wechselwirkungen usw. berücksichtigt werden. Dank der steigenden Rechenleistung und Fortschritten auf dem Gebiet der numerischen Verfahren werden Simulationen immer häufiger für die Auslegung und Optimierung in verschiedenen Bereichen eingesetzt [1].

Verwendet man moderne Computercluster, dauert die CFD-Berechnung für einen statischen Mischer 48 bis 72 h. Dabei entspricht die Rechenleistung eines Clusters dem Äquivalent von 150 von 200 PCs. Dies zeigt, wie komplex die Berechnungen sind

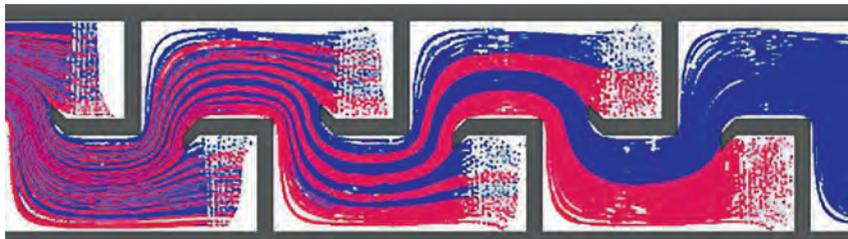


Bild 4: Schematische Darstellung der Schichterzeugung und Mischung in einem laminaren statischen Mischer (Bild: Sulzer Mixpac Ltd.)



Bild 5: Unschärfe Felder sind das Ergebnis numerischer Diffusion bei klassischen CFD-Methoden (Bild: Sulzer Mixpac Ltd.)

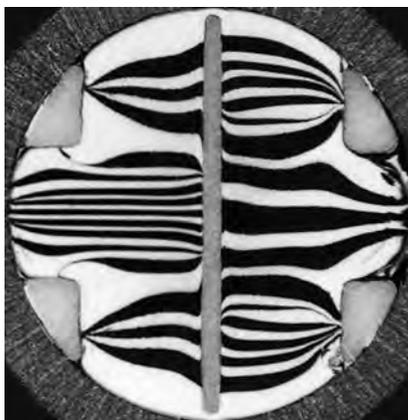


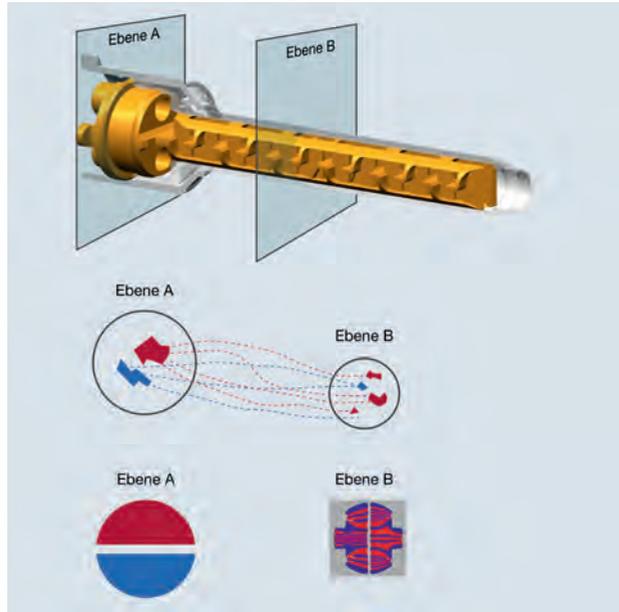
Bild 6: Beobachtete Mischverteilung im statischen Mischer (Bild: Sulzer Mixpac Ltd.)

und wie viele Rechenressourcen für solche Anwendungen erforderlich sind. Doch trotz der Fortschritte, die mithilfe kommerzieller Software möglich geworden sind, lassen sich laminare Mischprozesse nicht exakt vorhersagen. Das laminare Mischen basiert auf der Erzeugung, Teilung und Streckung von Materialschichten innerhalb des Mischers (**Bild 4**). Diese Schichten werden über die Länge des Mischers zunehmend feiner und dadurch gemischt [2].

Diese sehr feinen Schichten können mit herkömmlichen CFD-Gittern nur unzureichend räumlich aufgelöst werden, was zu einem numerischen Fehler, der numerischen Diffusion, führt. Diese numerische Diffusion führt zu einer Überschätzung der Mischqualität

Bild 7: Vorhersage der Mischverteilung eines statischen Mixers (oben) mithilfe von Particle Tracking für zwei Materialien mit unterschiedlicher Konzentration (Mitte) und Berechnung der Mischverteilung mit dem eigenen Tool

(Bild: Sulzer Mixpac Ltd.)



und einem verschmierten Erscheinungsbild der Mischverteilung (Bild 5) – im Gegensatz zur Messung, bei der die klaren Grenzen zwischen den beiden Materialien noch immer erkennbar sind (Bild 6).

Diffusionsfreies Particle Tracking

In den vergangenen Jahren wurde versucht, diese Einschränkungen zu überwinden, um den Entwicklungsprozess für Mixer zu beschleunigen und ein exakteres Mischergebnis zu erzielen. Ein bekannter Ansatz ist die Bestimmung der Mischverteilung und des Konzentrationsfelds mithilfe von diskreten, entsprechend der Konzentration gefärbten Partikeln. Die Farben Rot und Blau in Bild 7 stehen für unterschiedliche Konzentrationen. Mithilfe der Partikel kann berechnet werden, wie sich Materialien mit unterschiedlichen Konzentrationen durch den Mixer bewe-

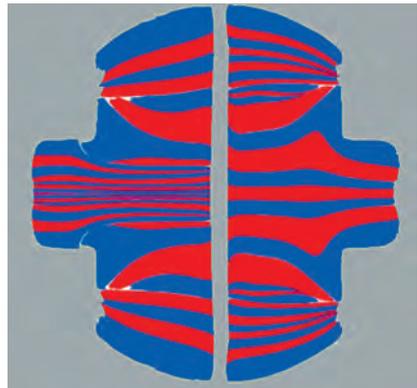


Bild 8: Mit dem Tool simulierte Mischverteilung (Bild: Sulzer Mixpac Ltd.)

und wie sich Materialien mit unterschiedlichen Konzentrationen durch den Mixer bewe-

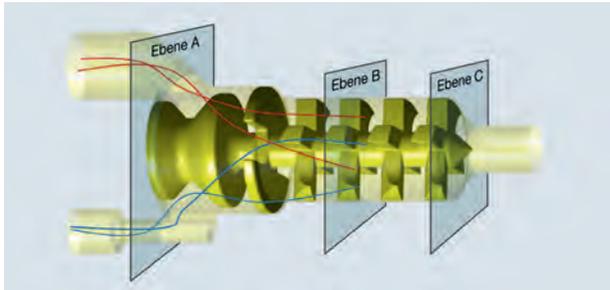


Bild 9: Dynamischer Mischer – die blauen und roten Linien symbolisieren das Particle Tracking

(Bild: Sulzer Mixpac Ltd.)

gen. Diese Methode wird Particle Tracking genannt [3]. Sie ermöglicht eine hochauflösende Abbildung der Mischverteilung und wird bereits seit längerem für statische Mischer angewandt. **Bild 6** zeigt Mischverteilungen, wie sie durch Messungen ermittelt wurden. **Bild 5 und 8** zeigen das mit herkömmlichen CFD-Methoden bzw. mit dem eigenen Tool berechnete Mischergebnis [4].

Particle Tracking bei dynamischen Mixern

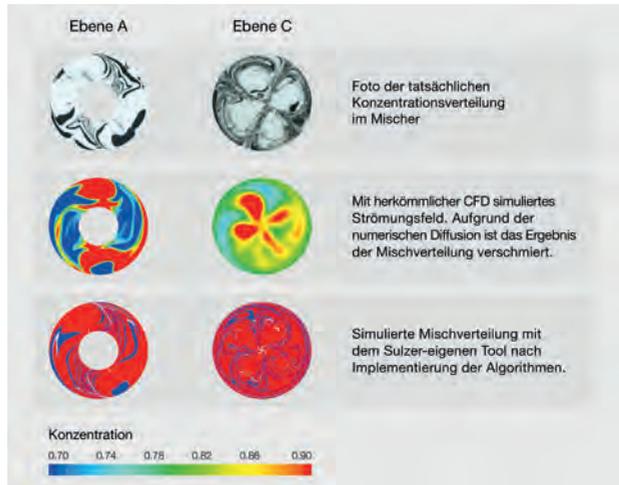
Anders als bei statischen Mischkanülen verändert sich bei dynamischen Mixern das Strömungsfeld im Mischer im zeitlichen Verlauf. Daher ist der bisherige Ansatz, d.h. die Offline-Verfolgung einer begrenzten Anzahl von Partikeln auf der Basis eines stationären Strömungsfelds, nicht mehr anwendbar. Neben dem instationären Strömungsfeld bringt die Mehrskaligkeit des Problems weitere praktische Herausforderungen mit sich. Der Rotor dieser Mischer dreht sich mit bis zu 1.500 min^{-1} . Die Axialgeschwindigkeit der Strömung kann hingegen nur wenige cm/s betragen. Die Simulation des gesamten Vorgangs einschließlich des Befüllens des Mischers und der Erfassung der Rotation mit ausreichender Genauigkeit ist eine Herausforderung.

Methodik und Algorithmen

Bei früheren Ansätzen hatten die Ingenieure versucht, das Particle Tracking mit der Simulation der Strömungsfelder im dynamischen Mischer zu koppeln. Dieser theoretisch korrekte Ansatz scheitert jedoch daran, dass die für solche Simulationen erforderliche Berechnungszeit und Speicherkapazität die praktischen Grenzen der verfügbaren Rechenressourcen sprengen würden. Daher untersuchten die Ingenieure alternative Ansätze für die Offline-Kopplung von Partikeln, ähnlich denen, wie sie für statische Mischer verwendet werden. Die eigentliche Herausforderung liegt in der instationären Eigenschaft der Strömung in dynamischen Mixern.

Bild 10: Vergleich von realen Mischergebnissen eines dynamischen Mixers mit herkömmlichen CFD-Berechnungen und mit dem eigenen Tool

(Bild: Sulzer Mixpac Ltd.)



Dieses Problem konnte dank der zeitlichen Periodizität des Strömungsfelds gelöst werden. Jeweils nach einer Umdrehung wiederholen sich die Zustände des Strömungsfelds im Mixer. So lässt sich eine Berechnung des Strömungsfelds für jede beliebige Zeitdauer ableiten. Dank dieser periodischen Wiederholung des Strömungsfelds kann eine Offline-Partikelverfolgung für dynamische Mixer mit einer begrenzten Anzahl von Partikeln durchgeführt werden. Für die Berechnung werden die Partikel in der Ebene B freigesetzt und rückwärts in Richtung Eintritt (Ebene A) verfolgt, um die Konzentration zu ermitteln.

Verifizierung und Validierung

Bevor sie in der Produktentwicklung Anwendung finden, werden alle numerischen Simulationsmethoden sorgfältig verifiziert und validiert. Dazu müssen die Mess- und Rechensysteme sorgfältig aufeinander abgestimmt sein, um einen zuverlässigen Vergleich zu ermöglichen. Die vorhergesagte Mischqualität wird mit optisch bestimmten Mischverteilungen verglichen. Die blauen und roten Linien in **Bild 9** stellen die Partikelverfolgung im dynamischen Mixer dar. Die Validierungsstudie bestätigt die Anwendbarkeit und Genauigkeit der Methode (**Bild 10**).

Fazit

Nach zahlreichen Tests und Messungen ist es gelungen, ein zuverlässiges Tool zu entwickeln. Die neu entwickelten und implementierten Algorithmen bieten die Möglichkeit, die Mischqualität in dynamischen Mixern genauer vorherzusagen. Außerdem

können die notwendigen Berechnungen innerhalb der praktischen Grenzen verfügbarer Rechenressourcen durchgeführt werden. Das Tool wird genutzt, um die Auslegung und die Optimierung von neuen und vorhandenen Produkten zu beschleunigen. Damit ist man in der Lage, innovative Designs und Lösungen für den stetig zunehmenden Einsatz von 2K-Materialien in allen Bereichen des modernen Lebens zu realisieren.

Literatur

- [1] J. Blazek, *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Oxford, UK: ELSEVIER, 2005.
- [2] E.L. Paul, V.A. Atiemo-Obeng, S. M.Kresta S. M., *Handbook of Industrial Mixing, Science and Practice*, John Wiley and Sons, 2004.
- [3] R. Schlegel, *Numerische Simulation und Analyse laminarer, stationärer Mischprozesse*, Diss. ETH Nr. 14122, 2001.
- [4] F. Muggli, L. Chatagny, J. Lätt, *Lattice-Boltzmann Method for the Simulation of Laminar Mixers*“, 14th European Conference on Mixing Warszawa, 10-13 September 2012.

Klebstoffe messen und vergleichen

Softwarebasiert Messdaten evaluieren

Wann erfüllen Klebeverbindungen sicher ihre Funktion? Auf der Basis von Messungen und der Evaluierung der Daten per Software lassen sich heute wichtige und verlässliche Aussagen treffen.

Als Klebstoffe werden Produkte bezeichnet, wenn sie klebende Eigenschaften besitzen. Die Vielfalt der heutigen Klebstoffe basiert auf Mischungen aus Polymeren natürlicher oder synthetischer Herkunft und natürlichen oder synthetischen Harzen. Diesen Mischungen sind oftmals noch Weichmacher zugesetzt. Klebstoffe können flüssig oder fest sein. Die flüssigen Klebstoffe haben einen thixotropen Fließcharakter und sollten mit Viskositätsmessgeräten gemessen werden können.

Wenn sie ausgehärtet sind, dann hat man Klebefugen vorliegen, die zwei Materialien – Substrate genannt – fest miteinander verbinden. Diese Verbindung wird mit Zugprüfmaschinen auf ihre Festigkeit geprüft. Feste Klebstoffe werden mit Lösungsmitteln in flüssige Klebstoffe überführt und ergeben nach dem Aushärten Klebefugen, die üblicherweise nicht beständig gegen die verwendeten Lösungsmittel sind. Hotmelts sind temperaturabhängige Klebstoffe, die bei Raumtemperatur meistens standfest und formfest sind. Reaktive Klebstoffe können aus Bestandteilen existieren, die miteinander oder mit den Substraten chemisch reagieren und so die Festigkeit der Verklebung erhöhen.

Die Praxis

Die Mischungskomponenten von Klebstoffen müssen miteinander verträglich sein, andernfalls ist mit einer Trennung der Komponenten zu rechnen, die für sich allein nicht klebrig sind. Ob diese Substanzen nun voll- oder teilverträglich sind, zeigt sich an den Eigenschaften. Bei Nichtverträglichkeit sind die Mischungen meist gar nicht klebrig.

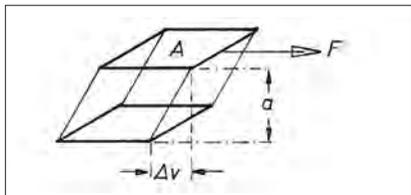


Bild 1: Skizze der Newton'schen Definition der Viskosität (Bild: Gerhard Simon)

Das Gel

Wenn ein Klebstoff von der flüssigen Phase in die feste Phase übergeht, dann spricht man vom Aushärten, weil die Klebefuge dabei immer härter wird. In der Kolloid-Lehre, ($\kappa\omicron\lambda\lambda\alpha$ Leim) wird die Aushärtung der flüssigen Klebstoffe als ein Übergang von der flüssigen Sol-Phase in die Gel-Phase bezeichnet.

Klebstoffe selbst können flüssig oder fest sein, dagegen sollten Klebefugen weder als flüssig und auch nicht als fest, sondern als Gel bezeichnet werden. Während des Vorgangs der Aushärtung nimmt die Festigkeit der Klebefuge immer weiter zu. Auch der Wackelpudding in Mutters Küche ist ein Gel, das im bestimmten Maße standfest und formbeständig ist. Viskositätsmessungen an flüssigen Klebstoffen zeigen manchmal „Nasen“, die man auf ein vorhandenes Gel zurückführt [1]. Solche Gele kann man sich wie einen Schwamm vorstellen, der ein Gerüst besitzt, das Zellen umschließt, in denen sich der Weichmacher, das Harz und die kleineren Moleküle der Polymere befinden. Diese versuchen, sich gleichmäßig zwischen Wand und dem Innerem zu verteilen. Wird so ein Gel unter Druck gesetzt, dann wandern die kleineren Moleküle zwischen der Wand und dem Inneren und auch in die Wand hinein und aus der Wand heraus, wobei sie versuchen, das Gleichgewicht wiederherzustellen. Dieses Gleichgewicht wird auch Strukturgleichgewicht genannt, obwohl dieser Name ursprünglich von der Bildung von Kristallen aus ihrer Lösung stammt. Das Gleichgewicht kann verändert werden, wenn die Temperatur oder der Druck verändert werden. Das Gleichgewicht benötigt manchmal viel Zeit, um sich einzustellen.

Dies ist zu berücksichtigen, wenn, z.B. vor einer Viskositätsmessung mit einer hohen Schubspannung, das Gleichgewicht erst einmal scheinbar kaputt gemacht wird. Auch die Messwerte von Rotationsviskosimetern mit einer Spaltbreite können unterschiedlich sein, während Platte/Kegel-Geräte nach J.Schurz [1] für thixotrope Flüssigkeiten konstantere Werte ergeben. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Deformationsgeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ bei nichtnewtonschen wie thixotropen Körpern nicht linear verläuft. Korrekt ist immer, wenn stattdessen das mittlere Schergeschwindigkeitsgefälle D verwendet wird.

Die Theorie

Grundlegend sind für alle Messungen die theoretischen Vorgaben, die von Newton stammen, zu berücksichtigen – Gl. 1, 2, 3 und (Bild 1).

$$D = \frac{\Delta v}{a} \quad [\text{s}^{-1}] \quad \text{Gl. 1}$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Gl. 2}$$

$$\eta = \frac{\tau}{D} \quad [\text{Pas}] \quad \text{Gl. 3}$$

Es bedeuten hierbei:

D [1/s] = mittleres Schergeschwindigkeitsgefälle

a [m] = Abstand

Δv [m/s] = Geschwindigkeitsdifferenz der Platten

F [N] = angelegte Kraft

A [m²] = Fläche der Platten (Klebefläche)

τ [Pa] = Schubspannung

η [Pas] = Viskosität

Wenn mit Zugprüfgeräten gearbeitet werden soll, dann muss zusätzlich die Federkonstante des Messgerätes bestimmt werden. Für das verwendete Gerät erhielt man hier: $f_c = 2.38 \text{ E}^{-9}$ [m/N]. Daraus ergibt sich für den D -Wert eine Abhängigkeit von Kraft, Zeit und Dicke der Klebefuge (Gl.4).

$$D = \frac{\Delta v}{a} = \frac{\Delta s}{\Delta t} * \frac{1}{a} = \frac{\Delta F}{\Delta t} * \frac{f_c}{a}; \quad \text{Gl. 4}$$

In **Bild 2** werden Kraft/Zeit-Messmöglichkeiten bei konstanter Dehnung mit Zugprüfgeräten gezeigt. Der Unterschied zwischen einem Festkörper und dem thixotropen Klebstoff ist auffallend.

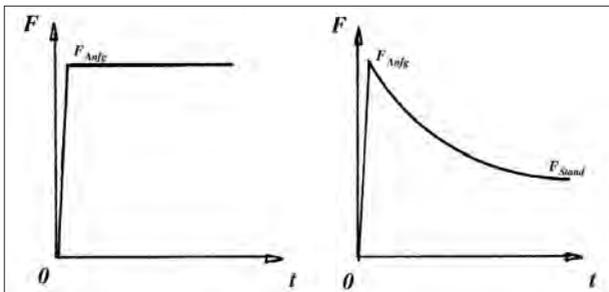


Bild 2: Kraft/Zeit-Messmöglichkeiten: Festkörper, z.B. Metalle (links), thixotrope Körper (rechts) (Bild: Gerhard Simon)

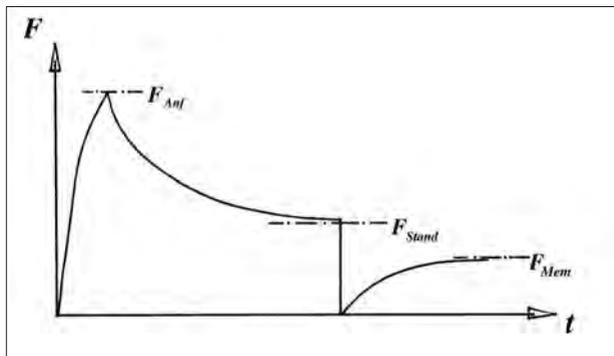


Bild 3: Erweiterte Ausschwingmessung einer Klebefuge

(Bild: Gerhard Simon)

In **Bild 3** ist die Kraft/Zeit-Kurve einer erweiterten Ausschwingmessung von einem thixotropen Klebstoff vorhanden, die im ersten Bereich mit **Bild 2 rechts** identisch ist und im zweiten Bereich den elastischen Bereich des Verlust-Moduls enthält. Diese Kurve wird an einer Verklebung von 20 mm x 20 mm als Scherprüfung mit konstanter Dehnung erhalten. Als Substrat wurde Ramin-Holz verwendet. Die Dicke der Klebefuge muss die Rauigkeit des Substrates überschreiten, sodass die Scherung voll durch den Klebstoff erfolgt [2]. Messungen haben ergeben, dass eine Dicke der Klebefuge von 0,15 bis 0,20 mm in den meisten Fällen ausreichend ist. Die Höhe der Anfangskraft ist variabel und richtet sich nach der Härte der Klebefuge. Die Prüfgeschwindigkeit ist möglichst klein zu wählen und betrug bei den Messungen 1 mm/min.

Durchführung des Messung

Die Traverse des Zugprüfgerätes wird bis zur gewünschten Kraft F_{Anf} abgesenkt, dann wird 5 min. bei stehender Traverse gewartet. Danach wird mit der Höchstgeschwindigkeit zur Kraft Null gefahren und wieder 5 min. bei stehender Traverse gewartet. Damit ist die Messung beendet. Die Wartebereiche sind als Bereiche mit konstanter Dehnung zu verstehen.

Auswertung der Messung

Aus dieser Messung werden die Moduln berechnet mit a =Dicke, l =Länge, b =Breite der Klebefuge und s_e als elastischem Biegeweg.

$$E'' = \frac{F_{Mem} \cdot a^3}{s_e \cdot l^3 \cdot b} \quad (\text{Verlustmodul};)$$

Gl. 5

Für das Speichermodul eines Klebstoffes erhält man:

$$E' = \frac{(F_{\text{Stand}} - F_{\text{Mem}}) \cdot a^3}{s_e \cdot l^3 \cdot b}; \quad (\text{Speichermodul}); \quad \text{Gl. 6}$$

Wie man aus den Gl. 5 und 6 ersieht, wird von den Längenabmessungen eine sehr hohe Genauigkeit verlangt. Dies gilt insbesondere für die Dicke a einer Klebefuge, die von der Oberfläche des zu verklebenden Substrates abhängig und deshalb nur sehr ungenau zu erfassen ist. Der Weg, der zur Lösung dieses Problems führt, ähnelt dem Weg zur Lösung des Problems, das man mit den Winkelfunktionen hat. Man setzt hier den Radius des Einheitskreises auf 1.

Einheitsmessung

Hier sind alle Längenmaße und die Maße, in denen Längenmaße vorhanden sind, auf 1 zu setzen. Später kann mit den tatsächlichen Werten multipliziert oder dividiert werden, jedoch ist das praktisch nicht notwendig. Es ändern sich die drei Newton'schen Gleichungen:

$$D = \frac{\Delta F}{\Delta t} * \frac{f_c}{a}; \quad \rightarrow \quad {}^1D = \frac{\Delta F}{\Delta t}; \quad \text{Gl. 7}$$

$$\tau = \frac{F}{A}; \quad \rightarrow \quad {}^1\tau = F; \quad \text{Gl. 8}$$

$$\eta = \frac{\tau}{D}; \quad \rightarrow \quad {}^1\eta = F * \frac{\Delta t}{\Delta F}; \quad \text{Gl. 9}$$

Auswertung der Einheitsmessung

In einem Diagramm mit der Ordinate 1D und der Abszisse ${}^1\tau$ bildet sich eine Gerade, deren Cotangens eine Ruheviskosität ist, die den Namen p_v -Ruheviskosität bekommen hat. p_v steht hier für "prevalue" (Vorwert). Die Fließgrenze f als Spannungswert erhält man als Schnittpunkt, den diese Gerade in einem ${}^1D/{}^1\tau$ -Diagramm mit der ${}^1\tau$ -Achse bildet.

Einen weiteren Schnittpunkt erhält man in demselben Diagramm, wenn die Werte dafür aus dem zweiten Teil der erweiterten Ausschwing-Kurve stammen. Dieser Schnittpunkt mit der ${}^1\tau$ -Achse ist ebenfalls ein Spannungswert und heißt Mem-Wert. Die p_v -Bewegungsviskosität errechnet sich mit den genannten Spannungswerten nach der Gl. 10 [2].

$$p_v^{\text{Bew}} = p_v^{\text{Ruhe}} * \frac{2}{\pi} * \arctan\left(\frac{\text{Mem}}{f - \text{Mem}}\right); \quad \text{Gl. 10}$$

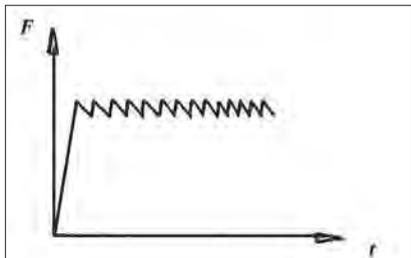


Bild 4: Beispieldiagramm, wenn bei elektronischen Zugprüfgeräten die Wahlmöglichkeit „Kraft const“ eingestellt wird

(Bild: Gerhard Simon)

Das Messgerät

Eigentlich können alle Zugprüfgeräte verwendet werden, die Kraft, Dehnung und Zeit messen. Ältere bzw. einfache Geräte haben Schreiber, die die Zeit durch den Diagramm-Papiervorschub zugänglich machen. Hier muss die Auswertung der Zeit extra mit Lineal und Bleistift vorgenommen werden. Der Kraftwert F_{Stand} kann nicht einfach aus den Papierdiagrammen abgelesen werden, sondern muss nach Angaben der Auswertung der Einheitsmessung über

die 1D , ${}^1\tau$ und ${}^1\eta$ -Werte nach den Gl. 7, 8 und 9 ermittelt werden.

Die elektronischen Zugprüfgeräte haben den Vorteil, dass die Messwerte von Kraft, Dehnung und Zeit als digitale Werte ausgegeben werden und dass bei ihnen das Gerät gleichzeitig mit dem Parametersatz gesteuert wird, sodass ein Kraft/Zeit-Diagramm wie **Bild 3** entstehen kann. Die digitalen Daten von Dehnung, Kraft und Zeit werden als Datendateien, meist mit dem Suffix TRA, (Tensile, Record, Ascii) zurückgegeben. Diese Records bestehen aus String-Zeilen und einem Kopf, in dem auch Teile des Parametersatzes zurückgegeben werden. Die Stringzeilen selbst müssen aufgelöst und in Real- oder Extended-Werte zurückübersetzt werden, woraus nach den obigen Angaben der Auswertung der Einheitsmessung die Spannung der Fließgrenze, die pv-Ruheviskosität, die Memory-Spannung und die pv-Bewegungsviskosität berechnet werden. Für die Auflösung der TRA-Files bietet sich die Software „ScherenB“ an, die [2] als CD beiliegt.

Das Gleichgewicht

Die physikalische Formel für Thixotropie ergibt sich aus einem Kraft/Zeitversuch, der nicht bei konstanter Dehnung, sondern bei konstanter Kraft vorgenommen wird. Hierfür gibt es an den elektronischen Zugprüfgeräten die Wahlmöglichkeit „Kraft const“. Wenn diese Einstellung vorgenommen wird, dann erhält man Diagramme wie in **Bild 4**. Eine exakte Auswertung von **Bild 4** wurde schon vor rd. 50 Jahren vorgenommen [3]. Daraus wird die physikalische Formel 11 für thixotropes Fließen gebildet.

$$D = \frac{\tau - f}{\eta_0} + \frac{\tau - f}{\eta_d} \cdot e^{-\frac{\eta_r}{\tau - f} \cdot (t - b)} \quad (11)$$

Gl. 11

In dieser Formel sind acht Variablen vorhanden. Diese Gleichung kann aufgelöst werden, wenn der Ausdruck $(1/t-b) = 0$ ist. Dann erhält man eine Bingham'sche Gleichung. Wenn der Ausdruck $(1/t-b) = 1$ ist, dann hat man mit Gl. 12 [2] eine Formel für thixotropes Fließen im Gleichgewicht.

$$D = \frac{\tau - f}{\eta_0} + \frac{\tau - f}{\eta_d} \cdot e^{-\frac{\eta}{\tau - f}} ; \quad \text{Gl. 12}$$

Aus Gl. 12 geht bei hohen Schubspannungen hervor, dass die Bewegungsverviskosität sich nach Gl.13 zusammensetzt.

$$\frac{1}{\eta_{so}} = \frac{1}{\eta_0} + \frac{1}{\eta_d} ; \quad \text{Gl. 13}$$

Gl. 13 zeigt, wie die Bewegungsverviskosität und Ruheviskosität zusammenhängen und miteinander in einem Gleichgewicht stehen. Weiterhin können aus Bewegungsverviskositäten und Ruheviskositäten über deren Arrhenius-Darstellungen deren Fließaktivierungsenergien berechnet werden. Man erhält als Ergebnis, dass die Ruheviskositäten im Gleichgewicht energieärmer sind als die Bewegungsverviskositäten [2].

Dadurch liegt der Beweis vor: Bei Klebstoffen bzw. thixotropen Körpern ist der Übergang von Ruheviskosität zu Bewegungsverviskosität ein energetischer Vorgang und kein chemischer. Die Frage, wo die Energie hingehet oder woher sie kommt, wäre von der Quantenphysik zu beantworten – ob und welche Elektronenbahnen näher oder weiter zu den korrespondierenden Atomkernen liegen. Die später erfolgende Abgabe dieser Energie macht das Gleichgewicht möglich. Die Änderung des Gleichgewichtes kann durch Druck, Temperatur und Licht geschehen. Die Rückkehr in das Gleichgewicht geschieht wesentlich langsamer: Messungen der pv-Relaxationsviskosität zur pv-Ruheviskosität haben an verschiedenen Klebstoffen Differenzen von 1:600 bis 1:31300 ergeben [4].

Der n-Wert des Gleichgewichtes

Die Anzahl der Moleküle, die die pv-Ruheviskosität aufweisen, steht mit der Anzahl der Moleküle, die die pv-Bewegungsverviskosität aufweisen, in einem konstanten Verhältnis, wenn Temperatur und Druck gleich gehalten werden. Daraus entsteht Gl. 14 [2].

$$n * pvRuhe = (1-n) * pvBew ; \quad \text{Gl. 14}$$

Da Gl. 14 für das Gleichgewicht gilt und die Gesamtzahl der Polymere 1 ist, ergibt die Zahl n die Anzahl der verhängten Polymere in Prozent, wenn sie mit 100 multipliziert wird. Nach [5, 6] handelt es sich dabei um Verschlaufungen und Verhängungen von Polymeren. Die Zahl n ist dimensionslos und sie wird als Ergebnis der Software „ScherenB“ [2] als Prozentwert der verhängten Polymere mit $n * 100$ angegeben.

Die Klebrigkeit oder der Tack

Mit dem n -Wert lässt sich die Klebrigkeit berechnen, die aus Rolling-Ball-Messungen [2] hervorgeht.

$$Tack = \frac{n}{(1-n)} * 100; \quad \text{Gl. 15}$$

Der Tack ist dimensionslos und bewegt sich im Bereich von 0 bis 100. Die Dimensionslosigkeit erklärt, warum es bisher so schwer war, den Tack zu messen und Prüfmaschinen dafür zu bauen.

Die Adhäsion

Mit dem n -Wert lässt sich auch die Adhäsion berechnen:

$$Adhäsion = f * \frac{n}{(1-n)}; \quad \text{Gl. 16}$$

Da $n/(1-n)$ dimensionslos ist, wird in Gl. 16 die Adhäsion als Spannung ausgegeben. Wird die Adhäsions-Spannung mit der Klebefläche multipliziert, dann erhält man die Adhäsion als Kraft-Größe mit allen Fehlern der eventuell ungenügenden Benetzung.

Die Oberflächenspannung

Aus dem n -Wert lässt sich auch die Oberflächenspannung berechnen (Gl.17).

$$\sigma = f * n; \quad \text{Gl. 17}$$

Gültigkeit der über n berechneten Werte

Es sei daran erinnert, dass Gl. 14 nur für gleichen Druck und gleiche Temperatur gilt. Um Werte für andere Temperaturen zu erhalten, muss die Messung bei anderen Temperaturen durchgeführt werden, z.B. mit einer temperierbaren Umhüllung der Messprobe während der Messung.

Der 2nd Order Transition Point

Mit Messungen bei zu niedrigen Temperaturen kommt man an einen Punkt, an dem

der n -Wert gegen Null geht. Sowohl die Klebrigkeit, die Adhäsion und die Oberflächenspannung gehen auch gegen Null. Auch der F_{Mem} -Wert geht gegen Null. Das heißt: Der Klebstoff ist nicht mehr flexibel und wird an diesem Punkt brüchig. Man kann dies durch einen Test nachprüfen, bei dem Klebstoff in Strängen von ca. 1 bis 2 mm Dicke in temperaturgesteuerte Tiefkühltruhen gelegt wird und diese nach einiger Zeit auf ihre Brüchigkeit geprüft werden [7]. Dieser Punkt gibt mit seiner Temperatur das Ende der Sol/Gel-Begrenzung an. Unterhalb dieser Temperatur ist das Gel nicht mehr klebrig, weil es auch kein Gel mehr, sondern ein (brüchiger) Festkörper ist. Es ist in der Praxis allerdings immer gelungen, durch Temperaturerhöhung Flexibilität und Klebrigkeit wiederzubekommen, wenn beim Bruchversuch kein Riss zu erkennen war.

Die Alterung

Vorhergehend wurde über die unterschiedlichen Geschwindigkeiten berichtet, mit der sich die Ruhe- und die Bewegungsverklemmungen bilden. So benötigt ein Gleichgewicht, z.B. bei höherer Temperatur, Zeit, um sich einzustellen. Auch bei niedrigerer Temperatur wird Zeit benötigt, um ins Gleichgewicht zu kommen. Steht aber im Wechsel zwischen zwei Temperaturen einer Verklebung so wenig Zeit zur Verfügung, dass sich das Gleichgewicht nicht mehr vollkommen einstellen kann, dann tendiert die Verklebung dazu, sich immer weiter der sich langsamer bildenden Viskosität anzunähern. Dies kann dazu führen, dass der Klebstoff in einer verklebten Konstruktion sich mit seinem n -Wert mit der Zeit gegen Null nähert und brüchig wird.

Dies ist nicht nur eine theoretische Möglichkeit, sondern auch in der Praxis zu beobachten. So sind Hallendacheinstürze in Bad Reichenhall, in Falkensee, in Ghana, in Korea, in Buenos Aires und zuletzt in Laatzen bekannt geworden, bei denen die Beteiligung von Klebstoffen an der Unfallursache nicht überall sicher geklärt ist, und mehrere Tote zu beklagen waren. Dagegen ist von dem Hallendacheinsturz in Laatzen bekannt, dass gleiche Dachkonstruktionen zwar mehrfach gebaut wurden, aber in Laatzen stand die Halle an einer relativ stark, auch von einer Straßenbahn befahrenen Straße, deren Erschütterungen ausreichten, um die Brüchigkeit in dem verwendeten Klebstoff hervorzurufen und den Einsturz auszulösen.

Fazit

Die Prüfung von Klebstoffen lässt sich mit elektronischen Zugprüfgeräten einfacher bewerkstelligen als mit nichtelektronischen. Die Prüfung mit Rotations-Viskositätsmessgeräten hat Nachteile, weil sie keine Adhäsion an verschiedenen Substraten und keine Oberflächenspannung messen können. Die wichtigen Angaben wie der n -Wert, die p_v -Bewegungs- und p_v -Ruheviskosität, die Fließgrenze und der Mem-Wert lassen

sich mit der Software „Scheren B“ aus den Messdaten der Einheitsmessung berechnen. Die Spannungswerte und die dimensionslosen Werte sind bei unterschiedlichen Klebstoffen bei gleicher Temperatur vergleichbar. Die Anzahl n der Verhängungen der Polymere wird wohl schwerlich bestimmten Kettenteilen zugeordnet werden können, da sie temperaturabhängig ist und den Energieunterschied zwischen Ruheviskosität und Bewegungsviskosität enthält. Der n -Wert führt dagegen zu einem einfachen Verständnis von Adhäsion, Klebrigkeit, Oberflächenspannung, dem 2nd Order Transition Point und der Alterung von Klebstoffen. Diese Art der Prüfung könnte und sollte für eine sachgemäße DIN-Normung als Grundlage dienen.

Literatur

- [1] J.Schurz, *Visk.Mess.an Hochpolymeren*, 1972, ISBN 3-408-2006-2
- [2] G.Simon, *Klebstoffe und thixotrope Massen*, 2011, ISBN 978-3-00-034578-4, 2.Aufl.mit CD als Beilage – Hinweis: Das Programm „ScherenB“ ist die Version 5.5 vom 16.3.2011. Es wertet die Messdaten der Einheitsmessung aus und liefert als Ergebnis die pv-Ruheviskosität [MPas], die pv-Bewegungsviskosität [MPas], die Fließgrenze [kPa], den Mem-Wert {kPa} und den dimensionslosen n -Wert mit $n*100$ als verhängte Polymere in {%. Der Tack, die Adhäsion und die Oberflächenspannung können nach den Gl. 15,16 und 17 ermittelt werden. Sie sind wesentlich genauer als andere Berechnungsarten. Die anderen Ergebnisse aus der Software „ScherenB“ entstanden aus den Berechnungsvarianten, die in dem Buch beschrieben worden sind.
- [3] G.Simon, *Chemiker ZTG*, 1976, S. 25
- [4] G.Simon, *KGK*, Okt. 2008, S. 525
- [5] W.Kuhn et al. *Makromol.Chem.*, 1971, S. 71
- [6] J.Schurz, *Vorl.Script.*, 1974
- [7] G.Simon, *Adhäsion*, 3, 2001, S. 2

Wissen und verstehen, was man tut

Das Potenzial der Klebtechnik und die Notwendigkeit der Qualitätssicherung

Der Trend zu einer zunehmenden Verwendung von Kleb- und Dichtstoffen hält in vielen Branchen aus Industrie, Handwerk und Dienstleistung weiterhin an. Nicht nur die Automobilindustrie, der gesamte Verkehrsmittelbau inkl. Sonder- und Nutzfahrzeugbau, Schienenfahrzeugbau, Schiffbau, Luft- und Raumfahrt und die Zulieferindustrie der genannten Branchen bedient sich mehr denn je der Klebtechnik, z.B. um neben effizienten und signifikanten Gewichtsreduzierungen auch aerodynamische Effekte zu erzielen. In der Elektronik sind Klebstoffe inzwischen unentbehrlich und tragen in hohem Maße zur Funktionssicherheit bei. Auch im Maschinen- und Anlagenbau setzt sich die Klebtechnik immer mehr durch. Der Industrieverband Klebstoffe geht auch mittelfristig von einem mindestens 4%igem Wachstum des Klebstoffsektors aus.

Die Realisierung der ständig steigenden Anforderungen an Produkte, Bauteile und Komponenten (Bild 1) erfolgt zwangsläufig über die Neu- bzw. Weiterentwicklung von Werkstoffen mit immer anforderungsspezifischeren Eigenschaften und mit neuen Verfahren. In den vergangenen Jahrzehnten wurden für die verschiedensten Einsatzbereiche permanent neue Spezialwerkstoffe entwickelt. Außer den klassischen



Bild 1: Technologie, Ökonomie, Ökologie -> steigende Anforderungen -> neue Werkstoffe

(Bild: Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM))

Von Professor Dr. Andreas Groß, Dr. Erik Meiß
 Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Weiterbildungszentrum
 Klebtechnik | www.kleben-in-bremen.de

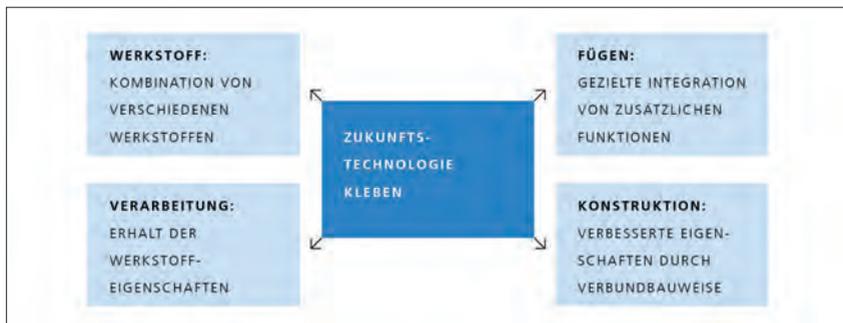


Bild 2: Kleben – die Verbindungstechnik des 21. Jahrhunderts (Bild: Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM))

Metallen kam eine Vielzahl von spezifischen Legierungen, Kunststoffen, aber auch Keramiken und Gläsern zum Einsatz. Die Zukunft wird zweifellos den aus verschiedenartigen Werkstoffen zusammengesetzten Verbundsystemen gehören. Gleichzeitig nimmt jedoch die Werkstoffsensitivität zu. Da im Produkt zunehmend unterschiedliche Werkstoffe miteinander verbunden werden müssen, stellt sich immer mehr die Frage nach der spezifischen Verbindungstechnik.

Kleben – die Verbindungstechnik des 21. Jahrhunderts

Die traditionellen Verbindungstechniken haben wohlbekannte Nachteile. Bei thermischen Verfahren wie dem Schweißen verändert der Werkstoff innerhalb einer Wärmeeinflusszone seine spezifischen Eigenschaften. Mechanische Verfahren wie Nieten oder Schrauben wiederum ermöglichen nur eine punktförmige Kraftübertragung. Außerdem muss man in die zu verbindenden Werkstücke Löcher bohren, den Werkstoff also verletzen und damit schwächen.

Die Klebtechnik (**Bild 2**) dagegen nimmt in diesem Zusammenhang aus vier wesentlichen Gründen eine Schlüsselstellung ein:

1. Über das bei fachgerechtem Einsatz dieser Fügetechnik langzeitbeständige Verbinden gleicher Materialien hinaus ist es klebtechnisch möglich, nahezu alle Werkstoffkombinationen langzeitbeständig zu verbinden.
2. Durch den Fertigungsprozess „Kleben“ werden die Werkstoffeigenschaften der Füge­teile nicht unzulässig verändert. Im Regelfall bleiben sie sogar unverändert erhalten: Der Klebprozess ist im Vergleich zum Schweißen oder Löten relativ wärmearm, eine Verletzung der Füge­teile wie beim Nieten oder Schrauben findet nicht statt.

3. Punkt 1 und 2 führen in der Produktherstellung zu der Möglichkeit, spezifische Werkstoffeigenschaften für das Bauteil optimal zu nutzen. Dadurch sind die Möglichkeiten für neue Bauweisen (z.B. Leichtbauweisen) gegeben.
4. Zudem ist es möglich, durch die Klebtechnik gezielt zusätzliche, über das eigentliche Verbinden hinausgehende Eigenschaften in das Bauteil zu integrieren.

Stand der Klebtechnik

Die moderne Klebtechnik ist somit integraler Bestandteil innovativer Technikentwicklung und leistet damit einen wirtschaftlichen Beitrag zur Stabilisierung bestehender und Schaffung neuer Arbeitsplätze. So wurden 2017 820.000 t Kleb- und Dichtstoffe (ohne zementäre Bauklebstoffe) hergestellt. Die – gemessen am Produktionsumfang – bedeutendsten Produkttypen in 2017 waren Dispersionsklebstoffe mit einer Produktionsmenge von rd. 420.000 t. Dahinter folgten reaktive Klebstoffsysteme mit 250.000 t und Schmelzklebstoffe mit 150.000 t. Hinzu kommen 1.016 Mio. m² Klebebänder (= 150.000 Fußballfelder). Das entspricht einem Umsatz von rd. 3,8 Mrd. €, der für die Volkswirtschaft zu einer indirekt generierten Wertschöpfung von ca. 400 Mrd. € führt [1].

Klebstoffe ermöglichen i.d.R. eine Null-Fehler-Produktion. Leider kommt es immer noch zu häufig zu Klebfehlern, die dann zu über 90% auf Anwendungsfehler zurückzuführen sind. Genau diesen Widerspruch nimmt die DIN 2304 „Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse“ auf: Wenn der wesentliche Grund nicht Klebstofffehler, sondern Anwendungsfehler sind, muss im Bereich der Anwendung nachgebessert werden. Folglich handelt es sich bei der DIN 2304 um eine Anwendernorm mit dem Ziel, klebtechnische Anwendungsprozesse organisatorisch so zu gestalten, dass der gesamte Klebprozess „beherrscht“ wird. Die DIN 2304 gilt für alle Klebstoffklassen und Werkstoffkombinationen sowie für alle Branchen und Klebungen.

DIN 2304 – eine Anwendernorm zur Qualitätssicherung von Klebprozessen

Die DIN 2304 konkretisiert die ISO 9001 und legt den im Produktsicherheitsrecht verbindlichen Stand der Technik für die fachgerechte Organisation der Umsetzung klebtechnischer Prozesse fest. Sie fixiert sowohl die Anforderungen an eine qualitätsgerechte Ausführung von Klebverbindungen als auch die allgemeinen organisatorischen, vertraglichen und fertigungstechnischen Grundlagen für die Herstellung klebtechnischer Verbindungen.

Mit der DIN 6701 „Kleben im Schienenfahrzeugbau“, die inhaltlich direkt kompatibel zur DIN 2304 ist, liegt bereits ein Erfolgsmodell vor. Die ursprünglich nationale Norm wirkt mittlerweile international und wird derzeit in eine Europäische Norm (EN) über-

führt. Die inzwischen langjährige Erfahrung mit der DIN 6701 zeigt, dass die Aufwendungen zweifelsohne leistungsfähig sind und sich bereits mittelfristig sowohl technologisch als auch ökonomisch auszahlen.

Kernelement 1: Klassifizierung der Klebungen

Gemäß DIN 2304 erfolgt die Einstufung der Klebung ausschließlich hinsichtlich potenzieller Auswirkungen auf das Versagen der Klebung. Es werden durch den Anwender alle Klebungen in Sicherheitsklassen eingestuft:

- S 1 – mittelbare/unmittelbare Gefährdung für Leib und Leben
- S 2 – mögliche Gefährdung von Leib und Leben, große Umweltschäden, weitreichende Vermögensschäden
- S 3 – wahrscheinlich keine Personenschäden oder größere Umwelt- bzw. Vermögensschäden, max. Komfort-/Leistungseinbußen und
- S 4 – definitiv keine Personen- oder Umweltschäden bzw. größere Vermögensschäden, maximal Komfort-/Leistungseinbußen

Kernelement 2: Klebaufsichtspersonal (KAP)

Das Klebaufsichtspersonal (KAP) umfasst Mitarbeiter mit nachzuweisender klebtechnischer Kompetenz und trägt im Betrieb Verantwortung für die Klebtechnik und damit verbundene Tätigkeiten. Das KAP ist im Betrieb die zentrale Ansprechstelle für alle qualitätsbeeinflussenden Faktoren des gesamten „speziellen Prozesses“ Kleben.

Kernelement 3: Nachweisführung

Die Klebverbindung ist unter Mitwirkung des Klebaufsichtspersonals (KAP) so zu bemessen, dass ihre maximale Beanspruchbarkeit stets größer ist als ihre reale Beanspruchung. Dieses muss nachvollziehbar dokumentiert werden. Die Nachweisführung selbst kann auf folgenden Wegen erfolgen:

1. Bemessung anhand von Standardproben, inkl. Alterungstest
2. Bauteilprüfung
3. dokumentierte Erfahrung bzw. 4
4. Kombination aus 1. bis 3.

