

Silikon-Klebstoffe in industriellen Klebprozessen – was ist zu beachten?

Von der Materialauswahl bis zur qualitätssicheren Serienfertigung

Kleben ist heute in der industriellen Fertigung eine zentrale Füge-technologie – gleichwertig neben Schrauben, Schweißen oder Nieten und in vielen Applikationen diesen sogar überlegen. Gleichzeitig ist Kleben eine der am häufigsten unterschätzten Technologien: Wer einen Klebstoff lediglich als flüssige Schraube begreift, wird die Möglichkeiten dieser Verbindungstechnik ebenso wenig ausschöpfen, wie ihre Risiken beherrschen.

Ein prozesssicher eingesetzter Klebstoff setzt eine strukturierte Vorgehensweise voraus – von der Materialauswahl und Substratanalyse über die Qualifizierung des Prozesses bis hin zur Kontrolle in der laufenden Produktion. Dies wird nachfolgend anhand von Silikon-Klebstoffen beleuchtet, die aufgrund ihrer thermischen Beständigkeit, Flexibilität und Substratverträglichkeit in zahlreichen Industrien zu den bevorzugten Systemen zählen.

Warum Silikon-Klebstoffe?

Diese nehmen innerhalb der Klebstoffklassen eine Sonderstellung ein. Ihre anorganische Polysiloxan-Hauptkette verleiht ihnen eine Kombination aus Eigenschaften, die kein organisches Polymersystem in dieser Breite bietet. Dazu zählen:

- Dauerhafte Elastizität von –60 °C bis weit über +200 °C,
- hervorragende Witterungs- und UV-Beständigkeit,
- niedrige Oberflächenenergie sowie
- chemische Inertheit gegenüber einer Vielzahl von Medien.

Für Klebfachkräfte und Prozessverantwortliche bedeutet das konkret: Silikon-Klebstoffe können dort eingesetzt werden, wo organische Klebstoffe versagen – an heißen Motorbauteilen, in der Elektronik, an Glas- und Kunststofffügeteilen mit stark unterschied-



lichen Wärmeausdehnungskoeffizienten oder in Umgebungen mit hoher Feuchtigkeitsbelastung. Gleichzeitig stellen Silikone jedoch spezifische Anforderungen an Substratvorbehandlung und Prozessführung, die im Vergleich zu anderen Klebstoffklassen nicht unterschätzt werden dürfen.

Silikon-Klebstoffe lassen sich nach ihrem Vernetzungsmechanismus in zwei Hauptgruppen einteilen:

- Kondensationsvernetzende Systeme (RTV-1 und RTV-2) – sie härten durch Feuchtigkeit oder Katalysatormischung aus. Typische Abspaltprodukte sind Oxim, Essigsäure oder Alkohol.
- Additionsvernetzende Systeme (LSR, HTV) härten durch Platin-Katalyse unter Wärme. Sie haben keine Abspaltprodukte, sie schrumpfen nicht und sind ideal für präzise Formteile und medizintechnische Anwendungen.

Für die meisten industriellen Klebprozesse sind kondensationsvernetzende RTV-Silikone die erste Wahl. Sie sind bei Raumtemperatur verarbeitbar, in der 1K-Variante (RTV-1) lagerstabil und vielseitig formulierbar. Additionsvernetzende Systeme ergänzen das Port-

folio dort, wo Rückstandsfreiheit, enge Toleranzen oder Biokompatibilität gefordert sind.

Beratung und Systemauswahl

Die Qualität eines Klebprozesses entscheidet sich nicht am Dosierkopf, sondern lange davor – bei der strukturierten Analyse von Substrat, Belastung der Klebung und Prozessumgebung. Eine sorgfältige Beratungsphase ist die Investition, die teure Fehlentscheidungen in der Serienfertigung verhindert.

Substratanalyse

Der erste Schritt jeder Systemauswahl ist die genaue Kenntnis der Fügepartner. Relevante Fragen sind:

- Aus welchem Material bestehen die Substrate?
- Welche Oberflächenenergien und -topografien liegen vor?
- Sind Trennmittel, Korrosionsschutzöle oder Beschichtungen vorhanden?
- Wie verhalten sich die Substrate unter thermischer und mechanischer Betriebslast?