Perspektive: Zertifizierung gemäß DIN 2304

Die DIN 2304 ermöglicht es Anwenderbetrieben, sich von akkreditierten Zertifizierungsstellen zertifizieren zu lassen und damit nachzuweisen, Klebungen nach dem derzeitigen Stand der Technik fachgerecht kontinuierlich auszuführen.

Personalqualifizierung als Voraussetzung eines qualitätsgesicherten Klebprozesses

Das überbetriebliche DVS®-EWF-Personalqualifizierungssystem – ein Baustein der DIN 2304

Das Klebaufsichtspersonal (KAP) muss gemäß DIN 2304 seine klebtechnischen Kompetenzen nachweisen. Daher werden dazu, basierend auf europaweit anerkannten und harmonisierten Richtlinien des DVS (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren) und der EWF (European Federation for Welding, Joining and Cutting), überbetriebliche Qualifizierungsmaßnahmen zum

- EWF-European Adhesive Bonder – EAB/DVS®/EWF-Klebpraktiker/in [2]
Dauer: 40 h, Zielgruppe: ausführende Ebene
 - EWF-European Adhesive Specialist – EAS/DVS®/EWF-Klebfachkraft [3]
Dauer: 120 h, Zielgruppe: Verbindungsmanagement
 - DVS®/EWF- und EWF-European Adhesive Engineer – EAE/(Klebfachingenieur/in) [4]
Dauer: 320 h, Zielgruppe: technische Entscheidungsebene
- angeboten.

Jede Qualifizierungsmaßnahme schließt mit praktischen, schriftlichen und mündlichen Prüfungen, deren erfolgreicher Abschluss zur Verleihung der international anerkannten DVS®/EWF- und EWF-Zeugnisse führt.

Einbettung des DVS®/EWF-Personalqualifizierungssystems in den akademischen Studiengang „Master of Engineering“ - Kleben (M.Eng.)

Im Mittelpunkt dieser berufsbegleitenden Weiterbildung steht das zweijährige Projekt-Kompetenz-Studium (PKS) (**Bild 3**), ein weltweit einzigartiges Studiensystem, bei dem neben der fachlichen Wissensvermittlung immer ein konkretes Projekt innerhalb einer Unternehmung im Zentrum steht. Es ähnelt in den Grundzügen einem Dualen Studium.

Eine elementare Besonderheit stellt die mit dem PKS verbundene Projektleistung dar. Sie wird mit dem gewonnenen Wissen und Können aus der Theorie erarbeitet. Hierzu



Bild 3: Schema des Projekt-Kompetenz-Studiums

– PKS (Bild: Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM))



Bild 4: Klebtechnische Kurse in Theorie und Praxis sind Studienbestandteile (Bild: Fraunhofer

Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM))

wird aus der betrieblichen Tätigkeit des Studierenden heraus ein Projekt definiert, während der Praxisphasen detailliert bearbeitet und von einem Hochschulbetreuer begleitet. Es endet dann mit der wissenschaftlichen Ausarbeitung der Masterthesis. Die Studierenden stellen somit unter Beweis, dass sie das im Studium vermittelte Wissen nutzbringend in der Praxis anwenden können. Dies geschieht schon während der berufsintegrierten Projektarbeit und führt unmittelbar im Unternehmen zu Innovationen, Wettbewerbsvorteilen und erhöhter Profitabilität. Der Aufbau des Studiums wird untergliedert in Projekt- und Theoriephasen (insgesamt 16 Seminarwochen, davon acht Wochen für den DVS®/EWF-Lehrgang EAE). Die Prüfungs- und Unterrichtssprache des Masters of Engineering, inkl. DVS®/EWF-EAE, ist grundsätzlich englisch, lediglich der EAE-Lehrgang wird in Deutsch oder in Englisch durchgeführt. Aufgrund des modularen Aufbaus ist ein Beginn des Programms jederzeit möglich. Lediglich die Zeiten für den DVS®/EWF-Lehrgang EAE (deutsch oder englisch) sind vorgegeben. Die Studierenden besuchen während der Regelstudienzeit von insgesamt 24 Monaten die Studienorte Berlin, Stuttgart und Bremen (**Bild 4**). Ergänzt werden diese durch Auslandsaufenthalte in Europa und Asien.

Die Inhalte des Studiums lassen sich in zwei Teile untergliedern. Diese sind zum einen zu 40% Wirtschaftswissenschaften und zu zum anderen 60% Ingenieurwissenschaften, inkl. DVS®/EWF-Lehrgang EAE. Die wirtschaftswissenschaftlichen Schwerpunkte umfassen:

- Projektmanagement und Organisation
- Volkswirtschaftslehre – Wirtschaft und Recht
- Strategien in der Betriebswirtschaftslehre
- Marketing und Unternehmensführung

Die ingenieurwissenschaftlichen Schwerpunkte beinhalten neben einer Einführung in die Produktions- und Verfahrenstechnik den DVS®/EWF-Lehrgang European Adhesive Engineer – EAE mit folgenden Modulen:

- Werkstoffliche Grundlagen
- Klebtechnische Eigenschaften der Fügeartikelwerkstoffe

- Klebstoffe, Funktionsprinzipien und Anwendungseigenschaften
- Klebstoff- und Oberflächenanalytik
- Adhäsion
- Oberflächenbehandlung
- Fertigungstechnik
- Fügeverfahren
- Klebtechnische Konstruktion
- Qualitätsmanagement, Prüftechnik, Alterung
- Arbeitssicherheit und Umweltaspekte

Potenzialträger aus den Unternehmen können sich berufsbegleitend akademisch mit zweifachem Abschluss weiterbilden: „Master of Engineering – M.Eng.“ und „DVS®/ EWF-European Adhesive Engineer – EAE“. Das Weiterbildungsangebot vermittelt neue und sofort umsetzbare Erkenntnisse aus der aktuellen Management- und Betriebswirtschaftslehre sowie der industriellen Klebtechnik. Durch dieses berufsintegrierte Weiterbildungsprogramm binden die Unternehmen ihre Mitarbeiter i.d.R. über die jeweilige Studienzeit hinaus an das Unternehmen. Indem das Unternehmen seinen Mitarbeitern diese innovative Weiterbildungsmöglichkeit anbietet, erhöht sich die Zufriedenheit und Loyalität der Mitarbeiter dem Unternehmen gegenüber. Dieses wiederum profitiert von einem positiven Imagetransfer und steigert die Attraktivität auf dem Arbeitskräftemarkt.

Fazit

Kleben ist deutlich komplexer, als der reine Klebstoffauftrag und Fügeprozess vermuten lassen. Qualitätssicherung ist hierbei für eine erfolgreiche Anwendung der Klebprozesse unverzichtbar. Entscheidend ist die ganzheitliche Betrachtung des Klebprozesses als Abfolge einer Kette von Prozessschritten – von der Idee bis zum fertigen Produkt, inkl. der Instandsetzung/Reparatur. Die DIN 2304 - wie die DIN 6701 für den Schienenfahrzeugbau – gibt hier wertvolle Hilfestellungen und konkretisiert dafür den Kerngedanken der ISO 9001 der maximalen Fehlerprophylaxe bei Fertigungsprozessen, die zerstörungsfrei nicht einhundertprozentig verifizierbar sind. Die Kernelemente der genannten Normen (Klassifizierung jeder Klebung – Klebaufsichtspersonal mit nachzuweisender Klebkompetenz – Nachweisführung: maximale Beanspruchbarkeit > reale Beanspruchung) führen zu einer ganzheitlichen Auseinandersetzung mit der jeweiligen Klebung. Der Anwender muss sich folglich mit der Prozesskette aktiv auseinandersetzen, um qualitativ hochwertige Klebungen zu produzieren. Dies ist nur mit klebtechnisch ausreichend qualifiziertem Personal möglich und was für jede Phase der Prozesskette, „Kleben“ gilt. Es klingt trivial, aber man muss wissen und ver-

stehen, was man warum tut. Das vermeidet Fehler und hilft, das Vertrauen in die Klebtechnik zu stärken. Die dazu notwendige ganzheitliche Betrachtung und Umsetzung des jeweiligen Klebprozesses ist ohne qualifiziertes Personal schlicht nicht möglich.

Literatur

[1] Industrieverband Klebstoffe e.V., Presseinformation Wirtschaftsbericht 2017.

[2] Guideline EWF 515 / Richtlinie DVS 3305

[3] Guideline EWF 516 / Richtlinie DVS 3301

[4] Guideline EWF 517 / Richtlinie DVS 3309

Präzision. Als Maßstab.

Präzision und Leistung, auf die Sie zählen können.

Vom großvolumigen Dosieren bis hin zu automatisierten und präzisen Dosier-Applikationen bietet Ihnen unser neues Produktsortiment viele Möglichkeiten. Unser umfangreiches Portfolio an 1K und 2K Dosierventilen wird hierdurch optimal für Sie ergänzt.

Nutzen Sie unsere manuellen Anlagen und Robotersysteme zum Dosieren von 1K oder 2K Materialien wie Epoxy, Silikon, Urethan, Acryl und Schmierstoffen.

Welcher Applikations-Herausforderung Sie auch immer gegenüberstehen, Nordson hat jahrzehntelange Anwendungserfahrung, um Ihnen die richtige Lösung anbieten zu können.

Jetzt informieren unter
www.nordson.com/nse

oder senden Sie uns eine Email
ics.eu@nordson.com



Licht richtig einsetzen

Was man über Aushärtungslampen wissen sollte

Wenn es um das schnelle und effiziente Verkleben von Bauteilen geht, werden häufig UV-härtende Klebstoffe eingesetzt. Denn aufgrund ihres sekundenschnellen Härtingsmechanismus können kurze Taktzeiten in der Serienfertigung erreicht werden. Für das Realisieren optimaler Aushärtungsprozesse spielen insbesondere die Belichtungslampen eine entscheidende Rolle.

UV-härtende Klebstoffe haben sich vor allem in der Unterhaltungselektronik etabliert. Kein Wunder: Im Sekundentakt müssen hier z.B. Einzelteile von Minilautsprechern verklebt, Displays versiegelt oder Mikroschalter vergossen werden. Aber auch im Automobilbereich, etwa bei der Verklebung von Stator und Gehäuse bei E-Motoren, ermöglicht der Einsatz UV-härtender Klebstoffe schnelle Klebprozesse. Das Besondere an diesen Klebstoffen ist ihr Härtingsmechanismus. Sie sind mit einem Photoinitiator ausgestattet, einer chemischen Verbindung, die durch die Absorption von UV-Licht in funktionale Gruppen zerfällt und somit die Polymerisation startet. In der Aushärtungsreaktion verbinden sich die Monomere im Klebstoff zu einem Polymer und damit zu einer fest vernetzten Struktur. Ein Lichtimpuls von < 1s kann ausreichen, um den Klebstoff vollständig auszuhärten und Bauteile dauerhaft zu verbinden.

Zum Aushärten von UV-härtenden Klebstoffen werden heute vorrangig leistungsstarke LED-Strahler eingesetzt. Wie auch in anderen Beleuchtungsbereichen mittlerweile etabliert, sind mit LEDs bestückte Lampen effizient und energiesparend. Die typische Lebensdauer von LED-Aushärtungslampen liegt häufig bei mehr als 20.000 h und übertrifft konventionelle Strahler damit um das 20-fache. Mussten Entladungslampen bis zu 20 min. vorgewärmt werden, erlangen LEDs in ms ihre volle Leuchtkraft. Das schmale Emissionsspektrum der Leuchtdioden sowie ihre hohen Intensitäten ermöglichen eine optimale Anpassung zwischen Klebstoff und Aushärtungslampe.

Um tatsächlich von den Vorteilen des Einsatzes UV-härtender Klebstoffe und von Hochleistungs-LED-Strahlern zu profitieren, gilt es jedoch, ein paar wichtige Faktoren zu beachten.

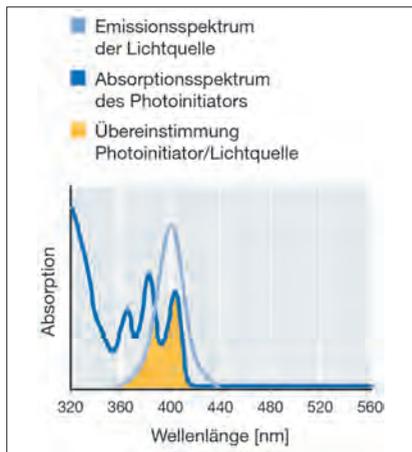


Bild 1: Die Wellenlänge der Lampe muss zum Absorptionsspektrum des Klebstoffs passen

(Bild: DELO Industrie Klebstoffe)

Die Lampe muss zum Klebstoff passen

Ein entscheidendes Kriterium, damit die Lichthärtungsreaktion überhaupt ablaufen kann, ist, dass das Wellenlängenspektrum der Aushärtungslampe sich mit dem Absorptionsspektrum des Photoinitiators überschneidet (**Bild 1**). Photoinitiatoren haben ein für sie typisches Absorptionsspektrum, das je nach chemischer Verbindung bei 370 bis 480 nm endet. Damit es nicht zu einer unkontrollierten Aushärtung kommt, sind die Absorptionsspektren meist so gewählt, dass z.B. Tageslicht den Klebstoff nicht oder nur sehr langsam, aushärten kann. LED-Aushärtungslampen emittieren bei 365, 400 oder 460 nm – analog zu den Absorptionsspektren der Klebstoffe.

Die Lampe muss zum Füge teil passen

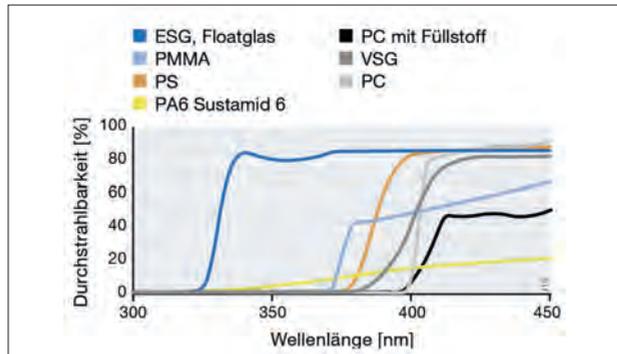
Damit ein spezifischer lichthärtender Klebprozess tatsächlich ablaufen kann, ist es wichtig, dass noch eine zweite Bedingung erfüllt ist: Mindestens ein Füge teil muss im Absorptionbereich des Klebstoffs durchstrahlbar sein.

Ein Beispiel: Displays von Smartphones oder Tablets werden zum Schutz meist mit einem „Deckglas“ versehen. Dieses kann sowohl aus Glas als auch aus einem Kunststoff wie PMMA (Polymethylmethacrylat) oder PC (Polycarbonat) bestehen. Während Glas bereits ab 325 nm Wellenlänge eine Durchlässigkeit für das Licht der Strahlungsquelle hat, blocken die genannten Kunststoffe in diesem Bereich das Licht noch vollständig ab. PC hat z.B. erst ab 400 nm Wellenlänge eine Transmission. Würde eine Verklebung mit PC also mit einem UV-Strahler (365 nm) belichtet, würde keine Polymerisation ablaufen, da das Licht den Klebstoff nicht erreicht. Für die Auswahl eines passenden LED-Strahlers muss also auch das Transmissionsspektrum des Bauteils bekannt sein (**Bild 2**). Dieses lässt sich über entsprechende Messgeräte bestimmen.

Einfluss der Intensität auf Aushärtungsprozess

Einen weiteren Einfluss auf den Aushärtungsprozess hat die Intensität der Lampe. Handelsübliche LED-Lampen für die Klebstoffaushärtung liegen bei bis zu

Bild 2: Transmissionspektren verschiedener Materialien im Vergleich (Bild: DELO Industrie Klebstoffe)



12.000 mW/cm². Der Vorteil dieser hohen Intensitäten ist in erster Linie, dass sich Prozesszeiten verkürzen lassen – auch bei „schwierigeren“ Verklebungen: Etwa wenn baulich bedingt zwischen der Lichtquelle und den zu verklebenden Bauteilen größere Abstände bestehen oder dickere Klebschichten sehr schnell ausgehärtet werden sollen. Auch kann eine Klebstoffschicht zwischen teiltransparenten Füge­teilen, die oft nur 10% des Initialwerts durchlassen, ausgehärtet werden.

Lampen mit hoher Intensität bringen noch einen weiteren Vorteil mit sich. Die Lebensdauer der Lampe kann über die Herstellerangaben hinaus erhöht werden, wenn die volle Intensität der LEDs (z.B. 2.000 mW/cm²) nicht benötigt wird und die Aushärtung bei niedrigeren Intensitäten erfolgt. Durch die Vorgabe des Stroms lässt sich auch bei LED-Lampen die Intensität stufenlos zwischen 0 – 100% einstellen.

Für die Auswahl der Intensitätshöhe ist es enorm wichtig, den Gesamtprozess zu betrachten. Denn nicht immer ist die Einstellung besonders hoher Intensitäten vorteilhaft, da diese auch zu einer fehlerhaften Aushärtung führen können. Der Gesamtprozess umfasst den Arbeitsabstand, die Durchstrahlbarkeit der Bauteile ebenso wie die Dicke der Klebstoffschicht. Die Distanz zwischen Lichtquelle und Füge­teil hat z.B. einen Einfluss darauf, wieviel Intensität am Bauteil ankommt. Je geringer der Arbeitsabstand ist, desto schmaler ist das Strahlprofil und desto höher die Intensität. Dieser Effekt ist bei Punktstrahlern noch massiver als bei Flächenstrahlern und schon 2 mm machen hier einen deutlichen Unterschied. Als Faustregel gilt: Bei einer Verdopplung des Arbeitsabstands nimmt die Intensität um Faktor vier ab.

Die Lampengröße muss passen

In der Industrie werden zwei verschiedene Lampentypen unterschieden: Punkt- und Flächenstrahler. Bei punktuellen oder linienförmigen Verklebungen, wie sie bei der



Bild 3: Kompakte UV-Flächenstrahler sorgen für ein homogenes Aushärten (Bild: DELO Industrie Klebstoffe)



Bild 4: DELOLUX 50 Punktstrahler für kleinere Flächen (Bild: DELO Industrie Klebstoffe)

Fertigung von Mikroelektronik oft vorkommen, werden Punktstrahler verwendet. Sollen große Flächen, wie z.B. Displays, oder gleichzeitig viele Bauteile (z.B. Mikroschalter-Vergüsse) im Batchprozess belichtet werden, kommen Flächenstrahler zum Einsatz. Je nach Anwendung können also unterschiedliche Strahler dienlich sein.

Flächen homogen aushärten

Flächenstrahler (**Bild 3**) sorgen für die gleichzeitige Belichtung großer Flächen oder für die Durchlaufbelichtung in langen Produktionsstraßen. Bei der Ausgestaltung von Fertigungslinien empfiehlt es sich, Flächenstrahler einzusetzen, die beliebig modular aneinanderreihbar sind, ohne dass es zu Abschattungen kommt, weil das Gehäuse größer ist als die Leuchtfläche. Die Flächenstrahler DELOLUX 20 und DELOLUX 202 erfüllen mit den zwei Bauformen mit Lichtaustrittsflächen von $100 \times 100 \text{ mm}^2$ sowie $200 \times 50 \text{ mm}^2$ diese Anforderung und haben einen schlanken Randbereich.

Ziel sollte es immer sein, die gesamte zu verklebende Fläche mit gleicher Intensität zu belichten. Werden große Flächen belichtet, ist zudem entscheidend, dass der Klebstoff spannungsfrei aushärten kann, damit es nicht zu Verzug kommt. Nur durch eine homogene Belichtung kann sichergestellt werden, dass der Klebstoff in allen Bereichen gleichmäßig und vollständig aushärtet und seine für die Anwendung erforderlichen Eigenschaften erreicht. Weniger gute Lampen haben oft aufgrund billiger Optiken und LEDs ein inhomogenes Belichtungsprofil, sodass die Intensität in der Mitte des Strahlers hoch ist, an den Rändern jedoch abfällt. Schlechte Klebstoffeigenschaften bis hin zum Bauteilversagen sind die Folge.

Punktgenaues Aushärten

Punktstrahler (**Bild 4**) werden meist eingesetzt, wenn Flächen, die nur wenige Quadratmillimeter groß sind, zuverlässig belichtet werden sollen. Die meisten Punktstrah-

ler verwenden Fokusoptiken, die, wie z.B. bei der Aushärtungslampe DELOLUX 50, vom Anwender flexibel gewählt und aufgeschraubt werden können. Dadurch lassen sich anwendungsspezifisch Spotgrößen von 1 bis 10 mm Durchmesser und Intensitäten von bis zu 12.000 mW/cm² realisieren. Punktstrahler werden meist passiv gekühlt. Eine Besonderheit unter den Punktstrahlern bietet die Lampe DELOLUX 80 (23 mm Ø Belichtungsfläche), bei der die LEDs durch eine festverbaute, wartungsfreie Wasserkühlung gekühlt werden.

Qualitätskontrolle

Schon minimale Verunreinigungen, irrtümliche Parameteränderung oder der Ausfall einer LED wirken sich auf die Intensität von LED-Strahlern aus. Um dauerhaft eine homogene Beleuchtung und damit eine hohe Verklebungsqualität sicherzustellen, muss die Intensität der einzelnen Lampenköpfe folglich regelmäßig überprüft werden. Hierzu können spezielle Messgeräte eingesetzt werden.

Fazit

UV-härtende Klebstoffe ermöglichen in Kombination mit leistungsstarker Lampentechnik schnelle Aushärtungsprozesse – vorausgesetzt, alle Parameter wurden aufeinander abgestimmt. Es muss immer das gesamte System aus Klebstoff, Aushärtungslampe (Wellenlänge, Intensität und Typ), Bauteil und Rahmenbedingungen der Fertigungslinie betrachtet werden, um optimale Prozesse zu realisieren. Außerdem ist es empfehlenswert, einen Lampentyp zu wählen, mit dem sich Produktionslinien beliebig erweitern lassen, um eine große Flexibilität bei der Ausgestaltung der Fertigungslinien zu haben. In Summe sollte man bei der Auswahl der Technik immer folgende Aspekte im Blick haben:

- Die Wellenlänge des UV-Strahlers muss zum Absorptionsbereich des Klebstoffs passen.
- Mindestens ein Fügeteil muss im Absorptionsbereich des Klebstoffs durchstrahlbar sein.
- Unterschiedliche Lampenarten sorgen für optimale Belichtung für das entsprechende Anwendungsfeld.
- Strahlungsprofil und Intensität ändern sich – besonders bei Punktstrahlern – durch den Arbeitsabstand.
- Die homogene Belichtung ist entscheidend für spannungsfreies Aushärten großer Flächen.
- Die Intensitätskontrolle ist zur Qualitätssicherung erforderlich.
- Für die Auswahl des passenden UV-Strahlers muss immer der gesamte Prozess betrachtet werden.

Elastisch

Flexible Kleb- und Dichtstoffe für die Industrie

Längst haben elastische Klebstoffe Bild 1 Einzug in viele Bereiche der Industrie gehalten und verdrängen zunehmend herkömmliche Fügeverfahren wie das Schweißen und das Nieten. Sei es im Metallbau, im Behälter- und Apparatebau, im Maschinen- und Anlagenbau, in der Möbelindustrie, in der Lüftungs- und Klimatechnik, in der Elektroindustrie, im Yacht- und Bootsbau, im Fahrzeugbau, in der Luftfahrtindustrie sowie in vielen Bereichen der Kunststofftechnik – ohne den Einsatz der flexiblen Klebstoffe wäre eine Produktion vieler moderner Güter nicht durchführbar.

Diese Klebstoffe kombinieren die Vorteile der Kleb- und Dichttechnologie und werden überall dort eingesetzt, wo hohe Anforderungen an die Elastizität und Dichtwirkung einer Fügeverbindung gestellt werden.

Eine extrem hohe Kraftübertragung steht bei solchen Anwendungen i.d.R. nicht im Vordergrund. Vielmehr sollen dynamische Belastungen, wie z.B. Vibrationen und Ausdehnungen der Fügeteile, aufgenommen und ausgeglichen werden.

Nachfolgend werden einige der Vor- und Nachteile der weitverbreiteten elastischen Kleb- und Dichtstoffe vorgestellt und drei wichtige Produktgruppen, die Polyurethane, die MS-Polymere und die Silikone, näher betrachtet. Im Anschluss wird noch auf einen Trend in der Industrie, die Hybridverklebung, die Kombination von elastischen Kleb- und Dichtstoffen und Klebebändern, eingegangen.

Abschließend wird der richtige Umgang mit den elastischen Klebstoffen hervorgehoben, da dieser für das Resultat – eine möglichst langlebige Verklebung – von entscheidender Bedeutung ist.

Vorteile elastischer Klebstoffe

Der Einsatz von elastischen Kleb- und Dichtstoffen bietet für die Anwender eine ganze Reihe von Vorteilen [1]:

- Kombination von Kleben und Dichten – die elastischen Klebstoffe können sowohl zum Kleben von Bauteilen als auch zum Abdichten verwendet werden. Jeder elas-

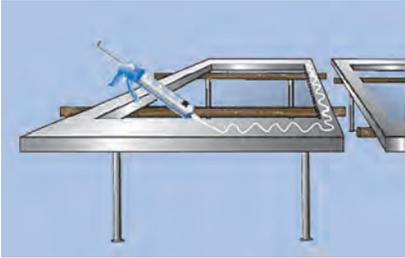


Bild 1: Elastische Kleb- und Dichtstoffe im Produktionsprozess (Bild: WEICON GmbH & Co. KG)



Bild 2: Verklebung in der Automobilindustrie (Bild: WEICON GmbH & Co. KG)

tische Klebstoff fungiert somit gleichzeitig auch als Dichtstoff. Durch ihre Verwendung werden Materialien in nur einem Arbeitsgang sowohl miteinander verbunden als auch sicher abgedichtet.

- Ideal für die Leichtbauweise – in industriellen Bereichen, wie z.B. der Luft- und Raumfahrt und dem Fahrzeugbau (**Bild 2**), ist die Leichtbauweise, also die max. Reduktion des Gewichtes, ein wichtiger Bestandteil der Konstruktionsphilosophie. Diese Art der Bauweise bietet einige Vorteile. Durch das geringere Gewicht wird eine geringere Antriebsleistung für die gleichen Fahr- oder Flugeigenschaften benötigt. Darüber hinaus sinkt der Kraftstoffverbrauch, wodurch die Betriebskosten ebenfalls gesenkt werden. Um eine besonders leichte Bauweise zu erreichen, ist der Einsatz von Klebstoffen ein seit Jahren etabliertes Mittel.
- Gleichmäßige Spannungsverteilung – neben dem geringeren Gewicht bieten die Klebstoffe einen weiteren Vorteil gegenüber den früher vorherrschenden genieteten Strukturen: Die Spannungskonzentrationen bei großflächigen Verbindungen werden minimiert. Durch die gleichmäßige Verteilung der Spannung werden Materialermüdung und Beschädigungen des Materials vermieden. Darüber hinaus können Bauteile, die durch elastische Klebstoffe miteinander verbunden werden, höheren dynamischen Belastungen standhalten.
- Keine Veränderung der Materialoberfläche – beim Einsatz der Klebstoffe kommt es nicht zu Veränderungen der Materialoberfläche, wie es z.B. beim Schweißen oder Löten der Fall wäre. Dadurch, dass die Fügeteile weder thermisch noch mechanisch beeinträchtigt werden, bleiben die spezifischen Eigenschaften der Materialien erhalten. Darüber hinaus wird durch die Aushärtung nach der Verklebung automatisch eine Dichtwirkung erzielt, die Passungsrost und Kontaktkorrosionen verhindert.
- Ausgleich unterschiedlicher thermischer Ausdehnung der Bauteile – bei der Verbindung von Werkstoffen aus unterschiedlichen Materialien, z.B. Glas mit Metall, helfen

elastische Klebstoffe dabei, Spannungen aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnung abzubauen und auszugleichen. Die elastische Klebschicht wirkt als eine Art Puffer, der die unterschiedlichen Bewegungen der Bauteile auffängt. Die Verbindung von Glas mit dem sich stärker ausdehnenden Metall wird dadurch nicht beeinträchtigt.

- Ausgleich von Fügepartietoleranzen – konstruktionsbedingt muss beim Fügen von Bauteilen oftmals eine gewisse Toleranz überbrückt werden. In vielen industriellen Bereichen, wie im Fahrzeugbau oder in der Metallverarbeitung, geht es oft um die Überbrückung von mehreren Millimetern. Hier bieten sich elastische Klebstoffe an, da sich diese für größere Toleranzen bestens eignen und zu sicheren Verklebungen führen.
- Keine Nachbearbeitung erforderlich – geschweißte Oberflächen müssen durch Schleifen nachbearbeitet oder mit Spachtelmasse wieder ausgeglichen werden. Bei der Verwendung elastischer Klebstoffe können diese aufwändigen Arbeitsschritte in der Regel entfallen.

Nachteile elastischer Klebstoffe

Neben den zahlreichen Vorteilen gilt es jedoch, auch die nachstehenden Eigenschaften der elastischen Klebstoffe in etwaige Konstruktionsüberlegungen einzubeziehen:

- Oberflächenvorbehandlung – bei den zu verklebenden Werkstücken ist eine sorgfältige Vorbehandlung der Oberflächen notwendig. Diese Vorbehandlung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität und Haltbarkeit der Klebung, wird aber oft als lästig empfunden und eher negativ beurteilt.
- Lange Aushärtezeiten – im Gegensatz zu mechanischen Verfahren, wie Schweißen, Nieten, Schrauben oder zu anderen Klebstoffen, die mitunter innerhalb kürzester Zeit aushärten und belastbar sind, benötigen elastische Klebstoffe relativ lange Aushärtezeiten.
- Begrenzte Temperaturbeständigkeit – ist ein elastischer Klebstoff dauerhaft hohen Temperaturen ausgesetzt, so sinken seine mechanischen Eigenschaften, wie die Zug- und Druckfestigkeit, und die Tragfähigkeit der Klebung lässt nach.
- Einfluss von Feuchtigkeit auf die Klebung – wenn Feuchtigkeit in die Klebschicht vordringt, so kann die Klebung geschwächt oder sogar gelöst werden. Feuchtigkeit beschleunigt den Alterungsprozess von Klebstoffen erheblich. Bei Klebungen ist darauf zu achten, dass sie nicht andauernd Feuchtigkeit ausgesetzt sind. Gelegentlicher Kontakt mit Wasser ist jedoch als unkritisch zu sehen, wenn die Klebung danach wieder vollständig trocknen kann.
- Keine zerstörungsfreie Prüfung möglich – im Gegensatz zu Schweißnähten, die sich optisch auf Fehler überprüfen lassen, können Verklebungen nur sehr bedingt mithilfe von Ultraschall oder Infrarot untersucht werden. Bei den elastischen Klebungen

gewährleistet nur eine aufwändige und genaue Überwachung des Herstellungsprozesses eine möglichst geringe Fehlerquote. Dies soll durch die DIN 2304 „Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse“ für die allgemeine Industrie und das Handwerk gewährleistet werden. Die Anwendernorm hat das Ziel, den gesamten klebtechnischen Anwendungsprozess organisatorisch zu „beherrschen“. Die DIN 2304 gilt für alle kraftübertragenden Klebungen in allen Branchen bis auf den Schienenfahrzeugbau (hier liegt mit der DIN 6701 eine eigene Norm vor) [4].



Bild 3: PU-Klebstoffe wie Flex 310 PU sind dauerelastisch und haftstark und zeigen eine hohe elastische Verformbarkeit (Bild: WEICON GmbH & Co. KG)

Elastische Klebstoffe in der Industrie

Neben einigen anderen Systemen sind Polyurethane, MS-Polymere und Silikone die in modernen Herstellungsverfahren am häufigsten eingesetzten Kleb- und Dichtstoffe. Sie können in einem breiten Anwendungsspektrum zum Einsatz kommen.

Polyurethane

Polyurethane sind Kunststoffe oder Kunstharze, die aus der Polyadditionsreaktion von Dialkoholen bzw. Polyolen mit Polyisocyanaten entstehen. Charakteristisch für Polyurethane (abgekürzt PU oder auch PUR) ist die Urethan-Gruppe [2]. Polyurethan-Klebstoffe sind als 1- oder 2K-Klebstoffe erhältlich, welche durch Polyaddition aushärten. Die 1K-PUR-Klebstoffe härten unter Zugabe von Luftfeuchtigkeit und/oder Wärme aus. Es besteht die Möglichkeit, beide Aushärtemechanismen zu verbinden, sodass eine erste Handfestigkeit durch die Luftfeuchtigkeitshärtung, die Endfestigkeit der Verklebung aber erst unter Wärmeinwirkung eintritt. Polyurethane sind dauerelastisch und haftstark und zeigen eine hohe elastische Verformbarkeit. Sie sind frei von Silikonen und nach der Aushärtung überlackierbar und schleiffähig. Im Gegensatz zu Silikonen härten Polyurethane weitestgehend geruchsfrei aus. Sie sind im Vergleich zu Silikonen jedoch weniger beständig gegenüber aggressiven Medien und UV-Strahlung.

Polyurethane eignen sich für strukturelle Verklebungen von Metallen und Kunststoffen und finden sich in einer Vielzahl von industriellen Anwendungen, wie im Fahrzeugbau, im Metallbau oder in der Kunststoffverarbeitung. Sie eignen sich z.B. sehr gut zur Verklebung von Metallen auf GFK oder von Stahlprofilen auf Holz. Im Fahrzeugbau



Bild 4: MS-Polymere, wie Flex 310 M HT 200, sind – anders als Silikone – für den Einsatz von konstruktiven Verbindungen prädestiniert

(Bild: WEICON GmbH & Co. KG)

werden Polyurethane häufig für das Kleben von Sichtfenstern oder Sicherheitsglas auf lackierten Metallrahmenprofilen eingesetzt. Ein Beispiel für einen solchen Klebstoff ist Flex 310 PU (**Bild 3**).

MS-Polymere

Alternativ zu den seit Jahren bekannten und bewährten Polyurethanen sind weiterentwickelte Silan-Modifizierungen am Markt erhältlich, die – grob gesagt – die Vorteile eines Polyurethans mit den Vorteilen eines Silikons vereinen: Die MS-Po-

lymere. Hierbei handelt es sich um haftstarke Kleb- und Dichtstoffe für formschlüssige Verbindungen von Metallen, Kunststoffen und vielen anderen Materialien sowohl mit glatten als auch mit porösen Oberflächen. Auch ohne den Einsatz von Haftvermittlern weisen sie eine hohe Klebkraft auf, sind „nass in Nass“ überlackierbar und frei von Silikonen und Isocyanaten.

Die mit MS-Polymeren erstellten elastischen Klebverbindungen weisen eine hohe Beständigkeit bei Schlag-, Schock- und Vibrationsbelastungen auf. Sie werden häufig auch als Hybridpolymere bezeichnet. Man könnte auch sagen, dass sich in diesen Produkten die positiven Eigenschaften zweier unterschiedlicher Werkstoffe vereinen und die negativen Eigenschaften vermieden oder zumindest reduziert werden. Das Ergebnis sind Produkte mit einem extrem breiten Anwendungsspektrum. Außerdem bieten MS-Polymere – anders als Silikone – deutlich höhere Festigkeiten, was sie für den Einsatz von konstruktiven Verbindungen prädestiniert.

Typische Anwendungsgebiete sind das gummielastische Kleben und Dichten als Alternative zu Silikonen, der Einsatz als Dichtstoff zur Naht- und Fugenabdichtung im Automobil-, Schiff- und Schienenfahrzeugbau und Verklebungen in der Solartechnik, der Metallverarbeitung, der Klima- und Lüftungs- sowie in der Reinraumtechnik. Ein Beispiel für ein Produkt dieser Gruppe von elastischen Klebstoffen ist Flex 310 M HT 200, der für strukturelle Verklebungen in der Industrie verwendet wird (**Bild 4**). Die hohe Temperaturbeständigkeit bis +200 °C ermöglicht auch das Verkleben und Abdichten von Bauteilen, die anschließend thermolackiert werden sollen. Der Klebstoff hält Temperaturen von +180 °C für 45 min. oder +200 °C für 30 min. stand und kann z.B. problemlos pulverbeschichtet werden.

Der Kleb- und Dichtstoff haftet sehr gut auf Metallen und den meisten Kunststoffen, ist schleiffähig, alterungsbeständig und silikon-, isocyanat- sowie halogenfrei und frei von Lösemitteln. Er kann im Metallbau, im Behälter- und Apparatebau, in der Lüftungs- und Klimatechnik, im Karosserie-, Container-, Waggon- und Fahrzeugbau und überall dort, wo Silikon- oder silikonhaltige Produkte nicht geeignet sind, zum Einsatz kommen. So wird Flex 310 M HT 200 z.B. für die Verklebung von Briefkästen verwendet, die anschließend pulverbeschichtet werden.

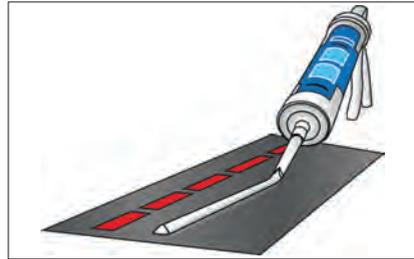


Bild 5: Schematische Darstellung einer Hybridverklebung (Bild: WEICON GmbH & Co. KG)

Kombination von Kleb- und Dichtstoffen und Klebebändern

Polyurethane und MS-Polymere haben eine weitere Gemeinsamkeit. Die beiden elastischen Klebstoffe werden verstärkt in Kombination mit Klebebändern eingesetzt. Diese Hybridverklebungen (**Bild 5**) gewinnen in der Industrie mehr und mehr an Bedeutung.

Hybridverklebungen

Durch die Klebebänder wird ein Nachteil der elastischen Kleb- und Dichtstoffe, die langsame Aushärtegeschwindigkeit, weitestgehend ausgeglichen. Hier werden die zu verklebenden Bauteile durch zwei Materialien, einen Klebstoff und ein Klebeband, befestigt. Dabei dient das Klebeband zur sicheren Positionierung des zu verklebenden Bauteils, bis der Klebstoff, der das Teil dauerhaft fixieren soll, ausgehärtet ist und seine vollständige Klebkraft entfaltet. Das Klebeband dient bei dieser Art der Verklebung somit zur Fixierung des zu verklebenden Bauteils.

Hybridverklebungen kommen in den verschiedensten Anwendungsbereichen, wie in der Werbetechnik, im Messe- und Ausstellungsbau, im Küchen- und Möbelbau, im Caravaning-Bereich, in der Karosserie- und Fahrzeugtechnik, im Metallbau und in der Elektronikindustrie zum Einsatz.

Silikone

Als Silikone wird eine Gruppe synthetischer Polymere bezeichnet, bei denen Siliciumatome über Sauerstoffatome verknüpft sind. Aufgrund ihres typisch anorganischen Gerüsts einerseits und der organischen Reste andererseits nehmen Silikone eine Zwischenstellung zwischen anorganischen und organischen Verbindungen ein, ins-



Bild 6: Silicon A ist lösemittelfrei, acetatvernetzend, haftstark, dauerelastisch, alterungs-, chemikalien- und temperaturbeständig bis +180 °C, extrem elastisch (Bruchdehnung >700%) und universell einsetzbar

(Bild: WEICON GmbH & Co. KG)

besondere zwischen Silikaten und organischen Polymeren. Sie sind in gewisser Weise Hybride und weisen ein einzigartiges Eigenschaftsspektrum auf, das von keinem anderen Kunststoff erreicht wird.

Silikone sind hochwertige Kleb- und Dichtstoffe für industrielle Anwendungen und weisen eine sehr gute UV-, Witterungs- und Alterungsbeständigkeit auf und zeigen eine hohe Beständigkeit gegenüber zahlreichen aggressiven Medien. Sie sind in einem Temperaturbereich bis zu +300 °C einsetzbar. Ein Beispiel für ein Silikon, das im industriellen Bereich zum Einsatz kommt, ist Silicon A (Bild 6). Es ist lösemittelfrei, acetatvernetzend, haftstark, dauerelastisch, alterungs-, chemikalien- und temperaturbeständig bis +180 °C, extrem elastisch (Bruchdehnung

>700%) und universell einsetzbar. Es haftet sehr gut auf Stahl, Aluminium, Glas, Keramik und vielen weiteren Werkstoffen.

Dieses Silikon kann im Fahrzeugbau, im Maschinen- und Anlagenbau, in der Lüftungs- und Klimatechnik, in der Energie- und Elektroindustrie, im Messe- und Ladenbau und in vielen weiteren Bereichen der Industrie eingesetzt werden. Es wird, z.B. für die Abdichtung der Klimatechnik, im Waggonbau verwendet.

Umgang mit elastischen Klebstoffen

Der qualitativ hochwertigste Klebstoff kann allein noch keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern, wenn nicht wichtige Voraussetzungen für eine erfolgreiche Vorbereitung und Verarbeitung berücksichtigt werden. Um eine möglichst langlebige Verklebung zu erhalten, ist der richtige Umgang mit elastischen Klebstoffen von besonderer Bedeutung.

Oberflächenvorbehandlung

Die richtige Vorbehandlung der zu verklebenden Oberflächen ist entscheidend für eine erfolgreiche Anwendung und eine langanhaltende Verbindung und sollte aus die-

sen Gründen stets ein wichtiger Arbeitsschritt im Prozess sein [3]. Die Oberflächen müssen sauber und frei von Fett sein (**Bild 7**). Viele Oberflächenverschmutzungen, wie beispielsweise Öl, Fett, Staub und Schmutz, lassen sich mit Reinigungsmitteln, wie etwa speziellen Oberflächenreinigern, entfernen. Bei besonders stark verschmutzten Metalloberflächen können leistungsstarke Reinigungsmittel verwendet werden. Zum Entfernen von alten Farbrückständen oder Klebstoffresten eignen sich spezielle Dicht- und Klebstoffentferner.



Bild 7: Reinigung von Oberflächen

(Bild: WEICON GmbH & Co. KG)

Die meisten Werkstoffe lassen sich mit- und untereinander gut verkleben. Für bestimmte Materialien oder extreme Anforderungen empfiehlt sich die Verwendung eines Haftvermittlers (Primers) für schwierige Untergründe. Eine mechanische Vorbehandlung der Oberflächen, z.B. durch Schleifen oder Sandstrahlen, kann die Adhäsion, also die Haftung von Klebstoffschichten an den Füge-teiloberflächen, darüber hinaus erheblich verbessern.

Verarbeitung

Elastische Kleb- und Dichtstoffe werden in Tuben, Kartuschen, Folienbeutel, Hobbocks oder in Fässer abgefüllt. Tuben, Kartuschen und Beutel werden entweder von Hand mit einer Druckpistole oder mit automatischen Dosiersystemen verarbeitet. In der Serienfertigung kommen i.d.R. automatisierte Auftrags- und Dosiergeräte oder Roboter zum Einsatz. Bei den Dosiersystemen und den Robotern wird der Kleb- und Dichtstoff aus Hobbocks oder – je nach Verbrauch – direkt aus Fässern verarbeitet. Diese Anlagen sind üblicherweise geschlossene Systeme, in denen das Material bei Arbeitsunterbrechungen nicht der Luftfeuchtigkeit ausgesetzt wird. Somit wird eine vorzeitige Aushärtung ausgeschlossen.

Nass- und Trockenfügen

Bei der Verarbeitung von elastischen Klebstoffen werden zwei grundlegende Fügemethoden unterschieden: Das Nass- und das Trockenfügen. Beim Nassfügen wird der Klebstoff auf das Werkstück aufgetragen. Im nächsten Schritt wird das zweite Werkstück gefügt, solange der Klebstoff noch nass ist. Hierbei ist zu beachten, dass die Bauteile gefügt werden, bevor sich die Haut auf dem Klebstoff gebildet hat – also vor

Ablauf der Hautbildezeit. Nur so kann eine optimale Benetzung gewährleistet werden. Ein prominentes Beispiel für das Nassfügen ist das Einkleben einer Pkw-Windschutzscheibe in eine Karosserie.

Beim Trockenfügen werden im Gegensatz dazu im ersten Schritt die zu verklebenden Werkstücke positioniert. Erst dann wird der Klebstoff in den entstandenen Fügespalt eingespritzt. Ein Beispiel für diese Methode ist die Herstellung von Isolierglas.

Entfernung von Klebstoffresten

Nicht abgebundener Klebstoff kann gut mit speziellen Dicht- und Klebstoffentfernern beseitigt werden. Mitunter eignen sich auch Aceton oder Isopropanol zur Reinigung. Durchgehärteter Klebstoff ist nur noch mechanisch zu entfernen. Zur Reinigung der Oberflächen oder zur Entfernung von Klebstoffresten gibt es Reinigungsprodukte, die speziell auf die verschiedenen Klebstoffe abgestimmt sind und so die gewünschten Ergebnisse liefern.

Aushärtung

Die 1K-Kleb- und Dichtstoffe härten i.d.R. unter dem Einfluss von Luftfeuchtigkeit aus. Der Aushärtprozess beginnt an der Oberfläche und setzt sich nach innen fort. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 50% beträgt die Durchhärtung in die Tiefe ungefähr 3 mm in den ersten 24 h.

Flächige Verklebungen und große Schichtstärken härten dementsprechend länger aus, da die Luftfeuchtigkeit nicht mehr so schnell durch die bereits ausgehärteten äußeren Schichten ins Innere dringen kann. Höhere Temperaturen und eine höhere Luftfeuchtigkeit beschleunigen die Aushärtung, wohingegen niedrige Temperaturen und eine niedrigere Luftfeuchtigkeit bewirken, dass die Aushärtezeit verlangsamt wird.

Lagerung

In ungeöffnetem Zustand und Lagerung bei Normalklima (23 °C und 50% relativer Luftfeuchte) sind die hier beschriebenen Produkte über einen Zeitraum von bis zu zwölf Monaten haltbar.

Literatur

[1] Pröbster, Manfred: *Elastisch Kleben aus der Praxis für die Praxis*. Springer Vieweg, Wiesbaden (2013)

[2] Habenicht, Gerd: *Kleben – erfolgreich und fehlerfrei*. Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie. 6. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden (2012)

[3] Doobe, Marlene (Hrsg.): *Kunststoffe erfolgreich kleben*. Grundlagen, Klebstofftechnologien, Best-Practice-Beispiele. Springer Vieweg, Wiesbaden (2018)

[4] <https://qualitaetssicherung.ifam.fraunhofer.de/de/qualitaetssicherung-organisation/inhalte-din-2304-din-6701.html> (Stand: 28. Mai 2018)

www.dopag.de

+49 621 3705 - 500



METER · MIX · DISPENSE

dynamicLine

DYNAMISCHES MISCHEN
IN EINER NEUEN DIMENSION



dynamicLine

Vom Birkenpech zu Hightech-Tapes

Klebebänder empfehlen sich für viele Lösungen in den verschiedensten Branchen

Kleben, was das Zeug hält: Seit 180.000 Jahren fügen Menschen ihre Alltagsgegenstände zusammen. Heute sind vor allem im Industriebereich viele Innovationen ohne die spezifischen Eigenschaften von Klebstoffen undenkbar. Verbindungen zwischen unterschiedlichen Oberflächen bzw. Materialien herzustellen, ist dabei nur ein Aspekt. Insbesondere Klebebänder übernehmen oftmals relevante Zusatzfunktionen – und bieten auch in Zukunft noch nahezu unbegrenzte Möglichkeiten.

Ohne „Klebebänder“ wäre die Pfeilspitze im Mammut stecken geblieben. Und das wollte keiner unserer Ururahnen riskieren, denn solch ein Teil war überaus wertvoll. Auch das Beil sollte sich nicht beim Holzfällen vom Griff lösen. Deshalb „erfanden“ schon die Steinzeitmenschen einen Klebstoff: Birkenpech. Experten gehen davon aus, dass die Geschichte des Klebens mindestens 180.000 Jahre zurückreicht. Die weiße Birkenrinde enthält Betulin, das bei sehr hohen Temperaturen und unter Ausschluss von Sauerstoff herausdestilliert und zu einem schwarzen Klebstoff umgewandelt werden kann.

Eine spektakuläre Entdeckung machten Forscher erst kürzlich bei der Untersuchung eines mehr als 2.500 Jahre alten Steins aus dem Bibelmuseum Münster, den der deutsche Archäologe Dr. Robert Koldewey 1913 im heutigen Irak entdeckte. Schwarze Anhaftungen ließen sich eindeutig als Erdharz (Bitumen) identifizieren. Die bemerkenswerten Erkenntnis: Schon die Babylonier verwendeten beim berühmten Turmbau zu Babel, wie er im ersten Buch Mose (Genesis 11,3-4) beschrieben ist, einen Kleber, um die Statik des riesigen Bauwerkes zu optimieren.

Schnelle, sichere und „sanfte“ Prozesse

Und heute? Avanciert das Kleben zur „Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts“? Diese Frage beantworteten Fachleute mit einem eindeutigen „Ja!“ [1]. Demnach wird das Kleben herkömmliche Techniken wie Nageln, Nieten, Schrauben und Schweißen

Von Gunnar von der Geest, stellvertretender Leiter Unternehmenskommunikation
tesa SE | www.tesa.de

verdrängen. Schon heute gibt es große Industriebranchen, in denen vor allem Klebeband-Lösungen (**Bild 1**) viele Vorteile bieten: Tapes lassen sich i.d.R. schnell und sauber verarbeiten. Zudem muss die Masse nicht, wie z.B. bei Flüssigklebern, aushärten. Dies beschleunigt Produktionsprozesse und senkt Kosten. Darüber hinaus sind Verklebungen überaus „werkstoffschonend“. Während z.B. beim Bohren, Nieten oder Schweißen die Materialien beschädigt werden und es an den Verbindungsstellen zu negativen Folgeerscheinungen wie Korrosion kommen kann, sind Klebebänder eine sanfte, aber dennoch sichere Füge-technologie. Welche industriellen Einsatzgebiete sich heute für Tapes eignen, soll nachfolgend an drei Beispielen deutlich gemacht werden: Elektronik-, Automobil- und Bauindustrie.

500 cm² Klebefläche im Mobiltelefon

Damit Smartphones rund um die Uhr einsatzbereit sind, müssen Klebeanwendungen deutlich mehr leisten, als zwei Bauteile miteinander zu „verheiraten“. Tapes übernehmen zahlreiche Zusatzfunktionen – und dies auf engstem Raum:

- So groß wie möglich, lautet das Credo der Handy-Hersteller, wenn es ums Display (**Bild 2**) geht. Dies bedeutet für die zur Verfügung stehende Verklebungsfläche: so klein wie nötig. Oft darf das Klebe-Stanzteil lediglich 0,5 mm breit sein. Und trotzdem sollen die – geschäumten – Tapes auch noch Stöße abfedern.
- Wie leistungsfähig Klebstoff-Lamine sind, kann man zudem nicht nur sehen, sondern auch hören: In sich verschlungene Acrylat-Molekülketten haben extrem gute Dämpfungseigenschaften. Dies prädestiniert sie für den Schichtaufbau von kleinen Lautsprecher-Membranen.

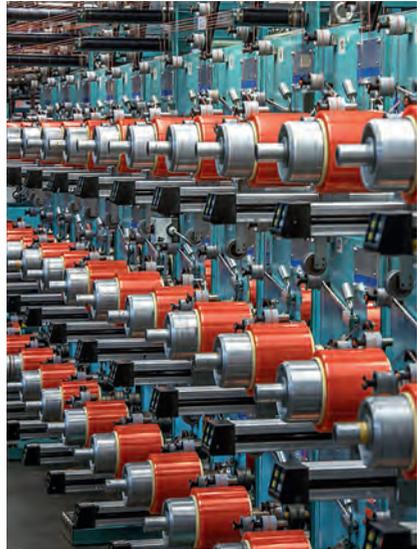


Bild 1: Klebebandfertigung (Bild: tesa SE)



Bild 2: Display-Fixierung – schmale Stanzteile müssen fest kleben und Stöße dämpfen

(Bild: tesa SE)



Bild 3: Mit der Verwendung von Tapes lassen sich Akkus leichter wechseln (Bild: tesa SE)

- Wenn Smartphones auf Hochbetrieb laufen, werden einige Bauteile 70 °C bis 90 °C heiß. Damit nichts durchbrennt, ermöglichen Spezial-Tapes – zum Teil mit Graphitschichten zur Wärmeableitung – eine Temperatur-Reduktion um mehr als 20 °C. Das derzeit dünnste doppelseitige Klebeband der Welt, das diese „kühlende“ Funktion übernimmt, ist 5 µm dick – zehnmal feiner als ein menschliches Haar.

- Ohne Licht geht's nicht, doch es soll nur punktuell für Erhellung sorgen. Licht blockierende Klebebänder sind in der Lage, den Austritt an unerwünschten Stellen, z.B. seitlich des Displays, zu 99,99 % zu vermeiden.
- Viel Elektronik auf engstem Raum: Dies kann zu unerwünschten Spannungszuständen führen. Elektrisch leitfähige Klebebänder übernehmen nicht nur das sichere Verbinden von flexiblen Leiterbahnen und Gehäuseteilen aus Metall, sondern ermöglichen darüber hinaus die reibungslose Arbeitsweise komplexer Schaltkreise. Die Tapes gleichen elektrische Potenziale aus und führen zudem elektrostatische Ladungen ab. Damit werden Kurzschlüsse verhindert. Das Geheimnis der Leitfähigkeit verbirgt sich hinter dem Aufbau der Träger und Klebmassen, die z.B. Nickel und Kupfer enthalten.
- Der Akku hat zumeist eine kürzere Lebensdauer als das Mobiltelefon. In der Vergangenheit war es schwierig, den im Gehäuse verklebten „Energiespender“ auszutauschen, ohne das Handy zu beschädigen. Die Lösung des Problems sind rückstandsfrei wieder ablösbare Streifen zur Batterie-Befestigung (**Bild 3**). Das Funktionsprinzip: Die Klebeband-Matrix besteht aus weichen, elastischen und harten, starren Anteilen. Im Urzustand haften die Strips auf der gesamten Länge, durch Dehnung – ähnlich den bekannten Powerstrips – verlieren sie ihre Haftklebrigkeit.

Mehr als 100 Klebeanwendungen im Pkw

Seit vielen Jahren hat sich das Kleben in der Automobilindustrie durchgesetzt. Ein maßgeblicher Pluspunkt ist, dass man auf diese Weise verschiedene Materialien hervorragend miteinander verbinden kann. Also z.B. Glas mit Metall, Metall mit Kunststoff, Kunststoff mit Glas. Vermehrt nutzt die Industrie zudem sensible Werkstoffe wie Karbon, die mittels invasiver Fügemethoden oft schwierig zu bearbeiten sind.

Traditionell werden in der Automobilindustrie diverse Kabel mit Klebebändern umwickelt (Wire Harnessing), Spiegel, Zierleisten, Dachhimmel oder Embleme verklebt. Zahlreiche neue Anwendungsgebiete ergeben sich durch große „Evolutionslinien“ wie die zunehmende Digitalisierung und das Verschmelzen traditioneller Branchen – in diesem Fall der Automobil- und Elektronikindustrie zu „Automotive Electronics“ (**Bild 4**). Hieraus ergeben sich von Innovationen getriebene Wachstumsfelder, z.B.: Komfort und Infotainment, Komponenten für Fahrer-Assistenzsysteme (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS), Batterien für Elektromobilität und Lichtmanagement. Bemerkenswert: In einem mit modernster Elektronik ausgestatteten Pkw können inzwischen mehr als 100 verschiedene Klebeanwendungen verbaut sein.



Bild 4: Wachstumsmarkt Automotive Electronics – traditionelle Industriebranchen verschmelzen (Bild: tesa SE)



Bild 5: Beim Lochverschluss haben sich Klebebänder seit vielen Jahren bewährt (Bild: tesa SE)

Ob im Außen- oder Innenbereich: Ein Auto steckt voller Beleuchtungskörper, die einerseits für Sicherheit, andererseits für

Sichtbarkeit sorgen. Die Aufgabe von Klebebändern in Bezug auf Lichtmanagement ist überaus vielfältig: Zum einen können mit doppelseitigen, besonders hitzereisistenten Tapes z.B. LED-Lichtleisten dauerhaft fixiert werden. Zum anderen sind Licht blockierende, schwarze Klebebänder in der Lage, den Lichtaustritt an unerwünschten Stellen, z.B. seitlich des Displays, zu vermeiden („Lightblocking“).

Dass manchmal für einen Automobilhersteller jedes Gramm zählt, macht das Thema „Lochverschluss“ deutlich (**Bild 5**). Ob im Boden, Radkasten, Motorraum oder in den Türen: Zahlreiche Karosserieteile werden bei der Herstellung mit Löchern versehen, die das Lackieren im Tauchbad erleichtern, jedoch im späteren Produktionsprozess verschlossen werden müssen, damit sie weder Feuchtigkeit noch Schmutz durchlassen. Werden statt der herkömmlichen Kunststoffteile zur Lochabdeckung bei durchschnittlich 70 Hohlräumen moderne Klebeband-Stanzteile genutzt, reduziert dies das Gewicht von etwa 280 auf 40 g.

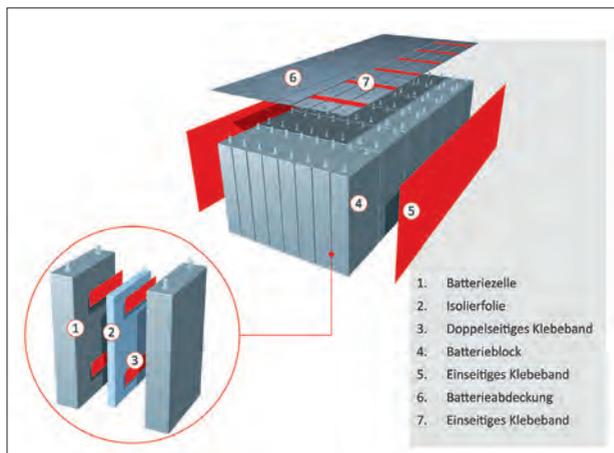


Bild 6: Klebebänder sind in der Batterieherstellung eine zentrale Komponente

(Bild: tesa SE)

Hochtransparente Filme aus dem Reinraum

Auf Wiedersehen Pferdetränken, hallo Megabyte! Während früher viele Autohersteller und -fahrer vor allem auf die Leistungsdaten unter der Motorhaube achteten, rückt nun die multimediale Technik im Innenraum in den Fokus. Eine wichtige Rolle spielen in diesem Zusammenhang große Displays und Touchscreens. Für eine dauerhafte und unsichtbare Verbindung der einzelnen Bauteile sorgen Optical Clear Adhesives (OCA). Die optisch klaren und extrem dünnen Klebstoff-Filme, hergestellt in Reinraum-Einheiten, müssen einerseits frei von Staubpartikeln bzw. Blasen sein und höchste Transparenz bieten. Auf der anderen Seite ist es erforderlich, dass die OCA hervorragend haften und beständig gegenüber großen Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit sowie UV-Strahlung sind.

Moderne Autos verfügen über eine Vielzahl an Fahrer-Assistenzsystemen, die in Fahr- und Parksituationen zusätzliche Unterstützung bzw. erhöhte Sicherheit bieten und einige Aufgaben sogar ganz übernehmen. Hierzu zählen u.a. „Warner“, die beim unbeabsichtigten Spurwechsel „Alarm schlagen“, oder Einparkhilfen. Zur Montage der zumeist kleinen Sensoren oder Kameras werden unter anderem hitzeaktivierbare Folien (HAF) eingesetzt, die sehr hohe Verbundfestigkeiten erreichen.

Globaler Wachstumsmarkt E-Mobilität

Noch immer befinden sich auf den Straßen die „Stromer“ in der Unterzahl, doch der Trend ist eindeutig: Nach jüngsten Analysen des Center of Automotive Management (CAM) wurden 2017 in Deutschland 54.492 Elektrofahrzeuge (+117% im Vergleich zu

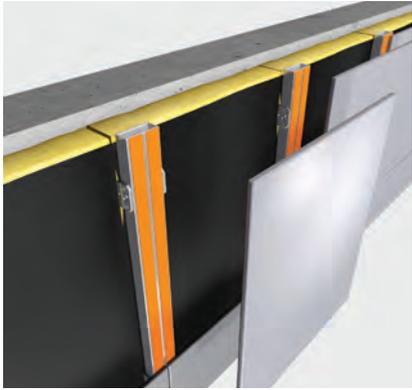


Bild 7: Klebebänder im Bau – zum Befestigen von Fassadenelementen (links) und Verkleben von Glastrennwänden (rechts)

(Bild: tesa SE)

2016) verkauft, wodurch sich der Marktanteil – noch auf niedrigem Niveau – von 0,8 auf 1,6% verdoppelte [2]. Sollten die Zuwachsraten weiterhin in diesem Maße steigen, wäre der E-Mobil-Marktanteil im Jahr 2020 zweistellig. Eine Entwicklung, von der Klebeband-Hersteller profitieren, denn: Die E-Mobil-Batterie ist ein komplexes Gebilde; sie besteht i.d.R. aus 100 x 200 mm großen Zellen, die zu Modulen aus jeweils zehn Zellen zusammengefügt werden (**Bild 6**). Zehn Module, also insgesamt 100 Zellen, bilden dann den Batterieblock. Jede Zelle verursacht Wärme und elektrische Spannung, die es abzuschirmen gilt. In diesem Zusammenhang übernehmen Tapes eine wichtige Funktion. Mit einem doppelseitigen Klebeband und einer Spezialfolie werden Zellen miteinander verbunden und in einer solchen Weise isoliert, dass keine Überspannungen auftreten können. Mit weiteren Produkten, die eine hohe Temperatur-Toleranz aufweisen und nicht entflammbar sind, lässt sich die Batterie ummanteln.

Acrylat-Klebebänder für die Bauindustrie

„Ich glaube an die unbegrenzten Möglichkeiten der Selbstklebetechnologie“, und: „Unter jedem Schornstein wird Klebeband benötigt“, sagte Mitte der 1930er-Jahre Hugo Kirchberg, der einst nicht nur den transparenten tesa film® als praktisches Utensil für Haushalt und Büro erfand, sondern auch das Geschäftsfeld für den industriellen Einsatz von Klebebändern „bestellte“. Welche vor mehr als 80 Jahren noch kaum denkbaren Anwendungsgebiete sich einmal ergeben würden, macht der Bereich „Building Supply“ deutlich: So lassen sich z.B. Fassadenelemente, Paneele und Glastrennwände heute mit doppelseitigen Acrylat-Klebebändern befestigen (**Bild 7**). Das Geheimnis der Tapes, die teilweise enorme Schichtdicken aufweisen, verbirgt sich hinter einem Fachbegriff: Viskoelastizität. Damit wird ein Materialverhalten bezeichnet, das sich gleichermaßen durch elastische wie viskose Eigenschaften auszeichnet. Die positiven

Effekte sind eine sehr hohe Klebkraft, Ausgleich von Spannungen sowie Temperatur- und Witterungsbeständigkeit. Das Acrylat-System passt sich an die zu verklebende Oberfläche an und sorgt für eine optimale Benetzung des Untergrundes. Selbst raue und unebene Flächen können, je nach Dicke des Tapes, nivelliert werden. Die Verklebung ist jahrzehntelang haltbar. Aufwändige Prüfverfahren wie wissenschaftlich begleitete Zyklon-Tests und Erdbeben-Simulationen belegen die Sicherheit der Klebänder für derlei Anwendungen im Innen- und Außenbereich.

Kooperation mit dem Technischen Handel

Von den nahezu „unbegrenzten Möglichkeiten der Selbstklebetechnologie“ profitieren indes nicht nur die Klebeband-Hersteller, sondern auch der Technische Handel, der vor allem in Westeuropa eine wichtige Rolle spielt. Zum einen offeriert er als Schnittstelle zu Industrie- und Gewerbeunternehmen das Kernsortiment; hier fungiert er in erster Linie als Logistik-Provider. Zum anderen spezialisieren sich immer mehr Technische Händler in puncto Weiterverarbeitung, indem sie Materialien zu speziellen Abmessungen oder gar kundenindividuellen Produkten veredeln. Wer darüber hinaus noch die optimale Applikationshilfe im Sortiment hat oder passgenau anfertigen kann, macht sich als Systemlieferant für Endkunden interessant. Davon haben die Menschen beim kräftezehrenden und langwierigen Turmbau zu Babel vermutlich des Öfteren geträumt.

Literatur

[1] Prof. Dr. Andreas Groß, Dr. Erik Meiß: Kleben – eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen

[2] Rebecca Eisert: CAM-Studie zu China, USA, Europa – Zukunftsszenarien: Wohin steuert die E-Mobilität. www.automobilwoche.de, 28.10.2017; Sebastian Viehmann: Elektroautos: Deutschland verdoppelt Marktanteil – Stromer-Absturz in den Niederlanden. www.focus.de, 19.1.2018

Beschichtung und Kohäsionsbestimmung von Klebstoffen und Haftklebstoffen

Neues Laborbeschichtungsanlagenkonzept

Die Entwicklung von Haftklebstoffen und Haftklebstoffprodukten in Form von einseitigen, doppelseitigen oder trägerlosen Haftklebebändern erfordert oft eine exakt breite Beschichtung im Format von DIN A4 Blättern, die nur mit speziellen Laborvorrichtungen zu realisieren sind. Derartige Laborbeschichtungsanlagen beinhalten V2A Stahl-Platten, die sehr oft poliert werden müssen. Eine verbesserte Variante einer neuartigen Beschichtungsanordnung besteht aus einer Granitplatte als Beschichtungsunterlage. Sie rostet nicht, ist sehr hart und ermöglicht eine exakte Klebstoffbeschichtung in unterschiedlichen Schichtstärken zwischen 1 bis 5 g/m² und 3000 g/m² (3 mm dick) und braucht nicht nachpoliert zu werden.

Die wichtigsten Eigenschaften von vernetzten Haftklebstoffprodukten beziehen sich auf Tack, Klebkraft und die Scherfestigkeit. Die Scherfestigkeit ist oft die wichtigste Eigenschaft der Klebstoffe und Haftklebstoffe. Sie entscheidet über die Kohäsion, die überwiegend nach internationaler Norm FINAT FTM 8 bestimmt und oft bei 20 °C, 70 °C und beim SAFT-Test gemessen wird. Dafür werden hochwertige Trockenschränke umgebaut und mit spezieller Software ausgerüstet. Eine zu geringe Klebstoffkohäsion bedeutet de facto teure Reklamationen. Dabei stellt sich die Frage, welche Eigenschaften und Prüfungen im Rahmen einer bestimmten reibungslosen Haftklebstoff- und Haftklebstoffproduktentwicklung wirklich notwendig sind.

Bei der Entwicklung, Beschichtung und schließlich Applikation von Haftklebstoffen spielt bei Haftklebebändern die Grammatik der Haftklebeschicht, die für die spätere Adhäsion (Klebkraft), für Tack (Anfangshaftung) und Kohäsion (innere Festigkeit) des Klebeverbundes sorgt, eine wichtige Rolle. Typische Haftklebematerialien sind durch

Von Professor Dr. Zbigniew Czech, Leiter des Internationalen Labors für Haftklebstoffe und Haftklebematerialien; Dipl.-Ing. Karolina Mozelewska, Doktorantin
Institut für Chemische Organische Technology, Westpommersche Technische Universität Szczecin | www.zut.edu.pl



Bild 1: Rakel aus Edelstahl für die Beschichtungsvorrichtung (Bild: Westpommersche Technische

Universität Szczecin)

Haftklebeschichten mit Grammaturen zwischen 20 und 150 g/m² charakterisiert. Natürlich gibt es eine ganze Reihe von Haftklebematerialien, die mit weniger als 20 g/m² ausgestattet sind. Ein Beispiel sind Schutzfolien, die zwischen 3 bis 8 g/m² dicke Klebstoffschichten haben.

Klebstoffaufträge bis ca. 150 g/m² sind einfach bei allen Haftklebstoffarten, d.h. lösemittelhaltigen Haftklebstoffen, wässrigen Dispersionen und lösemittelfreien Systemen, zu realisieren. Die Klebstoffgrammatur > 150 g/m² in nur einem Schritt ist nur beim Einsatz von lösemittelfreien Haftklebstoffen zu bewerkstelligen. Bei der Beschichtung von lösemittelhaltigen und wässrigen Haftklebstoffen bilden sich beim Trocknen von hohen Haftklebeschichtgrammaturen Lösemittelblasen, was die optische, physikalische und mechanische Qualität dieser Produkte beeinträchtigt.

Bei Laborbeschichtungen werden oft Handziehrahmen benutzt, die hinsichtlich der Handziehrahmenkonstruktion nur die Applikation von vier unterschiedlichen Klebstoffdicken erlauben. Mit diesen Handziehrahmen ist es nicht möglich, eine konstant kontinuierliche, unterschiedlich gewünschte Dicke der Haftklebeschicht auf Papier, Folie oder andere Unterlagen aufzutragen. Eine neue halbautomatische Laborbeschichtungsvorrichtung ermöglicht problemlose Beschichtung der Polymerschichten von 0,005 bis 3 mm Dicke, was einer Grammatur von 5 g/m² bis 3000 g/m² entspricht.

Die Beschichtungsvorrichtung

Damit alle drei typischen Haftklebstoffgruppen, wie lösemittelhaltige Haftklebstoffe, wässrige Dispersionen und lösemittelfreie Haftschmelzklebstoffe (Hotmelts), beschichtet werden können, hat man eine Beschichtungsvorrichtung mit beheizbarer Platte konstruiert, die die Beschichtung von diversen Papier- und Folienarten, unterschiedlichen Blechen und anderen Unterlagen bis 3 mm Dicke mit Haftklebstoffen, Klebstoffen, Dichtmassen, Farben, Lacken, Primer und anderen viskosen Stoffen in Form von Dispersionen, lösemittelhaltigen oder -freien Bestandteilen in einer konstanten und genau definierten Schichtgrammatur im Bereich von 5 bis ca. 3.000 µm mit einer Genauigkeit von 4 bis 5 µm ermöglicht. Das zu beschichtete Material (Papier, Folie) wird mit Vakuum, erzeugt durch eine Vakuumpumpe, auf der aus nichtrostendem Stahl bestehenden Platte aufgesaugt und festgehalten. Die Beschichtung erfolgt mit einem rostfreiem Rakel aus Edelstahl (**Bild 1**). Dieser ist einfach konstruiert und lässt sich problemlos mit Lösemitteln wie Isopropanol oder Ethylacetat von Haftklebstoffrestteilchen reinigen. Die beidseitige Halterung des Rakels ist aus einem lösemittel-

telbeständigem Kunststoff hergestellt und bis ca. 180 °C temperaturbeständig. **Bild 2** zeigt den Einsatz der Laborbeschichtungsvorrichtung bei der Beschichtung einer Polyesterfolie mit einem lösemittelhaltigen Haftklebstoff.

Beim Einsatz von lösemittelhaltigen und Dispersions(haft)klebstoffen sowie lösemittelfreien (Haft)klebstoffen mit niedriger Viskosität wird eine Beschichtungsvorrichtung mit eingebauter Granitplatte benutzt (**Bild 3**). Der Einsatz von dieser Beschichtungsvorrichtung erzeugt eine einwandfreie, gleichmäßige Polymer-schicht, was den Einfluss der Schichtstärke auf die Eigenschaften der beschichteten Produkte völlig ausschließt. Mit der in **Bild 3** abgebildeten Beschichtungsvorrichtung können Muster mit einer Fläche von 267 cm x 280 cm (DIN A4) gefertigt werden.

Scherfestigkeitsbestimmung

Die Scherfestigkeit (Kohäsion) ist die Kraft, die parallel auf einen Klebstoffverbund einwirkt und zu einem relativen Gleiten oder zu einem Trennungsbruch führt. Dabei verteilt sich die Kraft über die gesamte Klebefläche und wird in N/cm^2 angegeben. Bei typischen, 2,5 cm breiten Haftklebstoffmustern mit einer Klebefläche von 2,5 x 2,5 cm, wird die Scherfestigkeit in $\text{N}/6,25 \text{ cm}^2$ angegeben.

Zunehmend wird aus Präzisionsgründen und aufgrund von Einsparungen bei der Messungszeit die statische Scherfestigkeit nach der internationalen Norm FINAT FTM 8 gemessen. In diesem konkreten Fall handelt es sich um die Zeit, nach der das mit einer Kraft von 10 N (ca. 1 kg) belastete 2,5 cm breite Klebebandmuster von der Stahlplatte mit oder ohne Adhäsionsbruch ausschert. Laut FINAT FTM 8 wird die Scherfestigkeit bei Raumtemperatur und bei 70 °C bestimmt. Geprüft werden sowohl



Bild 2: Laborbeschichtungsvorrichtung im Einsatz (Bild: Westpommersche Technische Universität Szczecin)



Bild 3: Laborbeschichtungsvorrichtung mit Granitplatte (Bild: Westpommersche Technische Universität Szczecin)



Bild 4: Kohäsionstest von einseitigen oder doppelseitigen Haftklebebändern

(Bild: Westpommersche Technische Universität Szczecin)



Bild 5: Kohäsionsbestimmung von Transfer-Haftklebebändern (Bild: Westpommersche Technische Universität Szczecin)

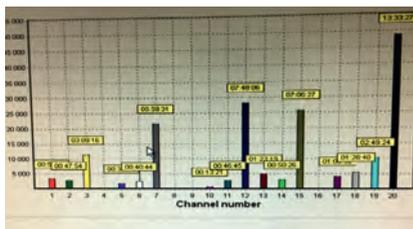


Bild 6: Visuelle Darstellung der registrierten Abfallzeit des Scherfestigkeitsniveaus

(Bild: Westpommersche Technische Universität Szczecin)

einseitige oder doppelseitige (je Seite) Haftklebebänder (**Bild 4**) als auch trägerlose (transfer) Haftklebefilme (**Bild 5**). Für diese Zwecke wurde ein Trockenschrank umgebaut. Die Abfallzeit der mit 10 N belasteten Haftklebebandstreifen wird auf dem Monitor angezeigt (**Bild 6**).

Ausgezeichnete Haftklebstoffe in Form von Haftklebebändern bestehen den Scherfestigkeitstest problemlos 7 Tage (168 h) bei 20 °C und 3 Tage (72 h) bei 70 °C. Der umgebaute Trockenschrank erlaubt es, einen SAFT (Shear Adhesion Failure Temperature) -Test durchzuführen. Es handelt sich dabei um einen, die Scherfestigkeit betreffenden

Wärmetest mit steigenden Temperaturen von 20 °C bis 240 °C innerhalb von 2 h. Begonnen wird bei 20 °C und es wird bis zu der Temperatur gemessen, bei der der Verbund separiert. Dieser Wärmetest ist eine Kombination aus Scherfestigkeits- und Wärmebelastungstest. Bei dieser Testmethode wird die thermische Kohäsion der Haftklebeschicht in Verbindung mit der Saugfähigkeit des Substratuntergrundes geprüft. Zusätzlich zu den Messwerten ist es sehr wichtig, das entstehende Bruchbild zu beurteilen und durch entsprechende Abkürzungen zu kennzeichnen:

- AB (Adhäsionsbruch) – schlechte Haftung zum Träger. Der Haftklebstoff bleibt auf der Prüfplatte.
- KB (Kohäsionsbruch) – die innere Festigkeit der Haftklebeschicht ist unzureichend. Die Haftklebstoffreste bleiben auf dem Träger und auf der Prüfplatte.
- Tw. AB/KB (teilweise Adhäsionsbruch und teilweise Kohäsionsbruch) – Zwischenstufen mit Adhäsions- und Kohäsionsbruch. Dieses Phänomen entsteht meistens bei kohäsiven Haftklebstoffen mit guter Klebkraft und guter Haftung zum Träger.

Tack (Anfassklebrigkeit)

Der Tack bewirkt die sofortige Adhäsion eines Haftklebstoffes auf einer Substratoberfläche ohne äußere Druckeinwirkung. Das schnelle Haften von Haftklebstoffen bei Kontakt mit festen Gegenständen wird als Anfassvermögen, Anfassklebrigkeit oder Oberflächenklebrigkeit, häufiger jedoch als Tack bezeichnet. Der Tack von Haftklebstoffen ist jedoch keine exakt definierte physikalische Messgröße. Versteht man Tack als Grenzwert der Adhäsion, so sind die Voraussetzungen für jede Tackbestimmung eine möglichst kurze Kontaktzeit und ein möglichst geringer Anpressdruck. Harte und dünne Haftklebeschichten haben einen ungenügenden Oberflächenkontakt und ergeben einen geringen Tack. Weiche und dicke Haftklebeschichten fließen optimal in die Oberfläche ein und ergeben einen guten Tack. Für die Messung des Tacks sind in der Literatur zahlreiche Methoden beschrieben. Oft wird jedoch nach speziellen Hausvorschriften gearbeitet. In der Haftklebebandindustrie wird der Tack nach der Looptack-Methode (AFERA 4015) bestimmt (**Bilder 7 und 8**).

Die Klebkraft (Schälfestigkeit oder Adhäsion) ist die zum Abziehen eines Haftklebebandes vom Substrat erforderliche Trennkraft. Sie beschreibt die Haftung zur Fügefläche und ist abhängig von der Breite des Haftklebebandes. In der Haftklebstofftechnik nennt man die Adhäsion als Schälwiderstand oder kurz Haltekraft zwischen den an einem Klebungsprozess teilnehmenden Stoffen. Als Adhäsion werden die Anziehungskräfte bezeichnet, die an den Grenzflächen zwischen der Klebstoffoberfläche und der zu klebenden Fläche zur Wirkung kommen. Diese Kräfte verursachen die Haftung. In der ersten Phase der Haftverbindung wird das Substrat vom Haftkleb-

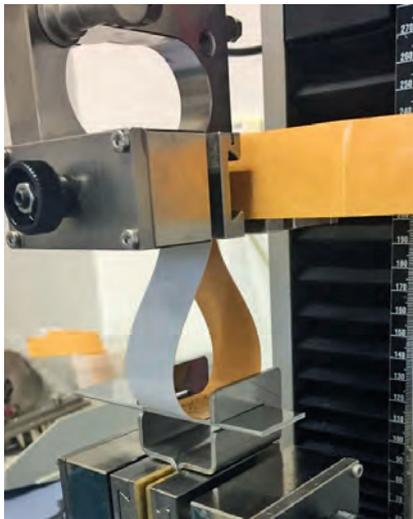


Bild 7: Gerät zur Looptack-Messung
(Bild: Westpommersche Technische Universität Szczecin)

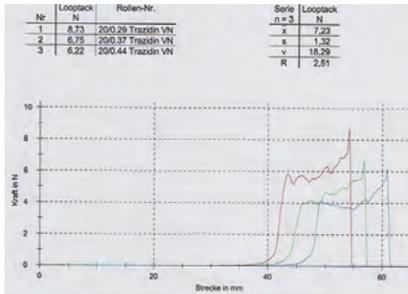


Bild 8: Diagramm der Looptack-Messung
(Bild: Westpommersche Technische Universität Szczecin)

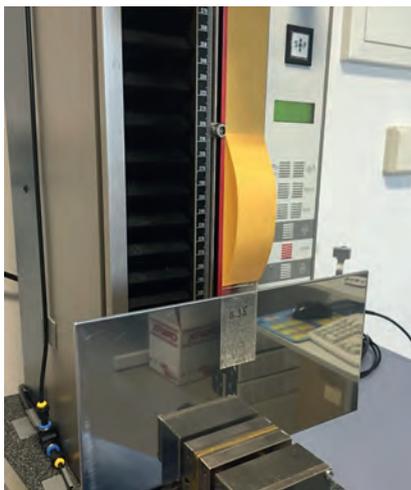


Bild 9: Klebkraftbestimmung (Bild: Westpommersche Technische Universität Szczecin)

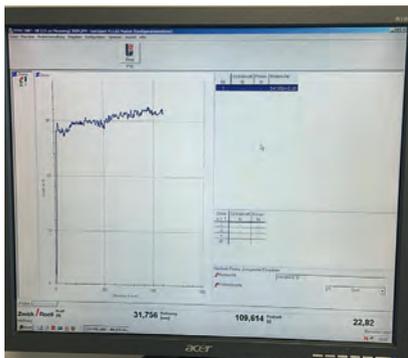


Bild 10: Klebkraftverlauf während der Prüfung (Bild: Westpommersche Technische Universität Szczecin)

stoff benetzt, dessen Film trotz seiner hohen Viskosität als „Flüssigkeit“ betrachtet werden kann. Der Benetzungsvorgang wird vor allem durch das Verhältnis der Grenzflächenenergien von Haftklebstoff und Substrat bestimmt. Die Klebkraft der Haftklebstoffe wird sehr oft nach internationaler Norm AFERA 4012 bestimmt (**Bild 9**), den dazugehörigen Klebkraftverlauf zeigt **Bild 10**.

Trotz zahlreicher Untersuchungen ist es nach dem derzeitigen Wissensstand nicht möglich, die Klebkraft und den Tack mit anderen mechanischen Eigenschaften, wie z.B. der Scherfestigkeit, eindeutig in Beziehung zu setzen. Hierfür sind die Grundlagen durchaus noch nicht geklärt. Sicher ist allerdings, dass die Klebkraft vor allem ein Maß für die zum Trennen eines Verbundes erforderliche Kraft ist. Sie sagt wenig über den Tack eines Haftklebstoffes und den Klebungsvorgang aus.



MIXPAC™

System Solutions for Adhesive Applications

- Innovation in Application
- Leading Technology
- Unique System

www.sulzer.com

MK™

Your Customized Solutions Partner for Dispensers

- For Specialized Applications
- Proven, High Performance
- Easy to handle

www.mk-guns.dk

COX™

Professional Range for Dispensers

- Full Range of Dispensers
- Professional Handling
- Premium Quality

www.coxdispensers.com

SULZER

Ressourcen bei der Klebstoffselektion sparen

Mit der richtigen Analyse unnötige Konstruktions- und Produktionsreserven vermeiden

Bei der Klebstoffauswahl und -verarbeitung wird – aufgrund fehlender Erfahrungswerte und valider Daten – mit Reserven gearbeitet. Die bruchanalytischen Bewertung von Klebeverbindungen zeigt hier als neue Analysemethode einen Weg auf, wie sich diese minimieren bzw. eliminieren und damit Ressourcen sparen lassen.

Moderne Fügeverfahren sind aus dem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Vor allem das Kleben hat sich als herausragende Verbindungstechnologie einen Spitzenplatz erarbeitet. Hinsichtlich der immer mehr um sich greifenden Leichtbauweise quer durch alle Branchen und des Einsatzes neuer innovativer Materialien ist die optimale Ausnutzung von Werkstoffen unter Berücksichtigung der Kosten eine fest verankerte Philosophie im Engineering. Die intelligente Kombination unterschiedlicher Werkstoffgruppen, wie z.B. Holz, Keramik, Kunststoff und Metall, ermöglicht es, immer neuere Anwendungen im Bereich der Medizintechnik, in Luft- und Raumfahrt und Automobilbau zu erschließen.

Der Vormarsch von Multimaterial-Verbundsystemen stellt an Klebstoffe immense Anforderungen puncto Qualität, Zuverlässigkeit und Lebensdauer – Kriterien, die sich in der Praxis bewähren müssen. Noch dazu verlangt die Forderung von Wirtschaftlichkeit und Effizienz seitens des Marktes eine möglichst maximale Ausnutzung und Ausreizung des Bauteils bis hin zur Einsatzgrenze oder darüber hinaus. Dieses „Ausreizen“ erfordert das „Erfassen und Verstehen“ von Entfestigungsvorgängen innerhalb der Grenzschicht (Klebeschicht). Hier ist am ehesten mit einem Versagen zu rechnen.

Künftig müssen geklebte Werkstoffverbunde somit auch in der Lage sein, unter einer bereits auftretenden Vorschädigung sowie bei der Existenz von Mikrorissen in der Klebeschicht ausreichend hohe Restkapazitäten zu besitzen, um ein schlagartiges und unkontrolliertes Versagen zu verhindern.

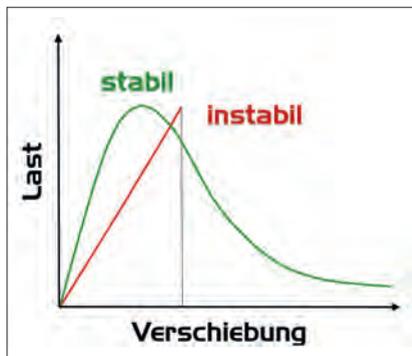


Bild 1: Illustration der Begriffe „stabiles“ und „instabiles“ Versagen

(Bild: FRACTURE ANALYTICS)

Das „Fail-safe-Prinzip“ – also das „sicheres Versagen“ – ist eine Doktrin, die bereits in der Entwicklung und Klebstoffselektion berücksichtigt werden muss und welche von den Märkten immer mehr gefordert wird. Zur Veranschaulichung zeigt **Bild 1** den Zusammenhang zwischen stabilem (grün) und instabilem (rot) Versagen einer Klebeverbindung anhand einer Prüfkurve, wie sie bei Festigkeitstests ermittelt wurde. Hierbei wurde der Klebstoffverbund auf reinen uniaxialen Zug geprüft.

Genormte mechanische Standardprüfverfahren nach [1, 2, 3, 4] sind nicht in der Lage, stabil zu testen, und können dadurch keinerlei signifikante Aussagen zum Nachbruchverhalten treffen. Somit ist eine vollständige physikalische Charakterisierung der Versagenseigenschaften des Klebstoffes erst gar nicht möglich.

Verlässliche Bewertungsmethoden werden benötigt

Ein Blick in die Industriepraxis zeigt, dass aussagekräftige Bewertungsmethoden über das Versagensverhalten von Klebstoffverbunden seitens der Klebstoffhersteller nicht vorliegen. Selbst in der Forschung reichen die aktuellen Verfahren zur Charakterisierung von Klebstoffverbunden bei Weitem nicht aus, um klare Aussagen über das reale Entfestigungsverhalten einer Klebeverbindung zu treffen.

Bereits vor 28 Jahren hat Rasche [5] den Zugscherversuch [3] als wichtigsten Versuch der Klebtechnik einer äußerst kritischen Betrachtung bezüglich seiner Aussagekraft unterzogen und kam zu wegweisenden Schlussfolgerungen, welche einen Paradigmenwechsel für künftige Qualitätsbetrachtungen in der Klebstoffindustrie erwarten ließen:

- Die im Zugscherversuch [3] ermittelte Klebefestigkeit charakterisiert nicht den Klebstoff an sich, sondern die Verbundfestigkeit, welche von der Art und Dimension der Fügeteile abhängt.
- Bei der Darstellung der Prüfergebnisse von Klebeverbindungen ist im Allgemeinen lediglich die Klebefestigkeit angegeben. Auf das Bruchverhalten der Proben wird meistens nicht eingegangen. Dies ist unbedingt notwendig, um die Prüfergebnisse richtig interpretieren zu können.

- Die Ergebnisse des Zugscherversuchs [3] können weder auf andere Werkstoffkombinationen noch auf andere Prüftechniken übertragen werden. (Anmerkung: Dies ist der Fall, da diese keinem unabhängigen lokalen Materialgesetz unterliegen).
- Eine Belastung gemäß Zugscherversuch [3] kommt in der Praxis bei geklebten Teilen nicht vor. Diese Prüftechnologie entspricht somit nicht den Gegebenheiten der Praxis.
- Die im Zugscherversuch [3] ermittelten Kenndaten sind zur Dimensionierung von Klebeverbindungen nicht geeignet, da dieser nur von einer Kurzzeitbelastung der Fügeteile ausgeht. Die Anfangsfestigkeit ist nicht der bestimmende Wert, sondern die Langzeitfestigkeit. Daher lassen sich diese Ergebnisse nicht auf das Zeitstandverhalten von Klebungen übertragen.
- Über die Verformbarkeit eines Klebstoffes macht der Zugscherversuch [3] keine Aussagen, sodass er als Auswahlkriterium nicht herangezogen werden kann. Gleiches gilt auch für die Schlag- und Stoßempfindlichkeit.

Die Argumentationen von Rasche [5] erfolgten bereits relativ frühzeitig, also zu einer Zeit, wo die Klebetechnik noch nicht diese Anwendungsbreite hatte wie heutzutage. Umso mehr kann man diese Feststellungen als ausgesprochen vorausschauend und revolutionär betrachten, da diese den Schluss nahelegen, sich nach weitaus geeigneteren Prüf- & Evaluierungsmethoden für Klebeverbindungen umzusehen. Paradoxerweise werden immer noch genormte mechanische Prüfverfahren wie der Zugversuch [1, 2], Zugscherversuch [3] oder Schälversuch [4] als „Basis“ für den technischen Qualitätsnachweis von Klebeverbindungen herangezogen, obwohl Nachteile und Einschränkungen mit diesen verbunden sind [5]. Hier lassen sich in Zukunft noch große Veränderungen zugunsten der Bruchanalytik erwarten [6 -13].

Es fehlt an aussagekräftigen Informationen und Daten

Aufgrund der doch recht komplexen Vorgänge in einer Grenzschicht während des Rissfortschrittes werden oft starke Vereinfachungen vorgenommen (z.B. Annahme von linear-elastischem Verhalten), was jedoch nicht zulässig ist. Dies führt in den meisten Fällen zur falschen Wahl des Klebstoffes und zu großer Unsicherheit beim Bemessen einer Klebeverbindung.

Oftmals werden diese Unsicherheiten durch eine Überdimensionierung der Bauteile „erkauft“. In Zeiten des Leichtbaus und der immer stärkeren Ausreizung von Werkstoffen bis hin zu ihren Einsatzgrenzen ist diese Philosophie nicht mehr zeitgemäß. Doch dieses gravierende Manko erschließt gleichzeitig auch immenses Potenzial für künftige Bewertungsstandards. Die neue Bewertungsmethode bietet eine Lösung hinsichtlich verschiedener Problemstellungen in der Praxis:

- Produktdatenblätter von Klebstoffherstellern enthalten ausschließlich chemisch-mechanische Grundeigenschaften unter Laborbedingungen. Eine vollständige Erfassung des lokalen Materialgesetzes im Interface wird nicht durchgeführt. Entfestigungsvorgänge lassen sich somit weder charakterisieren noch ausreichend prognostizieren.
- Branchenübliche Normtests für Klebstoffe begnügen sich nur mit einfachen Klebefestigkeiten als Gütekriterium einer Verbindung. Leider stellen diese keinen Bezug zum Ablöseverhalten einer Grenzschicht dar, noch erklären diese das Rissverhalten im Verbund.
- Einfache klassische Berechnungsmethoden wie auch vereinfachte Modellannahmen (linear-elastisches Verhalten) lassen sich bei geklebten Verbundsystemen unterschiedlicher Materialien aufgrund der Komplexität nicht mehr anwenden. Ebenso wird oftmals in der FEM-Simulation auf bereits „fertige Materialdaten“ zurückgegriffen, die jedoch nichts mit dem tatsächlichen Entfestigungsgesetz zu tun haben.

Neuer Ansatz

Der Schlüssel zum neuen Evaluierungskonzept liegt in der Vielfalt von qualitativen Güteparametern, mit welchen sich das Riss- und Versagensverhalten einer Klebeverbindung hinreichend genau beschreiben lässt und mit welchen sich das Risiko und die Qualität eines Klebstoffverbundes ermitteln lassen. Als Hauptbeurteilungsgrößen zum Beurteilen von Versagensvorgängen dienen dabei z.B.:

- der Widerstand gegen Rissausbreitung
- Bruchzähigkeit und Bruchsprödigkeit
- Schädigungsdominanz, -toleranz, -dynamik
- Kohäsivfestigkeit des betrachteten Interfaces

Diese Kennwerte sind nur ein Auszug der möglichen Kennzahlen, mit denen sich ein Klebstoffverbund qualitativ und anwendungsorientiert bewerten lässt. Sie finden sich in keinem technischen Datenblatt namhafter Hersteller. Dieses „Manko“ wirkt sich in der Klebstoffselektion allerdings nachteilig aus und erschwert eine optimale Wahl. Erst durch experimentelle Bestimmung dieser Kennwerte mittels Bruchanalytik lässt sich eine geeignete Datenbasis eruieren, welche als „bruchmechanische DNA“ bezeichnet werden kann.

Diese Kennzahlen sind unabhängige Werkstoffkenngrößen und können auch auf die Gesamtstruktur einer Klebung (Originalbauteil) übertragen werden. Der Vorteil dieses Ansatzes im Vergleich zu genormten Standardprüfverfahren, wie z.B. dem Haftzugtest [1, 2] bzw. Zugscherversuch [3], ist die Übertragbarkeit dieser Messdaten auf reale

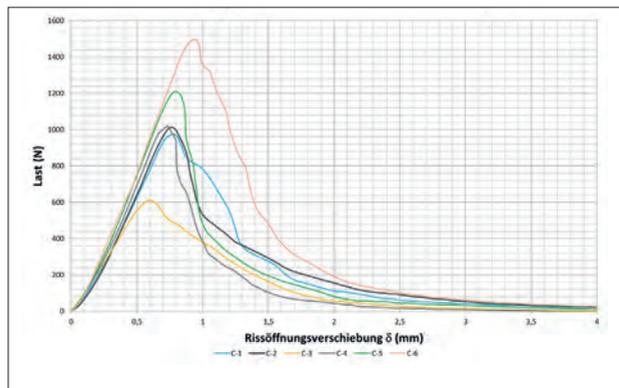
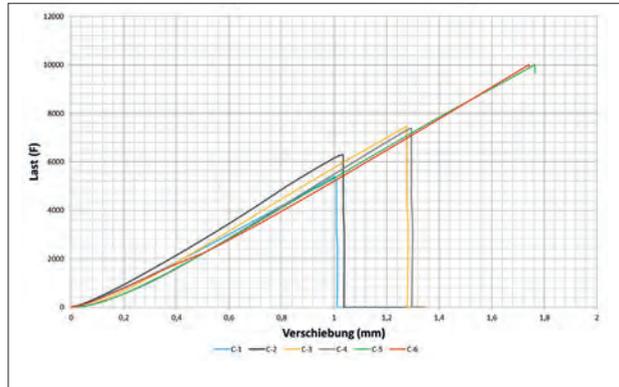


Bild 2: Gegenüberstellung der Prüfkurven für einen 2K-PU-Klebstoff mittels Haftzugtest (oben) und Bruchanalytik (unten)

(Bild: FRACTURE ANALYTICS)

Bauteile, wogegen jene Daten von Haftzugtests nur auf Prüfkörper im Labor begrenzt sind. Gerade in der FEM-Simulation ist dies eine Notwendigkeit.

Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal ist die stabile und stetige Aufzeichnung eines Last-Verschiebungs-Diagrammes von quasi-spröden Werkstoffen. Dadurch ist es erstmals möglich, Aussagen über das Nachbruchverhalten, als jenen Bereich nach dem Überschreiten der zulässigen Höchstkraft zu untersuchen, ohne einen Bruch der Probe zu riskieren. Gerade im Schadensfall muss ein Klebstoffverbund hohe Notfallreserven gegen schlagartiges Versagen aufweisen.

Künftig müssen geklebte Werkstoffverbunde auch in der Lage sein, unter einer bereits auftretenden Vorschädigung ausreichend hohe Resttragkapazitäten zu gewährleisten.