Praxistipp: Silikonhaltige Trennmittel, Öle oder Schmierstoffe auf dem Substrat schließen eine zuverlässige Haftung nahezu aus. Selbst kleinst-

Interessant für
alle Branchen

Weitere Informationen
OTTO-CHEMIE
www.otto-chemie.de

 **Zum Lösungspartner**

 Markus Falter
Business Development Manager

Kontaminationen – etwa durch Fingerabdrücke oder Aerosole aus benachbarten Prozessen – können die Adhäsion dauerhaft kompromittieren. Die Identifikation und Beseitigung solcher Kontaminationsquellen ist daher Grundvoraussetzung für jeden Silikon-Klebprozess.

Lastenheft und Klebstoffauswahl

Auf Basis der Substratanalyse wird ein Lastenheft für den Klebstoff erstellt. Wesentliche Parameter sind:

- geforderte Temperaturbeständigkeit (Dauer- und Spitzentemperatur),
- mechanische Belastungsart (Schäl-, Zug-, Schub- oder Schwingbelastung),
- Medienbeständigkeit,
- elektrische Anforderungen (Dielektrizität, Kriechstromfestigkeit),
- Emissionsanforderungen sowie regulatorische Bedingungen (REACH, RoHS, Lebensmittelkontakt, Medizintechnik).

Silikon-Klebstoffe decken ein breites Spektrum dieser Anforderungen ab. Die Systemauswahl folgt dabei einer klaren Logik:

- RTV-1-Kondensation (Alkoxy) – Universaleinsatz, neutrales Abspaltprodukt, SVHC-frei, hervorragende Metallhaftung – Standardwahl für Elektronik, HLK und Automotive.
- RTV-2-Kondensation (Alkoxy) – Universaleinsatz, neutrales Abspaltprodukt, SVHC-frei, hervorragende Metallhaftung, schnelle Zykluszeiten und hohe Schichtdicken möglich – Standardwahl für Elektronik, HLK und Automotive.
- RTV-2-Addition (platinkatalysiert) – wenn Rückstandsfreiheit, enge Maßtoleranzen oder Biokompatibilität nach ISO 10993 gefordert sind.
- Hochtemperatur-RTV (> 250 °C Dauertemperatur) – Spezialformulierungen für Motorenbau, Abgassysteme und Industrieöfen.

Substratvorbehandlung

Kein Klebstoff kompensiert eine unzureichend vorbereitete Oberfläche. Die Substratvorbehandlung ist die am meisten vernachlässigte Phase im Klebprozess – und die häufigste Ursache für Versagen im Feld.

Reinigung

Metallische Substrate werden in der Regel durch Entfettung mit Isopropanol, Aceton oder speziellen Industriereinigern vorbereitet. Wichtig ist dabei die Wischrichtung – immer in eine Richtung, nie kreisförmig, da sonst Kontaminationen lediglich umverteilt werden.

Für RTV-2-Addition Silikon-Klebstoffe sind chlorhaltige Reiniger zu vermeiden, da Chlor-

rückstände additionsvernetzende Systeme inhibieren können.

Kunststoffoberflächen – insbesondere Polyolefine wie PP und PE sowie fluorierte Polymere wie PTFE – weisen von Natur aus eine sehr niedrige Oberflächenenergie auf. Eine alleinige Lösemittelreinigung ist hier nicht ausreichend. Es sind aktivierende Vorbehandlungsverfahren erforderlich.

Aktivierung und Primer

Zur Aktivierung niedrigerenergetischer oder chemisch inerte Oberflächen stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Flammenbehandlung und Coronaentladung eignen sich für flächige Kunststoffteile und erhöhen die Oberflächenenergie durch Oxidation dauerhaft, sofern die Klebung innerhalb des Aktivierungsfensters (typisch 24 bis 72 h) erfolgt. Plasmabehandlung – atmosphärisch oder im Niederdruck – ist die präziseste Methode und ermöglicht auch die gezielte Beschichtung komplexer Geometrien.

Silanhaftvermittler (Primer) sind für Silikon-Klebstoffe auf vielen Substraten unverzichtbar. Amino- und Epoxysilane verbessern die Haftung auf Metallen und Glas erheblich. Vinylsilane werden für additionsvernetzende Systeme eingesetzt. Entscheidend ist die korrekte Primerauftragsmenge. Zu wenig Primer bietet keine Haftwirkung, zu viel bildet eine kohäsionsschwache Zwischenschicht. Empfohlen werden Filmdicken von 0,1 bis 1 µm, aufgetragen durch Wischen, Sprühen oder Tauchen.