Dies betrifft vor allem Klebungen mit den Sicherheitsanforderungen S1 bis S2 gemäß DIN 2304 [14], wo im Schadensfall mittel- oder unmittelbare Gefahr für Leib und Leben besteht mit weitreichenden Vermögensschäden als Folge. In **Bild 2** werden Ergebnisse anhand eines quasi-spröden und hochfesten Polyurethanklebstoffs gezeigt. Mittels einfacher Haftzugprüfung [1, 2] ist ein stabiles Testen nicht möglich. Man gewinnt den Eindruck, der Klebstoff sei spröde, was zu einer falschen Charakterisierung der Materialeigenschaften führt. Mittels des Prüfverfahrens der Bruchanalytik nach [10] ergibt sich ein weitaus breiteres Bild. Derselbe Klebstoff lässt sich nun stabil und ohne frühzeitiges Versagen prüfen. Er weist somit „quasi-sprödes“ Verhalten auf, was sich energetisch günstiger auf die Rissausbreitung auswirkt und somit seinem tatsächlichen Entfestigungsnaturell entspricht.

Umfangreiches Einsatzspektrum

Aus diesem Ansatz ergeben sich für Entwickler als auch Anwender verschiedene praktische Einsatzmöglichkeiten:

- Aufbau eines QS-Systems auf Basis der Bruchanalytik zur laufenden Kontrolle von Stichproben in der Serienproduktion. Dadurch können konkrete Ausscheidungskriterien und Standards festgelegt werden, mit denen es möglich ist, eine gleichbleibende Qualität und Minimierung von Risikofaktoren zu gewährleisten. Ziel eines solchen Systems ist die merkliche Senkung von Ausschussraten im laufenden Betrieb und somit der Reklamations- und Instandhaltungskosten. Es lässt sich einfach in bestehende Prozessketten integrieren.
- Mit dem Ausreizen der verwendeten Klebstoffmenge auf Basis der Bruchanalytik kann das Versagensrisiko qualitativ und quantitativ erfasst werden und durch die Wahl des optimalen Klebstoffes minimiert werden. Es lassen sich Materialdaten für numerische Simulationen (FEM) generieren und die daraus gewonnenen Erkenntnisse auf reale Strukturklebungen abseits der Laborumgebung übertragen.
- Aufbau eines Rating- & Rankingsystems für die Klebstoffselektion – durch die experimentelle Bestimmung der Entfestigungsvorgänge in der Grenzschicht lassen sich hochqualitative Güteparameter ermitteln, welche eine effiziente Selektion des Zielklebers gestatten. Der Anwender ist dann nicht mehr nur auf Produktdatenblätter von Herstellern und auf vorgeschriebene Kennwerte aus Normtests angewiesen. Diese Unabhängigkeit erlaubt es einerseits, die Qualität des Klebeverbundes selbst festzulegen, wie auch das Versagensrisiko zu minimieren. Durch höhere Test- und Auswerteanforderungen seitens der Bruchanalytik ist es möglich, höhere Klebegüten zu erreichen.

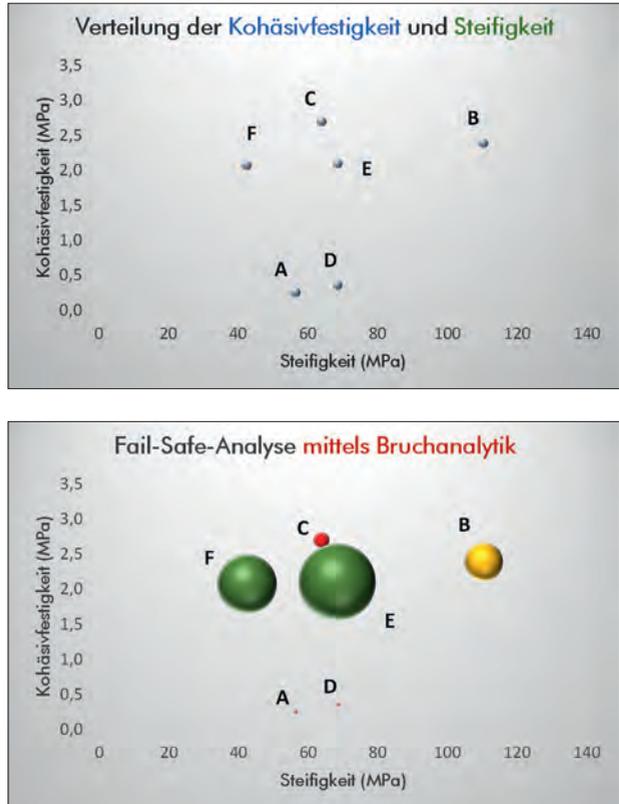


Bild 3: Vergleich der Bewertungsmethoden „Haftzugtest“ und „Fail-safe-Analyse“ mittels Bruchanalytik

(Bild: FRACTURE ANALYTICS)

Fallstudie zur bruchanalytischen Bewertung von Klebstoffverbunden

Die vorgestellte Bewertungsmethode ist durch eine empirische wissenschaftliche Studie signifikant untermauert. Durchgeführte Untersuchungen zeigen die umfassenden Möglichkeiten des bruchanalytischen Beurteilungskonzeptes. Bei dieser Fallstudie, die einen Einblick in die Vorgehensweise bei der Bewertung gibt, aber keine Wertung der getesteten Klebstoffe zulässt, wurden folgende Klebstoffe verwendet:

- Klebstoff A – 1K-Acrylat – Hersteller A
- Klebstoff B – 1K-MS-Polymer – Hersteller A
- Klebstoff C – 2K-Polyurethan – Hersteller A
- Klebstoff D – 1K-Acrylat – Hersteller B
- Klebstoff E – 1K-Polyurethan – Hersteller B
- Klebstoff F – 1K-Polyurethan – Hersteller B

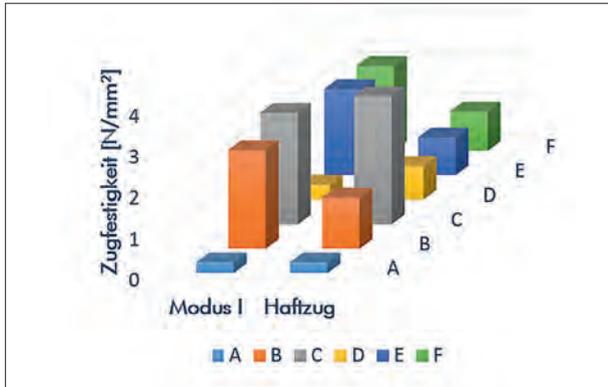


Bild 4: Vergleich zwischen Haftzugfestigkeit und Kohäsivfestigkeit bei Modus I

(Bild: FRACTURE ANALYTICS)

Wichtige Einblicke für die Klebstoffauswahl bringt die Gegenüberstellung von Festigkeitswerten und Steifigkeiten (**Bild 2**). Auffällig dabei ist, dass Klebstoff C die höchste Festigkeit bei mittlerer Steifigkeit besitzt. Man würde meinen, damit sei er der „Beste“, da er, absolut gesehen, die höchste Haftzugfestigkeit aufweist (**Bild 3 oben**).

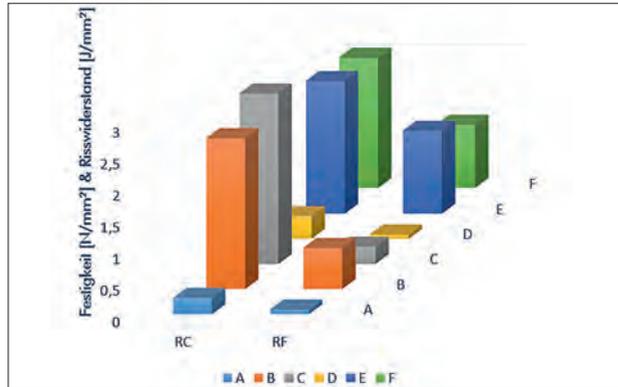
Ergänzt man das Diagramm jedoch um Risswiderstände, ergeben sich völlig neue Sichtweisen. Dabei stellt die Ballongröße die Höhe des Risswiderstandes dar und die Farbe das Risiko eines unkontrollierten Versagens (Ampelsystem). Dabei erkennt man, dass Klebstoff C trotz seiner hohen Festigkeit schlechte Risswiderstandswerte aufweist und somit aus dem Kandidatenkreis ausscheiden würde (**Bild 3 unten**).

Im Falle einer Vorschädigung besteht somit ein hohes Risiko, dass sich bei Verwendung dieses Klebers ein bestehender Riss im laufenden Betrieb unkontrolliert fort-pflanzen kann und die Klebeverbindung schlagartig versagt. Hingegen hat Klebstoff E ideale Voraussetzungen, im Falle einer Rissausbreitung genügend Reserven aufzubringen, den Riss zu verzögern (hohe Rissdämpfung) oder gar zum Stehen zu bringen (Rissarrest). Dass seine Haftzugfestigkeit etwas geringer ist, ist dabei nebensächlich. Dies wird durch die erhöhte Rissstabilität kompensiert.

Auffällig beim Vergleich der Haftzugfestigkeit des Verbundes mit der Kohäsivfestigkeit des Interfaces gemäß Bruchanalytik (**Bild 4**) ist, dass es signifikante Unterschiede in den Festigkeitswerten des Klebeverbundes gibt. Sind diese bei Klebstoff C gleich, so weichen sie von den restlichen Klebeverbänden ab. Aufgrund dieser immensen Schwankungen sind signifikante Aussagen zum Festigkeitsverhalten alleine auf dieser Basis nicht nachhaltig.

Bild 5: Vergleich zwischen Verbundfestigkeit R_C und Risswiderstand R_F bei Modus I

(Bild: FRACTURE ANALYTICS)



Zielführende Aussagen zum Versagensverhalten von Klebstoffverbunden lassen sich nur unter Hinzuziehung weiterer qualitativer Güteparameter, wie z.B. dem Risswiderstand, erzielen. In **Bild 5** erkennt man den signifikanten Unterschied zwischen Festigkeitswert R_C und Risswiderstand R_F . Besonders deutlich wird dies bei Klebstoff C, der aufgrund seiner Sprödigkeit zwar hohe Verbundfestigkeiten aufweist, jedoch im Falle eines Risses die Tendenz zum schlagartigen und unkontrollierten Versagen hat. In diesem Falle ist Klebstoff E eindeutig vorzuziehen.

Fazit

Dass durchaus Chancen bestehen, positive Veränderungen herbeizuführen, zeigt die wissenschaftliche Untersuchung [10]. Folgende Erkenntnisse und Fakten können aus dieser abgeleitet werden:

- Mechanische Prüfverfahren [1, 2, 3, 4] sind nicht in der Lage, tiefgreifende Aussagen über das Klebstoffversagen zu liefern, die für eine qualitative Klebstoffselektion notwendig sind. Gerade bei Klebeanwendungen mit hohen Sicherheitsanforderungen wirkt sich dieses Manko aus. Daher bedarf es hier der Bruchanalytik, um das Versagensrisiko klar zu definieren, einzugrenzen und abzubauen.
- Diese Techniken nach [1, 2, 3, 4] neigen zu instabilem Versagen beim Prüfvorgang, was zu falschen Schlüssen über die Rissprödigkeit und Steifigkeit des Testklebstoffes führt. Daher ist es wichtig, auf Prüfmethoden zurückzugreifen, die einen stabilen Prüfvorgang gewährleisten. Mittels Bruchanalytik ist dies erstmals möglich.
- Klebstoffe mit hohen Haftzugwerten sind nicht automatisch die „besseren Kandidaten“. Dies ist ein Trugschluss und kann im Extremfall zu einem bösen Erwachen führen. Bereits Dr. Rasche hat dies relativ früh festgestellt [5]. Der bruchanalytische Sicherheitsnachweis mittels „Fail-safe-Analyse“ nach [10] bringt hier eindeutige

Gewissheit und schafft Vertrauen in die Technologie und deren Anwendungen. Ebenso lassen sich dadurch Kostensenkungspotenziale erschließen, sei es durch reduzierte Wartungsintervalle, geringere Klebstoffmengen und längere Einsatzdauern.

- Technische Datenblätter von Klebstoffherstellern liefern keinerlei empirische Datenbasis zum Bruchverhalten, wie z.B. zum Risswiderstand oder zur Risszähigkeit. Dieser Mangel an Kennzahlen lässt keine qualitative Klebstoffselektion zu. Dieses Defizit lässt sich jedoch mittels Bruchanalytik beheben.
- Vor allem Premiumhersteller von Klebstoffen als auch Unternehmen mit dem Bekenntnis zur Technologieführerschaft und mit hohem Innovationscharakter sind die idealen Zielgruppen für Bruchanalytik. Diese sind vor allem im Bereich Automotive, Elektronik, Luft- und Raumfahrt sowie Medizintechnik angesiedelt.
- Aktuelle Qualitätssicherungsprozesse laut DIN 2304 bilden zwar erste gute Ansätze zum Erfassen von Klebeprozessen. Jedoch wird auf den bruchanalytischen Sicherheitsnachweis völlig verzichtet. Dies betrifft vor allem das Kernelement 3 - Nachweisführung [14].

Es wird sich zeigen, wie lange es dauert, bis die Industrie, sowohl Hersteller als auch Anwender, diese Notwendigkeit erkennt und umsetzt. Erst wenn dies erfolgt ist, wird man die „Angst vorm Kleben“ Schritt für Schritt ablegen können und somit eine breite fundamentale Basis für die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts schaffen.

Literatur

- [1] ASTM D897-08 (2016): Standard test method for tensile properties of adhesive bonds, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [2] DIN EN 14293 (2006): Klebstoffe - Klebstoffe für das Kleben von Parkett auf einen Untergrund - Prüfverfahren und Mindestanforderungen, Beuth Verlag, Berlin.
- [3] DIN EN 1465 (2009): Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebung, Beuth Verlag, Berlin.
- [4] DIN EN 1464 (2010): Klebstoffe - Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen – Rolenschälversuch, Beuth Verlag, Berlin.
- [5] Rasche, M. (1990): Der Zugscherversuch in der Klebtechnik, In: Adhäsion (11), S. 36-43.
- [6] Brandtner-Hafner, M. H. (2016a): Holz im Verbund geklebt: Klebstoffsysteme für den Holzbau im Verbund optimal einsetzen, In: Holzmagazin (7), S. 44–45.
- [7] Brandtner-Hafner, M. H. (2016b): Interface Fracture Mechanics and Healing of Wood-Adhesive-Composites at Mode I, II, III Loading, Dissertation, Vienna University of Technology, Vienna.
- [8] Brandtner-Hafner, M. H. (2016c): Neue Prüfmethode für geklebte Holzstrukturen: Bruchmechanik-Spezialist Martin Brandtner-Hafner entwickelt ein neuartiges Prüfkonzept für Holz-Klebstoff-Verbunde, In: Holz-Zentralblatt (37), S. 902.
- [9] Brandtner-Hafner, M. H. (2017a): Innovatives Bewertungssystem für Holz-Klebstoff-Verbundsysteme, In: Holzrevue (4-5), S. 15–16.
- [10] Brandtner-Hafner, M. H. (2017b): Interface Fracture Behaviour of Industrial Adhesives: A

Novel Evaluation Approach for Adhesive Selection, In: Proceedings of the IN-ADHESIVES Symposium on Innovations in Adhesives and their Applications, Munich, February 14-15., pp. 221-229.

[11] Brandtner-Hafner, M. H. (2017c): **Interface Fracture Mechanics of Notched Wood-Adhesive Composites at Mode I, II, III Loading, Proceedings of the International Symposium on Notch Fracture (ISNF), Santander, March 29-31. pp. 104-111, ISBN: 978-84-617-9463-8.**

[12] Brandtner-Hafner, M. H. (2018a): **Unkontrolliertes Versagen verhindern: Neues Analysekonzept für die Klebstoffselektion, In: DICHT! (1), S. 34–35.**

[13] Brandtner-Hafner, M. H. (2018b): **Innovatives Bewertungskonzept für die qualitative Klebstoffselektion, In: Adhäsion: Kleben & Dichten, Jahrgang 62, Heft (5), S. 28–33.**

DOI: 10.1007/s35145-018-0034-1.

[14] **DIN 2304-1 (2016): Klebtechnik - Qualitätsanforderungen an Klebprozesse - Teil 1: Prozesskette Kleben, Beuth Verlag, Berlin.**



Klarer Fall für Lohmann

Wenn's um schwere Herausforderungen geht:
Wir kleben's für Sie. Mit Leidenschaft.

Ganz gleich, welchen komplexen Herausforderungen Sie aktuell oder zukünftig begegnen. Mit Lohmann kleben Sie zuverlässiger, effizienter und wirtschaftlicher. Die Bonding Engineers analysieren Ihre Anforderungen, übersetzen die gewünschte Applikation in die passende Klebetechnik und integrieren sie in Ihren Prozess. Auf Basis eines vielfältigen Produktportfolios. Und mit begleitendem Service, der Ihnen langfristigen Erfolg sichert.

Erfahren Sie mehr unter: www.lohmann-tapes.com

Fertigungskapazitäten einfach skalieren

Mit Optical Bonding und moderner Fertigungstechnik
neue Märkte erschließen

Optical Bonding ist Stand der Technik. Die Anlagen basieren teilweise auf patentierten Fügeverfahren und einem hohen Automatisierungs- und Flexibilitätsgrad. Das Ziel ist – gerade in der Automobilindustrie – die optimale Kapazitätsauslastung bei gleichzeitiger Flexibilität für neue Aufträge. Wie dies realisiert wird, zeigt die Anlage bei einem Automobilzulieferer.

Ob Automobilanwendungen, mobile Geräte, GPS, Industriemonitore, Navigationsgeräte oder Wearables: Mit jeder neuen Generation von Elektronikgeräten verlangen Kunden nach höherer Leistung und verbesserten Funktionen. Das gilt auch für Displays (**Bild 1**): Bessere Lesbarkeit, höhere Strapazierfähigkeit, dünnere Designs und eine längere Lebensdauer sind nur einige der meistgefragten Qualitäten. Um diese Anforderungen zu erfüllen, kommt zunehmend die Optical-Bonding-Technologie zum Einsatz, die



Bild 1: Besonders in Pkw- und Nutzfahrzeugcockpits müssen Displays eine gestochen scharfe Definition und Klarheit aufweisen

(Bild: RAMPF Production Systems)

auf dem Fügen zweier – meist lichtdurchlässiger – Materialien mittels eines klaren Klebstoffes basiert. Die optimale Abstimmung von Verarbeitungsprozess und Material gewährleistet hierbei ein luftblasenfreies Ergebnis. Durch die Vermeidung eines Luftspalts zwischen den Fügepartnern werden eine wesentlich reduzierte Lichtbrechung sowie verbesserte Kontrastwerte erreicht. Die Vorteile dieses Verfahrens sind:

- Bessere Lesbarkeit, verbesserte Kontraste – Optical Bonding vermindert die interne Reflexion zwischen Display und Deckglas. Dadurch werden Verluste verringert, der Kontrast wird erhöht und die Lesbarkeit verbessert (**Bild 2**).

Von Sascha Bender, Key Account Manager
RAMPF Production Systems GmbH & Co. KG | www.rampf-gruppe.de

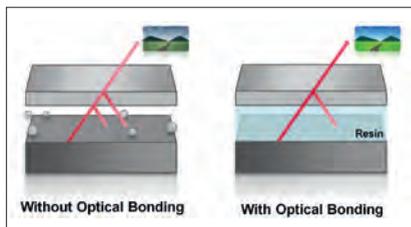


Bild 2: Optical Bonding bietet eine bessere Lesbarkeit und verbesserte Kontraste der Displays, ... (Bild: RAMPF Production Systems)

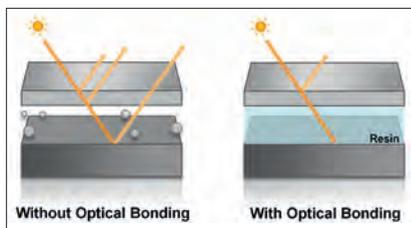


Bild 3: ... minimierte Reflexionen, ... (Bild: RAMPF Production Systems)

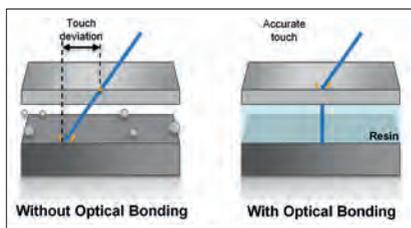


Bild 4: ... eine verbesserte Touch-Genauigkeit, ... (Bild: RAMPF Production Systems)

- Minimierte Reflexionen – Reflexionen und Spiegelungen durch einfallendes Umgebungslicht werden stark reduziert, während die Lichtdurchlässigkeit des Displays erhöht wird (**Bild 3**).
- Verbesserte Touch-Genauigkeit, reduzierte Bildverzerrung (**Bild 4**).
- Keine Kondensation – Die Vermeidung eines Luftspalts zwischen Deckglas und Anzeige gewährleistet, dass Feuchtigkeit auch bei Temperaturschwankungen nicht eindringen kann und eine Trübung des Displays vermieden wird (**Bild 5**).
- Verbesserte mechanische Stabilität – sie gewährleistet eine erhöhte physikalische Belastbarkeit und Schlagfestigkeit des Bildschirms sowie eine höhere Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse (z.B. Staub und Flüssigkeiten) (**Bild 6**).

Vollautomatisches Fügeverfahren

Eine Herausforderung ist der Auftrag des Klebstoffes. Deshalb wurde hierfür ein vollautomatisches Fügeverfahren entwickelt, das für einen prozesssicheren, luftblasenfreien Auftrag sorgt und auch gleich das Fügen der Bauteile beinhaltet. Mit diesem Produktionsprozess wird die Ausschussrate auf nahezu null gesenkt.

Die Bondingmasse wird unter Vakuum aufgetragen und die Bauteile werden unter Luftabschluss im Vakuum gefügt. Durch die Dünnschicht-Entgasungstechnologie der Einzelkomponenten ist die Verarbeitung hochevakuierter Bondingmaterialien möglich. Darüber hinaus erfolgt die Entgasung von Hinterschnitten und der Spalte zwischen Rahmen und Display bereits beim Materialauftrag. So wird das Risiko minimiert, dass beim Füge- und Aushärtprozess Luftblasen eingeschlossen werden.

Den Auftrag der Bondingmasse übernimmt die Vakuumdosieranlage DC-VAC (Bild 7). Sie ist für die Verarbeitung von 1K- und 2K-Vergussmassen ausgelegt, verfügt serienmäßig über eine Vakuummaterialaufbereitung und ist mit einem dynamischen Mischsystem ausgestattet. Durch das große Sichtfenster kann der Vergussvorgang leicht eingestellt und überprüft werden. Umfangreiche Überwachungseinrichtungen erleichtern die Prozesskontrolle. Die Vakuumkammer kann für manuelle Beschickung oder für die Integration in automatisierte Systeme ausgelegt werden. Eine weitere Optimierung der Produktionsprozesse wird mit schlüsselfertigen Lösungen für Optical-Bonding-Prozesse erreicht. Hierzu gehören – zusätzlich zum Display-Fügeverfahren unter Vakuum – sämtliche Arbeitsschritte zum Verkleben des Displays mit dem Rahmen.

Maßgeschneiderte Anlage

Für den Automobilzulieferer wurde auf Basis dieses Fügeverfahrens eine Anlage entwickelt, die einen maximalen Automatisierungs- und Flexibilitätsgrad bietet. Seit Jahren sind vollautomatisierte Produktionssysteme für Pkw-Displays weltweit im Einsatz und produzieren im Dreischichtbetrieb.

Jetzt galt es, die Anlagentechnik auch für die Nutzfahrzeugproduktion einzusetzen. Da hier im Vergleich zum Pkw-Bereich deutlich niedrigere Stückzahlen produziert werden, musste die Anlage einen sehr hohen Flexibilitätsgrad aufweisen, um eine maximale Anzahl unterschiedlicher Produkte herzustellen, denn die Maßgabe war eine optimale Kapazitätsauslastung.

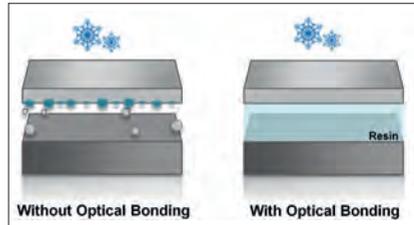


Bild 5: ... Vermeidung von Kondensation und ...
(Bild: RAMPF Production Systems)

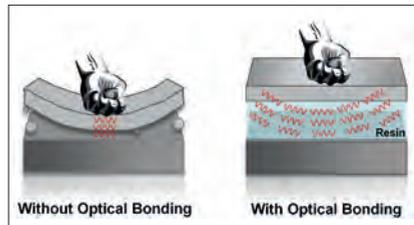


Bild 6: ... eine bessere mechanische Stabilität
(Bild: RAMPF Production Systems)



Bild 7: Die Vakuumdosieranlage DC-VAC
(Bild: RAMPF Production Systems)

Gemäß dieser Vorgaben wurde eine Produktionsanlage konzipiert, die auf dem Kernprozess unter Vakuum dosierter und gefügter Displaybaugruppen basiert. Um eine höchstmögliche Flexibilität zu erreichen, wurde zudem ein maßgeschneidertes Werkstückträgersystem entwickelt, das die verschiedenen Baugruppen durch die Anlage transportiert. Um verschiedenartige Produkte fertigen zu können, müssen so lediglich die Werkstückträger getauscht werden. Seit August 2017 stellt die Produktionsanlage in einem Reinraum Baugruppen im Minutentakt her. Der hohe Flexibilitätsgrad ermöglicht es dem Automobilzulieferer zudem, die Anzahl verschiedener Produkte immer weiter zu erhöhen. Denn diese Anlage ist auch eine Investition in die Zukunft. Sie ermöglicht es dem Zulieferer, mit seiner Displaytechnologie weitere Kundenkreise zu erschließen – ohne groß in die Produktion investieren zu müssen.

A close-up photograph of a waterjet cutting nozzle. The nozzle is a complex, multi-part metal assembly, primarily silver in color, with a red band near the cutting tip. A fine, red stream of water is being directed downwards from the nozzle, cutting through a metal surface. The background is a blurred industrial setting with blue and red tones. A dark grey horizontal bar is overlaid on the right side of the image, containing the title text.

Maschinen und Anlagen

STM

>> STM Waterjet entwickelt innovative Wasserstrahl-Schneidsysteme für ein vielfältiges Anwendungsgebiet.

Smarte Elastomerverarbeitung

Mit intelligenten Assistenzsystemen zu einer höheren Prozesskonstanz und Qualität

Im Auto möchten viele nicht mehr darauf verzichten: Fahrassistenten unterstützen den Fahrer, das Fahrzeug optimal zu führen und sicher ans Ziel zu kommen. Auch in den Spritzgießbetrieben läuten intelligente Assistenzsysteme eine neue Phase der Fertigung ein. Zur Sicherung der Qualität werden nicht länger reine Maschinengrößen überwacht, sondern reale Prozessfaktoren. Auf dieser Basis kann die Spritzgießmaschine qualitätsrelevante Parameter im laufenden Prozess automatisch nachjustieren und Ausschuss proaktiv verhindern. Sich selbst optimierende Maschinen und Prozesse sind ein wesentliches Merkmal der Smart Factory.

Eine präzise arbeitende Spritzgießmaschine und ebenso zuverlässige periphere Systeme bilden die Grundvoraussetzung, hochwertige Gummi- und Silikonprodukte wie z.B. Dichtungen, Formteile und Profile herzustellen. Um aber über längere Produktionszeiträume hinweg Schuss für Schuss eine konstant hohe Qualität zu erzielen, reicht auch das beste Fertigungsequipment nicht aus. Denn neben der Maschine nehmen viele weitere Faktoren Einfluss auf den Prozess. So führen z.B. Schwankungen im Rohmaterial immer wieder zu Ausschuss. Von Charge zu Charge, aber auch innerhalb eines Batches weisen die zu verarbeitenden Compounds herstellungsbedingt Toleranzen auf. Diese erreichen vor allem dann Qualitätsrelevanz, wenn die Compounds hohe Anteile natürlicher Materialien enthalten. Hinzu kommt, dass im Gegensatz zu thermoplastischen Polymeren viele Elastomere nicht für die Verarbeitung auf Spritzgießmaschinen optimiert sind und stärker unter der Scherbelastung beim Plastifizieren und Einspritzen leiden. Weitere Einflussfaktoren sind die klimatischen Bedingungen in der Fertigungsumgebung, Schwankungen in der Temperiermedienversorgung oder z.B. Verschleiß an der Rückstromsperre. Alle diese Faktoren nehmen Einfluss auf die Viskosität und das Fließverhalten der Schmelze, was wiederum Auswirkungen auf das Einspritzvolumen hat. Fließt das Material leichter als unter den angenommenen Idealbedingungen, wird es in der Spritzeinheit weniger stark komprimiert, die Scherbelastung wird reduziert und es kann zu viel Material in die Kavitäten fließen. Die Folge sind Gratbildung oder eine Deformation der Bauteile. Im umgekehr-

Von Ing. Leopold Praher, Vertriebsleiter elast; M. Sc. Paul Kapeller, Produktmanager Digital Solutions
ENGEL AUSTRIA | www.engelglobal.com

Industrie 4.0 für eine höhere Wettbewerbsfähigkeit

Durch die Vernetzung von Produktionssystemen, die systematische Nutzung von Maschinen-, Prozess- und Produktionsdaten und den Einsatz intelligenter Assistenzsysteme steigen die Produktivität, Effizienz und Qualität in der Smart Factory an und zugleich kann der Verarbeiter sehr flexibel auf die sich immer schneller verändernden Anforderungen reagieren. Industrie 4.0 hat sich als Oberbegriff für die Vernetzung und Digitalisierung in der Industrie, aber auch in anderen Lebensbereichen etabliert.

Das inject 4.0 Programm unterscheidet drei Einsatzbereiche:

- smart machine umfasst intelligente Assistenzsysteme wie iQ weight control, iQ clamp control und iQ flow control für eine höhere Prozessstabilität und konstant hohe Produktqualität,
- smart service steigert durch Fernwartung, Online-Support und die vorausschauende, zustandsbasierte Instandhaltung die Verfügbarkeit des Fertigungsequipments und
- smart production steigert durch die Vernetzung und Integration von Maschinen und Geräten, Sensoren und Anwendungen die Produktivität und Flexibilität der Fertigung.

ten Fall, wenn das Material langsamer fließt, kann es passieren, dass zu wenig Material in die Kavitäten gelangt und die Teile nicht vollständig ausgespritzt werden. Letzten Endes hängt auch das Verhalten der Rückstromsperre von der Fließfähigkeit der Schmelze ab, was einen zusätzlichen Effekt auf das eingespritzte Volumen haben kann.

Transparenz, Assistenz, Effizienz

Moderne Spritzgießmaschinenbauer nehmen sich seit vielen Jahren der Herausforderung an, durch die Integration von Expertenwissen in die Steuerung der Spritzgießmaschine diese äußeren Einflüsse auszuschalten. Drei Ziele stehen in diesem Fall im Fokus:

- Transparenz – durch die verständliche Visualisierung des Prozesses mithilfe von aussagekräftigen Prozessparametern in Echtzeit
- Assistenz – durch das automatisierte Einstellen von Sollwerten und Nachjustieren der Ist-Werte über den gesamten Prozessverlauf
- Effizienz – durch die Erhöhung der Produktivität und Reproduzierbarkeit sowie die Reduktion von Ausschuss



Bild 1: iQ weight control gleicht Prozessschwankungen aus, noch bevor Ausschuss entsteht. Das intelligente Assistenzsystem steht sowohl für elektrische als auch hydraulische Spritzgießmaschinen zur Verfügung (Bild: Engel)

iQ weight control (**Bild 1**) zur Optimierung des Einspritzvorgangs kam in diesem Kontext als erstes der Assistenzsysteme auf den Markt. Vor allem in der LSR-Verarbeitung (**Bild 2**) hat sich die Software sehr gut etabliert. Schon während der Entwicklung bezog man neben Verarbeitern thermoplastischer Materialien Hersteller von Elastomerprodukten mit ein. Als qualitätsrelevanter Prozessparameter analysiert iQ weight control den Druckverlauf über der Schneckenposition.

Für die Schneckenbewegung in der geschwindigkeitsgeregelten Füllphase gibt es drei Sollwerte: Die Startposition, das

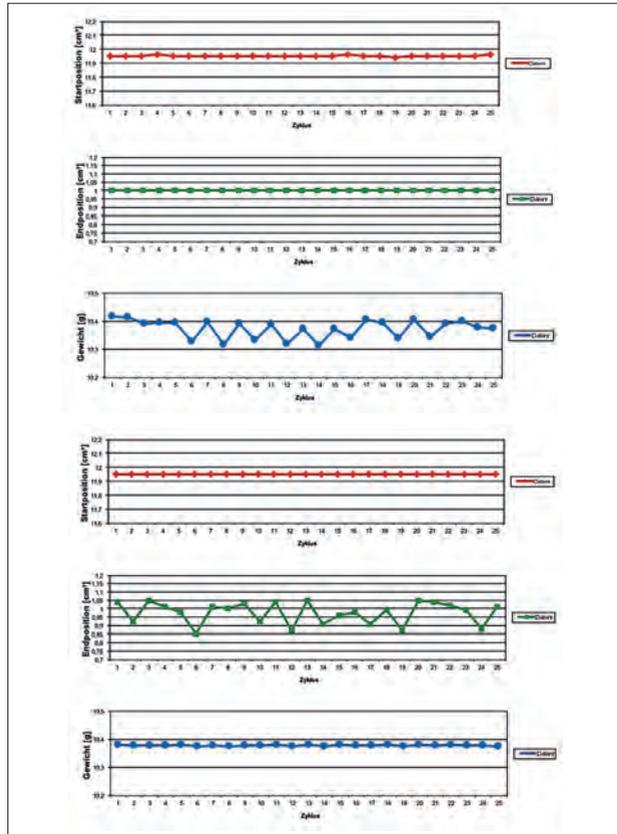
Geschwindigkeitsprofil und den Umschaltpunkt. Aus diesen Größen berechnet die Maschine die Sollwertvorgabe für den Einspritzregler. Neben der Geschwindigkeit bestimmen die im Schneckenvorraum vorliegende Schmelzmenge, die Fließfähigkeit des Materials und der Fließwiderstand den Spritzdruckverlauf. Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren ist der Spritzdruckverlauf charakteristisch für die jeweilige Anwendung – und somit einzigartig. In der Praxis auftretende Schwankungen von einem oder mehreren Einflussfaktoren verändern die Druckkurve, weshalb sich der Druckkurvenverlauf indirekt für die Qualitätsüberwachung eignet.

Umschalten auf konstante Qualität

Die Verwendung von iQ weight control ist denkbar einfach. Der Anwender optimiert zunächst wie gewohnt den Prozess auf die gewünschte Qualität der Bauteile. Danach startet er mit einem Tastendruck die Referenzmessung und speichert den aktuellen Zustand als Soll-Vorgabe. Die Referenzmessung umfasst mindestens 20 Zyklen. Stellt die Software fest, dass der Prozess noch nicht eingeschwungen ist, wird die Referenzierung automatisch wiederholt. Aus der beobachteten Streuung schlägt die Software automatisch Grenzen für erlaubte Schwankungen vor, die der Bediener entweder übernehmen oder manuell anpassen kann.

Da in der laufenden Fertigung die Analyse der Kennwerte während des Einspritzens erfolgt, eröffnet das System die Chance, bei Abweichungen von den Sollwerten ent-

Bild 2: Testserie LSR ohne (oben) und mit (unten) iQ weight control: Durch die individuelle Anpassung des Umschaltpunkts (Endposition auf der Schnecke) werden Schwankungen der Schmelzmenge ausgeglichen und eine konstant hohe Qualität produziert (Bild: Engel)



gegenzusteuern, noch bevor auch nur ein Ausschussteil produziert wird. Für diese Inline-Regelung werden für jeden Zyklus einzeln das Einspritzprofil und der Umschaltpunkt an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst sowie Öffnungs- und Schließzeitpunkte der Verschlussdüsen im Werkzeug bedarfsabhängig gesteuert. Das Einspritzvolumen bleibt so über die gesamte Fertigungsdauer konstant.

Zur Demonstration der Wirkungsweise von iQ weight control wurden im Technikum auf einer vollelektrischen e-motion 310/100 Spritzgießmaschine Musterteile aus einem Flüssigsilikonkautschuk mit einer Härte von 50 Shore A produziert. Die in die Maschinenantriebe integrierten Absolutwertgeber gewährleisteten eine sehr hohe Positioniergenauigkeit, sodass die Startposition der Schnecke innerhalb von $\pm 10 \mu\text{m}$

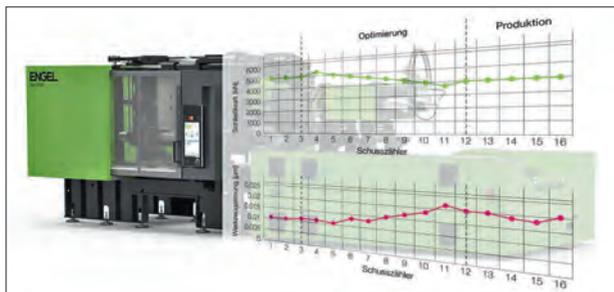


Bild 3: iQ clamp control nutzt die Werkzeugatmung, um die optimale Schließkraft zu ermitteln und anzupassen

(Bild: Engel)

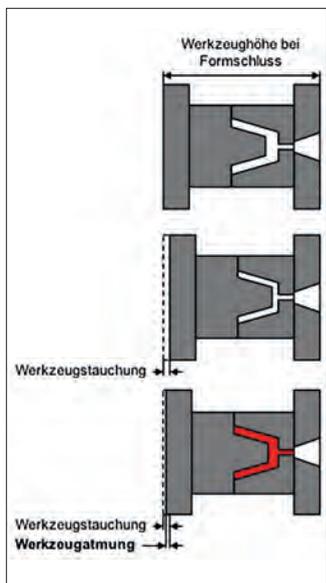


Bild 4: Ausgangspunkt zur Bestimmung der Werkzeugatmung ist die Werkzeughöhe beim kraftfreien Formschluss der beiden Werkzeughälften. Beim Aufbau der Schließkraft verringern sich die Werkzeughöhe sowie das Volumen der Kavität, wobei der Auftreibdruck beim Einspritzen der Schmelze einen Teil dieser Stauchung aufhebt (Bild: Engel)

und die Endposition sogar innerhalb von $\pm 3 \mu\text{m}$ reproduzierbar waren. Diese Werte können mit dem verwendeten Schneckendurchmesser von 30 mm in eine maximale Volumenschwankung von etwa $0,018 \text{ cm}^3$ umgerechnet werden, was bei LSR einer Gewichtsschwankung von 0,019 g entspricht. Ohne iQ weight control betrug die tatsächlich gemessene Schussgewichtsschwankung jedoch 0,102 g, also fünfmal so viel wie durch die geringfügigen Positionsabweichungen der Schnecke zu erklären wäre. Mit aktivierter iQ weight control Prozessregelung ergibt sich dagegen eine Schwankungsbreite des Formteilgewichts von nur noch 0,008 g.

Optimale Schließkraft schont Werkzeug und Ressourcen

Während iQ weight control den Spritzgießer dabei unterstützt, den Einspritzprozess zu optimieren, rückt iQ clamp control (Bild 3) den Formschluss in den Mittelpunkt. Die zentrale Referenzgröße ist hier die Werkzeugatmung. Von Werkzeugatmung (Bild 4) spricht man, wenn der Auftreibdruck beim Füllen der Kavitäten die schließkraftbedingte Stauchung des Spritzgießwerkzeugs teilweise wieder aufhebt. Auch diese feinsten Bewegungen der Werkzeughälften im Bereich einiger 1/1.000 bis 1/100 mm können,

wenn sie bestimmte Grenzen überschreiten, zu Ausschuss führen. So verhindert eine zu kleine Werkzeugatmung infolge einer zu hohen Schließkraft eine ausreichende Werkzeugentlüftung und führt zu Brennern. Bei einer zu großen Werkzeugatmung bzw. zu kleinen Schließkraft kommt es zu überspritzten Kavitäten und damit zur Gratbildung.

Lange Zeit ließ sich die Schließkraft nur manuell optimieren. Die dafür eingesetzten Messmethoden erlaubten jedoch nur subjektive Aussagen und erforderten viel Erfahrung. Aus diesem Grund arbeiten bis heute viele Spritzgießer generell mit der maximal möglichen Schließkraft, was jedoch nicht nur das Ausschussrisiko erhöht, sondern auch den Werkzeugverschleiß beschleunigt und unnötig viel Energie verbraucht. Hier setzt iQ clamp control an. Das Assistenzsystem ermittelt auf Basis der Werkzeugatmung die optimale Schließkraft und kann diese im laufenden Prozess nachjustieren. Zum Messen der Werkzeugatmung nutzt die Software Informationen aus in der Spritzgießmaschine standardmäßig vorhandenen Sensoren. Für die automatische Schließkraftoptimierung müssen weder zusätzliche Sensoren noch weitere Hardware installiert werden.

Neben iQ weight control leistet iQ clamp control einen weiteren Beitrag zu einer höheren Prozesskonstanz und reproduzierbaren Bauteilqualität. Hinzu kommt, dass Verschleiß am Werkzeug verzögert und der Energiebedarf gesenkt wird. Auf Thermo- plastmaschinen wird iQ clamp control bereits in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt und erweist sich dort jeweils als sehr erfolgreich. Da, z.B. in der Silikon-Verarbeitung, der Forminnendruck nach dem Einspritzen besonders schnell ansteigt, sieht man auch für die Elastomerindustrie ein großes Potenzial, durch die automatische Schließkraftoptimierung die Standzeit der Werkzeuge zu verlängern. Erste Testanwendungen sollen dies nun bestätigen.

Dynamisch geregelte Mehrkreistemperierung

Als jüngstes der iQ Assistenzsysteme befindet sich iQ flow control (**Bild 5**), das sich der Prozessstemperierung widmet, auf dem Sprung in die Elastomerindustrie. Schwankungen in der Medienversorgung und Temperierleistung gehören beim Spritzgießen zu den häufigsten Ursachen für Ausschuss, weshalb man sich intensiv diesem Thema widmet. Schon 2010 legte man mit dem elektronischen Temperierwasserverteiler flo-mo die Basis für mehr Transparenz und Konstanz im Temperierprozess. Dieser kann bereits in der Basisversion sämtliche Temperierkreisläufe einzeln überwachen und dokumentieren. Die Weiterentwicklung e-flo-mo ist mithilfe von iQ flow control in der Lage, wahlweise die Durchflussmengen oder die Temperaturdifferenz (ΔT) in allen Ein-

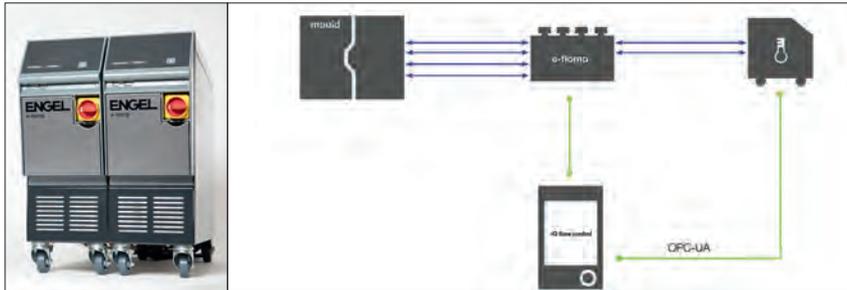


Bild 5: iQ flow control ist ein Meilenstein auf dem Weg zum sicheren Datenaustausch in der Smart Factory. Das Temperiergerät wird über OPC UA in die CC300-Steuerung der Spritzgießmaschine integriert (Bild: Engel)

zelkreisen dynamisch zu regeln. Der Vorteil der ΔT -Regelung ist, dass die Software die individuell benötigte Durchflussmenge für jeden Temperierkreis berechnet und über e-floMo automatisch regelt. Dabei geht iQ flow control noch einen Schritt weiter. Das Assistenzsystem vernetzt die Temperiergeräte und die mit e-floMo ausgerüstete Spritzgießmaschine zu einer Einheit und steuert die Drehzahl der Pumpen in den Temperiergeräten bedarfsabhängig. Neben einer stabilen Temperierung resultiert daraus eine deutlich höhere Energieeffizienz.

Für die neue integrierte Temperierlösung wurde gemeinsam mit einem Partner eine Baureihe besonders kompakter Temperiergeräte (**Bild 5**) entwickelt. Die e-temp Temperiergeräte werden über OPC UA mit der Spritzgießmaschine vernetzt, womit die Entwicklungspartner einen weiteren Meilenstein auf dem Weg zur Smart Factory setzen. Das Kommunikationsmodell OPC UA ermöglicht eine plattformunabhängige, leistungsstarke und vor allem sichere Verständigung sowohl innerhalb der Shopfloor-Ebene als auch mit übergeordneten Leitsystemen und setzt sich in der Kunststoff- und Gummiindustrie deshalb immer stärker als Standard durch.

WATERJET SOLUTIONS

STM

IHR STM WATERJET SYSTEM *ENTDECKEN SIE DIE MÖGLICHKEITEN*

FLEXIBEL - WIRTSCHAFTLICH - EFFIZIENT

Von Einstiegslösungen bis hin zum komplexen 3D-System. STM bietet Wasserstrahl-Schneidlösungen, um Sie noch effizienter, wirtschaftlicher und erfolgreicher zu machen.



WWW.STM.AT
WWW.STM-WATERJET.DE

Nachhaltig Dichtungen fertigen

Moderne Wasserstrahl-Schneidsysteme erfüllen viele Kriterien

Nachhaltigkeit ist in den letzten Jahren zwar als Modewort etwas überstrapaziert worden. Im Bereich der Wasserstrahltechnologie trifft dieser Begriff aber im Kern für viele Entwicklungen zu. Denn diese Technologie bietet nicht nur interessante ökologische Aspekte, ihr Einsatz kann auch zur nachhaltigen Unternehmensentwicklung beitragen.

Ressourcen sparen, energieeffizient produzieren – diese Anforderungen stehen heute quasi in jedem Pflichtenheft von Dichtungsherstellern. Auch deshalb, weil viele der heute produzierten Dichtungen helfen, Ressourcen zu sparen und Maschinen und Anlagen energieeffizient zu betreiben. Moderne Wasserstrahl-Schneidsysteme (**Bild 1**) bieten aufgrund ihrer modularen Bauweise viele Ansätze, Nachhaltigkeit ökologisch umzusetzen.

Abrasiv Recycling

Ein Ansatz ist die vollautomatische Wiederaufbereitung von Abrasivsand. Wasserstrahl-Schneidanlagen benötigen für den laufenden Betrieb Wasser und eben Abrasivsand. Letzterer ist der größte variable Kostenfaktor beim Wasserstrahlschneiden und eine knappe Ressource. Hier setzt das OneClean-System (**Bild 2**) an. Das Abrasiv-Recycling-Modul dieses Systems ermöglicht es, mehr als die Hälfte des Granatsandes für weitere Schneidaufträge zu recyceln. Das spart Beschaffungs-, Entsorgungs- und Transportkosten, die bei ca. 50 t Abrasiv-Verbrauch pro Jahr eine Amortisierung der Anschaffung innerhalb von ca. drei bis fünf Jahren möglich machen.

Die Recycling-Technologie funktioniert so: Ein spezifischer Hydrofilter sondert über ein patentiertes Verfahren Grob- und Feinteile aus dem gebrauchten Abrasiv in den Auffangbehälter des Basismoduls ab, wobei zu grobe und zu feine Bestandteile ausgeschieden werden. Das Gebrauchtabrasiv wird energieeffizient getrocknet und automatisch mit neuem Abrasiv aus dem Abrasivbehälter vermischt, um eine stabil hohe Abrasivqualität sicherzustellen. Mit diesem System sind – je nach Qualität und

Von Jürgen Moser¹, Geschäftsführer und Sven Anders², Geschäftsführer

¹STM Stein-Moser GmbH | www.stm.at

²STM Waterjet GmbH Germany | www.stm-waterjet.de

Bild 1:
Modernes Wasserstrahlschneidesystem mit OneClean-Modul
 (Bild: STM Stein-Moser GmbH)



Bild 2:
OneClean-System – mit dem Abrasiv-Modul lässt sich der Verbrauch des Abrasivsandes um bis zu 55% senken
 (Bild: STM Stein-Moser GmbH)



Schneidgeschwindigkeit – bis zu 55% des gebrauchten Abrasivs wiederverwendbar. Der benötigte Energieaufwand für die Wiederaufbereitung des Abrasivs ist mit 3 bis 6 kW minimal. Die Schnittqualität bleibt im Vergleich zu neuem Abrasiv gleich. Das Abrasiv Recycling ist eines von fünf zueinander in Beziehung stehenden Modulen des OneClean-Systems. Die Anlage kann also mit einem kleinen Investment in Betrieb gesetzt und nach Bedarf jederzeit erweitert werden.

Energieeffiziente Hochdruckpumpen

Eine Wasserstrahl-Schneidanlage ist nur so gut, d.h. auch so nachhaltig, wie ihre Hochdruckpumpe. Zentrale Kriterien sind hier Leistungsfähigkeit, Energieeffizienz und minimale Druckschwankungen. Moderne Hochdruckpumpen wie der Typ 4200.45 (**Bild 3**) bieten bei einem max. Betriebsdruck von 4.000 bar und einer Fördermenge von 4,6 l/min mehr Leistung, weniger Verschleiß und eine höhere Energieeffizienz als ältere Typen.



Bild 3: Moderne Hochdruckpumpe mit 20% weniger Stromverbrauch (Bild: STM Stein-Moser GmbH)

Mit einer Leistung von 45 kW für 0,40 mm Wasserdüsen bietet diese Pumpe dank des XL-Druckübersetzers um bis zu 35% mehr Schneidleistung gegenüber 37 kW. Der längere Hub sorgt für 20% weniger Doppelhübe und damit längere Standzeiten bei den Dichtungen und Rückschlagventilen – und das bei gleicher Schneidleistung. Das schont das gesamte Hochdrucksystem. Das Thema Energieeffizienz ist nicht nur bei Investitionszuschüssen relevant. Durch den per Frequenzumrichter angesteuerten Asynchronmotor benötigt diese Pumpe 20% weniger Strom im Regel-

betrieb und ist dadurch deutlich sparsamer als vergleichbare Aggregate. Ein geringer Haltestrom bei geschlossenem Schneidventil und nur 1,5-facher Anlaufstrom runden das Energieeffizienz-Paket ab.

Lange Lebensdauer und geringer Wartungsaufwand

Eine nachhaltig wirtschaftliche Nutzung solcher Anlagen basiert letztendlich auch auf ihrem Aufbau und ihren konstruktiven Details. So hat es sich bewährt, auf Wasserstrahl-Schneidanlagen ohne Faltenbälge zu setzen. Die standardmäßige wassergeschützte Linearführung ist somit leicht zu reinigen und zeigt eine bessere Schutzwirkung. Sie ist viele Jahre einsetzbar und verbessert die Optik der Anlage erheblich. Durch den robusten Zahnstangenantrieb wird die Haltbarkeit der Maschinen zusätzlich verlängert. Auch der geringe Bedarf an Druckluft für den Betrieb der Anlagen trägt dazu bei, dass die Betriebskosten einer modernen Wasserstrahl-Schneidanlage sehr gering sind. Ein konsequent umgesetztes System bietet neben einer absolut rostfreien Leichtbau-Konstruktion aus Aluminium und Edelstahl eine Kombination aus erstklassigen Komponenten sowie ein maximales Maß an produktionstechnischer Effizienz, Umweltfreundlichkeit und Verschleißfestigkeit.

Moderne Technik für eine nachhaltige Unternehmensentwicklung

Wie eingangs erwähnt, hat Nachhaltigkeit verschiedene Aspekte. Wie sich mit dieser Technik eine nachhaltige Unternehmensentwicklung bei einem Dichtungshersteller gestalten lässt, zeigt am besten ein Praxisbeispiel. Mit einer Wasserstrahl-Schneidanlage stellte die DDL GmbH erfolgreich auf ganzheitliche Inhouse-Produktion für anspruchsvolle Nischenmärkte um.

Das Unternehmen konzentriert sich auf Dichtungslösungen für den Rohrleitungsbau (**Bild 4**) – darunter auch salzwasser-, fett-, öl- und feuerbeständige Konstruktionen für sensible Einsatzgebiete. Die Produkte wurden in den ersten Jahren nahezu komplett fremdproduziert. Erst seit wenigen Jahren fertigt man alle Teile mithilfe einer kombinierten Rein- und Abrasivwasserstrahl-Schneid-anlage inhouse. Wie in der Branche üblich, konzentrierte sich der Gründer anfangs auf Beratungs- und Ingenieursleistungen und lagerte die Produktion im Ausschreibungsverfahren an Lohnfertiger aus. Die damit verbundenen Reibungsverluste, Qualitätsschwankungen und die eingeschränkte Flexibilität wurden jedoch zunehmend zum Problem. Nachdem die Produktion von lasergeschnittenen Pressringdichtungen auf große Nachfrage stieß – die Gummikomponenten wurden im Betrieb aufwändig ausgeschnitten, per Hülsbohrer mit Löchern versehen und beschriftet – begab man sich vor Jahren auf die Suche nach der geeigneten Verarbeitungstechnik. Gefunden wurde diese mit einem Wasserstrahl-Schneidsystem. Diese Technik bot – im Vergleich zu anderen technischen Optionen – eine tragfähige Lösung, die gesamte Fertigung unabhängig von Lohnfertigern im eigenen Betrieb durchzuführen. Heute werden die Dichtungen auf einer zur MasterCut aufgerüsteten 1020 EcoCut mit einem 1 x 2 m großen Schneid-tisch, einer Ecotron-Hochdruckpumpe sowie einem Reinwasser- und einem Abrasivschneidkopf gefertigt. Geschnitten wird im Wechsel hauptsächlich 5 mm dicker V2-Stahl und EPDM-Kautschuk.



Bild 4: Die Dichtungen für den Rohrleitungsbau selber zu fertigen, trug nachhaltig zur Unternehmensentwicklung bei

(Bild: STM Stein-Moser GmbH)

Die Anlage wurde innerhalb von zwei Tagen aufgestellt und in Betrieb genommen. Schon nach drei Tagen Schulung beherrschten die Mitarbeiter die selbstständige Bedienung der Maschine – trotz fehlendem CNC-Know-hows. Geschnitten wurden von Anfang an alle Komponenten ohne Werkzeugwechsel, ohne Nachbearbeitungsaufwand, bei max. 14% Materialausschuss und deutlichem Qualitätszuwachs. Das machte schnell die Runde und führte zu mehr Aufträgen, sodass die Maschine bald 10 h/Tag ununterbrochen lief. Vor fünf Jahren wurde ein zweiter Schneid-tisch angeschafft, damit Stahl und Gummi mit zwei Anlagen parallel geschnitten werden können. Die Rentabilität in der Fertigung ist seitdem um gut 30% gestiegen. Inzwischen

Die Anlage wurde innerhalb von zwei Tagen aufgestellt und in Betrieb genommen. Schon nach drei Tagen Schulung beherrschten die Mitarbeiter die selbstständige Bedienung der Maschine – trotz fehlendem CNC-Know-hows. Geschnitten wurden von Anfang an alle Komponenten ohne Werkzeugwechsel, ohne Nachbearbeitungsaufwand, bei max. 14% Materialausschuss und deutlichem Qualitätszuwachs. Das machte schnell die Runde und führte zu mehr Aufträgen, sodass die Maschine bald 10 h/Tag ununterbrochen lief. Vor fünf Jahren wurde ein zweiter Schneid-tisch angeschafft, damit Stahl und Gummi mit zwei Anlagen parallel geschnitten werden können. Die Rentabilität in der Fertigung ist seitdem um gut 30% gestiegen. Inzwischen



Bild 5: Der gleichzeitige Betrieb mehrerer Schneidköpfe erhöht die Effizienz der Anlagen

(Bild: STM Stein-Moser GmbH)

ist das Unternehmen unabhängig von Fremddienstleistern, konnte die Fertigungskosten signifikant senken und die Qualität maximieren. Als einziger unabhängiger Hersteller in der Zielbranche kann das Unternehmen zudem deutlich flexibler agieren und so seine Wettbewerbsposition nachhaltig sichern.

Fazit

Diese Beispiele zeigen die vielen Nachhaltigkeitsaspekte dieser Technologie. Welche bei einem jeweiligen Einsatz zum Tragen kommen, hängt von den Prioritäten des Anwenders ab. Grundsätzlich empfiehlt es sich immer, eine Bedarfsanalyse durchzuführen, um so das ideale System auszuwählen. Denn Wasserstrahl-Schneidsysteme sollten nicht von der Stange beschafft, sondern technisch

exakt dem Bedarf angepasst werden. Nachhaltige Einsteigermodelle sind beliebig aufrüstbar und lassen sich verändernden Anforderungen schnell und zuverlässig anpassen. Dazu trägt die Vielseitigkeit des Modulsystems mit Schneidmaschinen und Zubehör in verschiedensten Ausführungen entscheidend bei. Mit diversen Tuning-Optionen lässt sich dann – je nach Anwendung – die Nachhaltigkeit einer Anlage noch weiter steigern. Solche Optionen können eine automatische Höhenabtastung mit Kollisionsschutz, eine Unterdrucküberwachung im Abrasivdosiersystem, der gleichzeitige Betrieb mehrerer Schneidköpfe (**Bild 5**) etc. sein. Dabei resultiert Nachhaltigkeit letztendlich immer auf einer Bedarfsanalyse und dem modularen Ausbau der Anlagen, basierend auf modernster Technik.



Das Online-Fachbuch www.fachwissen-dichtungstechnik.de erläutert in 24 Fachkapiteln ausführlich die physikalischen Vorgänge und die technologischen Überlegungen für die Gestaltung und den Betriebseinsatz von Dichtungen und Dichtsystemen.

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Heinz K. Müller, IMA, Universität Stuttgart, Dr. Bernard S. Nau, British Hydromech. Research Group, BHRG.

INHALT

Allgemeine Grundlagen

1. Grundbegriffe der Dichtungstechnik
2. Polymerwerkstoffe
3. O-Ring: Theorie und Praxis
4. Fluidströmung im engen Dichtspalt

Abdichtung bewegter Maschinenteile

5. Hydraulikdichtungen
6. Pneumatikdichtungen
7. Abstreifer
8. Wellendichtringe ohne Überdruck
9. Wellendichtringe mit Überdruck
10. Fanglabyrinth-Dichtungen
11. Stopfbuchs-Packungen
12. Gleitringdichtungen: Grundlagen

13. Gleitringdichtungen: Gestaltung
14. Gleitringdichtungen: Werkstoffe
15. Kolbenringe f. Mot. u. Verdichter
16. Drosseldichtungen f. Flüssigkeiten
17. Drosseldichtungen für Gase
18. Gewinde-Wellendichtungen
19. Zentrifugal-Wellendichtungen
20. Magnetflüssigkeits-Dichtungen
21. Membran- u. Faltenbalgdichtungen

Abdichtung ruhender Maschinenteile

22. Flanschabdichtung: Grundlagen
23. Flanschdichtungen: Bauformen
24. Stat. Dichtungen: Sonderbauformen

www.fachwissen-dichtungstechnik.de wird von namhaften Sponsoren unterstützt. Das umfangreiche Fachwissen der Autoren steht dem individuellen Nutzer unentgeltlich zur Verfügung. Jedes Kapitel kann als PDF-File heruntergeladen werden. Das Online-Fachbuch wendet sich an alle, die ihre Kenntnisse über Dichtungen und Dichtprobleme vertiefen wollen, an Konstrukteure, Entwicklungs- und Betriebsingenieure, Mitarbeiter in Kundendienst und Marketing sowie Studierende der technischen Fachbereiche.

Das Interesse der Fachwelt an fundierten Informationen zu Themen der Dichtungstechnik ist unvermindert groß. Die Website www.fachwissen-dichtungstechnik.de verzeichnet seit Erscheinen 721.735 Besucher

Das in www.fachwissen-dichtungstechnik.de vermittelte Wissen kann den notwendigen Kontakt zwischen Dichtungsherstellern und Anwendern nicht ersetzen, aber es kann dabei helfen, bei Dichtproblemen das Wesentliche zu erkennen, zweckmäßige Fragen zu stellen und einen Weg zu brauchbaren Antworten zu finden.

Die Mischung macht's

Perfektes Compoundieren mit Extrudern – auch eine Frage der richtigen Antriebs- und Automatisierungstechnik

Hochleistungsextruder werden zum Compoundieren von Kunststoffen, z.B. für Dichtungen, immer wichtiger. Neue Doppelschneckenextruder bieten hohe Drehmomente und können gleichzeitig große Volumen verarbeiten. Kombiniert mit der richtigen Automatisierungstechnik lassen sich dann die optimalen Mischungen realisieren.

Die Entwicklung, die vor Jahrzehnten bei Schraubenspindelpumpen zum Fördern zäher Massen begann, ist mittlerweile bei Doppelschneckenextrudern angekommen. Moderne Hochleistungsextruder wie ZSE MAXX (Bild 1) vereinen heute zwei wichtige Eigenschaften, die herkömmliche Systeme nicht bieten, in einer Anlage: Dieser Extruder besitzt eine sehr hohe Drehmomentdichte (15 Nm/cm^3) und kann gleichzeitig, dank eines hohen freien Schneckenolumens ($D_a/D_i = 1,66$), große Materialvolumen verarbeiten. Diese Kombination ermöglicht, insbesondere bei temperatursensiblen Prozessen, maximale Durchsätze. Die gleichläufigen Doppelschneckenextruder sind modular aufgebaut und lassen sich für eine Vielzahl an Aufbereitungsaufgaben einsetzen. Darüber hinaus erhöhen sie die Flexibilität in der Fertigung: So können Schnecken und Zylinder individuell konfiguriert und an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Zudem entfallen zeitraubende Reinigungsarbeiten, da sich das Schneckenprofil im Betrieb selbst reinigt.

Für verschiedenste Prozesse geeignet

Hochleistungsextruder werden u.a. zum Compoundieren eingesetzt, also zum Füllen und Verstärken von Polymeren, um mechanische Eigenschaften wie Schlagzähmodifizierung, Formstabilität und Bruchfestigkeit zu verbessern. Sie eignen sich aber auch zur Herstellung von Polymerblends, also zur Mischung verschiedener Kunststofftypen. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Herstellung von Masterbatches, also von Kunststoffgranulaten, denen bis zu 85% Füll- oder Farbstoffe beigemischt sind. Direktextrusion bzw. Inline-Compounding sind mit diesen Extrudern ebenfalls möglich: In diesem Fall werden sie zur Materialaufbereitung und Formgebung genutzt, der Zwi-

Bild 1:
Die Hochleistungs-
extruder der Baureihe
ZSEMAXX erzielen bei
temperatursensiblen
Prozessen maximale
Durchsätze (Bild: Leistritz
Extrusionstechnik GmbH)



schenschritt über die Granulatproduktionsentfällt in diesem Fall.

Temperatur und Druck genau im Blick

Da gerade in der Industrie die Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit von Prozessen von großer Bedeutung ist, werden Extruder häufig automatisiert – u.a. mithilfe von Massedruck- und Massetemperatursensoren (**Bild 2**). Bei thermischen Prozessen wie der Kunststoffverarbeitung muss der Anlagendruck genau überwacht werden. Wenn ein unzulässig hoher Druckaufbau zu beobachten ist, dann stimmt etwas mit der Verfahrenstechnik nicht. Der Antrieb der Maschine wird dann über die Sensoren abgeschaltet.



Bild 2: KE-Massedrucksensoren des Performance-Level 'c' messen den Prozessdruck bei Temperaturen bis zu 538 °C

(Bild: Gefran Deutschland GmbH)

Bei in diesen Extrudern eingesetzten KE-Massedrucksensoren handelt es sich um mit einem Natrium-Kalium-Gemisch gefüllte Sensoren, die für die Druckmessung von heißen Kunststoffmassen bis zu 538 °C entwickelt wurden. Sie arbeiten nach dem Prinzip der hydraulischen Druckübertragung, bei dem der Druck auf die Sensoren in ein elektrisches Signal umgewandelt wird, das die Maschinensteuerung weiterverarbeitet. Die KE-Sensoren decken Druckbereiche von 0 bis 35 und 0 bis 1.000 bar ab und entsprechen dem Performance Level 'c', der Extruder-Norm EN 1114-1 und der Europäischen Maschinenrichtlinie.



Bild 3: Die Frequenzumrichter ermöglichen eine optimierte Prozessanbindung der Extruder (Bild: Gefran Deutschland GmbH)

Darüber hinaus kommen Massetemperatur Sensoren in verschiedenen Bauformen zum Einsatz. Auch sie haben eine wichtige Funktion: Die Temperatur der Kunststoffschmelze ist ein Indikator für den ordnungsgemäßen Ablauf des Prozesses. Der Kunststoff darf nicht überhitzt werden. Aufgrund der Informationen des Massetemperatur Sensors wissen die Maschinenführer zu jeder Zeit, ob sie sich im richtigen Prozessfenster bewegen.

Individuelle Maschinensteuerung

Ebenfalls großen Einfluss auf das optimale Mischungsergebnis haben die Antriebstechnik-Komponenten der Extruder. Hier hat sich z.B. die Frequenzumrichterbaureihe ADV200 (**Bild 3**) bewährt. Sie ermöglicht eine optimierte

Prozessanbindung durch spezielle Parameter, die je nach Anforderung individuell angepasst werden kann. Des Weiteren lassen sich alle gängigen Feldbusschnittstellen anbinden. Ein weiteres Feature des ADV200 ist die Motordaten-Identifikation – sie arbeitet sowohl bei drehendem als auch bei stehendem Motor. Die Frequenzumrichter sind für Motorleistungen von 0,75 kW bis 1,8 MW ausgelegt und so konstruiert, dass eine einfache und schnelle Inbetriebnahme möglich ist. Ein schneller Stromregler ermöglicht sowohl bei Asynchronmotoren als auch bei Synchronmotoren eine hohe Drehmomentgenauigkeit für Extruderanwendungen mit und ohne Drehzahlrückführung.

Neben den Frequenzumrichtern kommt – u.a. für kundenspezifische Projekte – die Maschinensteuerung extru+ (**Bild 4**) zum Einsatz. Diese Software steuert die Prozesse bei der Extrusion von Kunststoffen, ist konfigurierbar und lässt sich vollständig an die jeweilige Anwendung anpassen – sowohl die grafische Benutzeroberfläche als auch die Maschinensteuerung können dank eines quelloffenen Templates leicht personalisiert werden. Diese Maschinensteuerung erlaubt z.B. das Management von zwölf Temperaturregelzonen sowie die Konfiguration von zwei Motoren als Master/Slave und deren synchronen Betrieb. Da Extrusionsverfahren sehr energieintensiv sind,

wurde außerdem eine Energy Saving-Funktion für die Aufheizphase und eine Smart Energy-Funktion für die Produktionsphase in die Software integriert. Beide Funktionen steigern die energetische Effizienz der Anlage deutlich.

Die Software bietet Anwendern darüber hinaus die Möglichkeit, Compound-Rezepturen einfach zu verwalten und ihre Anlage vorbeugend zu warten. Die Gefahr von Produktionsunterbrechungen aufgrund von Störfällen wird so reduziert.

Neben der Möglichkeit, bei kundenspezifischen Projekten mit der Software zu arbeiten, bietet sich der Vorteil eines geschlossenen Systems. Das bedeutet, dass der Systemhersteller keine Software-Anpassungen machen muss und deshalb keine eigenen Programmierer braucht. Offene Systeme kosten vor diesem Hintergrund deutlich mehr. Vor allem im südostasiatischen Raum bietet die Software eine gute Möglichkeit für klassische Compoundieraufgaben. Eine erweiterte Variante setzt ein italienischer Kunststoffproduzent ein: Hier sind neben den Dosierungen auch die Unterwassergranulierung sowie weiteres Up- und Downstream-Equipment eingebunden. Darüber hinaus stehen mehr Temperaturregelzonen zur Verfügung und der Bildschirm für die Überwachung der Parameter ist deutlich größer.

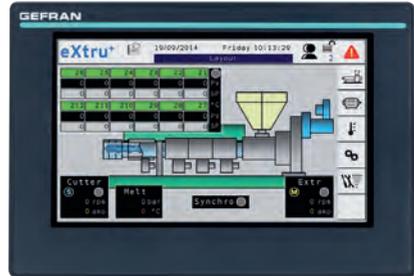


Bild 4: Die Maschinensteuerung eXtru+ kann vollständig und ohne großen Aufwand an die jeweilige Applikation angepasst werden

(Bild: Gefran Deutschland GmbH)

Prozesssicherheit durch intelligente Entgasung

Neue Automationslösungen optimieren die Ab- und Umfüllung hochviskoser Medien

Neue Vakuumlösungen senken die Kosten und erhöhen die Sicherheit bei der automatisierten Abfüllung und Förderung hochviskoser Medien aus Deckelfässern. Beispiele sind ein Fasswechselsystem für Anwender in der Dosier- und Mischtechnik sowie ein Fassabfüllsystem für Materialhersteller oder zur Vakuum-Abfüllung beim Kunden. Beide Systeme lassen sich branchenübergreifend einsetzen und basieren auf der Integration eines intelligenten Entgasungssystems.

Zu Beginn waren es vor allem industrielle Anwender im Bereich der Kunstharz-Verarbeitung, die an der Entwicklung des neuen Fasswechselsystems interessiert waren. Mittlerweile setzen aber auch Anwender in vielen anderen Branchen der Fluidtechnik – etwa in der Dichtungs- und Klebstofftechnik sowie in der Verarbeitung hochviskoser Fette – diese vakuumtechnische Systemlösung ein. Der Grund dafür ist einfach nachzuvollziehen: Wann immer in Industriebetrieben hochviskose, pastöse Medien aus den weitverbreiteten 50-l- und 200-l-Spannring-Deckelfässern (**Bild 1**) zu verarbeiten sind, bietet ein solches Fasswechsel-System aufgrund seiner vollautomatischen Entlüftung bzw. Entgasung einen deutlich reduzierten Aufwand für das Material-Handling, eine verbesserten Ergonomie und einen erhöhten Sicherheitsstandard.

Problematische Luftkammern

In vielen Bereichen, in denen heute Kunstharze dosiert und gemischt werden müssen, erfolgt die Förderung der hochviskosen Materialien meist aus Deckelfässern mithilfe von Pumpen, die auf Fassfolgeplatten montiert sind, die in der Höhe beweglich sind. Zur Entnahme der pastösen Fluide werden diese zur Wandung des Blechfasses hin abgedichteten Platten von oben auf das Medium gepresst oder sinken durch ihr Eigengewicht während der Entleerung nach unten. Hierbei zeigt sich jedoch immer wieder die gleiche Problematik: Weil die angelieferten Deckelfässer nicht bis zum oberen Rand gefüllt werden können, befindet sich oberhalb der Materialoberfläche Luft im

Fass. Um nun aber der prozesstechnischen Anforderung gerecht zu werden, dass bei dem Routinevorgang eines Wechsels bzw. Austauschs eines Fasses in der Dosier- und Mischanlage auf keinen Fall Luft mit in die Förder- bzw. Dosierpumpe einströmt, wird diese meist mithilfe pneumatischer, elektrischer oder manueller Entlüftungseinrichtungen abgeführt. Hierbei handelt es sich vielfach um suboptimale Lösungen, bei denen u.a. das latente Risiko besteht, dass sich vom vorherigen Fasswechsel noch Materialreste in der Entlüftungseinrichtung befinden, die dann beim Entweichen der Luft nach außen spritzen. Gleichzeitig kann es dabei zum raschen Absacken der Folgeplatte kommen. Abgesehen davon, dass das Entlüftungssystem oft noch per Hand von störendem Restmaterial befreit werden muss, hat der Maschinenbediener ein ständiges Verletzungs- und Verschmutzungsrisiko (Spritzgefahr). Mit anderen Worten: Die bisher weitverbreiteten Probleme bei der Entgasung der Deckelfässer beeinträchtigen die Prozesssicherheit, setzen die Bediener der Anlagen einem Gesundheitsrisiko aus und verursachen darüber hinaus auch teure Materialverluste.



Bild 1: Halbautomatische Vakuumstation für die luftfreie Abfüllung von 200-l-Deckelfässern, die sich für viele verschiedene pastöse und hochviskose Medien nutzen lässt und auch auf andere Gebindegrößen auslegt werden kann (Bild: Tartler GmbH)

Luftgängige Fassfolgeplatte

Das neue Vakuumsystem für den Fasswechsel eliminiert diese Probleme. Es arbeitet vollautomatisch, schließt den schädlichen Lufteintrag in die Pumpe oder in die Misch- und Dosieranlage aus und vermeidet den Materialverlust. Der Grund: Die gesamte im Fass und in der Förder- und Dosierpumpe befindliche Luft wird über einen Vakuumanschluss durch eine zwar luftgängige, nicht aber mediendurchlässige Fassfolgeplatte automatisch und sehr gleichmäßig abgesaugt. Dies erfolgt schnell und sicher und unabhängig von der Art der pastösen Rohstoffe. Damit am Ende des Entnahmeprozesses auch im entleerten Fass kein Vakuum zurückbleibt, wird beim Ausfahren der Spezialplatte durch den gleichen Vakuumanschluss, der für die Entgasung genutzt wurde, wieder Luft eingebracht. Das geschieht dank des großflächigen Eintrags durch den luftgängigen Plattenwerkstoff völlig ohne Spritzgefahr für den Bediener. Im Ergebnis erhöht das neue Vakuumsystem also den Anwenderschutz und die Prozesssicherheit, während Materialverluste nahezu ausgeschlossen sind. Das Fasswechsel-



Bild 2: Mit der neuen halbautomatischen Vakuumstation TAVA 200 F können Materialhersteller pastöse und hochviskose Medien luftfrei in 200-Liter-Deckelfässer abfüllen

(Bild: Tartler GmbH)

system steht auch als Nachrüstsatz für ältere Anlagen (ab Baujahr 2015) zur Verfügung. Dabei kann der Um- bzw. Einbau (inklusive Steuerung) werkseitig oder vor Ort beim Kunden vorgenommen werden.

Der Vakuumfasswechsel leistet einen wesentlichen Beitrag zur Prozesssicherheit, verbessert den Kontaminationsschutz der Mitarbeiter und reduziert den Materialverlust. Allerdings kann das System per se noch nicht garantieren, dass sich keine Luftnester und -polster im angelieferten Materialfass befinden, die den Verarbeitungsprozess behindern bzw. auch zu dessen Abbruch führen können. Im nächsten Schritt haben sich die Entwicklungsingenieure deshalb den vorgelagerten Prozess der Materialvorbereitung und der Materialabfüllung genauer angeschaut und auch hierfür eine vakuumtechnische Lösung geschaffen, die die Prozesssicherheit bei der Abfüllung garantiert. Dieses System wurde inzwischen zum Patent angemeldet.

Garantierte Prozesssicherheit auch beim Abfüllen

Um die Lufteinschluss-Problematik also nicht nur für die Anwender hochviskoser Fluide aus der Welt zu schaffen, sondern auch für die Materialhersteller und Materialabfüller, wurde die Entwicklung des Entgasungssystems ausgeweitet und die Vakuum-Abfüllanlage TAVA F (**Bild 2**) realisiert. Hierbei handelt es sich um eine kompakte halbautomatische Vakuumstation für die luftfreie Abfüllung – z.B. von 200-l-Deckelfässern – die sich flexibel für viele verschiedene pastöse und hochviskose Medien nutzen lässt und auch problemlos auf andere Gebindegrößen auslegt werden kann. Sie besteht im Wesentlichen aus vier funktionellen Komponenten (**Bild 3**):



Bild 3: Die Systemlösung mit vier funktionellen Komponenten in der Einzelfass-Anwendung

(Bild: Tartler GmbH)

- einer Aufnahme zum Einspannen und Stabilisieren eines Fasses,
- einem individuell anpassbaren Materialeinlass,
- einer Vakuumpumpe und
- einer Steuerung mit Touchscreen.

Alle Komponenten sind platzsparend positioniert und gut zugänglich auf einem stabilen Maschinengestell untergebracht. Die Beschickung der Station, das Positionieren des noch leeren Fasses auf der Zentrierplatte und das Schließen der Spannvorrichtung erfolgen manuell, während die Vakuumbeaufschlagung des Fasses und das nahezu gleichzeitige Einfüllen der pastösen Masse vollautomatisch ablaufen. Ein Fass ist nach einigen Minuten ohne Lufteinschlüsse befüllt und kann – versiegelt mit einer Deckfolie – abtransportiert werden.

Bei der Entwicklung und Optimierung der Abfüllanlage wurden verschiedene Optionen berücksichtigt. So lässt sich z.B. – nachdem das Vakuum im Fass aufgebaut ist – die Materialeintritts-Oberfläche über verschiedene Materialzuführungen (Lochplatten, Breitstrahl-Einlässe u.a.) variieren. Auf diese Weise werden Luftpolster, die sich im Material befinden, sowie eingemischte Luft sofort aus dem Dosier- oder Herstellungsprozess entfernt, sobald die Förderung des Materials in das evakuierte Fass startet. Darüber hinaus steht mit der kleineren TAVA 50 F auch eine Anlagenvariante für 50-l-Fässer zur Verfügung.

Optimale Befüllung ohne Lufteinschlüsse

Produzenten, Abfüller und Verpacker von pastösen und hochviskosen Medien profitieren von der neuen Serie in mehrfacher Hinsicht. Die Materialhersteller können damit ihren Kunden z.B. garantieren, dass sie optimal befüllte Fässer ohne Lufteinschlüsse



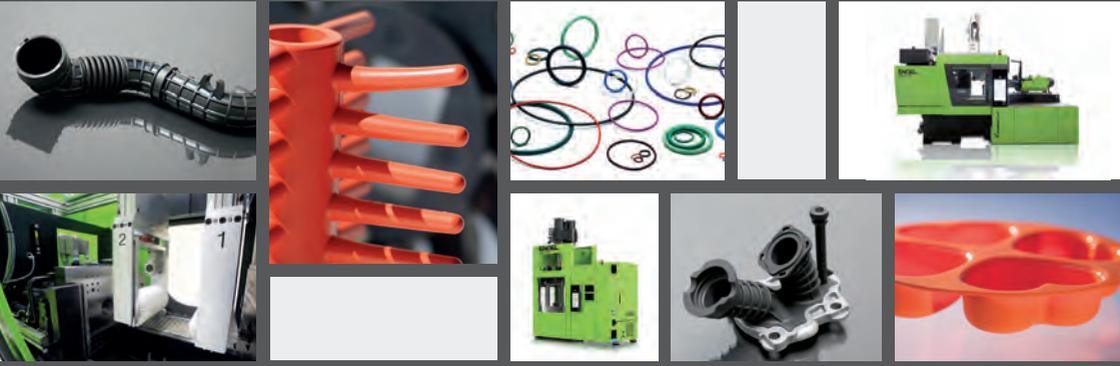
Bild 4: Vollautomatisierte Komplettlösung mit antriebenem Rondell, auf dem jeweils vier Fässer im Kreisverkehr positioniert, befüllt und versiegelt werden

(Bild: Tartler GmbH)

von hoher Lagerstabilität erhalten, die eine prozessichere Weiterverarbeitung der Inhaltsstoffe ermöglichen. Letztlich profitiert auch der Anwender vom Einsatz der manuellen Version der TAVA F durch die einfache Entgasung vor Ort.

Für Materialhersteller, die besonders große Mengen an Deckelfässern wirtschaftlich befüllen müssen, steht die TAVA 200 F auch als vollautomatisierte Komplettlösung zur Verfügung (**Bild 4**). Im Mittelpunkt steht hier ein antriebenes Rondell, auf dem jeweils vier Fässer im Kreisverkehr positioniert, befüllt und versiegelt werden. Sowohl die Beschickung als auch der Abtransport der Fässer erfolgen dabei – automatisiert – über Rollenbahnen.

Perfekt angepasst. ENGEL elast.



Geht es um Gummi & Co, gilt: ENGEL elast – passt. Denn egal ob Gummi, Fest- und Flüssigsilicone oder thermoplastische Elastomere: ENGEL hat für Sie die richtige Maschine. Und: die passende Automatisierung. Als innovativer Systemanbieter bieten wir Ihnen hocheffiziente Produktionszellen, die Ihre Elastomer-Anwendungen prozessstabil und sehr energiesparend verarbeiten.

Das flexible kompakte Kraftpaket für maximalen Output: Die hydraulische ENGEL flexseal eignet sich für alle gängigen Gummimischungen. Dank Servo-Antrieb im Standard können Sie jede Art von O-Ringen und Flachdichtungen besonders effizient auf kleinstem Raum produzieren.

ENGEL
be the first

www.engelglobal.com

Keine Chance für Korrosion

AD-Plasma ermöglicht dichte Hybridverbunde

Wenn Feuchtigkeit in Kombination mit Sauerstoff die Grenzfläche eines im Spritzguss gefertigten Metall/Kunststoff-Verbunds unterwandert, droht Korrosion und damit das vorzeitige Haftungsversagen des Hybridbauteils. Dem nachhaltig entgegenzuwirken, verspricht eine atmosphärische Plasmaversiegelung in Kombination mit anwendungsspezifischen Thermoplast-Compounds.

Die Praxis zeigt, dass auch ein ursprünglich dichter Verbundspritzguss nach einiger Zeit undicht werden kann und in der Folge sein Zusammenhalt und die Funktion der Bauteile oft nicht mehr gegeben sind. Die Grenzfläche von Metall/Kunststoff stellt ohne spezielle Abdichtung eine konstante Angriffsfläche für das Eindringen von Wasser, Luft oder anderen Medien dar.

Verschiedene Unternehmen und Forschungseinrichtungen beschäftigen sich seit Langem damit, dieses Risiko zu minimieren bzw. es komplett zu eliminieren. Einen neuen Ansatz für einen medienresistenten und besonders haftungsstarken Hybridverbund bietet das Plasma-SealTight (PST)-Versiegelungsverfahren (**Bild 1**). Die Zusammensetzung einer im Atmosphärendruck erzeugten plasmapolymerten Schicht, die Rezeptur des Kunststoff-Compounds und die Prozessparameter werden dabei so aufeinander abgestimmt, dass ein langzeitstabil fester und mediendichter Verbund des Spritzgussbauteils entsteht.

Plasmabeschichtung unter Normaldruck

Der neue Plasma-Versiegelungsprozess basiert auf der bereits vor über zehn Jahren entwickelten und patentierten atmosphärischen PlasmaPlus-Technologie. Mit dieser Erfindung war es erstmals möglich geworden, funktionale Dünnschichten anstatt im Niederdruck, d.h. in einer separaten und kostenaufwändigen Vakuumkammer, unter Normaldruck zu erzeugen und durch eine Plasmapolymersation im kontinuierlichen Fertigungsprozess Plasmabeschichtungen vorzunehmen.

Von Inès A. Melamies¹, Fachjournalistin; Edgar Düvel, Global Market Segment Manager²; Leonhard Enneking, Key Account Manager²

¹Pressebüro Facts4You.de

²Plasmatreat GmbH | www.plasmatreat.de

Plasma-SealTight ist ein trockener und umweltfreundlicher Prozess. Das robuste und reproduzierbare Verfahren ersetzt die beim Hybrid-Spritzgießen für eine Vorbehandlung häufig angewandten nasschemischen Reinigungs- und Primerverfahren. Arbeitsschritte wie Trocknungsprozesse oder Zwischenlagerung entfallen komplett, denn die Bauteile können sofort nach ihrer Beschichtung inline weiterverarbeitet werden.

Multifunktional und millimetergenau

Die Erzeugung einer Grenzflächenschicht zwischen zwei ungleichen Materialien stellt Entwickler grundsätzlich vor

eine große Herausforderung, da von den chemischen Eigenschaften der Schicht verlangt wird, gleichzeitig zwei unterschiedliche Stoffe zu verbinden. Noch komplexer wird die Aufgabe, wenn die Materialien verschiedenen Gruppen angehören, wie in diesem Fall dem Metall und Kunststoff. Werden Materialien nicht stoffgebunden gefügt, so können Wasser oder andere Medien leichter in die Grenzfläche eindringen und sich auf der Materialoberfläche ausdehnen. Die PST-Versiegelung verhindert diesen Effekt, indem die Schicht mikroskopisch kleine Hohlräume fein wie ein Nebel ausfüllt und sich korrosionsschützend mit der Metalloberfläche verbindet (**Bild 2**).



Bild 1: Mit dem chemisch-physikalischen Plasma-SealTight-Verfahren lassen sich in Millisekunden funktionelle Nanoschichten ortsselektiv abscheiden und in der Folge stoffschlüssige Verbindungen unterschiedlicher Materialien erzeugen (Bild: Plasmatrete GmbH)

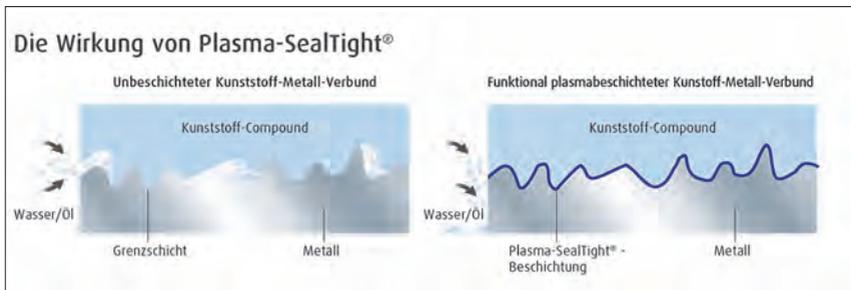


Bild 2: Dringen Wasser oder andere Medien in die Grenzfläche des Kunststoff-Metall-Verbunds ein, kann es zu Korrosion, zum Versagen der Bauteilfunktion oder gar zu einer Delamination kommen (links). Die plasmapolymere Schicht (rechts) füllt dagegen alle Hohlräume und bietet dem Wasser keine Möglichkeit, in die Grenzfläche vorzudringen (Bild: Plasmatrete GmbH)



Bild 3: Der Metallkörper (links) kann sofort nach der Beschichtung im Atmosphärendruckplasma mit dem Thermoplast-Compound (rechts) überspritzt und zum festen Verbund gebracht werden (Bild: Plasmatrete GmbH)

Bei Plasma-SealTight handelt es sich um ein chemisch-physikalisches Verfahren, das durch Schichtabscheidung im Atmosphärendruckplasma die stoffschlüssige Verbindung der verschiedenen Materialien bewirkt. Die Schicht verbindet sich auf molekularer Ebene mit dem Metall und gewährleistet im Verbund mit den modifizierten Kunststoffcompounds eine so hohe Haftung und Dichtigkeit, dass sie gleichzeitig die Funktion einer Antikorrosionsschicht übernimmt.

Zur Erzeugung einer Schicht wird dem Plasma ein Präkursor in Form einer siliziumorganischen Verbindung beige-mischt. Durch die hochenergetische Anregung im Plasma wird diese Verbindung

fragmentiert und scheidet sich auf einer Oberfläche als glasartige Schicht ab. Die chemische Zusammensetzung kann je nach Anwendungsfall variiert werden, um auf den unterschiedlichen Materialien die jeweils besten Funktionalisierungsergebnisse zu erzielen. Ein weiterer Vorteil des Prozesses ist seine hohe Flexibilität. Insbesondere die Schichtstärke und die Prozessgeschwindigkeit lassen sich genau auf die jeweilige Applikation abstimmen. Gegenüber anderen Beschichtungstechniken liegt ein ganz besonderer Vorteil des Verfahrens zweifellos darin, dass die Schichtabscheidung aufgrund der Düsentchnik ortsselektiv, also im Millimeterbereich und an genau definierter Stelle, erfolgen kann und das bei sehr hoher Geschwindigkeit. Während hier eine 100 nm dünne Schichtdecke in Millisekunden abgeschieden wird, dauert es z.B. beim Niederdruckplasma (Vakuumkammer) etwa 1 bis 2 min. und eine Ortsselektion ist nicht möglich.

Durch die Entwicklung neuer Präkursoren und die umfangreiche Anpassung der Plasmaparameter gelang beim PST-Verfahren der gezielte Einbau von gleichzeitig mehreren Funktionen in einer Schicht. Zu diesen Funktionen gehören die gute Bindung an die Metalloberfläche, eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit, die Wirkung als Medien- und Oxidationsbarriere sowie die haftvermittelnde Eigenschaft für Kunststoffe durch funktionelle chemische Gruppen. Während das in der Schicht enthaltene Silizium für

die Haftung am Metall bzw. Metalloxid sorgt, ist Siliziumoxid für die Barrierewirkung und Mediendichtigkeit verantwortlich. Die organischen Anteile in der Schicht (funktionelle Gruppen) bewirken die Haftung an das Polymer.

Maßgeschneidertes Kunststoffrezept

Bei der Rezeptur ihrer Kunststoffe haben die Hersteller viele vom Kunden definierte Eigenschaften des späteren Produkts zu berücksichtigen – mechanische, elektrische, thermische und chemische, das Brandverhalten des Kunststoffs und seine allgemeinen Eigenschaften wie Dichte und Feuchtigkeitsaufnahme. Die jeweilige Modifizierung der Kunststoffmatrix erfolgt durch eine Additivierung sowie die Zugabe von Füll- und Verstärkungsstoffen. Erst diese Rezepturbestandteile machen aus dem Basiskunststoff einen anwendungsspezifischen Kunststoff-Compound.

Die Sicherstellung einer konstanten Produktqualität und damit der Funktion der späteren Bauteile setzt beim Hersteller eine hohe Präzision und Reproduzierbarkeit des Compoundierprozesses voraus. Das Compound wurde von einem Unternehmen hergestellt, das auf komplexe, individuelle Anpassungen von Kunststoffeigenschaften spezialisiert ist. Aufgrund einer im eigenen Hause entwickelten Compoundiertechnik ist man in der Lage, die vorgenannten Voraussetzungen in puncto Funktionserhaltung und Qualität unabhängig vom Produktionsstandort international zu erfüllen. Das Unternehmen hatte im Projekt die Aufgabe übernommen, ein Compound mit gezielten Eigenschaften herzustellen. Die chemische Rezeptur musste bei dem neuen Verfahren vor allem zwei Aspekte berücksichtigen – den unterschiedlichen Längenausdehnungskoeffizienten von Kunststoff und Metall auf der einen und den chemisch-physikalischen Haftverbund mit der plasmapolymere Schicht auf der anderen Seite. Nach Evaluierung und Anpassung aller Kriterien kann das im Atmosphärendruckplasma beschichtete Metall sofort und ohne den Einsatz zusätzlicher Mittel oder Maßnahmen mit dem Thermoplast-Compound überspritzt und zum festen Verbund gebracht werden (**Bild 3**).

Doppelt starke Haftung

In der heutigen Validierungsphase mit kundenspezifischen Aufgabenstellungen konzentrieren sich die Systempartner beim Basis-Compound auf glasfaserverstärkte Kunststoffe, die entsprechend dem Projektverlauf modifiziert werden. Die Prüfkörper bestehen vornehmlich aus Aluminium, Stahl und Edelstahl, jeweils angespritzt mit den Thermoplasten PA6 GF30 bzw. PA66 GF30. Die Haftungstests überzeugen: Allein bei den Stahlprüfkörpern liegen die erreichten Zugscherfestigkeiten nach der Plasma-SealTight-Behandlung in einem durchschnittlich doppelt so hohen Bereich wie

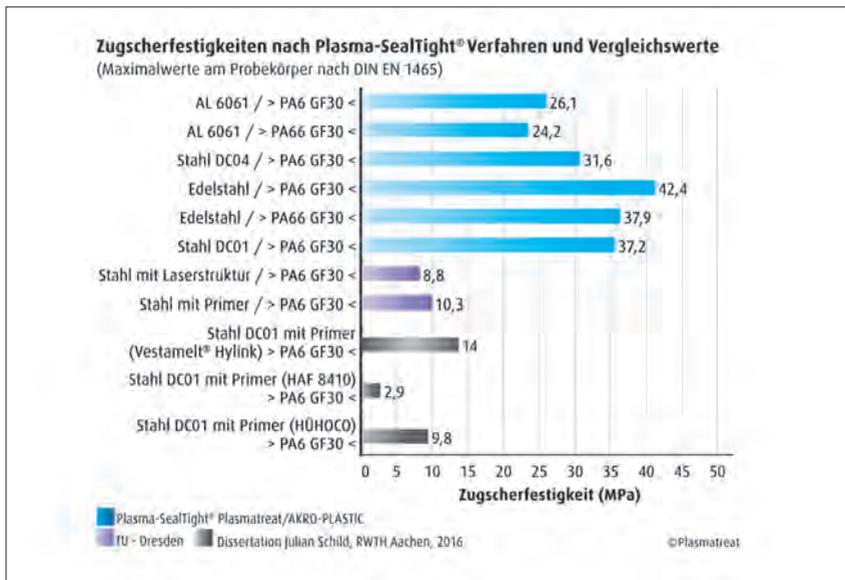


Bild 4: Im Vergleich: Die erreichten maximalen Zugscherfestigkeiten der Plasma-SealTight-Verbunde liegen weit über den Höchstwerten der mit einem Haftvermittler beschichteten bzw. laserstrukturierten Prüfkörper (Bild: Plasmatreat GmbH)

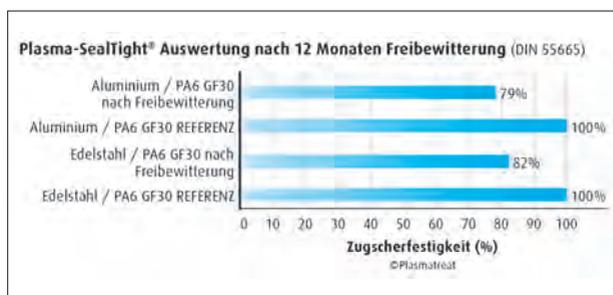


Bild 5: Testergebnis: Die Zugscherfestigkeiten der plasmaver-seigelten Hybrid-Prüfkörper haben nach einjähriger Auslagerung nur um etwa 20% abgenommen

(Bild: Plasmatreat GmbH)

die Prüfkörper, bei denen eine langzeitstabile Verbindung von Metall und Kunststoff, z.B. über eine Laserstrukturierung oder durch den Auftrag haftvermittelnder Primer, angestrebt wird (**Bild 4**).

Die Plasmaschicht wird dabei – sowohl in Hinblick auf ihre haftungsvermittelnde wie auch auf ihre korrosionsschützende Funktion – ständig optimiert. Das Ziel bei an-



Bild 6: Auch nach zwölf Monaten Freibewitterung kommt es bei den PST-beschichteten Aluminium- und Edelstahl-Prüfkörpern zum gewünschten kohäsiven Bruch im Kunststoff

(Bild: Akro-Plastic)

schließenden Versuchen zur Korrosionswiderstandsfähigkeit war, zu erfahren, inwieweit die erlangte Verbundfestigkeit durch Auslagerungstests geschwächt wird. Nach einer einjährigen Auslagerung bei Freibewitterung (gemäß DIN 55665) der Hybrid-Prüfkörper Aluminium und Edelstahl, kombiniert mit dem Thermoplast PA6 GF30, wurde ermittelt, dass die Zugscherfestigkeiten um nur etwa 20% abgenommen hatten (Bild 5). Dies entspricht in etwa dem Abfall der Zugfestigkeit des Polymers im nicht gefügten Zustand. Alle laufenden Versuche zeigen den gewünschten kohäsiven Bruch im Kunststoff bei den Metallen Aluminium und Edelstahl (Bild 6). Aufgrund des hohen Interesses der kunststoffverarbeitenden Industrie an dem Verfahren beschloss die Systempartner im Jahr 2017 für das Plasma-SealTight-Verfahren die Einrichtung eines gemeinsamen Technologiezentrums. In diesem befindet sich eine eigens für das Verfahren entwickelte Plasmavorbearbeitungs- und Beschichtungszelle. Die hier im Kundenauftrag durchgeführten Versuchsreihen schließen eine geraume Anzahl weiterer Materialkombinationen ein. Dazu gehören verschiedene Metalle, Polyamide mit unterschiedlichen Glasfasergehalten oder auch andere Polymere wie zum Beispiel PBT und PPA.