Praxistipp für den Umgang mit Silikon-Klebstoffen: Silikonoberflächen selbst – etwa bereits ausgehärtete Dichtraupen oder Silikonformteile – sind für die meisten Klebstoffe schwierig zu benetzen. Hier sind Spezialprimer auf Basis von reaktiven Silanen oder eine Plasmaaktivierung erforderlich, um eine belastbare Klebverbindung herzustellen.

Qualifizierung des Klebprozesses

Das ist der formale Nachweis, dass der Prozess unter definierten Bedingungen reproduzierbar Klebverbindungen mit den geforderten Eigenschaften erzeugt. Sie ist nicht optional – sie ist die Grundlage für die Serienfreigabe und in vielen Branchen wie Automotive, Luftfahrt und Medizintechnik regulatorische Voraussetzung.

Prüfprogramm und Prüfparameter

Das Prüfprogramm orientiert sich am Lastenheft und umfasst in der Regel:

- Zugscherfestigkeit und Schälhaftigkeit am Fügepaar (nach DIN EN 1465 und DIN EN 28510),

- Bruchbild-Auswertung (Kohäsions- vs. Adhäsionsbruch),
- Klimawechselprüfungen (Temperatur-Feuchte-Wechsel nach DIN EN 60068),
- Wärmelagerungs- und Kälteprüfungen sowie medienspezifische Alterungsprüfungen (Öl, Kraftstoff, Kühlmittel).

Praxistipp: Für Silikon-Klebstoffe gilt: Ein Kohäsionsbruch – das heißt, der Bruch verläuft im Klebstoff selbst, nicht an der Grenzfläche – ist das Qualitätsmerkmal einer gut haftenden Klebverbindung. Ein Adhäsionsbruch an der Substratgrenzfläche ist dagegen ein klares Signal für unzureichende Oberflächenvorbereitung oder falsche Primerwahl und muss als Prozessversagen gewertet werden.

Inhibierungsrisiken bei

RTV-2-Addition-Silikon-Systemen

Ein prozessspezifisches Risiko bei additionsvernetzenden Silikon-Systemen ist die Inhibierung. Einige Substanzen blockieren den Platinkatalysator und verhindern die Aushärtung vollständig oder partiell. Zu den häufigen Inhibitoren zählen schwefelhaltige Verbindungen (z. B. Vulkanisationshilfsmittel, ausgewählte Gummiqualitäten), zinnorganische Verbindungen (relevant bei benachbarten kondensationsvernetzenden Silikon-Systemen), Stickstoff- und Aminverbindungen (z. B. aus Polyurethan-Schäumen oder Epoxid-Härtern) sowie bestimmte Löse- und Reinigungsmittel.

Im Qualifizierungsprozess muss die Inhibierungsfreiheit aller Substrat- und Prozessmaterialien systematisch nachgewiesen werden.

Praxistipp für einen Vortest: Ein kleiner Klebstoffauftrag wird direkt auf dem Substrat oder dem Prozessmaterial beobachtet – bleibt die Oberfläche nach der erwarteten Aushärtezeit klebrig oder bleibt das Material flüssig, liegt eine Inhibierung vor.

Prozessdokumentation und Freigabe

Das Ergebnis der Qualifizierung ist ein dokumentierter Prozessstandard: Substratspezifikation, Reinigungsmittel und -verfahren, Primersystem und Auftragsmenge, Klebstoffsystem mit Chargennummer, Applikationsparameter (Raupengeometrie, Auftragsmenge, Fugentiefe), Aushärtebedingungen sowie Prüfumfang und Freigabekriterien werden dokumentiert. Dieser Standard ist verbindliche Arbeitsgrundlage für die Serienfertigung – Abweichungen erfordern eine erneute Teilqualifizierung.