Mediendichte Versiegelung

Bei den plasmabeschichteten Metallen konnte nachgewiesen werden, dass die Schicht eine Sperre gegen Wasser, Salzlösungen und Gase bildet und eine Unterwanderung durch diese Medien verhindert. Die Anbindung des Polymers erfolgt dabei auf Basis einer chemischen Reaktion, d.h. durch den Verbund reaktiver Gruppen.

Ein Beispiel: Ein Edelstahlprüfkörper wurde zur Hälfte plasmabeschichtet, komplett mit PA6 GF30 überspritzt und anschließend für mehrere Wochen in einem korrosiven

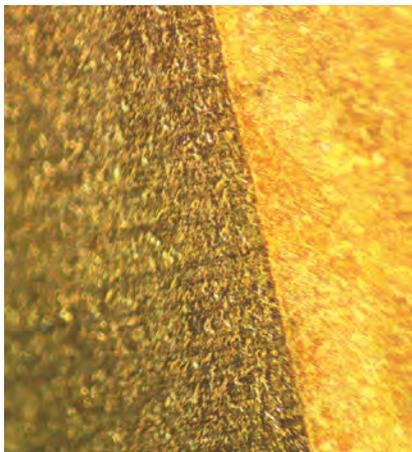


Bild 7: Die mikroskopische Aufnahme zeigt eine deutliche Trennlinie zwischen der plasmabeschichteten, korrosionsfreien Metallfläche (links) und dem unbeschichteten, korrodierten Bereich (rechts)

(Bild: Plasmatrete GmbH)

Medium ausgelagert. Nach Herausnahme wurde der Kunststoff mechanisch entfernt und das Metall mikroskopisch analysiert. Zu erkennen war eine scharfe Trennung zwischen dem unbeschichteten, nun stark korrodierten Bereich und der plasmabeschichteten korrosionsfreien Metallfläche (**Bild 7**).

Eine weitere Versuchsserie erfolgte in Zusammenarbeit mit einem Automobil- und Industrielieferer. In einem Technologievergleich wurde das PST-Verfahren anderen am Markt verfügbaren Technologien gegenübergestellt. Bubble-Tests (deutsch: Blasenmethode) und Klimawechseltests sollten die Dichtigkeit eines Hybrid-Prüfkörper-Steckers unter Wasser nachweisen. Die Materialpaarung Metall/Kunststoff bestand aus Kupfer (blank) und einem angespritztem PPA-I GF30 (schlagmodifiziertes Polyphthalamid mit 30% Glasfaseranteil) -Kunststoff-Compound (**Bild 8**). Für den Technologievergleich mit dem Plasma-SealTight -Verfahren wählte das Entwicklungsteam einen Standard-Kupfer-Steckkontakt ohne jegliche Vorbehandlung als Referenz sowie die drei Dichtungsmethoden Labyrinthstruktur, Schrumpfschlauch und Laser-Strukturierung.

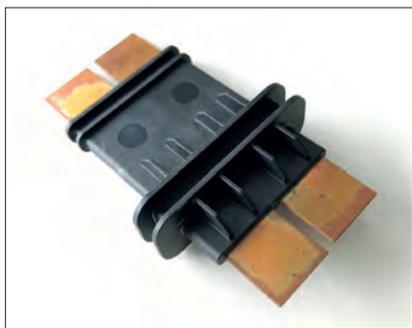
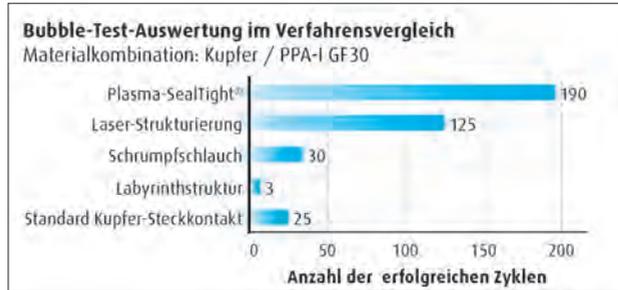


Bild 8: Die Prüfung der Dichtigkeit im Bubble-Test erfolgte mit einem Entwicklungsmuster aus Kupfer (blank) und einem angespritztem PPA-I GF30 - Kunststoff-Compound (Bild: Schaeffler Technologies)

Für den Bubble-Test montierte man den Prüfkörper in einen Anschlussadapter, der an seinem einen Ende mit Luft und einem vordefinierten Prüfdruck beaufschlagt wurde, während das andere Ende unter Überdruck in das flüssige Prüf-

Bild 9:
Beim Verfahrens-
vergleich erzielte die
Plasma-SealTight-
Technologie
den höchsten
Dichtigkeitseffekt
 (Bild: Plasmatrete GmbH)



medium eingetaucht wurde. Ein eventuelles Leck im Hybridverbund, also eine unzureichende Mediendichtigkeit, macht sich bei dieser Methode durch aufsteigende Luftblasen bemerkbar. Alle Prüfkörper mussten sich dem Test gleich nach ihrer Fertigung im Spritzgussverfahren ein erstes Mal unterziehen. Anschließend wurde der Klimawechseltest in einem Temperaturbereich von -40 °C bis $+180\text{ °C}$ in insgesamt 200 Zyklen durchgeführt, wobei nach jeweils 50 Zyklen die Bauteile aus der Wärmewechsellagerung genommen und erneut unter Wasser geprüft wurden. Das Ergebnis zeigte auf, dass die im Plasma-Versiegelungsverfahren gefügten Bauteile deutlich bessere Dichtigkeitswerte als die Vergleichsmethoden erzielten (Bild 9).

Maschinelle Umsetzung

Die maschinelle Umsetzung der Plasma-SealTight-Technologie erfolgte mit der Entwicklung der schlüsselfertigen, vollautomatischen Plasmazelle PTU1212 (Bild 10). Die Zelle kann an jede handelsübliche Spritzgussmaschine angepasst werden. Mit ihr wird nicht nur ein schneller, sondern auch kontinuierlicher Fertigungsprozess für die Serienproduktion von Kunststoff-Metall-Bauteilen möglich. Die Zelle beinhaltet vom Generator und Roboter, der Steuerungstechnik, einer Plasma-Kontrolleinheit (PCU/Plasma Control Unit) und den Plasmajets bis hin zu Kabeln und Verbrauchsmaterial alles, was der Vorbehandlungsprozess verlangt. Das Plasma-System selbst besteht aus zwei getrennten Plasmadüsen. Ein Roboter – oder bei zwei kleineren Varianten ein XY-Achssystem – führt den Metalleinleger zunächst unter eine Openair-Plasmadüse, wo seine Oberfläche auf molekularer Ebene von jeglichen Kontaminationen gereinigt und damit seine ursprüngliche Fähigkeit für eine gute Benetzbarkeit wiederhergestellt wird. Im direkten Anschluss erfolgt die funktionale Beschichtung aus der zweiten Plasmadüse.

Fazit

Mit dem neuen Plasma-Versiegelungsprozess wurde eine zukunftsweisende Lösung zur Verbesserung von Kunststoff-Metall-Verbunden in der Spritzgussindustrie geschaf-



Bild 10: Die schlüsselfertige, vollautomatische Plasmazelle PTU1212 beinhaltet alles, was der Plasmaprozess verlangt und kann an jede handelsübliche Spritzgussmaschine angeschlossen werden (Bild: Plasmatrete GmbH)

fen. Die Systempartnerschaft der beiden Spezialisten bietet Anwendern ein besonders hohes Maß an Sicherheit bei der Erfüllung individueller Kundenanforderungen. Eine höhere Produktqualität kann laut Angaben der Hersteller durch das neue Verfahren ebenso gewährleistet werden, wie ein sicherer, reproduzierbarer und wirtschaftlich effizienter Produktionsprozess – und dies bei völliger Verträglichkeit mit der Umwelt. Das Plasma-SealTight-Verfahren bietet in Summe eine Reihe von Vorteilen:

- Kostenreduzierung auf Basis einer global einsetzbaren Industrielösung durch den Inline-Einsatz in der Spritzguss-Fertigungslinie (keine externen Transportwege).
- Prozesssicheres, reproduzierbares Verfahren mit hohem Entwicklungspotenzial (neue Materialkombinationen) und der ortsselektiven Vorbehandlung bei sehr hohen Geschwindigkeiten.
- Erhöhung der Bauteil-Qualität durch deutliche Verbesserung der Verbundhaftung, durch Korrosionsschutz des Metalleinlegers, Mediendichtigkeit im Grenzflächenbereich und konstante Produktqualität durch hohe Präzision und Reproduzierbarkeit des Compoundierprozesses.
- Umweltschutz/Nachhaltigkeit durch die komplette Eliminierung von Lösungsmitteln, Primern, Säuren, durch keinerlei VOC-bedingte Emissionen, den sehr geringen Einsatz von Chemikalien (Präkursor), hohe Energieeffizienz durch geringen Energieverbrauch der Plasmaanlage sowie den Entfall von Transportwegen und Trocknungsprozessen der Halbfertigteile.

In Alternativen denken und die richtige Technik einsetzen

Prototypen und Kleinmengen optimal fertigen

Die Ansprüche der Anwender, die Anforderungen an Dichtungen sowie an Profile und Formteile mit Dichtungsfunktion steigen ständig. Unabhängig vom Werkstoff und der Qualitätskonstanz dieser Bauteile, sind natürlich auch Lieferzeit und der Preis entscheidende Kriterien bei der Teilebeschaffung. Und hier kommt immer mehr die Wahl der richtigen Produktionstechnik ins Spiel.

Ganz gleich, ob ein Anwender Prototypen für Versuche, Ersatzteile, Kleinmengen oder Großserien benötigt, die Wahl der richtigen Produktionstechnik spielt bei Dichtungen, Formteilen und Profilen eine größere Rolle – sowohl für die Qualität wie auch die Wirtschaftlichkeit. Damit sind umfangreiche Kenntnisse der Vorteile und Grenzen verschiedener Verarbeitungstechniken nötig und für Anwender ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl der Lösungspartner. Dabei geht es aber nicht nur um Kenntnisse, die Fertigungsverfahren müssen auch direkt oder im Netzwerk angeboten werden können. Sind hier die Grenzen vorgegeben, wird sich das immer auf die Lösung auswirken.

Heute wird eine Vielzahl von Fertigungsverfahren für Dichtungen, Formteile und Profile eingesetzt, die alle ihre Vorteile und Grenzen haben. Nachfolgend liegt der Fokus – begrenzt auf Polymerprodukte – auf einem Vergleich der Wasserstrahlschneidtechnik mit 3D-Schwenkkopf, mit dem 3D-Druck (Additive Fertigung) und dem Compression Moulding-Verfahren. Verschiedene Beispiele aus der Praxis zeigen dann, warum verschiedene Verfahren genutzt werden – doch zunächst zu den derzeit interessantesten Fertigungsverfahren.

Wasserstrahlschneiden mit 3D-Kopf

Diese Technik hat sich in den letzten Jahren in der Dichtungstechnik immer mehr etabliert (**Bild 1**) – nicht zuletzt aufgrund ihrer Entwicklung. Mithilfe einer Hochdruckpumpe wird hier ein Wasserstrahl von 500 bis zu 2.000 bar Druck erzeugt. Dieser Strahl wird durch eine sehr feine Düse gepresst und trifft dann auf das Schneidgut. Ein Kopf oder mehrere Köpfe bewegen sich CNC-gesteuert über den Schneidtsch.



Bild 1: Die Wasserstrahlsteuertechnik bietet sich heute für die Fertigung vieler Dichtungs- und Formteillösungen an

(Bild: BergerS2B GmbH)

Damit werden – auf Basis der in das System geladenen Zeichungsdaten – qualitativ hochwertige 2D- und 3D-Bauteile erstellt. Bei sehr harten Polymeren (Duroplaste etc.) wird dem Wasser sehr feiner Sand beigegeben, der dadurch eine höhere Abrasion ermöglicht. In der Praxis bewährt sich diese Technik aufgrund verschiedener Vorteile:

- Hohe Wirtschaftlichkeit aufgrund optimaler Ausnutzung des Materials, verschiedener Möglichkeiten zur Senkung der Betriebskosten und der Tatsache, dass i.d.R. teure Werkzeuginvestitionen entfallen.
- Schnelle Produktion, da auf der Grundlage einer dxf.-Datei die Produktion

schnell eingeplant und realisiert werden kann. Die Teile lassen sich zumeist mit recht hoher Schnittgeschwindigkeit und Präzision schneiden (Fahrgeschwindigkeit bis zu 20-40m/min.) Eine hohe Schneidgeschwindigkeit reduziert aber teilweise die Genauigkeit und die Qualität des Schnittbildes. Das sollte berücksichtigt werden.

- Hohe Bauteilqualität, da es keine Temperaturbelastung des Schneidgutes, wie z.B. beim Laser, gibt. Weitere Aspekte sind eine hohe Schneidepräzision bis 0,01 mm und ein deformationsfreies Schneiden dicker Werkstoffe.
- Flexible Produktion für die unterschiedlichsten Werkstoffe – die Technik erlaubt eine mehrlagige Produktion, z.B. 0,5 mm fünfseitig, und ist u.a. für die unterschiedlichsten Polymere aller Art mit max. Schneiddicke von 150 mm geeignet. Allerdings ist zu beachten, dass die Dicken und Toleranzen meist abhängig von den Halbzeugdimensionen sind. Ein 3D-Schnitt ist derzeit bis 68° möglich.

Die Grenzen dieser Technologie für den jeweiligen Anwendungsfall liegen in den vergleichsweise hohen Anschaffungs- und Betriebskosten einer Anlage, auch wenn letztere durch neue Module in den letzten Jahren gesenkt werden konnten. Auch ist das geschnittene Gut meist feucht und die Technik hat bei hohen Stückzahlen ihre wirtschaftlichen Grenzen.

3D-Druck/Additive Fertigung

Der 3D-Druck – seit mehr als 30 Jahren bekannt – erlebt aktuell einen Hype und bietet viele interessante Perspektiven. Allerdings erfordert gerade diese Technologie ein anderes Denken – von der Entwicklung/Konstruktion bis zur Fertigung. Mithilfe der additiven Fertigung und einer hochpräzisen Dosiertechnik (**Bild 2**) erfolgt ein schichtweiser Aufbau der Teile, die dann nach definierten Verfahren aushärten. In Abhängigkeit von der Komplexität und der Gesamtmasse der Teile dauert der Produktionsprozess lange. Da es zahlreiche Verfahren gibt, sind auch die Vor- und Nachteile der Verfahren unterschiedlich. Vorteilhaft ist:

- Kostenpotenzial – wie beim Wasserstrahlschneiden entfallen die Werkzeuginvestitionen. Darüber hinaus lässt sich durch die schnelle Fertigung bis zur Losgröße 1 die sonst übliche Vorratslagerung deutlich minimieren.
- Benötigte Toleranzen lassen sich mit der jeweils verwendeten Dosiertechnik gut realisieren.
- Individualisierte Produkte – wie keine andere Technik erlaubt der 3D-Druck ein hohes Maß an Designfreiheit und Variantenvielfalt. Dabei lassen sich Dichtungen und Formteile mit Konturen wie zum Beispiel Hinterschnitte fertigen, die bisher fertigungstechnisch nicht realisierbar waren.
- In vielen Fällen führt die 3D-Fertigung zu einer Gewichtsreduktion.
- Verkürzte Time-to-Market, da schnell Prototypen zur Verfügung stehen und die Bauteile in überschaubaren Mengen schnell produziert werden können.
- Hohe Anforderungen beim Datenschutz lassen sich mit hauseigenen 3D-Druckern realisieren.

Die Nachteile sind, dass das Materialspektrum eingeschränkt ist, wobei permanent neue Werkstoffe und Anwendungen auf den Markt kommen. Auch führen die hohen Maschinen- und Verbrauchskosten (Energie) und die geringe Produktionsgeschwindigkeit auf den ersten Blick dazu, dass 3D-gedruckte Teile vordergründig sehr teuer sind. Hier muss z.B. erwähnt werden, dass der Postprocess eine wichtige Rolle in der Gesamtbetrachtung spielt, da die Teile nach dem Druck noch aufwändig nachgearbeitet werden müssen.



Bild 2: 3D-Druck, derzeit der große Hype, lässt sich allerdings nur für ein eingeschränktes Materialspektrum verwenden (Bild: German RepRap GmbH)



Bild 3: Compression Moulding erlaubt den einfachen Übergang vom Prototyping in die Großserie (Bild: BergerS2B GmbH)

Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass erst eine Vollkostenrechnung eine wirkliche Beurteilung der Wirtschaftlichkeit erlaubt.

Compression Moulding-Verfahren

Bei diesem Verfahren (**Bild 3**) wird in ein geöffnetes Werkzeug eine Mischungsmasse eingegeben, das Werkzeug schließt und in einer definierten Zeit wird mit definiertem Druck und definierter Temperatur der Vulkanisationsprozess, die Vernetzung der Mischung abgeschlossen. Die Teile werden danach dem Werkzeug entnommen. Dieses – an sich einfache – Verfahren eignet sich für viele Werkstoffe und bietet eine große Flexibilität bei Werkstoff- und Werkzeugwechseln. Dabei ist nicht zu unterschätzen, dass seriengleiche Werkstoffe beim Prototyping genutzt werden können. Weitere Vorteile sind die

geringen Kosten durch Maschinen und die notwendigen Werkzeuge sowie geringen Fixkosten.

Nachteilig ist, dass die Rohlinge aufwändig gerichtet werden müssen und dass das Verfahren viel manuelles Handling und aufwändige Nacharbeit mit sich bringt. Bei dickwandigen Bauteilen muss bei niedriger Temperatur vulkanisiert werden, damit der Rohling an allen Stellen gleichmäßig durchvulkanisiert. Zudem ist es erforderlich, ein Werkzeug zu erstellen. Dies bedingt zusätzliche Lieferzeiten und Kosten.

Praxisbeispiele

Die nachfolgenden Beispiele zeigen auf, welche Lösungen anhand der Pros und Contras der einzelnen Verfahren in der Praxis gewählt wurden. Dabei wird auch deutlich, wie sich die grundsätzlichen Vor- und Nachteile der Verfahren in der Praxis auswirken.

Optische Sichtteile in geringer Stückzahl

Bei diesem Projekt benötigte ein Kunde für Sondereinbauten zwanzig Sichtteile mit homogener, glatter Oberfläche, die hohen Temperaturen von ca. 190 °C standhalten

und hoch komprimierbar sind. Da es sich um einen Exportauftrag handelte, der vor der Auslieferung stand, war eine kurze Lieferzeit unabdingbar. Zudem waren enge Toleranzen definiert.

Bei der Werkstoffauswahl war aufgrund der hohen Temperatur und der hohen Komprimierbarkeit Silikonschaum die erste Wahl.

Bei der Wahl der Verfahren fiel das Moulding aus, da eine Werkzeuglieferzeit von ca. 4 bis 6 Wochen zu lang war und die Menge für eine Rohstoffbeschaffung und einen optimierten Prozess zu gering war. Zudem werden Silikonschaumteile in einem anderen Produktionsverfahren hergestellt. Das additive Verfahren wäre werkstoffseitig nicht in Frage gekommen. Letztendlich entschied man sich für die 3D-Wasserstrahlproduktion. Die ausschlaggebenden Gründe hierfür waren:

- Die Kontur konnte mit der 3D Wasserstrahltechnik in den geforderten Toleranzen geschnitten werden.
- Das Silikonschaumhalbzeug war mit der benötigten glatten Oberflächenqualität standardmäßig vorrätig.
- Da bei dieser Technik keine Werkzeugkosten entstehen, erlaubte sie in diesem Fall auch sehr günstige Teilekosten.

Abdeckkappen für die Medizin

In einem anderen Projekt wurden kurzfristig zehn Abdeckkappen aus einem für den Medizinbereich freigegebenen Silikonwerkstoff benötigt – in der definierten Farbe, mit einer glatten Oberfläche und mit guter Haptik. Hier war der Werkstoff vorgegeben.

Bei den Verarbeitungstechniken schied zunächst die 3D-Wasserstrahltechnik aus, da die geforderte Werkstoffqualität nicht als Halbzeug zur Verfügung stand und auch die geforderte Teilekontur nicht zu realisieren war. Das Compression Moulding-Verfahren hätte Werkzeugkosten bedingt und war aufgrund der notwendigen Koordination mit einem Mischungslieferanten nicht unter zehn Wochen zu erhalten. Hier entschied man sich für die additive Fertigung per 3D-Druck. Entscheidende Vorteile waren hier die schnelle Verfügbarkeit (<1 Woche), die Eignung des Verfahrens für den freigegebenen Werkstoff in der gewünschten Farbe und die Erfüllung der haptischen Anforderungen. Diese überwogen die Nachteile der sehr hohen Teilekosten und der Mängel der Oberfläche. Sie wies Konturen auf und war nicht glatt. Auch die Materialeigenschaften, insbesondere die mechanischen Werte, sind noch verbesserungswürdig.

Ölpumpendichtungen für Tests

Ein Hersteller von Außenbordmotoren benötigte kurzfristig 50 Ölpumpendichtungen für Testfahrten. Es lagen genaue Anforderungen in Bezug auf die Temperaturbeständigkeit, das Quellverhalten in Öl, die Zugfestigkeit und die Rückfederung vor. Die Toleranzen waren eher unkritisch (ISO 3302 M3). Bei Erfolg sollte das Teil, ggf. mit leichten Modifikationen, in Großserie produziert werden.

Die Dichtung hätte zwar grundsätzlich als Wasserstrahlteil hergestellt werden können, da sowohl die Kontur dies ermöglichte als auch das geeignete Halbzeug aus NBR (dieselmotorenstoffbeständig und mit den Forderungen entsprechenden mechanischen Werten) vorhanden war. Da aber eine Großserie nach erfolgreichen Versuchen anstand, schied dieses Verfahren – auch aufgrund der anfallenden Materialreste – aus. Das 3D-Druckverfahren war aufgrund des fehlenden Rohstoffs keine Option. Deshalb wurde die Dichtung mittels Compression Moulding-Verfahren hergestellt. Letztendlich entscheidend waren hier der einfache Transfer in die Großserie, überschaubare Kosten und schnelle Verfügbarkeit. Für die Versuche wurde ein 1-Kavitäten-P20 Stahl-Werkzeug (ca. 200 €) erstellt. Das Serienwerkzeug mit neun Kavitäten kostete 900 €. Das ausgewählte Material wurde sowohl für die Versuche als auch für die spätere Großserie eingesetzt und die geforderten Muster waren kurzfristig (zwei Wochen mit Luftfracht) lieferbar.

Fazit

Diese Beispiele zeigen, dass sich theoretische Vor- und Nachteile der einzelnen Fertigungsverfahren im Projekt ganz unterschiedlich auswirken können und dass die optimale Lösung nicht immer direkt auf der Hand liegt. Entscheidend sind hier Partner, die über Fertigungs-Know-how bei vielen Verfahren verfügen und auf dieser Basis mit ihrer Expertise unterstützen können.

Neue Potenziale erschließen

Additive Fertigung von Bauteilen mit Dichtungsfunktion

Die additive Fertigung von Bauteilen aus zwei Komponenten wie etwa Hart-Weich-Kombinationen mit Dichtung wird für immer mehr Lösungen – weit über das Prototyping hinaus – interessant. Die Kombination aus moderner Maschinenteknik in Verbindung mit dem Verfahren des Kunststoff-Freiformens ist hierfür die Grundlage.

Systeme wie der Freeformer sind für die industrielle additive Fertigung von Funktionsbauteilen aus qualifizierten Originalmaterialien ausgelegt. Die Basis sind Kunststoffgranulate, wie sie auch beim Spritzgießen eingesetzt werden. Mit der Entwicklung des Kunststoff-Freiformens und den 2015 weltweit in den Markt eingeführten Systemen wurden neue Potenziale der industriellen additiven Fertigung aus der Sicht eines Maschinenbau-Unternehmens erschlossen. Das hierfür eigens entwickelte Kunststoff-Freiform-Verfahren (AKF-Verfahren) arbeitet werkzeuglos auf Basis von 3D-CAD-Daten und qualifizierten Kunststoffgranulaten. Damit ist ein Produktstart innerhalb weniger Minuten möglich, um etwa schnell und ganz nach Bedarf Einzelteile oder Kleinserien zu produzieren. Eine kontinuierlich erweiterte Materialdatenbank stellt Anwendern eine wachsende Arbeitsbasis zur Verfügung.

Offenes System für die additive Fertigung

Ein großer Vorteil des AKF-Verfahrens ist, dass sich der Prozess an die Anforderungen anpassen lässt. Das Fertigungssystem ist vor allem für diejenigen interessant, die

- auf Originalmaterialien und Werkstoffvielfalt setzen,
- mit einem offenen System arbeiten wollen und
- dabei ihr Know-how in der Kunststoffverarbeitung einbringen.

Sie können dazu ihre eigenen Werkstoffe qualifizieren und die frei programmierbaren Prozessparameter gezielt optimieren. Das System ist aber nicht nur im Prototyping einsetzbar, sondern vor allem für die additive Fertigung „echter“ Funktionsbauteile. Für die industrielle Anwendung sind z.B. individuelle Kunststoffteile für Konsumgüter, medizinische Einzelteile (Implantate) sowie funktionale Ersatzteile prädestiniert.

Darüber hinaus kann das System schnell und flexibel Betriebsmittel wie etwa individuelle Montagevorrichtungen und Greifer für die Automation fertigen.

Das Verfahren

Der Freeformer bereitet die Materialien – ähnlich wie beim Spritzgießen – über eine spezielle Plastifizierschnecke auf. Nach dem Aufschmelzen folgt das werkzeuglose Freiformen: Zwei Austrageinheiten mit hochfrequent getaktetem Düsenverschluss tragen kleinste Kunststofftropfen aus, die auf einem beweglichen Bauteilträger exakt positioniert werden. So lassen sich dreidimensionale Kunststoffteile Schicht für Schicht aufbauen. Der Bauraum des Systems bietet Platz für Teile, die bis zu 154 x 134 x 230 mm groß sind. Die zweite Austrageinheit kann dabei für eine zusätzliche Komponente genutzt werden, um z.B. ein Bauteil in verschiedenen Farben, mit spezieller Haptik oder als Hart-Weich-Verbindung zu erzeugen oder um mithilfe von Stützstrukturen komplexe Geometrien zu realisieren. Im Vergleich zum Spritzgießen lassen sich mit diesem Verfahren materialabhängig Bauteildichten bis zu 95% und Zugfestigkeiten bis zu 97% erreichen. Bei Versuchen zur Festigkeit von Zugstäben aus PC (Makrolon 2805) entsprach die Streckspannung in x/y-Richtung zu 100% der von Spritzgießteilen. In z-Richtung wurde mit 83% ebenfalls ein sehr guter Wert erreicht.

Einfach zum fertigen Bauteil

Die schichtweise Geometriezerlegung (Slicing) und die automatische Aufbereitung der 3D-CAD-Daten erfolgen nach qualitäts- und materialabhängigen Kriterien zu einem anlagenspezifischen NC-Programm. Hier fließen Aspekte wie Kanten-, Füll-, Festigkeitsstrategie und Bauraumtemperatur ein. Ergebnis sind voroptimierte Prozessdaten für die einzelnen Materialtypen, die aber auch individuell eingegeben oder verändert werden können und sich gezielt auf die jeweilige Anwendung optimieren lassen. Das ist ein weiterer Vorteil gegenüber anderen 3D-Systemen.

Auch die intuitiv bedienbare Steuerung ist eine Eigenentwicklung. Das Bedienpanel besteht aus einem Industrie-PC mit Multi-Touchscreen. Die für den schichtweisen Aufbau der Teile notwendigen Parameter generiert die ebenfalls selbst entwickelte Software. Zu den Features zählen die „intelligente“ automatische Generierung einer dem Bauteil angepassten Stützstruktur, eine adaptierte Füllgeschwindigkeit und eine druckregulierte Strategie für eine bessere Haftung der ersten Schicht auf der Grundplatte. Hinzu kommen eine komfortablere Bedienoberfläche der Steuerung und neue bzw. überarbeitete Materialprofile. Die Verbesserungen führen zu einer hohen Prozessstabilität und Teilequalität.

Materialqualifizierung

Um zu prüfen, ob und wie sich ein neues Material verarbeiten lässt, werden zunächst in einem standardisierten Qualifikationsprozess die korrekten Verarbeitungsparameter ermittelt. Im Prototyping-Center (**Bild 1**) produzieren sieben Anlagen Benchmark-Bauteile für potenzielle Kunden. Damit können die Technologieberater schnell auf Anfragen reagieren.



Bild 1: Herstellung von Benchmark-Bauteilen im Prototyping-Center (Bild: ARBURG GmbH + Co KG)

Das kontinuierlich erweiterte Spektrum qualifizierter Materialien wird in einer Datenbank dokumentiert. Diese umfasst neben amorphen Standardgranulaten wie ABS, PA und PC z. B. auch elastisches TPE, medizinisches PLLA, PMMA (z. B. Plexiglas 7N) sowie SEBS (z. B. Cawiton PR13576). Das heißt, für anspruchsvolle Anwendungen etwa in der Medizintechnik oder Luftfahrt kann ebenfalls auf vorhandenes, zertifiziertes Originalmaterial zurückgegriffen werden. Ein wichtiger Fortschritt ist mit der Erweiterung des Materialspektrums um teilkristallines PP gelungen.



Bild 2: Ein interessanter Anwendungsbereich sind Funktionsbauteile für Betriebsmittel und Automation, darunter z.B. Greiferfinger aus PA und TPE (Bild: ARBURG GmbH + Co KG)

Breites Einsatzspektrum

Hinsichtlich Branchen und Einsatzbereichen sind dem System kaum Grenzen gesetzt – weder bei der Herstellung von Hart-Weich-Verbindungen noch in anderen High-End-Sektoren. Durch die Veränderung des Formfaktors – also dem Verhältnis von Breite zu Höhe der ausgetragenen Tropfen – kann die Dichte und somit Weichheit des TPE-Materials zusätzlich gezielt beeinflusst werden. Aktuelle Bauteil-Beispiele sind:

- Dichtplatte aus ABS und TPU, die als Gehäuseabdeckung mit integrierter Dichtung in einem Arbeitsgang entsteht.
- Rutschsicherer Greiferfinger aus der Materialkombination PA10/TPE (Grilamid BTR 600/Desmoflex 9880) (**Bild 2**).



Bild 3: Ein Beispiel für additiv gefertigte Zwei-Komponenten-Funktionsbauteile – ganz ohne Montage – sind Planetenrollen aus TPU und PHA (Arboblend).

(Bild: ARBURG GmbH + Co KG)



Bild 4: Das AKF-Verfahren eignet sich für TPE-Werkstoffe verschiedenster Härten Shore A. Der Freeformer fertigt daraus additiv z.B. funktionsfähige, luftdichte Faltenbälge.

(Bild: ARBURG GmbH + Co KG)

- Ein runder Greifer mit vier Dichtlippen aus ABS und TPE (80 Shore). Er kann an einem End-of-Arm-Tool (EOAT) zur Teileaufnahme, etwa aus einem Spritzgießwerkzeug, eingesetzt werden.
- Planetenrollen (**Bild 3**) aus der Kombination des Biopolymers PHA mit TPU. Das Biopolymer Arboblend ist nach ISO 14850 biologisch abbaubar. Die beweglichen Teile sind ohne weiteren Montageaufwand direkt voll funktionsfähig.
- Bauteile, die an die Qualität von Spritzteilen heranreichen, sind beispielhaft Faltenbälge, die aus TPU gefertigt werden. Die Bälge sind flexibel und trotz schichtweisem Aufbau besonders reißfest und dicht (**Bild 4**).
- Implantate wie Schädel-, Wangen- oder Fingerknochen aus medizinischem PLLA (z.B. Purasorb PL18), das sich nach vorgegebener Zeit im Körper auflöst, sowie Sägeschablonen aus PA, die als individualisierte Operationshilfen zum Einsatz kommen.
- Eine über Gelenke bewegliche Seilrolle samt Gehäuse und Befestigungshaken aus chemisch widerstandsfähigem Bio-Polyamid (Grilamid BTR 600), die bis 100 kg belastbar ist (**Bild 5**).
- Mit funktionalen Materialien lassen sich gezielt zusätzliche Eigenschaften in Bauteile integrieren. Bei den „Light-Sticks“ wurden elektrisch leitfähige Carbon-Nanotubes (CNTs) in den Kunststoff PC/ABS eincompoundiert, sodass die eingelegte LED bei Zufuhr von Strom aufleuchtet.

Funktionsintegration und bionische Optimierung

Interessant ist auch das Thema Gewichtsreduktion und Leichtbau. So können bionisch optimierte Bauteile konstruiert und hergestellt werden, ohne fertigungstechnische Zwänge, wie sie beim Spritzgießen gegeben sind, berücksichtigen zu müssen. Ein weiterer Vorteil neben der Teileherstellung aus zwei Komponenten ist auch die Möglichkeit zur Funktionsintegration, indem die additive Produktionstechnik Teilefertigung und Montage in nur einem Arbeitsgang kombiniert.



Bild 5: Komplett Bauteilgruppe im bereits montierten Zustand additiv gefertigt: Eine über Gelenke bewegliche Seilrolle aus Bio-Polyamid mit Gehäuse und Befestigungshaken ist mit 100 kg belastbar

(Bild: ARBURG GmbH + Co KG)

Ausblick

Die additive Verarbeitung von Originalmaterial erschließt neue Möglichkeiten in der Kunststoffverarbeitung und findet derzeit den Weg in die industrielle Anwendung. Der Freeformer und das AKF-Verfahren bieten dabei Designfreiheit und Flexibilität. Mit dem offenen System lassen sich funktionsfähige Kunststoffteile aus qualifizierten Standardgranulaten fertigen, eigene Materialien einsetzen und die Prozessparameter anpassen. Eine solche industrielle additive Fertigung kann den Weg zum Serienbauteil und damit zum Markt deutlich beschleunigen. Darüber hinaus kann das System, integriert in eine Projektanlage, auch Serienteile, die auf einer Spritzgießmaschine gefertigt wurden, automatisiert individualisieren. Durch diese selbst steuernde und selbst organisierende Individualisierung von Großserienprodukten im Sinne von Industrie 4.0 können Kunststoffteile veredelt, echter Mehrwert für den Kunden generiert und neue Geschäftsmodelle erschlossen werden.

Kompressible Dichtstoffe in Form gebracht

2K-Dosiersystem für anspruchsvolle automatisierte Anwendungen

Die Applikation von hochviskosen Dichtstoffen in der Luftfahrtindustrie stellt die Bestrebungen nach Automatisierung vor neue Herausforderungen. Um eine prozesssichere Produktion zu gewährleisten, bedarf es vieler Technologien. Eine Kombination mit dem entsprechenden Know-how der Prozessentwicklung eröffnet neue Möglichkeiten in der Versiegelung von Strukturbauteilen (Bild 1).

Bauteilversiegelung – ein notwendiges Übel

Bei der Herstellung von Flugzeugen und ihren einzelnen Strukturbauteilen – unabhängig von der Verwendung von Aluminium oder Faserverbundwerkstoffen – ist neben der Montage die Bauteilversiegelung einer der zeitintensivsten Arbeitsschritte. Hierbei gilt es, sämtliche Bauteilübergänge abzudichten, um ein Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern. Da diese durch Kondensation der Luftfeuchtigkeit an der durch den Flugbetrieb kalten Struktur zu jeder Zeit und in jedem Bereich entstehen kann, ist eine hohe Gründlichkeit notwendig. Weitere Gründe für die Bauteilabdichtung sind zudem die Versiegelung gegenüber dem Flugzeugäußeren und das lückenlose Verschließen der Tankbereiche im Inneren der Flügel. Hierfür gibt es eine Vielzahl verschiedener Anwendungsszenarien und die dazugehörigen Auftragsprofile und -bedingungen. So wird unterschieden zwischen:

- aerodynamischen Anwendungen im Außenbereich von Flugzeugrumpf sowie Flügelflächen,
- Versiegelungen von unzähligen verschiedenen Nietköpfen in hohen Stückzahlen in sämtlichen Bereichen der Struktur und
- diversen Nahtgeometrien am Übergang zwischen miteinander verbundenen Bauteilen.

In der heutigen Produktion von Flugzeugen werden diese Tätigkeiten, unabhängig vom Flugzeughersteller, zum größten Teil manuell durchgeführt. Die Resultate weisen

Von Dipl.-Ing. Urs Roemer¹, Gruppenleiter Adaptive Applikationssysteme; Dipl.-Ing. Jens Bölke², Director Key Market Composites | Wind | Aerospace

¹Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Stade | www.ifam.fraunhofer.de/stade

²DOPAG / Hilger & Kern Group | www.dopag.de

Bild 1: Prototypischer Dosier-Endeffektor innerhalb einer CFK-Flugzeugrumpfschale in der Überkopfanwendung

(Bild: Fraunhofer IFAM)



hierdurch eine zu erwartende große Streuung auf: Sie variieren in ihrer Güte sowie Schichtdicke, der aufgetragenen Menge und der Einhaltung der Positionsanforderungen.

Da diese Art von Dichtmasse in einem Flugzeug an sehr vielen Stellen und in einem nicht unbeträchtlichen Umfang verwendet wird, ergibt sich hieraus neben einem hohen Arbeitsanteil ein deutlicher Gewichtsanteil. Aus diesem Grund wurden die zur Verfügung stehenden Materialien in den vergangenen Jahren in ihren Eigenschaften immer weiter optimiert, um bestmögliche Resultate bei dem geringsten Gewicht zu erzielen. So konnte insbesondere mit eingebrachten mikroskopisch kleinen Polymerhohlkugeln die Dichte des Materials deutlich gesenkt werden. Die Verarbeitungseigenschaften der Dichtstoffe sind komplett auf eine manuelle Handhabung zugeschnitten und ermöglichen durch eine sehr hohe Viskosität auch die problemlose Verarbeitung in Überkopfbereichen. Um die Positionstreuung und diverse Nahtgeometrien heutzutage realisieren zu können, ist es bei der Verarbeitung oft notwendig, sehr viele Arbeitsschritte in der Vorbereitung durchzuführen. So gehört das Maskieren der Bauteile zur Regel, um einen ungewollten Kontakt von Dichtstoff und Bauteil beim Materialauftrag sowie der anschließenden Formgebung mithilfe eines Spatels zu verhindern (**Bild 2**). Nach erfolgter Formgebung gilt es, genau diese Maskierung wieder zu entfernen. So ergibt sich typischerweise durch die Maskier- und Demaskierarbeiten ein weitaus größerer Arbeitsanteil, als es der reine Dichtstoffauftrag vermuten lässt. Aus diesem Grund war es eine der Hauptbestrebungen bei der automatisierten Verarbeitung solcher Dichtstoffe neben einer prozessgesicherten Verarbeitung auch die Applikation so sicher zu beherrschen, dass auf die Bauteilmaskierung in Zukunft verzichtet werden kann.



Bild 2: Manuelle Dichtstoffverarbeitung mit Materialauftrag, Formgebung und Demaskierung

(Bild: Fraunhofer IFAM)

Mix-on-Demand als flexible Automatisierungslösung

Zielsetzung des Projekts war es, den heutigen Einsatz von Kartuschen, die sich von Hand oder mit einem Automat vormischen lassen, durch den Einsatz eines robotergeführten Dosier- und Mischwerkzeugs für eine Mix-on-Demand-Anwendung zu ersetzen. Der Materialauftrag sollte mit diesem Werkzeug ebenfalls, innerhalb der gesetzten Toleranzen, realisiert werden. Als Materialversorgung sollten Großgebinde die bisherigen Kleinkartuschen ersetzen.

Um ein solches System an einem Industrieroboter realisieren zu können, werden normalerweise lange Schlauchleitungen von einem Fassentnahmesystem bis zum Dosierkopf eingesetzt. Da die zu bearbeitenden Bauteile aus dem Luftfahrtbereich in ihren Dimensionen den Einsatz eines entsprechend großen Roboters benötigen, galt es, Schlauchlängen von minimal 10 m Länge einzuplanen. Hierbei stellten sich die Eigenschaften der einzelnen Dichtstoffkomponenten als ganz besondere Herausforderung dar. Die Härterkomponente ließ sich mit Standardsystemen problemlos fördern und transportieren. Bei der Grundmasse wurden hier jedoch schnell Grenzen erreicht. Durch die bereits erwähnten Polymerhohlkugeln war die Grundmasse bei ihrer Verarbeitung und Förderung überaus empfindlich gegenüber Drücken und Scherbeanspruchungen. Ein Überschreiten dieser geringen Grenzen führte zu einer unweigerlichen Zerstörung der Füllkörper und hiermit zu einem deutlichen Anstieg der Materialdichte. Die Veränderung ließ sich äußerlich jedoch nicht erkennen und hätte eine unwissentliche Weiterverarbeitung eines zerstörten Materials bedeutet. Hinzu kam eine ungewöhnlich hohe Viskosität der Grundmasse von bis zu 1.700 Pa·s, die bei einem Transport des Materials durch einen Schlauch aufgrund der Rohrreibung ebenfalls zu erheblichen Drücken führte. Wegen dieser Einschränkungen durch die Materialeigenschaften galt es, einen neuartigen Ansatz zur Materialversorgung zu entwickeln.

Bei der Verarbeitung des 2K-Materials ist die Einhaltung des Mischungsverhältnisses von besonderer Relevanz. Es kann gravimetrisch eingestellt werden oder aber über eine entsprechende volumetrische Dosierung. In einem Dosier- und Mischprozess, der

im laufenden Prozess durchgeführt werden muss, ist nur eine volumetrische Dosierung möglich. Aufgrund der sehr hohen Prozesssicherheit und hohen Genauigkeit wurden hierfür zwei, in ihrer Größe dem Mischungsverhältnis angepasste Kolbendosierer ausgewählt. Um im nächsten Schritt bei Durchführung des Dosiervorgangs die Dosiermenge entsprechend dem vorgegebenen volumetrischen Mischungsverhältnis anzupassen, stellte erneut die Beschaffenheit der

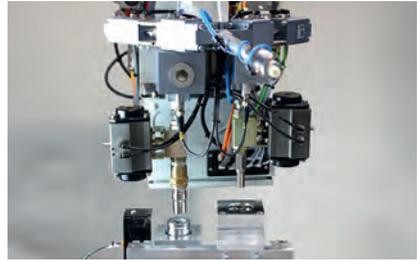


Bild 3: Prototyp des entwickelten Dosier-Endeffektors über der Materialnachfüllstation

(Bild: Fraunhofer IFAM)

Grundmasse eine besondere Herausforderung dar. Wie bereits erwähnt, sind die Füllstoffe in Form von kleinsten Polymerhohlkugeln unter Druck komprimierbar. Das führt letztendlich dazu, dass die Grundmasse als kompressibles Fluid zu behandeln ist. Sobald innerhalb des Dosierkolbens ein Druck aufgebaut wird, erfolgt eine Kompression der Grundmasse von ca. 25%. In diesem Zustand ist es nun notwendig, permanent im korrekten volumetrischen Mischungsverhältnis die beiden Materialien zueinander zu dosieren und in der intelligenten Steuerung die Kompression der Grundmasse für jeden möglichen Füllstand zu berücksichtigen. So ließ sich mit einem Zweikolbensystem die präzise Dosierung eines hochviskosen, kompressiblen Dichtstoffs erfolgreich erzielen.

Verzicht auf Versorgungsschläuche als Schlüssel zur freien Prozessgestaltung

Nachdem die komplexe Materialdosierung gelöst war, konnte als nächster Schritt die Materialversorgung ergänzt werden. Da im angestrebten Einsatzgebiet die möglichen Bauteile meist sehr große Dimensionen aufweisen, z.B. hat die Flügelschale eines Airbus A350XWB eine Länge von über 30 m, war eine der größten Herausforderungen, einerseits die Materialversorgung so flexibel wie möglich zu gestalten und andererseits materialschonend sowie chargenrein zu arbeiten. So wurde auf die Integration einer Schlauchversorgung über das Robotersystem verzichtet und stattdessen eine stationäre Nachfüllstation entwickelt. Hierbei wurden die Dosierkolben des Roboter-Endeffektors zugleich als Dosierpumpe und als Materialvorrat genutzt. Sobald die Einzelkomponenten verbraucht sind, kann das Dosierwerkzeug mithilfe des Roboters zur Nachfüllstation gebracht und dort über ein Kupplungssystem (**Bild 3**) mit der fasspumpenbasierten Materialversorgung verbunden werden. Exakt auf die jeweiligen Maximaldrücke abgestimmt, lassen sich die Kolbendosierer so wieder befüllen. Nach Abschluss dieses Vorgangs, der nur einige Sekunden in Anspruch nimmt,

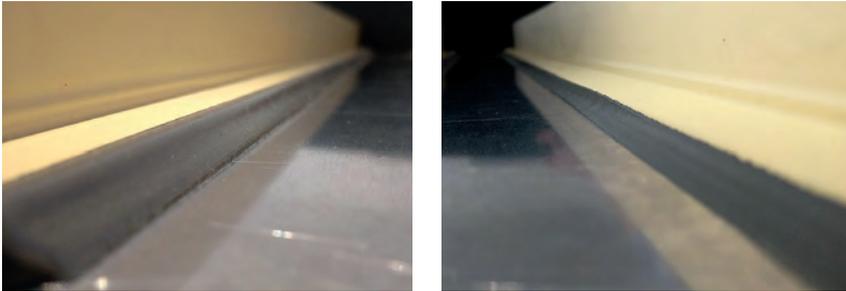


Bild 4: Direkt applizierte Nahtgeometrien an Versteifungsbauteil (Bild: Fraunhofer IFAM)

kann das neu befüllte Werkzeug wieder gelöst und der Abdichtvorgang nach Plan fortgesetzt werden.

Die Vermischung solcher Dichtstoffe erfolgt in den meisten Fällen über ein in Kartuschen integriertes Rührwerk und nimmt einige Minuten in Anspruch. Dies wird zum einen durch die bereits erwähnte hohe Viskosität verursacht und zum anderen durch die geringe Resistenz gegenüber Scherbelastungen. Zudem erfordert das sehr unterschiedliche Mischungsverhältnis der beiden Komponenten von 100:10 (gravimetrisch) einen besonders gründlichen Vermischungsprozess. Für ein Dosiersystem bieten sich hier statische Maschinenmischer an, die über eine Zwangsmischung auf definierter Strecke die Komponenten hinreichend vermengen. Da für ein solches Mischungsverhältnis ein Statikmischer entsprechend lang gestaltet sein muss, ergeben sich hieraus erschwerte Zugänglichkeiten des Roboterwerkzeugs und zusätzlich ein großes Materialvolumen innerhalb des Mixers. Bei einer kontinuierlichen Verarbeitung stellt dies keine große Herausforderung dar. Wenn jedoch die Dosierung nur in sehr kurzen Intervallen stattfindet, kommt es im Anschluss an den Dosiervorgang zu einer Druckentlastung innerhalb des Mixers. So entspannt sich die Grundmasse, welche den deutlich größeren Volumenanteil im Mixer darstellt, und sorgt so für eine Verschiebung des aktuellen Mischungsverhältnisses innerhalb der Mischstrecke. Bei einem erneuten Dosierstoß erfolgt eine erneute Komprimierung, verbunden mit einer Verzögerung des Dosieraustrags – so verschiebt sich das Mischungsverhältnis innerhalb des Systems immer weiter. Um diesen Effekt zu verhindern, wurde es angestrebt, den Druck innerhalb der Mischstrecke konstant zu halten.

Maskierungslose Applikation als Zusammenspiel vieler Variablen

Durch eine erfolgreiche Auslegung und Implementierung der Materialversorgung, der Materialbefüllstation sowie der Dosier- und Mischeinheit galt es, den eigentlichen

Auftrag des Dichtmaterials in einer automatisierten Anwendung zu realisieren. So ließen sich durch das exakte Zusammenspiel verschiedener Prozessparameter, wie Vordruck, Schließzeiten, Abstand und Geschwindigkeiten, unterschiedliche Applikationsprofile über ein anwendungsfallspezifisches Düsensetup umsetzen. Neben der präzisen, kontaktlosen Düsenführung über das Bauteil im Nahtbereich war es von besonderer Bedeutung, im Prozess gänzlich ohne den Einsatz von Maskierungen zu arbeiten. Auch die Nacharbeit und Formgebung wurde in das spezielle Düsendesign integriert (**Bild 4**). Durch die Verarbeitung des Dichtstoffs im Mix-on-Demand-Verfahren konnte das System mit konstanten Materialparametern arbeiten, ohne die Variablen des Dosierprozesses permanent an das Material anpassen zu müssen. Ebenfalls ließ sich der Effekt der Materialdekompression beim Düsenaustritt durch einen möglichst geringen Systemdruck soweit reduzieren, dass dieser Einfluss keine Auswirkungen auf das Applikationsbild zeigte.

Fazit

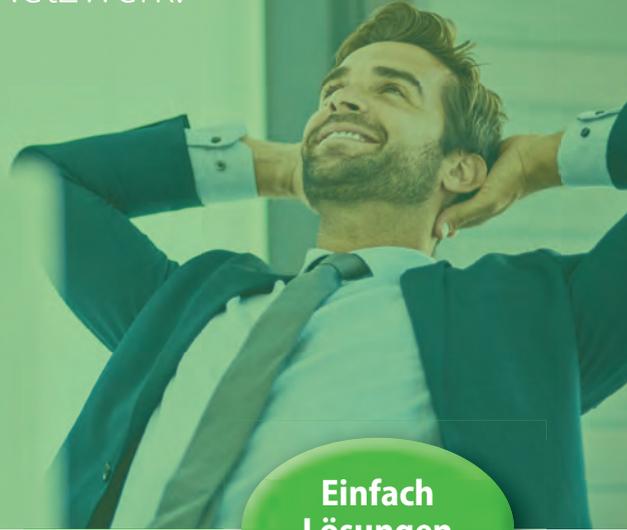
Für ein sehr anspruchsvolles Anwendungsszenario im Bereich Luft- und Raumfahrt wurde eine technisch weitgreifende Lösung erarbeitet, die zukünftig auch die Integration leichtbauoptimierter Kleb- und Dichtstoffe in vollautomatisierten Anwendungen in Branchen wie dem Nutzfahrzeugbau und dem Schienenfahrzeugbau ermöglicht. Dadurch, dass sie zudem eine sehr hohe Auftragsgüte und ressourcenschonende Verarbeitung gewährleistet, ermöglicht sie die signifikante Steigerung der Produktivität.

Die beschriebenen Ergebnisse sind Teil des Projekts ASAP (FKZ: 20W1311B), welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurde.

Raum für Ergebnisse

Recherche. Wissen. Netzwerk.

©iStock.com/PeopleImages



**Einfach
Lösungen
finden!**

Das Online-Portal für den Bereich Dichten. Kleben. Polymer., das Sie täglich effektiv unterstützt:

- täglich aktuelle Meldungen zu Entwicklungen, Produkten und Dienstleistungen, Werkstoffen, Unternehmen
- mehr als 15 Jahre Fachwissen
- alle DICHT!- und Jahrbuch-Beiträge direkt anfordern
- schneller, selektiver Zugang zu wichtigen Fachinformationen über die Suchmaschine
- direkter Kontakt zu Lösungspartnern
- Schadensanalysen, Checklisten, Preisindex, Marktstudien, Dossiers, Umfrageergebnisse, Statements, Werkstoffkompass u.v.m.

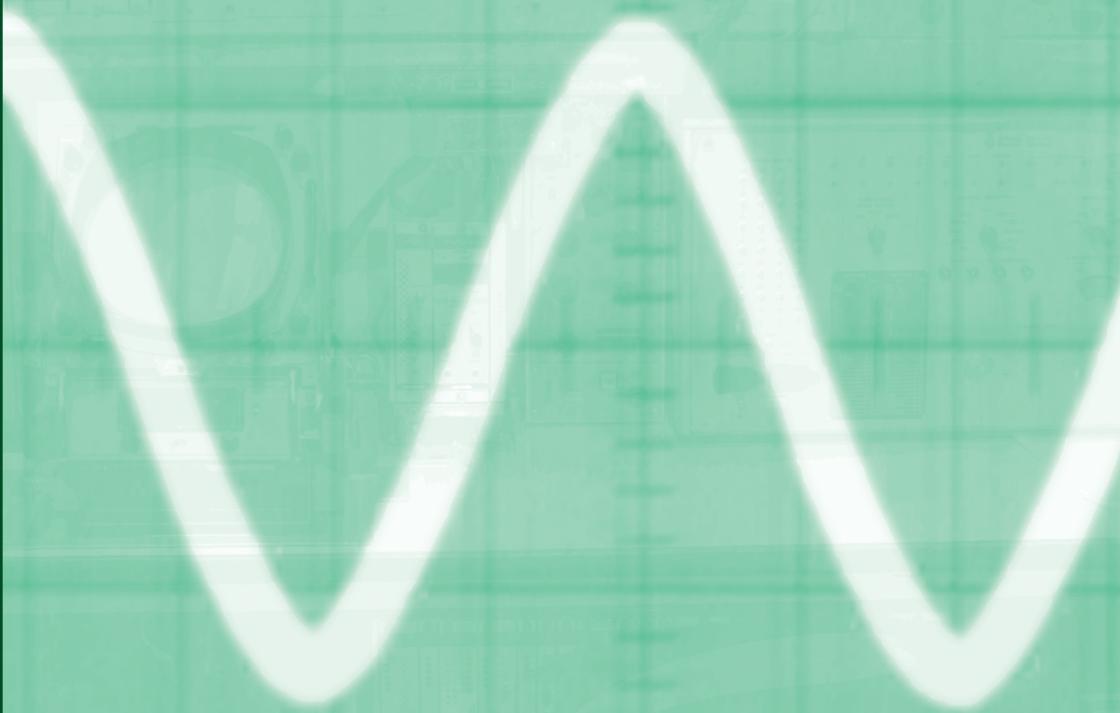
www.isgatec.com > Netzwerk

Was vermissen Sie?

Impulse an: skiefer@isgatec.com

ISGATEC®
NETZWERK

Mess- und Prüftechnik



Beschichtungsanlagen auf Dichtheit prüfen

Tipps und Tricks

Nach der Installation einer neuen Anlage oder der Wartung an einer bestehenden treten nicht selten Leckagen auf. Ursache hierfür sind oft Fügefehler oder vergessene bzw. defekte Dichtungen. Um diese Leckagen zu finden und Anlagen auf Dichtheit zu prüfen, ist der korrekte Umgang mit Helium-Lecksuchgeräten von entscheidender Bedeutung.

Je mehr über die der Dichtheitsprüfung zugrunde liegenden physikalischen Phänomene sowie über die Optimierungsmöglichkeiten bei der Durchführung bekannt ist, umso einfacher ist der Einsatz von Helium-Lecksuchern in der Praxis und umso zuverlässiger sind die Messergebnisse. Der folgende Überblick gibt anhand von Anwendungsbeispielen praktische Hinweise zum richtigen Umgang mit Helium-Lecksuchern und zur erfolgreichen Durchführung von Dichtheitsprüfungen an Vakuumanlagen.

Was ist beim Anschließen des Lecksuchers an eine Beschichtungsanlage zu beachten?

Leckagen, die nach der Inbetriebnahme oder Wartung von Vakuumanlagen auftreten, sind oftmals sehr groß. Ab einer bestimmten Leckgröße können marktübliche Helium-Lecksucher jedoch nicht mehr verwendet werden. Ihr maximaler Arbeitsdruck liegt i.d.R. zwischen etwa 6 und 25 mbar. Liegen große Leckagen vor, kann dieser Druck unter Umständen beim Evakuieren nicht erreicht werden. **Bild 1** zeigt eine Si_3N_4 -Beschichtungsanlage. Nach einer Wartung wird beim Evakuieren lediglich ein Druck von 80 mbar erreicht. Statt der Drosselung eines Vakuumlecksuchers kann beim Lecksuchgerät ASM 340 ein qualitativer Massiv-Lecksuchmodus eingesetzt werden, mit dessen Hilfe das vorliegende Leck lokalisiert werden kann.

Prozesspumpe zur Unterstützung des Lecksuchers

Optimalerweise sollte der Lecksucher, wie in **Bild 1 und 2** gezeigt, in der Vorvakuumleitung einer Vakuumanlage angeschlossen werden. Um zu verhindern, dass die beim Abpumpen entstehende Kompressionswärme den für Einsätze in sauberen Umge-

Von Dr. Rudolf Konwitschny, Applikationsspezialist im Bereich Business Development Leak Detection Pfeiffer Vacuum GmbH | www.pfeiffer-vacuum.com

Bild 1: Einbindung des Helium-Lecksuchers in eine Beschichtungsanlage

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)

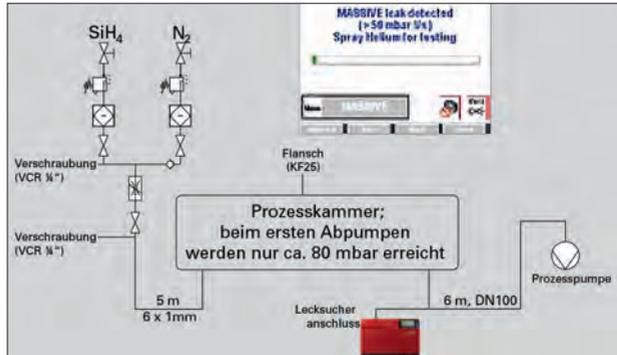
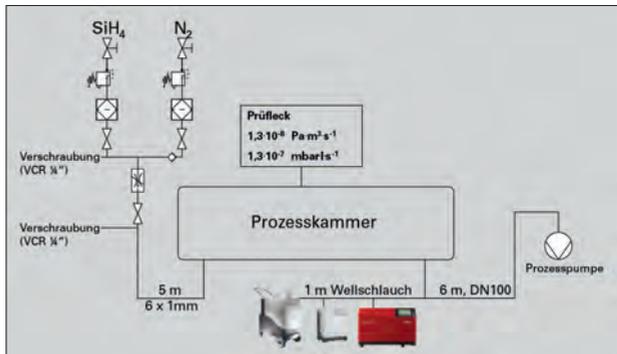


Bild 2: Einbindung verschiedener Lecksucher (ASM 390, ASM 310, ASM 340) in die Anlage

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)



bungen konzipierten Lecksucher thermisch stark belastet, kann außerdem eine zusätzliche Prozesspumpe eingesetzt werden. Diese ist gegen die thermische Belastung unempfindlich und pumpt zudem auch sämtliche Ausgasungen, Dämpfe und möglicherweise aufgewirbelte Partikel ab. Die Verwendung einer zusätzlichen Prozesspumpe kann so die Verfügbarkeit des Lecksuchers steigern und seine Wartungsintervalle signifikant verlängern. Daraus resultieren deutlich verringerte Betriebskosten.

Sobald der Druck ein entsprechend niedriges Niveau erreicht hat, kann der Lecksucher das Vakuum halten. Ab diesem Moment ist die Prozesspumpe obsolet und kann abgeschaltet werden – nun kommen 100% des Prüfgases beim Lecksucher an. Um die Ansprechzeit des Lecksuchers noch einmal deutlich zu verkürzen, kann zudem eine Turbopumpe zwischen Kammer und Lecksucher eingesetzt werden. Sie wirkt wie ein Booster und verkürzt die Ansprechzeit des Lecksuchers entsprechend ihres zusätzlichen Saugvermögens.

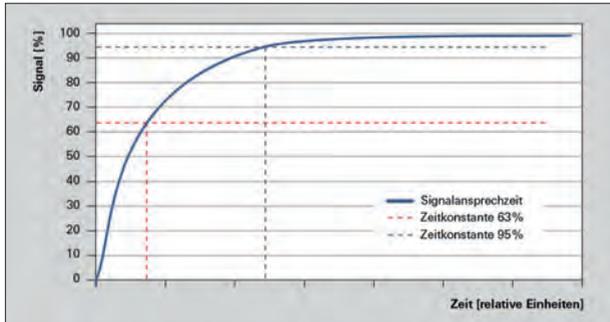


Bild 3: Signalverlauf am Lecksucher bei dauerhaftem Beaufschlagen des Lecks mit Helium (idealisiert)

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)

Ein auf die Prozesskammer geflanshtes Prüflack macht die Entwicklung des Leckratensignals über die Zeit nachvollziehbar. Außerdem kann so auch ermittelt werden, welche Anteile des aus dem Testleck austretenden Heliums von der Prozesspumpe evakuiert und welche vom Lecksucher nachgewiesen werden (Teilstromfaktor). Hierbei können unterschiedliche Strömungsverhältnisse aufgrund unterschiedlicher Drücke die Gasdynamik beeinflussen, was sich wiederum auf das Teilstromverhältnis auswirkt. Aus diesem Grund sollten die Messungen nahe dem Prüfdruck erfolgen. Den Teilstromfaktor lediglich abzuschätzen, reicht nicht aus, denn Prozesspumpe und Lecksucher haben in verschiedenen Druckbereichen unterschiedliche Saugvermögen und Kompressionsverhältnisse.

Zeitkonstante

Die Zeitkonstante eines Vakuumsystems wird wie folgt dargestellt:

τ = Zeitkonstante bis zum Erreichen von 63 % der maximalen Signalintensität [s]

S_{eff} = effektives Saugvermögen [l/s]

V = Volumen des Prüfobjekts [l]

Die Zeitkonstante eines Vakuumsystems ist zum einen vom Volumen der Anlage und zum anderen vom Heliumsugvermögen des Pumpsystems abhängig. In **Bild 3** wird der Zusammenhang für die Zeitkonstante gezeigt, der für die Zeit gilt, die gebraucht wird, um 63% der max. Signalintensität zu erreichen. Zudem sind Definitionen für Zeitskalen bei 3τ bei einer Signalthöhe von 95% oder 5τ bei einer Signalintensität von 99% verfügbar.

Gasversorgungssysteme

Setzt man das Prüflack in die Gasversorgungsleitung, verlängert sich die Ansprechzeit durch den Strömungswiderstand der engen Gasleitung und weiterer Installations-

Bild 4: Einbindung des Lecksuchers zur Prüfung von Gasversorgungssystemen

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)

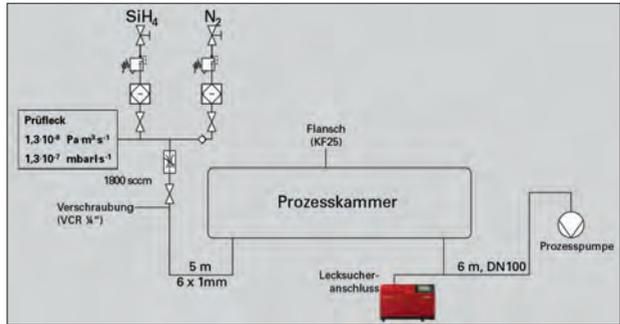
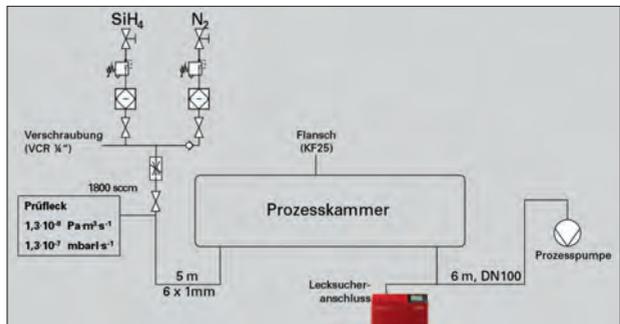


Bild 5: Aufbau eines Gasversorgungssystems ohne stark leitwertlimitierendes Bauteil

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)



elemente. Dies ist mithilfe des Lecksuchers messbar. In der in **Bild 4** gezeigten Beispielanlage war das Signal des Lecksuchers schwankend und uneinheitlich. Es wurde selbst nach langer Wartezeit nicht stabil. Ursache dafür waren Regelungsschleifen des Massenflussreglers, die die Anlagensteuerung unabhängig von der Lecksuche regelte. Wie in **Bild 5** zu sehen ist, wurde das Prüfleck als Konsequenz noch einmal versetzt. So konnten der Einfluss des Massenflussreglers und der der Gasversorgungsleitung zwischen MFC und Anlage voneinander getrennt werden.

Leitwerte und Strömungswiderstände

Die Ansprechzeit des Lecksuchers konnte verkürzt und das Signal stabilisiert werden, nachdem ein stark leitwertlimitierendes Bauteil ausgebaut worden war. Der in der Gasleitung herrschende Strömungswiderstand führte dazu, dass es 4 min. dauerte, bis die vorher ohne Leitwertbegrenzungen gemessene Leckagerate reproduziert werden konnte. Bei einer quantitativen Messung wurden im Falle des versetzten Prüfleckes genau dieselben Signalintensitäten gemessen wie mit direkt an die Prozesskammer angeschlossenem Prüfleck (**Bild 5**).

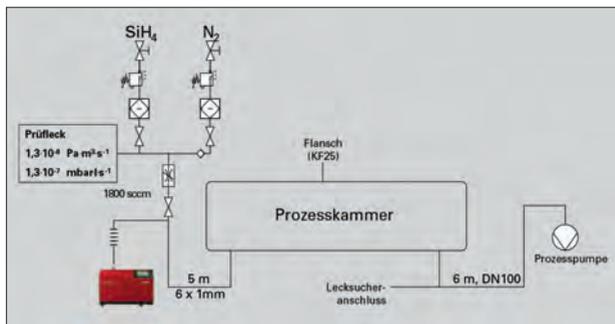


Bild 6: Integration des Lecksuchers in die Anlage zur Leckprüfung von Massenflussreglern

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)

Wichtige Aspekte bei der Leckprüfung von Massenflussreglern

Um den Massenflussregler separat prüfen zu können, wurde der Lecksucher direkt hinter dem MFC an die Gasversorgungsleitung angeschlossen. Dabei lagen die Ansprechzeiten < 1 s. Der Lecksucher profitierte hier von der Veränderung des Teilstromverhältnisses zwischen dem Lecksucher und der Prozesspumpe: Er konnte 100% des Gasstroms, der vom Prüfling abgegeben wurde, messen. Grund dafür war der hohe Strömungswiderstand der Gasversorgungsleitung, deren Innendurchmesser lediglich 4 mm betrug. Bei der Leitung zum Lecksucher handelte es sich im Vergleich dazu um eine DN 25-Leitung. Dieser Vorgang ist in **Bild 6** dargestellt.

Leitwerte von Reinstgasversorgungen darstellen

Die **Bilder 7 und 8** zeigen Leitwertsimulationen von Gasversorgungsleitungen in Abhängigkeit von der Leitungslänge mit für diese Leitungen typischen Abmessungen von 6 x 1 mm. Dabei beträgt der Außendurchmesser 6 mm und die Wandstärke 1 mm. Daraus resultiert entsprechend ein Innendurchmesser von 4 mm. Bei hohen Drücken liegt eine laminar-viskose Strömung vor. Dabei besteht ein linearer Zusammenhang des Strömungswiderstandes mit dem mittleren Druck der Rohrleitung. Bei Druckverhältnissen unter rund 0,1 mbar liegt molekulare Strömung vor. In diesem Bereich hängt der Strömungswiderstand nicht mehr von den herrschenden Druckverhältnissen ab, sondern lediglich von der Geometrie der Leitung. Übergangsströmung, auch Knudsen-Strömung genannt, liegt im Druckbereich zwischen rund 5 und 0,1 mbar vor. In diesem Bereich können auch gasspezifische Effekte auftreten. Im molekularen Strömungsbereich beträgt der Leitwert für Helium bei einer 20 m langen Leitung nur 0,001 l/s. Daraus resultiert eine deutliche Verzögerung der Ansprechzeit. Zudem kann das Signal zeitlich gedehnt werden. Wird das Leck nicht mindestens so lange mit Helium beaufschlagt wie die Zeitkonstante des Systems im geprüften Bereich, so gibt das Signal selbst in seiner maximalen Intensität eine deutlich kleinere Größe als die des wahren Lecks an.

Bild 7: Leitwert vs. Druck bei einem Leitungsdurchmesser von 0,4 cm und einer Leitungslänge von 700 cm

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)

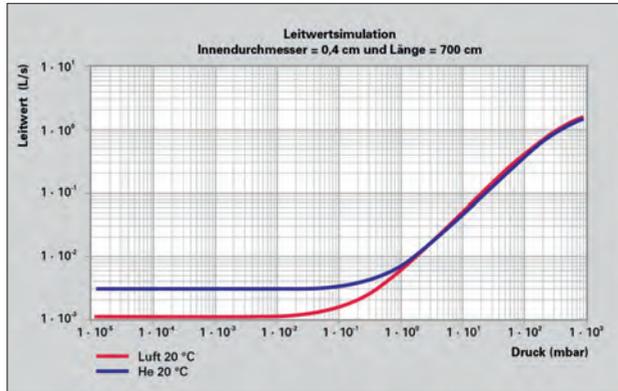
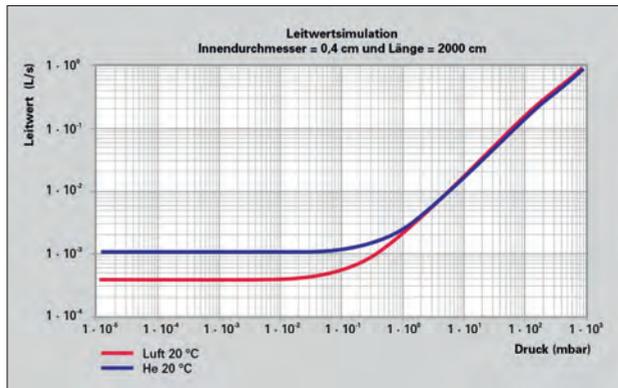


Bild 8: Leitwert vs. Druck bei einem Leitungsdurchmesser von 0,4 cm. Leitungslänge 2.000 cm

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)



Lecksuche an leitwertlimitierten Bauteilen mit und ohne Prüfgas

Die **Bilder 9 und 10** zeigen das zeitliche Verhalten bei einer Leckprüfung. In **Bild 9** stellt die blaue Kurve das Beispiel eines evakuierten Behälters mit einem Volumen von 1,5 l dar, an den nach dem Erreichen eines festgelegten Untergrundsignals ein Prüfleck mit Reservoir ($Q = 1 \cdot 10^{-7}$ mbar·l/s) angeflanscht und geöffnet wurde. Durch die plötzliche Freisetzung des Heliums, das sich zwischen dem Permeationselement des Prüflecks und dem Absperrventil angesammelt hat, kommt es zu einem kurzen Überspringen. Anschließend stabilisiert sich die Anzeige des nominellen Prüfleckwertes jedoch schnell. Nach dem Verschließen des Prüflecks klingt das Signal ebenfalls rasch ab.

Das Ansprechverhalten eines Prüflecks ($Q = 5 \cdot 10^{-6}$ mbar·l/s) am identischen Behälter wird mithilfe der grünen Kurve in **Bild 9** dargestellt. Der Lecksucher ist in diesem Bei-

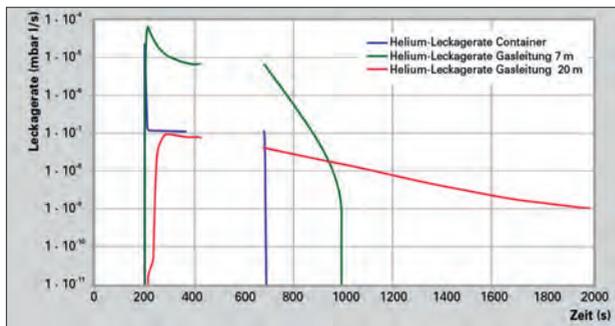


Bild 9: 1,5-l-Behälter und Gasleitung ohne Trägergas

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)

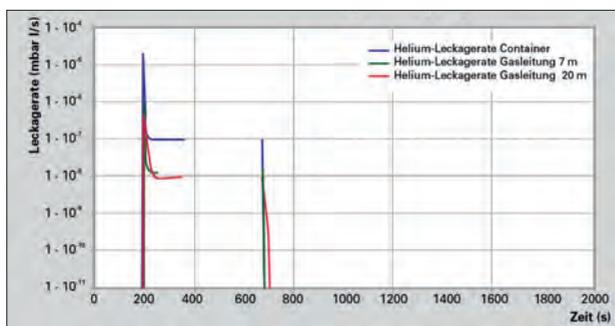


Bild 10: Behälter und Gasleitung mit Trägergas N_2 , Reinheit 5.0

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)

spiel durch eine 7 m lange Gasversorgungsleitung (6 x 1 mm) mit dem Behälter verbunden. Dies führt zu einer signifikanten Verlängerung von Einschwingverhalten und Abklingzeit. Mit der roten Kurve ist das Ansprechverhalten mit einer Gasversorgungsleitung von 20 m dargestellt. Hier wird beim selben Prüfaufbau auch nach > 30 min. Abpumpzeit das Helium nicht komplett evakuiert. Somit wird auch der nominelle Wert des Prüflecks nicht erreicht. Das Beispiel in **Bild 10** zeigt das Verhalten in einem identischen Experimentaufbau, wenn die Leitungen nicht evakuiert werden, sondern das beinahe heliumfreie Gas Stickstoff 5.0 strömt. Am Lecksucher soll hier der empfindlichste Messbereich bei gleichzeitig maximalem Prüfdruck erreicht werden. Dabei soll maximale Empfindlichkeit mit möglichst günstiger Strömungsdynamik, also kürzest möglicher Ansprechzeit, kombiniert werden. Die Druckschwelle zum Erreichen des empfindlichsten Messbereichs ist gerätespezifisch und liegt beim verwendeten Lecksucher ASM 340 bei 0,5 mbar. Entsprechend wird der Gasdurchsatz gewählt – am Eintritt der Leitung liegt der Einlassdruck bei etwa 12 mbar. Wird Trägergas zur Lecksuche eingesetzt, sind die Ansprech- und Abklingzeiten sehr viel kürzer. Allerdings geht damit ein Intensitätsverlust um rund eine Dekade einher. Um die An-

Bild 11: Abschnüffeln der Gasversorgungsleitungen

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)

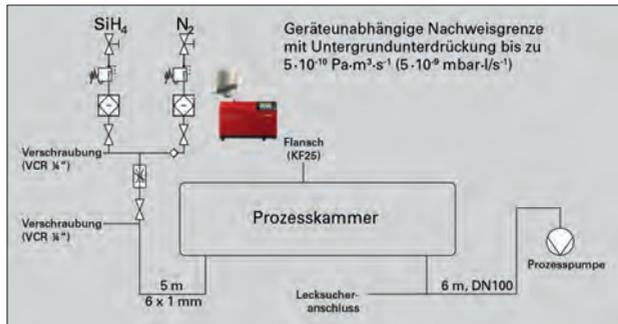
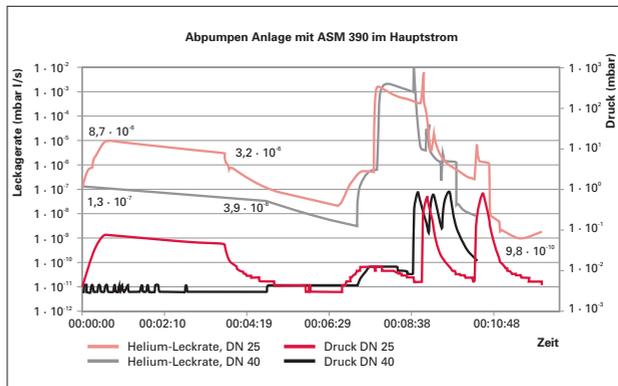


Bild 12: Signalerholungsverhalten des Lecksuchers im Hauptstrombetrieb

(Bild: Pfeiffer Vacuum GmbH)



sprechzeit und den Teilstromfaktor genau zu bestimmen, müssen solche Messungen mithilfe von Prüflecks kalibriert werden. Am besten geeignet hierfür sind Prüflecks ohne Reservoir oder eigens für den Einbau in Gasversorgungsleitungen konzipierte Prüflecks.

Durchführung von Schnüffellecksuche an Gasversorgungsleitungen

Eine der wichtigsten Anforderungen bei der Dichtheitsprüfung ist die Messung unter realen Bedingungen: Die Druckbelastung des Prüflings beim Test muss der bei einem wirklichen Einsatz entsprechen. Hier stehen die Gasleitungen unter Überdruck. Die Prüfung unter Vakuum ist das einzige Testverfahren, das die oft geforderte Empfindlichkeit für Reinstmedienversorgungen im Bereich von $1 \cdot 10^{-9}$ mbar-l/s bis $1 \cdot 10^{-10}$ mbar-l/s erreicht. Die der korrekten Druckrichtung entsprechende Schnüffelprüfung ist in **Bild 11** dargestellt.

Lecksucher	He-Saugvermögen	Leitung	Gemessene He-Leckagerate	Teilstromverhältnis
ASM 310	1,0 l/s	DN 25	$4,4 \cdot 10^{-9}$ mbar·l·s ⁻¹	1:30
ASM 340	2,5 l/s	DN 25	$1,2 \cdot 10^{-8}$ mbar·l·s ⁻¹	1:11
ASM 390	7,0 l/s	DN 25	$1,5 \cdot 10^{-8}$ mbar·l·s ⁻¹	1:9
		DN 40	$2,4 \cdot 10^{-8}$ mbar·l·s ⁻¹	1:5

Tabelle 1: Abhängigkeit der gemessenen Leckrate von Teilstromverhältnis, Heliumsaugvermögen und Leitungsquerschnitt (Quelle: Pfeiffer Vacuum GmbH)

Abpumpen und Druckwechselspülung beeinflussen das Signalerholverhalten

Das Signalerholverhalten in einer Prozesskammer mit 700 l Volumen ist in **Bild 12** gezeigt. Hier wird das Abklingen des Heliumsignals innerhalb von 4 min. nach dem Auffinden einer Leckage und anschließendem Abpumpen dargestellt. Im Zeitraum von 4 min. werden nur 50% des Signals abgebaut. Ein Signalabbau in Höhe mehrerer Dekaden wird hingegen erreicht, wenn drei Druckwechselspülungen durchgeführt werden, wenn also nach einer kurzen Evakuierung auf einen Druck im mbar-Bereich wieder auf einen Druck von mehreren Hundert mbar belüftet und anschließend erneut gepumpt wird.

Um zu verhindern, dass die Anlage versehentlich durch den Lecksucher belüftet wird, muss die Funktion des Lecksuchers zum automatischen Belüften ausgeschaltet werden. Außerdem empfiehlt es sich, zum Belüften Gase mit sehr geringem Heliumgehalt einzusetzen. So wird ein effektiver Heliumabbau gewährleistet. Verfügt das Gas außerdem über eine geringe Restfeuchtigkeit, so haben diese Spülprozesse auch einen positiven Effekt für die Bedeckung der Kammerwände mit Feuchtigkeit.

Was tun bei einem intensiven Signal?

Bei einem starken Signal des Helium-Lecksuchers ist zu beachten, dass die Regenerierung bei einem höheren Saugvermögen schneller erfolgt. Außerdem kann es sein, dass das Abklingverhalten des Lecksuchers nach dem Auffinden einer hohen Leckrate lange dauern kann. Von hohen Leckraten spricht man dabei ab Werten von $> 1 \cdot 10^{-5}$ Pa m³/s. Durch Festlegung eines Grenzwertes in Form eines Maximalwertes bei der Detektion von Leckraten kann der Lecksucher geschützt werden. Hier ist zu beachten, dass das Belüftungsventil des Lecksuchers auf „Aus“ gestellt werden muss, da ansonsten die Kammer durch den Lecksucher belüftet wird. Das Volumen des an den Lecksucher angeschlossenen Prüflings wirkt sich signifikant auf das Erholverhalten des Signals aus. Diese Erholzeit sowie die des gesamten Systems kann verkürzt werden, indem mit einem heliumfreien Gas eine Druckwechselspülung durchgeführt wird. Dabei ist der maximale für den Lecksucher zugelassene Einlassdruck zu berücksichtigen.

sichtigen. Alternativ kann ein Überdruck-Sicherheitsventil verwendet werden. Außerdem muss das Belüftungsventil auf „Aus“ gestellt werden.

Abhängigkeit der Leckageraten vom Typ des verwendeten Lecksuchers

Die Übersicht in **Tabelle 1** zeigt den Einfluss von Teilstromverhältnis, Heliumsaugvermögen und Leitungsquerschnitt auf die gemessene Leckrate. Dabei wird die folgende Konfiguration der Anlage angenommen:

- Kammervolumen: 700 l
- Prozesspumpe: Trockene Pumpe mit einem Saugvermögen von 1.800 m³/h
- Größe des Prüfleck: 1,3·10⁻⁸ Pa m³/s (1,3·10⁻⁷ mbar · l/s)
- Messung erfolgt im Teilstrom
- Länge des Wellschlauches: 1 m

Sollen Objekte mit einem großen Volumen auf Dichtheit geprüft werden, liegen große Lecks vor oder sind beim Testen von großen Oberflächen hohe Desorptionsraten zu erwarten, empfiehlt sich die kombinierte Anwendung des Lecksuchers mit einer Hilfspumpe. Bei Verwendung im Teilstrombetrieb erreicht nur ein geringer Teil des Prüfgesetzes, das durch das Leck eingedrungen ist, den Lecksucher. Dabei gilt:

$$Y = \frac{S_L}{S_L + S_T} = \frac{Q_L}{Q_L + Q_T}$$

y = Teilstromverhältnis (Anteil des Gases, das am Lecksucher ankommt)

S_L = He-Saugvermögen Lecksucher [l/s]

S_T = He-Saugvermögen Hilfspumpe [l/s]

Q_L = Gasfluss zum Lecksucher [mbar · l/s]

Q_T = Gasfluss zur Hilfspumpe [mbar · l/s]

Aus den angestellten Beobachtungen ergeben sich Konsequenzen für die praktische Anwendung: Die Ansprechzeiten des Lecksuchers sind mit Werten < 1s sehr kurz. Das Teilstromverhältnis und die Reproduzierbarkeit verbessern sich mit zunehmendem Heliumsaugvermögen. Diese beiden Faktoren können weiter verbessert werden, indem der Querschnitt des Wellschlauches als Verbindung zwischen Lecksucher und Prüfling von 25 auf 40 mm ausgedehnt wird (ASM 390 in **Tabelle 1**).

Fehler im Umgang mit dem Lecksucher vermeiden

Bedienfehler oder falscher Umgang mit dem Lecksucher können verfälschte Messergebnisse oder Fehlmessungen zur Folge haben. Daher ist es wichtig, die Kammer bestmöglich von Ausgasungen zu befreien, noch bevor die Dichtheitsprüfung beginnt. Da-

zu eignen sich Druckwechselspülungen mit inerten, trockenen Gasen sowie unter Umständen auch das Ausheizen der Anlage. Zudem ist es wichtig, dass Leckagen eindeutig identifiziert werden können. Dafür ist ein auf die jeweilige Anwendung abgestimmter Ausgangsdruck notwendig, bei dem der Restgehalt an Helium und damit die Untergrund-Leckagerate deutlich unter den nachzuweisenden Leckageraten liegen.

Darüber hinaus sollten zur einwandfreien und zuverlässigen Durchführung von Messungen Hilfspumpen eingesetzt sowie alle Messungen mittels interner oder externer Speichermedien festgehalten werden. Zudem empfiehlt es sich, den Lecksucher nicht direkt nach einer erfolgten Messung zu bewegen und die Nachlaufanzeige des Gerätes zu beachten. An Beschichtungsanlagen sollte die Lecksuche im Teilstrom durchgeführt werden. Die Dichtheitsprüfung an einer Prozesskammer sollte ab dem Prüfanschluss am Gaspanel erfolgen. An der Hilfspumpe nahe dem Endvakuum können Leckagen anhand des zurückströmenden Prüfgases gemessen werden. Ist eine Gaspanelprüfung geplant, muss die Messung im Teilstrom direkt am Gaspanel erfolgen.

Dichtheitsprüfung im Fertigungsprozess

Qualitätsabsicherung elektronischer Displays

Elektronische Anzeigen werden in vielen Industriebereichen eingesetzt und müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen. Dies beinhaltet die Dichtigkeit gegen Schmutz und Feuchtigkeit. Eindringen von Flüssigkeiten kann zu schwerwiegenden Funktionsstörungen des Displays und der zugehörigen Elektronik führen. Daher ist häufig die Dichtheitsprüfung von montierten Anzeigesystemen in der Fertigungslinie von besonderer Bedeutung. Sehr oft wird das Prüfmedium Druckluft und die Druckverlustprüfung bei der End-of-Line-Dichtheitsprüfung eingesetzt.

Wenn die Displays in feuchtigkeitsbelasteter Umgebung verwendet werden, müssen sie wasserdicht sein. Denn das Eindringen von Flüssigkeiten kann zu schwerwiegenden Funktionsstörungen des Displays und der Elektronik führen. Häufig wird ein Dichtheitsgrad entsprechend einer IP-Schutzart (z. B. IP 67) gefordert. In der Definition der IP-Schutzarten wird nur beschrieben, wie ein geeigneter Labortest durchzuführen ist. Hierbei handelt es sich um eine Typprüfung. Von besonderer Bedeutung ist die Absicherung der Fertigungsqualität von montierten Anzeigesystemen. Daraus ergibt sich der Anspruch, zu 100% geprüfte Produkte auszuliefern, verbunden mit der Integration der Dichtheitsprüfung als End-of-Line-Test in die Fertigungslinie. Hierbei handelt es sich um eine Stückprüfung. In der Produktionslinie kann ein Labortest gemäß der IP-Schutzart natürlich nicht durchgeführt werden. Basierend auf den Ergebnissen der Laborversuche müssen die Anforderungen an eine entsprechende Dichtheitsprüfung in der Produktionslinie erarbeitet werden. Idealerweise können der Prüfdruck und die zulässige Leckrate definiert werden.

Leckraten und Dichtheit

In **Tabelle 1** sind einige Orientierungswerte für Leckraten in Abhängigkeit von der geforderten Dichtigkeit aufgeführt. Die Leckrate wird üblicherweise in der Einheit „mbar*l/s“ bzw. „ml/min“ angegeben, wobei $1 \text{ mbar} \cdot \text{l/s} = 60 \text{ ml/min}$ ist.

Dichtheitsanforderung	Grenzleckrate	Prüfmedium
Wasserdicht	$Q_L < 10^{-2}$ mbar*/s	Druckluft
Dampfdicht	$Q_L < 10^{-3}$ mbar*/s	Druckluft, Wasserstoff
Bakteriendicht	$Q_L < 10^{-4}$ mbar*/s	Wasserstoff
Öldicht / Benzindicht	„ $Q_L < 10^{-5}$ mbar*/s (abhängig von Viskosität / Temperatur des Öls)“	Wasserstoff, Helium
Virendicht	„ $Q_L < 10^{-6}$ mbar*/s bis $Q_L < 10^{-8}$ mbar*/s (abhängig von der Virengröße)“	Helium
Gasdicht	$Q_L < 10^{-7}$ mbar*/s	Helium
Technisch dicht	$Q_L < 10^{-10}$ mbar*/s	Helium

Tabelle 1: Dichtheit, Leckrate (Orientierungswerte) und Prüfmedien (Quelle: CETA Testsysteme GmbH)

Prüfmedium Druckluft

Das Prüfmedium Druckluft kann bis zu einer Luftleckrate von 10^{-3} mbar*/s (abhängig vom Prüfteil) verwendet werden. Wenn ein elektronisches Anzeigesystem wasserdicht sein soll, wird üblicherweise eine Luftleckrate von 10^{-2} mbar*/s (= 0,6 ml/min) angenommen. Diese Leckrate kann als ein erster Ansatz verwendet werden. Wenn die Leckrate angenommen wird, wird empfohlen, praktische Tests durchzuführen, um die Leckrate zu verifizieren. Andernfalls kann es vorkommen, dass die Leckrate zu niedrig gewählt wird, was einen zu hohen virtuellen Ausschuss zur Folge hat.

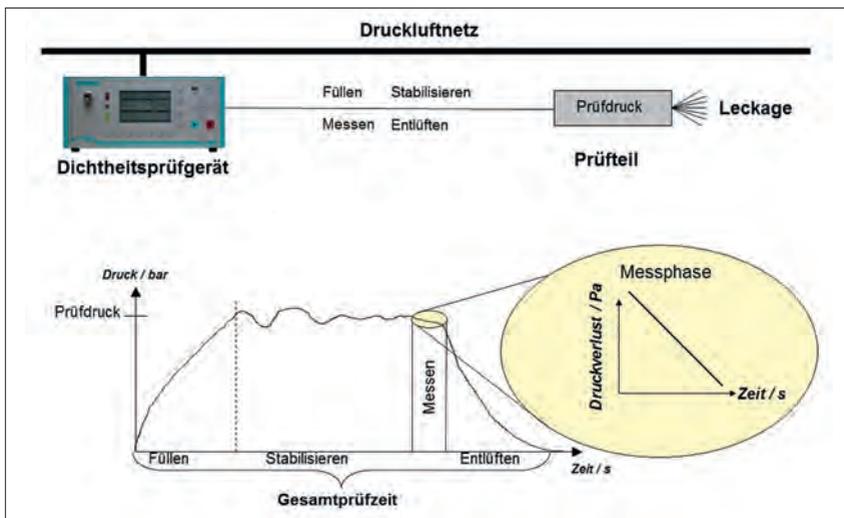


Bild 1: Prinzip der Druckverlustprüfung bei direkt befüllbaren Prüfteilen (Bild: CETA Testsysteme GmbH)

Prinzip der Druckverlustprüfung bei direkt befüllbaren Prüfteilen

Ist das Prüfteil direkt befüllbar, kann die Druckverlustprüfung verwendet werden. Ein kompletter Prüfprozess (**Bild 1**) besteht aus den folgenden Phasen: Füllen, Stabilisieren, Messen und Entlüften. In der Füllphase wird das Prüfteil auf den Prüfdruck befüllt. Die Stabilisierungsphase ist notwendig, damit Luftstörungen (verursacht durch den Füllvorgang und durch das Schalten der internen Ventile des Prüfgerätes) abklingen können. Zudem muss sich die Temperatur der Druckluft an die Temperatur des Prüfteils anpassen. In der Messphase wird der Druckverlust gemessen und mit den zulässigen Toleranzen verglichen. In dieser Phase wird meist ein sehr empfindlicher Drucksensor aktiviert, um den Druckverlust mit hoher Auflösung zu messen. Hierbei wird i.d.R. die Differenzdruckmethode verwendet. Dabei wird der Druckverlust im Prüfteil im Vergleich zu einem internen Referenzvolumen mit einem sehr empfindlichen Drucksensor (meist ein piezoresistiver Differenzdrucksensor) gemessen. Eine stabile Messphase ist dadurch gekennzeichnet, dass der leakagebedingte Druckverlust proportional zur Zeit ist. Anschließend folgt die Entlüftungsphase.

Leckratenformel

Der erwartete Druckverlust pro Zeit kann unter Verwendung der Leckratenformel berechnet werden. Dies ist eine Näherung für die Berechnung des leakagebedingten Druckverlustes bei einem stabilen Regime. Luft tritt durch das Leck im Prüfteil in die umgebende Atmosphäre aus, wobei hier als atmosphärischer Luftdruck ein Absolutdruck von näherungsweise 100.000 Pa verwendet wird.

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{s}} \right] = \frac{Q_L \left[\frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]}{V_{\text{Prüfteil}} \left[\text{ml} \right]} \cdot \frac{100.000 \text{ Pa}}{60 \text{ s/min}}$$

$\Delta p/\Delta t$ = Druckverlust pro Zeit

V_{eff} = Effektives Prüfvolumen (Prüfteil, Adaption, Messleitung, Messkreis des Prüfgerätes)

Q_L = Leckrate (1 mbar*s = 60 ml/min).

Haubenprüfung bei gekapselten Prüfteilen

Viele Displaysysteme sind gekapselt, sodass das Innere des Systems nicht direkt mit Druckluft gefüllt werden kann (**Bild 2**). Gekapselte Prüfteile werden in einer Haube auf Dichtheit geprüft (**Bild 3**). Die Haube wird mit dem Prüfdruck beaufschlagt. Der zeitliche Druckverlust in das Prüfteil wird gemessen. Um eine gute Auflösung zu erhalten, ist es notwendig, dass der verbleibende Luftspalt zwischen Prüfteil und Haube unter Berücksichtigung der Montagetoleranzen relativ klein ist.



Bild 2: Display mit Bedienelementen

(Bild: CETA Testsysteme GmbH)



Bild 3: Vorrichtung zum Prüfen eines Displaysystems in einer Haube – hier ist die leere Haube dargestellt

(Bild: CETA Testsysteme GmbH)

Anmerkung: Bei Anzeigesystemen, die in rauen Umgebungen verwendet werden, muss die gesteckte Einheit aus Stecker und Buchse dicht sein. Der Steckerbereich des Anzeigesystems selbst muss nicht dicht sein. Wenn ein derartiges System in der Haube geprüft wird, muss der Steckerbereich während der Dichtheitsprüfung abgedichtet werden. Dies muss bei der Auslegung des Prüfprozesses berücksichtigt werden.

Bei der Prüfung eines gekapselten Prüfteils tritt folgendes Problem auf: Hat das Prüfteil ein großes Leck (Grobleck), so wird es bereits während der Füllphase der Haube mit Druckluft befüllt. In diesem Fall würde in der Messphase nur die Dichtheit der das Prüfteil umschließenden Haube gemessen werden. Das ist natürlich nicht das Ziel des Prüfprozesses. Daher muss im ersten Schritt kontrolliert werden, dass das Prüfteil kein Grobleck aufweist (Groblecktest).

Danach wird der Feinlecktest mittels der Druckverlustprüfung durchgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass das Haubenrestvolumen (d.h. Haubenleervolumen minus Verdrängungsvolumen des Prüfteils) das eigentliche Prüfvolumen darstellt. In der geschlossenen und leckdichten Haube wird der leckagebedingte Druckverlust in das Prüfteilinnere gemessen.

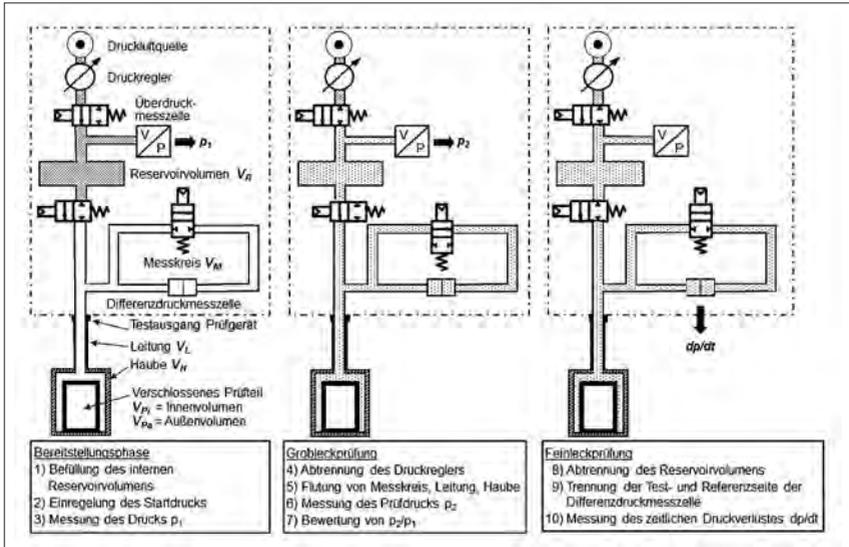


Bild 4: Prinzip der Dichtheitsprüfung gekapselter Prüfteile. Der Prüfprozess besteht aus zwei Schritten: Nach dem Groblecktest folgt der Feinlecktest (Bild: CETA Testsysteme GmbH)

Der Groblecktest wird folgendermaßen durchgeführt (**Bild 4**): Ein im Prüfgerät integriertes Reservoirvolumen wird auf einen Druck p_1 gefüllt und vom Druckregler getrennt. Dann wird das Absperrventil des internen Reservoirvolumens geöffnet und die Luft wird durch die Messleitung in die Haube geflutet. Hierdurch sinkt der Druck auf einen niedrigeren Druck p_2 . Das Verhältnis p_2/p_1 ist ein Maß für das Volumen, das befüllt wird. Diese Drücke werden mit einem Überdrucksensor gemessen.

Je nach Zustand des Prüflings (mit/ohne Grobleck) werden unterschiedliche Druckverhältnisse registriert. Somit können Prüfteile mit Grobleck durch Auswertung dieses Druckverhältnisses eindeutig erkannt werden. Wenn das Prüfteil kein Grobleck aufweist, gilt:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_{\text{Reservoir}}}{V_{\text{Reservoir}} + V_{\text{Messkreis}} + V_{\text{Leitung}} + V_{\text{Haube}} - V_{\text{Prüfteil, außen}}}$$

Bei einem Prüfteil mit Grobleck wird das Innenvolumen des Prüfteils zusätzlich gefüllt und es gilt:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_{\text{Reservoir}}}{V_{\text{Reservoir}} + V_{\text{Messkreis}} + V_{\text{Leitung}} + V_{\text{Haube}} - V_{\text{Prüfteil, außen}} + V_{\text{Prüfteil, innen}}}$$

wobei

- $V_{\text{Reservoir}}$ = Reservoirvolumen,
- $V_{\text{Messkreis}}$ = Volumen des Messkreises des Prüfgerätes,
- V_{Leitung} = Volumen der Messleitung,
- V_{Haube} = Volumen der leeren Haube,
- $V_{\text{Prüfteil, außen}}$ = Verdrängungsvolumen des Prüfteils,
- $V_{\text{Prüfteil, innen}}$ = Internes Volumen des Prüfteils (wird im Fall eines Groblecks befüllt)

Diese Beziehungen ergeben sich aus der idealen Gasgleichung unter Annahme einer konstanten Temperatur (isotherme Zustandsänderung). Im Anfangszustand befinden sich die Volumina auf atmosphärischem Druckniveau, sodass in diesen Formeln die Drücke als positive und negative Überdrücke eingesetzt werden.

Projektierungsbeispiel

Ein Anzeigesystem soll wasserdicht sein (unter Annahme einer Leckrate von 0,6 ml/min) und wird bei einem Druck von 100 mbar getestet. Das äußere Volumen des montierten Anzeigesystems (Außenmaße: 30 cm x 20 cm x 5 cm) beträgt 3.000 cm³. Das System ist gekapselt. Das Prüfteil muss somit in einer Haube geprüft werden. Der Steckerbereich ist dicht und wird in der Haube nicht abgedichtet. Das mit Luft befüllbare innere Volumen des Prüfteils beträgt 20% des äußeren Volumens, das sind 600 cm³. Dieses Volumen wird im Fall eines Groblecks gefüllt. Die Montagetoleranz wird mit ±1 mm angegeben.

Dadurch ergibt sich ein Verdrängungsvolumen von 3.172,2 cm³ bei einem Display mit Maximaltoleranz und ein Verdrängungsvolumen von 2.832,2 cm³ bei einem Prüfteil mit Minimaltoleranz. Das maximale „Toleranzatmen“ beträgt also insgesamt 340 cm³ und ist damit geringer als das im Grobleckfall befüllte Innenvolumen von 600 cm³. Damit ist die messtechnische Machbarkeit zumindest prinzipiell gegeben.

Unter Berücksichtigung der Montagetoleranzen und des Handlings ist ein umlaufendes Spaltmaß von +3 mm zwischen Haube und nominal dimensioniertem Prüfteil geeignet. Damit ergibt sich ein Leervolumen der Haube von 3.530 cm³.

Das Testgerät hat ein internes Reservoirvolumen von 41 cm³. Dieses wird durch ein Zusatzvolumen von 1.000 ml vergrößert, d.h. das gesamte Reservoirvolumen beträgt 1.041 cm³. Dieses hat den Vorteil, dass der Druckunterschied zwischen Reservoir-

Tabelle 2: Druckverhältnisse und Druckverlustgradienten für die verschiedenen Toleranzen des Prüfteils
(Quelle: CETA Testsysteme GmbH)

	Prüfteiltoleranz			
	+/- 0 mm	+1 mm	-1 mm	
Haubenleervolumen	3.530,0 ml	3.530,0 ml	3.530,0 ml	
Verdrängungsvolumen	3.000,0 ml	3.172,2 ml	2.832,2 ml	
Haubenrestvolumen	530,0 ml	357,8 ml	697,8 ml	
Reservoirfülldruck p_1	150 mbar	150 mbar	150 mbar	
Haubendruck p_2 für Nicht-Grobleckteile	98 mbar	110 mbar	89 mbar	
Verhältnis p_2 / p_1 bei Nicht-Grobleckteilen	65,2%	73,5%	59,2%	Min. 59,2 %
Verhältnis p_2 / p_1 bei Grobleckteilen	47,5%	51,6%	44,2%	Max. 51,6 %
Druckverlustgradient dp / dt	1,8 Pa/s	2,7 Pa/s	1,4 Pa/s	

befüllung und dem Haubendruck nach Umfluten nicht zu groß ist. Dadurch werden Temperatureffekte aufgrund adiabatischer Prozesse deutlich reduziert. Der interne Messkreis des Prüfgerätes hat ein Volumen von 6 cm^3 . Die Messleitung hat eine Länge von $1,0 \text{ m}$ und einen Innendurchmesser von 4 mm , was einem Leitungsvolumen von $12,6 \text{ cm}^3$ entspricht. Die sich unter Berücksichtigung der dimensionellen Prüfteiltoleranzen ergebenden, rechnerisch ermittelten Werte sind in **Tabelle 2** dargestellt.

Da während der Prüfung die exakten Toleranzen des Prüfteils nicht bekannt sind, gilt es, eine für alle erlaubten Toleranzlagen passende Prüfgeräteeinstellung festzulegen. Hierzu dienen die in **Tabelle 2** aufgeführten Werte:

Wird bei einem Prüfteil ein Druckverhältnis $< 51,6\%$ registriert, so bricht die Prüfung ab und das Prüfteil wird als n.i.O. bewertet. Dieses Prüfteil hat ein Grobleck.

Alle Prüfteile, bei denen sich bei der Grobleckprüfung ein Druckverhältniswert $> 59,2\%$ einstellt, haben kein Grobleck.

Somit beträgt der Abstand der Druckverhältnisse bei einem Grobleckteil und einem Nicht-Grobleckteil mindestens $7,6\%$ ($= 59,2\% - 51,6\%$). Bei Prüfteiltoleranzen innerhalb von $\pm 1 \text{ mm}$ ist somit eine eindeutige Unterscheidung zwischen Grobleck und Nicht-Grobleck möglich.

In der Praxis legt man die Bewertungsgrenze in diesem Beispiel auf 57% . Alle Prüfteile, die bei der Grobleckprüfung ein Druckverhältnis größer als 57% aufweisen, haben

kein Grobleck. Bei diesen schließt sich die Feinleckprüfung an, und es wird gemessen, ob der Druckverlustwert innerhalb der erlaubten Toleranz liegt.

Da sich der in der Haube einstellende Druck von der Toleranz des Prüfteils abhängt, wird vor der Feinleckprüfung in einer Nachfüllphase der Druck auf den Prüfdruck von 100 mbar nachgefüllt, sodass bei der Feinleckprüfung immer die gleichen Bedingungen hinsichtlich des Prüfdruckes vorliegen.

Anhand **Tabelle 2** ist ersichtlich, dass der Druckgradient vom Haubenrestvolumen, d.h. Haubenvolumen minus Verdrängungsvolumen des Prüfteils, abhängt. Um hier sicherzugehen, wird der kleinste Druckgradient von 1,4 Pa/s zugrunde gelegt. Für ein prozesssicheres Signal (d.h. wenn ein C_g -Wert $> 1,33$ gefordert ist) werden in der Praxis ca. 30 bis 40 Pa benötigt. Damit ist von einer reinen Messzeit in der Größenordnung von ca. 21 s bis 29 s auszugehen: Die Gesamtprüfzeit ergibt sich bei der Haubenprüfung aus der Summe der Phasenzeiten aus Reservoirfüllen (ca. 5 s), Umfluten (ca. 5 s), Nachfüllen auf 100 mbar (ca. 5 s), Stabilisieren (ca. 10 s), Messen (22 bis 29 s), Entlüften (ca. 1 s). Somit beträgt die Gesamtprüfzeit, bestehend aus Grobleckerkennung und Feinleckprüfung sowie Berücksichtigung der Prozesssicherheit, insgesamt ca. 49 s bis 56 s (inkl. interner Delayzeiten des Prüfgerätes). Aufgrund des Druckgradienten in der Größenordnung von ca. 2 Pa/s ist der Einsatz eines Dichtheitsprüfgerätes mit Differenzdrucksensor notwendig.

Praxistipps

Wenn das Toleranzatmen größer ist als das im Grobleckfall innen befüllbare Volumen, so lässt sich aufgrund der zu großen Toleranzen keine passende Prüfgeräteeinstellung hinsichtlich der eindeutigen Erkennbarkeit von Grobleck- und Nicht-Grobleck-Prüfteilen finden. Diese Prüfaufgabe ist dann nicht machbar. In derartigen Fällen ist zu prüfen, ob die Toleranzen verkleinert werden können und bzw. oder das Spaltmaß in der Haube verringert werden kann.

Häufig wird zur Beurteilung der Druckverhältnisse ein Überdrucksensor eingesetzt. Damit wird in der Praxis mindestens eine Trennung von 3% zwischen Grobleck und Nicht-Grobleck benötigt. Wird anstelle des Überdrucksensors ein Differenzdrucksensor zur Messung der Druckverhältnisse eingesetzt, verbunden mit einer darauf angepassten Ventilschaltung, so lassen sich noch deutlich geringere Druckverhältnisse in der Größenordnung von 0,03% prozesssicher erkennen (wie es z.B. mit dem Differenzdruckprüfgerät CETATEST 515 möglich ist). Ein Prüfgerät mit einer derart hohen Auflösung kann u.a. im Rahmen der Montagekontrolle auch dafür eingesetzt werden, um

die Existenz der verbauten Komponenten zu kontrollieren, wenn optische oder taktile Verfahren nicht möglich sind.

Um grenzwertige Prüfteile nachzustellen, werden i.d.R. kalibrierte Testlecks verwendet. Diese haben bei einem bestimmten Druck einen definierten Durchfluss, der der Grenzleckrate entspricht. Testlecks werden pneumatisch parallel zu einem Masterdichteteil geschaltet und dienen der Simulation eines grenzwertigen Prüfteils. Das Testleck wird auch bei der Ermittlung der Messmittelfähigkeit verwendet.

Integration von Druckausgleichselementen

Aufgrund von äußeren Temperaturschwankungen und Temperatureffekten, die durch den Betrieb des Displays verursacht werden, kann der Druck in dem Anzeigesystem variieren. Dieses führt zu zyklischen Belastungen der Dichtungen, die dadurch undicht werden können. Wenn Feuchtigkeit oder Flüssigkeit auf das Display einwirkt und im Inneren des Displays Vakuum herrscht, besteht die Gefahr, dass Flüssigkeit in das System gesaugt wird, wenn die Nähte nicht dicht sind. Um diese Gefahr zu verringern, wird ein Druckausgleichselement in das System integriert. Oft werden Membranen verwendet, die dicht gegen Wasser, aber luftdurchlässig sind. Durch die Verwendung eines Druckausgleichselementes werden diese „gefährlichen“ Druckunterschiede recht schnell ausgeglichen. In diesem Fall kann die Dichtheitsprüfung durchgeführt werden, indem das System direkt durch das Druckausgleichselement befüllt wird und eine Druckverlustprüfung durchgeführt wird. Bei dieser Prüfung ist also keine Haube notwendig. Dies vereinfacht den Prüfprozess. Aufgrund des begrenzten Luftdurchflusses durch ein Druckausgleichselement wird allerdings die benötigte Prüfzeit verlängert. Daher wird bisweilen trotzdem eine Haubenprüfung des Systems durchgeführt, wobei die Membran während der Prüfung innerhalb der Haube abgedichtet wird.

Welches Konzept vielversprechender ist, hängt von mehreren Faktoren ab, wie z.B. von der Produktionszykluszeit, dem Volumen des Prüfteils, dem Luftdurchfluss durch die Membran sowie weiteren Faktoren. Diese Aspekte müssen detailliert betrachtet werden, um einen prozesssicheren Prüfprozess in die Produktionslinie zu integrieren.

Was beim Schnüffeln zu beachten ist

Dynamisches Roboterschnüffeln macht erst mit 3.000 sccm Sinn

In verschiedenen Branchen ist eine Schnüffellecksuche ein unverzichtbares Element für die Qualitätssicherung im Fertigungsprozess. Ob sie manuell oder robotergestützt stattfindet, sie basiert immer darauf, dass ein Leck anhand eines austretenden Prüfgases identifiziert wird. Entscheidet man sich für das Roboterschnüffeln, ist der Gasfluß ein zentrales Kriterium.

Oft dient die Schnüffellecksuche dazu, eine Leckstelle an einem Prüfteil genau zu lokalisieren – nachdem der Prüfling eine vorangehende integrale Dichtheitsprüfung nicht bestehen konnte. Mitunter erfüllt eine Schnüffellecksuche aber auch integrale Dichtheitsprüfaufgabe – etwa wenn im Fertigungsablauf ermittelt werden muss, ob die Verbindungsstellen zwischen diversen Komponenten wirklich dicht sind. Im Automobilbau ist dies z.B. nach der Endmontage der Klimaanlage im Fahrzeug erforderlich. Oder sie ist nach der Montage der Batteriemodule im Gehäuse einer Antriebsbatterie erforderlich – auch deren Lebensdauer und Betriebssicherheit hängen von einer zuverlässigen Kühlung ab.

Im nachfolgenden Beispiel der Klimaanlage bzw. der Kühlung der Traktionsbatterie kann durchaus auch das verwendete Kältemittel selbst als Prüfgas dienen, sei es R1234yf oder CO₂. Gerade im Falle der Roboter-Schnüffellecksuche ist aber grundsätzlich zwischen zwei Anwendungsszenarien zu unterscheiden: der stationären und der dynamischen Schnüffellecksuche. In der dynamischen Variante ergeben sich ganz andere und sehr viel strengere Anforderungen an die technischen Parameter des dabei eingesetzten Lecksuchgeräts.

Besondere Anforderungen der dynamischen Schnüffellecksuche

Wenn Unternehmen bei ihren Dichtheitsprüfungen im Fertigungsablauf einen Roboter einsetzen, geschieht dies üblicherweise bei der automatisierten Schnüffellecksuche. Ein Roboterarm (**Bild 1**) bewegt dabei die Schnüffel-Messsonde zum Prüfling, um austretendes Prüfgas und seine Leckrate zu erfassen. Bei der stationären Schnüffellecksuche bewegt sich der Roboterarm zu einer definierten Stelle am Prüfteil und verharrt dort für eine definierte Zeit, um etwaige Leckagen und Leckraten an genau

diesem Punkt zu ermitteln. Technisch deutlich anspruchsvoller ist die dynamische Schnüffellecksuche. Hier fährt der Roboterarm nicht zu einzelnen, zuvor definierten Stellen. Stattdessen beschreibt die Messspitze einen kontinuierlichen Weg an der Oberfläche des Prüfteils. Damit das dynamische Roboterschnüffeln verlässliche Ergebnisse erbringt, sind zwei Faktoren entscheidend: zum einen die Geschwindigkeit, mit der der Roboterarm das Prüfteil abfährt, – und zum anderen, wie stark das Gerät dabei Luft und Prüfgas ansaugen kann.



Bild 1: Dynamische Roboter-Schnüffellecksuche an einem Batteriegehäuse (Bild: INFICON)

Die dynamische Schnüffellecksuche soll gleich zwei Dinge leisten: Einerseits soll sie einen größeren Bereich des Prüfteils auf etwaige Leckstellen prüfen, andererseits soll sie dies mit möglichst hoher Geschwindigkeit tun. Leider sind beide Ziele nicht leicht in Einklang zu bringen. Denn je kleiner die Leckrate ist, desto langsamer verteilt sich an einer Leckstelle auch die Wolke mit austretendem Prüfgas. Mitunter müsste eine Leckrate dann schon extrem hoch sein, um bei der automatisierten Schnüffellecksuche überhaupt erkennbar zu sein. Es ist das Prinzip der Schnüffellecksuche – ob man sie per Roboter oder manuell durchführt –, dass Luft und Prüfgas von der Messspitze mit einem gewissen Fluss angesaugt werden. Als Einheit für den Gasstrom ist sccm (standard cubic centimeter per minute – Standardkubikzentimeter pro Minute) gebräuchlich. Viele herkömmliche Schnüffellecksuchgeräte saugen Gas aber mit einem Teilchenstrom von lediglich 60 sccm an. Bei einer sorgfältigen manuellen Handhabung der Schnüffelspitze kann dies mitunter ausreichend sein – etwa wenn es nur wenige Prüfstellen gibt und die Schnüffelspitze nur langsam und nah an der Oberfläche bewegt wird. Allerdings stellt gerade die dynamische Roboter-Schnüffellecksuche sehr viel höhere Anforderungen.

Prüfung auf Öldichtheit braucht Gasfluss von 3.000 sccm

Um die Öldichtheit einer Komponente zu ermitteln, ist eine Prüfung gegen Leckraten im Bereich von 10^{-3} mbar·l/s erforderlich. Versuchsreihen zeigen, welche Auswirkung die Scan- bzw. Bewegungsgeschwindigkeit des Messkopfes hat, wenn gegen solche eine Leckrate getestet werden muss (bei einem Abstand von 6 mm vom Prüfteil am Bei-

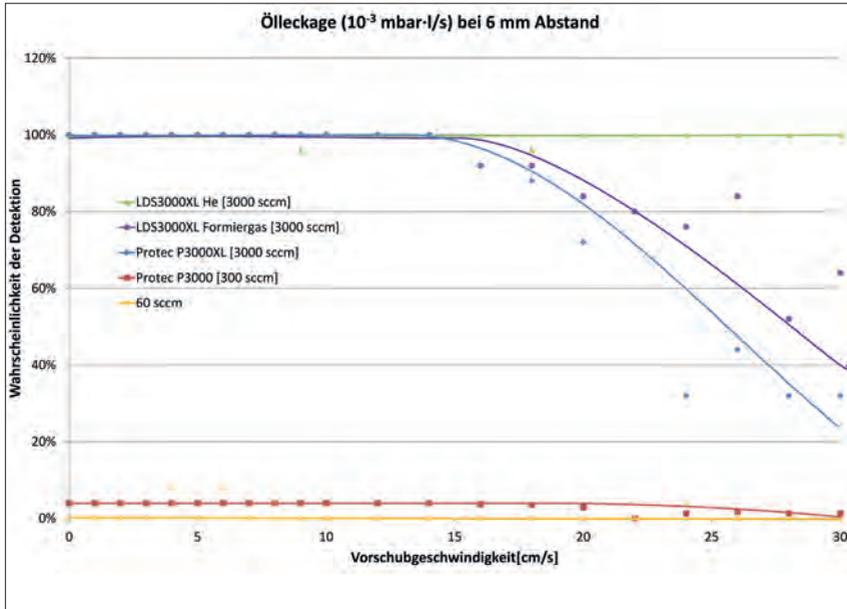


Bild 2: Dynamische Roboter-Schnüffellecksuche bei einem Ölleck (Bild: INFICON)

spiel eines Testlecks von $1 \cdot 10^{-3}$ mbar-l/s (**Bild 2**). Das ernüchternde Ergebnis: Herkömmliche, marktübliche Schnüffellecksucher, die Gas mit einem Fluss von nur 60 sccm ansaugen, versagen in solch einem Szenario vollkommen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Leck von $1 \cdot 10^{-3}$ mbar-l/s von solchen Geräten gefunden wird, ist gleich null. Selbst Geräte, die mit einem Teilchenfluss von 300 sccm arbeiten, sind für diesen Einsatzzweck ungeeignet.

Erst Geräte wie der Protec P3000XL bzw. der LDS3000 mit XL-Schnüffeladapter, die eigens mit einem Fluss von 3000 sccm ausgelegt sind, erfüllen die Anforderungen des dynamischen Roboterschnüffels. Führt der Roboterarm seine Messspitze mit einer Geschwindigkeit von < 14 cm/s über die Oberfläche des Prüflings, werden die für die Öldichtheit relevanten Lecks zu 100% erkannt und lokalisiert. Bei einer Prüfgeschwindigkeit von > 14 cm/s nimmt die Nachweiswahrscheinlichkeit beim Protec P3000XL langsam ab, während der LDS3000XL selbst bei einer Geschwindigkeit von 30 cm/s das Leck noch völlig zuverlässig nachweisen kann – vorausgesetzt, man verwendet Helium als Prüfgas.

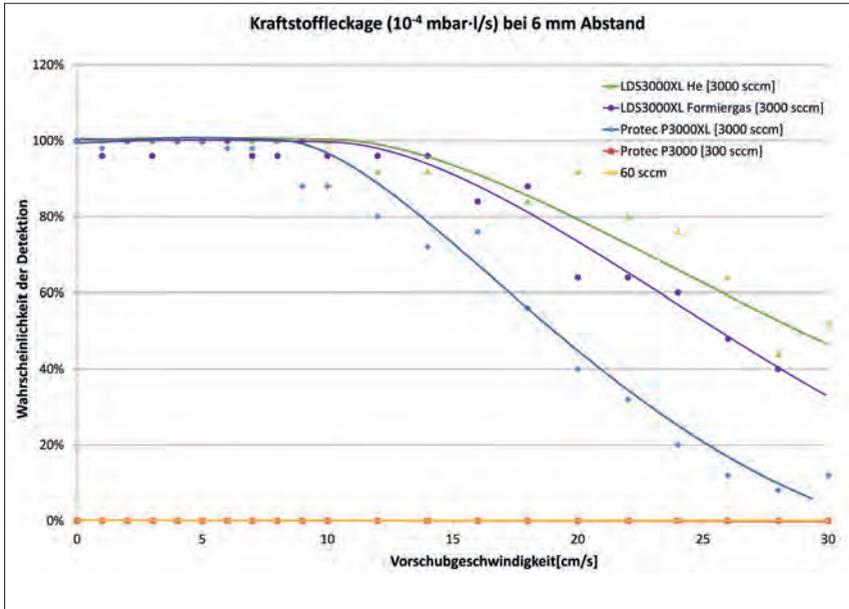


Bild 3: Dynamische Roboter-Schnüffellecksuche bei einem Kraftstoffleck (Bild: INFICON)

Noch höhere Anforderungen für Kraftstoffdichtheit

Wenn eine Komponente im Automobilbau gegen den Austritt von Kraftstoffen geprüft werden muss, sind die Leckraten meist noch um eine Zehnerpotenz kleiner: sie liegen bei circa $1 \cdot 10^{-4}$ mbar-l/s. Für die dynamische Roboter-Schnüffellecksuche hat das Konsequenzen. In diesem Beispiel, mit einem Abstand von 6 mm von der Oberfläche des Prüfteils, weisen nun weder Prüfgeräte mit 60 noch mit 300 sccm in irgendeinem Fall ein Leck dieser Größe korrekt nach, bei keiner Prüfgeschwindigkeit (Bild 3). Und auch bei der Messung mit einem Lecksuchgerät, das einen sehr hohen Gasfluss von 3.000 sccm hat, sollte man die Geschwindigkeit etwas reduzieren. Mit dem Protec P3000XL erbringt die dynamische Schnüffellecksuche bei Geschwindigkeiten < 8 cm/s zuverlässige Ergebnisse, mit Leck-Erkennungsraten von nahezu 100%. Mit dem LDS3000XL liegt diese Geschwindigkeitsgrenze etwas höher, bei ungefähr 10 cm/s.

Einhausen des Roboters

Ob nun auf Öl- oder Kraftstofflecks oder sogar auf noch kleinere Leckraten geprüft werden soll – für eine gute Roboter-Dichtheitsprüfung ist es in jedem Fall wichtig, dass sich die gesamte Prüfanlage in einem abgeschirmten Bereich befindet. Üblicherweise

werden Roboterstationen schon aus Sicherheitsgründen in irgendeiner Art von Einhausung untergebracht. Wirklich zuverlässige Ergebnisse erzielt man, wenn diese Einhausung den Roboter auch vor Luftbewegungen im Produktionsbereich schützt. So ist sichergestellt, dass austretende Prüfgaswolken nicht sofort verweht werden können.

Fazit

Die Erkenntnis: Eine automatisierte Schnüffellecksuche eliminiert zwar den Einfluss eines menschlichen Prüfers, aber auch für solch eine Roboter-Schnüffellecksuche ist es unerlässlich, das Lecksuchgerät sorgfältig auszuwählen – anhand der Leistungsdaten, die für den spezifischen Einsatzzweck erforderlich sind. In vielen Fällen wird dies bedeuten: Nur wenn das Gerät das Prüfgas mit einem sehr hohen Gasfluss von z.B. 3.000 sccm ansaugt, kann die dynamische Roboter-Schnüffellecksuche das leisten, was sie soll – Lecks zuverlässig aufspüren und lokalisieren.



The image shows a red Pfeiffer Vacuum ASM 340 leak detector. The device is rectangular with a control panel on top featuring a color display and several buttons. The brand name 'PFEIFFER VACUUM' is printed at the top, and 'ASM 340' is visible on the front panel. The device is mounted on a clear plastic base.

ASM 340

Leistungsstarker Lecksucher für Helium und Wasserstoff

- Einzigartige Fähigkeit zur Lokalisierung von Leckagen ab 100 hPa
- Schnellste Betriebsbereitschaft in seiner Klasse
- Abnehmbares Farb-Bedienteil für verbesserte Ergonomie

Sie suchen eine perfekte Vakuumlösung? Sprechen Sie uns an:
Pfeiffer Vacuum GmbH · Headquarters/Germany · T +49 6441 802-0
www.pfeiffer-vacuum.com

Unternehmen finden

Firma	Seite
ACTEGA DS GmbH	122
Alwin Höfert KG	506
APO GmbH	505
ARBURG GmbH + Co KG	461
Atlas Copco IAS GmbH	89
Berger S2B GmbH	155, 175, 455, 508
Berghof Fluoroplastic Technology GmbH (BFT)	185
CeraCon GmbH	334, 500, 503
C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG	98, 506
CETA Testsysteme GmbH	485
Compounds AG	147
DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA	375
Drei Bond GmbH	504
DONIT TESNIT, d.o.o.	507
DOYMA GmbH & Co.	207
Dyneon GmbH	509
ElringKlinger Kunststofftechnik GmbH	201
ENGEL AUSTRIA	422, 445
E. Epple & Co. GmbH	501, 505
Fa. Gerhard Simon	357
fachwissen-dichtungstechnik.de	435
Fietz Gruppe	134
Fischer & Tausche Capacitors FTCAP GmbH	320
FluorTex GmbH	148
FPS GmbH	148
FRACTURE ANALYTICS	405
Fraunhofer Institut (IFAM)	367
Frenzelit GmbH	190, 507
Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG	208
Garlock GmbH	176, 500
Gefran Deutschland GmbH	436
GFD - Gesellschaft für Dichtungstechnik mbH	502, 507
HAW Hamburg	202
HAW München	244
Herbert Hähnchen GmbH & Co. KG	305
Hexpol TPE GmbH	114
HiDi GmbH	500
Hilger & Kern Group	389, 466
IFAM Fraunhofer-Institut	367
IFAM Stade	466
INFICON GmbH	494
ISGATEC GmbH	12, 15, 75, 160, 212, 235, 243, 310, 327, 472, 508, 510, 511
Jurima Dichtungen GmbH	501
Karl Späh GmbH & Co. KG	121
Kempchen Dichtungstechnik GmbH	507
Klinger GmbH	189, 196, 508

Firma	Seite
Klöckner DESMA Elastomertechnik GmbH	3, U
KRAIBURG TPE GmbH & Co. KG	130
Lannewehr + Thomsen GmbH & Co. KG	68
Lohmann GmbH & Co. KG	416, 504
Loop GmbH	505
MIS Fluorplastic Technology GmbH (BFT)	185
Nordson Deutschland GmbH	374
Ohrmann Montagetechnik GmbH	2
O-Ring Prüflabor Richter GmbH	161
OVE Plasmatec GmbH	76
Pallas GmbH & Co. KG	106
Pallas Oberflächentechnik GmbH & Co. KG	506
Panacol-Elosol GmbH	504
Parker Hannifin Manufacturing Germany GmbH & Co. KG	141
Pemdorfer Maschinenbau KG	509
Pfeiffer Vacuum GmbH	474, 498
Plasmatec GmbH	446
Prüflabor Richter GmbH	161
RAMPF Polymer Solutions GmbH & Co. KG	319, 502
RAMPF Production Systems GmbH & Co. KG	417
REIFF Technische Produkte GmbH	300, 501
Ryback + Hofmann rhv-Technik GmbH + Co. KG	506
Scheugenpflug AG	2, U, 320
SCHLÖSSER GmbH & Co. KG	501
SKF Sealing Solutions Austria GmbH	213
Sika Deutschland GmbH	504
Sonderhoff Holding GmbH	Lesezeichen, 328
Sonderhoff Chemicals GmbH	502
Stasskol GmbH	285, 311
Steinbach AG	156
STM Stein-Moser GmbH	430
STM Waterjet GmbH Germany	421, 429
Sulzer Mixpac Ltd.	350, 404
TARTLER GmbH	440
tesa SE	390, 505
Trelleborg Sealing Solutions Germany GmbH	236
Universität Kaiserslautern	221
Universität Stuttgart	286
ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH	4, 343, 349
Vito Irmen GmbH & Co. KG	503
Wacker Chemie AG	110
WEICON GmbH & Co. KG	380
Westpommerische Techn. Universität Szecezan	397
WEVO-CHEMIE GmbH	320
W. KÖPP GmbH & Co. KG	502, 503
xpress seals GmbH	503
ZITEC-Brammer	84

LÖSUNGEN FINDEN

AUTOMATISIERTE ÖFEN ZUM AUSHÄRTEN/VORWÄRMEN



CeraCon GmbH
Systems & Engineering
Talstraße 2
97990 Weikersheim

Tel.: +49(0)7934.9928-0 | Fax: +49(0)7934.9928-600
www.ceracon.com | epost@ceracon.com

DICHTHEITSPRÜFUNG



ZELTWANGER Dichtheits- und Funktionsprüfsysteme GmbH
Maltschachstraße 32
72144 Dußlingen

Tel.: +49(0)7072.92897-501 | +49(0)7072.92897-555
dichtheit@zeltwanger.de | www.zeltwanger.de

DICHTUNGEN



Garlock GmbH
Falkenweg 1
41468 Neuss

Tel.: +49(0)2131.349-0 | Fax: +49(0)2131.349-222
garlockgmbh@garlock.com | www.garlock.com



HilDi GmbH
Raiffeisenstraße 6
72810 Gomaringen

Tel.: +49(0)7072.9176-0 | Fax: +49(0)7072.9176-20
vertrieb@hildi-gmbh.de | www.hildi-gmbh.de

DICHTUNGEN

**Jurima Dichtungen GmbH**

Derchinger Straße 143
86165 Augsburg

Tel.: +49(0)821.74867-0 | Fax: +49(0)821.74867-99
post@jurima-gmbh.de | www.jurima-gmbh.de

**REIFF Technische Produkte GmbH**

Tübinger Straße 2-6
72762 Reutlingen

Tel.: +49(0)7121.323-0 | Fax: +49(0)7121.323-3460
vktp@reiff-gruppe.de | www.reiff-tp.de

**Schlösser GmbH & Co. KG**

Dichtungen und Stanzteile
Wilhelmstraße 8
88512 Mengen

Tel.: +49(0)7572.606-0 | Fax: +49(0)7572.606-5598
info@schloess.de | www.schloesser-dichtungen.de

DICHTUNGS-, VERGUSS- UND KLEBESYSTEME

**E. Epple & Co. GmbH**

Dichtstoffe, Klebstoffe, Gießharze,
Lohnfertigung
Hertzstraße 8 · 71083 Herrenberg

Tel.: +49(0)7032.9771-0 | Fax: +49(0)7032.9771-50
info@epple-chemie.de | www.epple-chemie.de

DICHTUNGS-, VERGUSS- UND KLEBESYSTEME



W. KÖPP GmbH & Co. KG

Hergelsbendenstraße 20
52080 Aachen

Tel.: +49(0)241.16605-0 | Fax: +49(0)241.16605-55
info@koeppe.de | www.koeppe.de



**RAMPF Polymer Solutions
GmbH & Co. KG**

Robert-Bosch-Straße 8-10
72661 Grafenberg

Tel.: +49(0)7123.9342-0 | Fax: +49(0)7123.9342-2444
polymer.solutions@rampf-gruppe.de | www.rampf-gruppe.de



Sonderhoff Chemicals GmbH

Richard-Byrd-Straße 26
50829 Köln

Tel.: +49(0)221.95685-0 | Fax: +49(0)221.95685-599
info@sonderhoff.com | www.sonderhoff.com

DYNAMISCHE DICHTUNGEN



**GFD - Gesellschaft für
Dichtungstechnik mbH**

Hofwiesenstraße 7
74336 Brackenheim

Tel.: +49(0)7135.9511-0 | Fax: +49(0)7135.9511-11
info@seals.de | www.seals.de

DYNAMISCHE DICHTUNGEN

**xpress seals gmbh**

Fangdieckstraße 70-74
22547 Hamburg

Tel.: +49(0)40.8797.44510 | Fax: +49(0)40.8797.445-69
michael.muelner@xpress-seals.com | www.xpress-seals.com

FLÜSSIGDICHTUNGEN

**CeraCon GmbH**

Systems & Engineering
Talstraße 2
97990 Weikersheim

Tel.: +49(0)7934.9928-0 | Fax: +49(0)7934.9928-600
www.ceracon.com | epost@ceracon.com

**W. KÖPP GmbH & Co. KG**

Hergelsbendenstraße 20
52080 Aachen

Tel.: +49(0)241.16605-0 | Fax: +49(0)241.16605-55
info@koeppe.de | www.koeppe.de

KLEBTECHNIK

**Vito Irmten GmbH & Co. KG**

Mittelstraße 74-80
53424 Remagen

Tel.: +49(0)2642.4007-0
info@vito-irmten.de | www.vito-irmten.de

KLEBE- UND VERBINDUNGSTECHNIK



Drei Bond GmbH

Carl-Zeiss-Ring 17
85737 Ismaning/München

Tel.: +49(0)89.962427-0 | Fax: +49(0)89.962427-19
info@dreibond.de | www.dreibond.de



Lohmann GmbH & Co. KG

Irlicher Straße 55
56567 Neuwied

Tel.: +49(0)2631.34-0 | Fax: +49(0)2631.34-6661
info@lohmann-tapes.com | www.lohmann-tapes.com



Panacol-Elosol GmbH

Member of Hönle Group
Daimlerstraße 8
61449 Steinbach/Taunus

Tel.: +49 (0)6171.6202-0 | Fax: + 49(0)6171.6202-590
info@panacol.de | www.panacol.de



**Sika Deutschland GmbH
Kleben und Dichten Industrie**

Stuttgarter Straße 139
72574 Bad Urach

Tel.: +49(0)7125.940-761 | Fax: +49(0)7125.940-763
industry@de.sika.com | www.sika.de

KLEBE- UND VERBINDUNGSTECHNIK



tesa SE

Hugo-Kirchberg-Straße 1
22848 Norderstedt

Tel.: +49(0)4088899-0
tesa.industriemietanfragen@tesa.com | www.tesa.de

LOHNFERTIGUNG CHEMISCH TECHNISCHER PRODUKTE



E. Epple & Co. GmbH

Dichtstoffe, Klebstoffe, Gießharze,
Lohnfertigung
Hertzstraße 8 · 71083 Herrenberg

Tel.: +49(0)7032.9771-84 | Fax: +49(0)7032.9771-50
kam@epple-chemie.de | www.epple-chemie.de



LOOP GmbH

Am Nordturm 5
46562 Voerde

Tel.: +49(0)281.83135 | Fax: +49(0)281.83137
mail@loop-gmbh.de | www.loop-gmbh.de

OBERFLÄCHENTECHNIK



APO GmbH

Massenkleinteilbeschichtung
Konrad-Zuse-Straße 2b
52477 Alsdorf

Tel.: +49(0)02404.59980 | Fax: +49(0)2404.5998300
info@apo.ac | www.apo.ac

OBERFLÄCHENTECHNIK



**Pallas Oberflächentechnik
GmbH & Co. KG**
Adenauerstraße 17
52146 Würselen

Tel.: +49(0)2405.4625-0 | Fax: +49(0)2405.4625-111
info@pallaskg.de | www.pallaskg.de



**Rybak + Hofmann rhv-Technik
GmbH + Co. KG**
Eisentalstraße 27
71332 Waiblingen

Tel.: +49(0)7151.95998-0 | Fax : +49(0)7151.95998-95
info@rhv-technik.de | www.rhv-technik.de

O-RINGE



C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG
Dichtungstechnik
Gehrstücken 9
25421 Pinneberg

Tel.: +49(0)4101.5002-0 | Fax: +49(0)4101.5002-83
info@cog.de | www.cog.de



Die Dichtung.
Seit 1963

Alwin Höfert
Fabrikation von Spezialdichtungen
Ferdinand-Harten-Straße 15
22949 Ammersbek/Hamburg

Tel.: +49(0)40.604477-0 | Fax: +49(0)40.6046523
service@hoefert.de | www.hoefert.de

STATISCHE DICHTUNGEN



**GFD - Gesellschaft für
Dichtungstechnik mbH**
Hofwiesenstraße 7
74336 Brackenheim

Tel.: +49(0)7135.9511-0 | Fax: +49(0)7135.9511-11
info@seals.de | www.seals.de



DONIT TESNIT D.O.O.
Cesta Kom. Staneta 38
1215 Medvode
SLOWENIEN

Tel.: +386.158.23300 | Fax: +386.158.23208
info@donit.eu | www.donit.eu



Frenzelit GmbH
Frankenhammer
95460 Bad Berneck

Tel.: +49(0)9273.72-0 | Fax: +49(0)9273.72-222
info@frenzelit.com | www.frenzelit.com



Kempchen Dichtungstechnik GmbH
Im Waldteich 21
46147 Oberhausen

Tel.: +49(0)208.8482-0 | Fax: +49(0)208.8482-285
info@kempchen.de | www.kempchen.de

STATISCHE DICHTUNGEN



KLINGER GmbH

Richard-Klinger-Straße 37
65510 Idstein

Tel.: +49(0)6126.4016-0 | Fax: +49(0)6126.4016-22
mail@klinger.de | www.klinger.de

TECHNISCHE BERATUNG



ISGATEC GmbH

Postfach 10 15 05
68015 Mannheim

Tel.: +49(0)621.7176888-0 | Fax: +49(0)621.7176888-8
info@isgatec.com | www.isgatec.com

3D-WASSERSTRAHLSCHNEIDEN



Berger S2B GmbH

Hans-Thoma-Straße 49-51
68163 Mannheim

Tel.: +49(0)621.41003-0 | Fax: +49(0)621.41003-33
info@bergers2b.com | www.bergers2b.com

WASSERSTRAHLSCHNEIDEN



PERNDORFER MASCHINENBAU KG
Parzleithen 8
4720 Kallham
ÖSTERREICH

Tel.: +43(0)7733.7245 | Fax: +43(0)7733.7080
maschinenbau@perndorfer.at | www.perndorfer.at

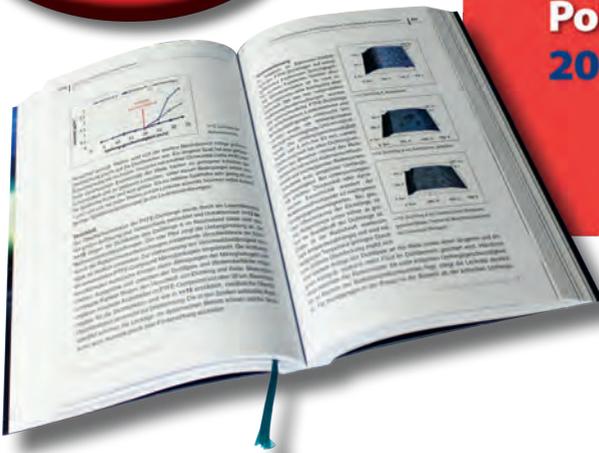
WERKSTOFFE/HALBZEUGE



Dyneon GmbH
3M Advanced Materials Division
Carl-Schurz-Straße 1
41453 Neuss

Tel.: +49(0)2131.142265 | Fax: +49(0)2131.143857
dyneon.europe@mmm.com | www.dyneon.eu | www.dyneon.eu/FFKM

**Jetzt schon
vormerken!**
Erscheinungstermin:
30.10.2019



Berger/Kiefer (Hrsg.)

JAHRBUCH
Dichten.
Kleben.
Polymer.
2020

ISGATEC

Raum für Experten

Erfahrung. Erkennen. Lösungen.



©iStock.com/Tom Merton

Jetzt
Beratung
sichern!

Mit unserem technischen Consulting kommen Sie schnell und ohne Umwege ans Ziel

- Teilekonstruktion und -modifikation
- Werkstoffspezifikation
- Verarbeitungstechnik, Prozessoptimierung
- Qualitätsmanagement, Lieferantenqualifizierung u.a. für
- Formteile und Profile
- statische Dichtungen
- dynamische Dichtsysteme
- Flüssigdichtsysteme
- Klebetechnik

www.isgatec.com > Consulting

Ihr Ansprechpartner: Karl-Friedrich Berger
Tel.: 0049(0)621-7176888-5

ISGATEC[®]
CONSULTING

Raum für Impulse
Überblick. Wissen. Transparenz.



DICHT!
Probeexemplar
sichern!

Anwendungsorientierter Wissenstransfer: Die Basis für Ihre Lösungen im Bereich Dichten. Kleben. Polymer. finden Sie hier:

- Fachmagazin DICHT!, DICHT!digital
- Newsletter [i] ISGATEC Impulse
- DICHTUNGSTECHNIK JAHRBÜCHER und weitere Fachliteratur

zu den Themen:

- statische Dichtungen,
- Formteile/Profile,
- dynamische Dichtsysteme,
- Flüssigdichtsysteme,
- Klebetechnik,
- Rohstoffe/Mischungen/Halbzeuge,
- Maschinen und Anlagen,
- Mess- und Prüftechnik,
- Dienstleistungen,
- Unternehmen/Markt.

www.isgatec.com > Medien

Kostenloses DICHT!-Probeexemplar anfordern
unter info@isgatec.com

ISGATEC[®]
MEDIEN

ISGATEC GmbH, Mannheim

Diejenigen Bezeichnungen von im Buch genannten Erzeugnissen, die zugleich eingetragene Warenzeichen sind, wurden nicht besonders kenntlich gemacht. Es kann also aus dem Fehlen der Markierung ® und TM nicht geschlossen werden, dass die Bezeichnung ein freier Warenname ist. Ebenso wenig ist zu entnehmen, ob Patente oder Gebrauchsmusterschutz vorliegen.

Autoren und Herausgeber haben alle Texte und Abbildungen mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Deshalb übernehmen weder Autoren noch Herausgeber irgendwelche Garantien für die in diesem Buch gegebenen Informationen. In keinem Fall haften Autoren oder Herausgeber für irgendwelche direkten oder indirekten Schäden, die aus der Anwendung dieser Informationen folgen.

Das Werk einschließlich der Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Die Verwendung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmung und Digitalisierung.

© 2018 ISGATEC GmbH, Mannheim

<http://www.isgatec.com>

Printed in Germany

Satz und Umschlaggestaltung: Büro für visuelle Kommunikation, Dipl.-Des. Rainer E. Rühl, Alsheim

Druck: Silber Druck oHG, Niestetal

DESMA

SmartFace

SmartTraining

SmartTrace

SmartRemain

SmartFocus

DESMA 4.0

**PRODUKTE UND PROZESSE
VERNETZEN.**

Nähere Informationen zu unseren Industrie 4.0
Produkten unter: www.smartconnect4u.biz



24/7

*Your experts in rubber and
silicone injection moulding.*

**SMART
CONNECT 4U[®]**

Inhalte

Das DICHTUNGSTECHNIK JAHRBUCH 2019 enthält 54 fundierte und praxisrelevante Fachbeiträge aus den Bereichen **Dichten. Kleben. Polymer.:**

- Trends/Dienstleistungen
- Rohstoffe/Mischungen/Halbzeuge
- Statische Dichtungen/Formteile/Profile
- Dynamische Dichtsysteme
- Flüssigdichtsysteme
- Klebtechnik
- Maschinen und Anlagen
- Messtechnik und Prüftechnik

Neben Grundlagen, Informationen über den Entwicklungsstand mit detaillierten Fachbeiträgen aus Wissenschaft und Praxis vermittelt das DICHTUNGSTECHNIK JAHRBUCH 2019 wertvolles Basiswissen, neue Forschungserkenntnisse und in der Praxis bewährte Lösungen. Jeder Fachbeitrag ist in sich geschlossen und beleuchtet unterschiedliche Aspekte. Wie zuvor haben wir die Artikel thematisch nach Produktgruppen und Bereichen gegliedert.

Die einzelnen Fachbeiträge geben branchenübergreifend Impulse und Lösungen für Ihre tägliche Arbeit und Entwicklungen. Das Standardwerk im Bereich Dichten. Kleben. Polymer. bietet einen guten Einblick in die verschiedenen Werkstoffe, Dicht- und Klebesysteme sowie deren vor- und nachgelagerten Prozessstufen.

Die Ergebnisse der großen ISGATEC-Umfrage „Das bewegt den Markt im Bereich Dichten. Kleben. Polymer.“ sind ebenfalls wieder enthalten.

Die Einschätzungen der in Summe mehr als 500 Experten bieten einen interessanten Blick in den Markt, die Trends und Herausforderungen. Hier sind alle Teilmfragen zusammengefasst, die wir in den letzten zwölf Monaten durchgeführt haben.

Die Jahrbuch-Reihe umfasst inzwischen 15 Ausgaben (DICHTUNGSTECHNIK JAHRBUCH 2004 bis 2019) mit über 750 Fachbeiträgen und insgesamt ca. 6.500 Seiten und ist damit eines der umfangreichsten und wichtigsten Nachschlagewerke für Ihre tägliche Arbeit im Bereich **Dichten. Kleben. Polymer.** quer durch alle Branchen.

Herausgeber

Sandra Kiefer und Karl-Friedrich Berger haben sich mit der ISGATEC GmbH auf das Gebiet der Dichtungs-, Klebe- und Polymertechnik spezialisiert. Sie bietet Raum für Lösungen und Perspektiven im Bereich Dichten. Kleben. Polymer. durch die Akademie (Seminare, Foren), Netzwerk (das Online-Portal www.isgatec.com), Medien (DICHT!, DICHTUNGSTECHNIK JAHRBUCH etc.), Consulting.

ISGATEC – Das Kompetenznetzwerk

Das Online-Portal unter www.isgatec.com bietet Wissenswertes für die Arbeit in diesem Bereich. Alle Fachartikel werden online über die ISGATEC Suchmaschine auf www.isgatec.com angezeigt und können angelesen werden.

ISBN: 978-3-946260-02-8

Weitere Bücher zum Thema:
www.isgatec.com