Prozessphase	Aufgabe / Ziel	Silikon-spezifische Besonderheiten
Beratung und Auswahl	Klebstoffsystem und Substratkompatibilität festlegen	Vernetzungstyp (RTV-1 / RTV-2, Addition / Kondensation), Abspaltprodukt, Shore-Härte, Temperaturanforderung definieren.
Substratvorbereitung	Oberfläche reinigen, aktivieren, ggf. primern	Silikonoberflächen erfordern Spezialprimer oder Plasmaaktivierung Silikon-Trennmittelrückstände schließen Direkthaftung aus
Qualifizierung	Prozess- und Produktfreigabe erarbeiten	Klimawechseltests, Alterungsprüfungen, Schälfestigkeit, Kohäsions- vs. Adhäsionsbruch, OEM-Freigabeproofungen nach Branchenstandard
Applikationstechnik	Dosier-, Misch- und Auftragssystem auslegen	Viskosität, Thixotropie und Topfzeit bestimmen Systemwahl: Kartuschen, Fässer, 2K-Mischköpfe, Raupen- oder Flächenauftrag.
Aushärtung	Vernetzung sicherstellen und kontrollieren	Feuchtigkeitsabhängigkeit (RTV-1), Mischverhältnis-Kontrolle (RTV-2), Inhibierung durch Schwefel, Zinn oder Amine vermeiden.
Serienüberwachung	Prozessstabilität und Produktqualität sichern	Raupengeometrie, Auftragsmenge, Hautbildungszeit und Shore-Härte als Inline-Prüfparameter; SPC-Auswertung empfohlen

Tab. 1: Phasen des industriellen Klebprozesses mit silikon-spezifischen Besonderheiten, RTV = Room Temperature Vulcanizing | SPC = Statistical Process Control
(Quelle: OTTO-CHEMIE)

Applikationstechnik

Die Auswahl des richtigen Dosiersystems ist keine Detailfrage, sondern eine prozessentscheidende Festlegung. Falsch ausgewählte oder schlecht eingestellte Dosiertechnik ist eine der häufigsten Ursachen für Schwankungen in der Klebstoff-Auftragsmenge und damit für mangelhafte Verbindungsfestigkeit.

1K-RTV-1-Systeme

RTV-1-Silikone werden überwiegend aus Kartuschen (310 ml) oder Beuteln/Hobbocks (bis 600 ml) über pneumatische oder elektrische Kartuschenpistolen appliziert. Für die Serienfertigung stehen Fassdruckanlagen mit Folgeplatte (5- bis 200-l-Gebinde) zur Verfügung, die eine konstante Materialversorgung ohne Gebindewechsel-Unterbrechung sicherstellen. Düsengeometrie und Vordruck bestimmen maßgeblich Raupenbreite und Auftragsmenge. Beide Parameter sind im Prozessstandard zu verankern und regelmäßig zu überprüfen.

Silikon-Klebstoffe sind häufig thixotrop formuliert. Im Ruhezustand sind sie hochviskos und standfest, unter Scherbeanspruchung (Dosieren) werden sie fließfähig. Dieses Verhalten ist für den Dosierprozess vorteilhaft.

Nach dem Auftrag behält die Raupe ihre Form. Dies erfordert aber eine sorgfältige Abstimmung von Druck, Düsengeometrie und Fahrgeschwindigkeit beim Roboterantrag.

2K-RTV-2-Systeme

Diese werden über 2K-Dosieranlagen mit statischen oder dynamischen Mischern verarbeitet. Das Mischungsverhältnis – typisch 1:1 bis 10:1 (A- zu B-Komponente) – muss dauerhaft präzise eingehalten werden, da Abweichungen direkt die Vernetzungsqualität und damit die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung beeinflussen. Moderne Dosieranlagen überwachen das Verhältnis kontinuierlich und erzeugen bei Abweichung einen Prozessalarm.

Praxistipp: Ein häufiger Fehler ist der Einsatz von zu kurzen oder zu langen statischen Mixern. Zu kurze Mischer liefern ein inhomogenes Gemisch mit partiell unvollständiger Vernetzung. Zu lange Mischer erhöhen unnötig den Druckabfall und das Totvolumen. Für jedes RTV-2-System empfiehlt der jeweilige Klebstoffhersteller einen qualifizierten Mischertyp – diese Empfehlung ist im Prozessstandard verbindlich zu hinterlegen.

Aushärtung und Handhabungsfestigkeit

Kondensationsvernetzende RTV-1-Silikone härten feuchtigkeitsinitiiert aus. Die Hautbildungszeit – also der Zeitraum, bis die Oberfläche nicht mehr klebrig ist – beträgt je nach Formulierung und Umgebungsbedingungen 5 bis 60 min. Die Durchhärtung erfolgt von außen nach innen. Bei Schichtdicken > 3 mm kann die vollständige Vernetzung mehrere Stunden bis Tage dauern. In der Serienfertigung ist daher zu klären, wann die Klebverbindung erstmals belastet werden darf (Handhabungsfestigkeit) und wann die Eeigenschaft erreicht ist.

Für additionsvernetzende Systeme lässt sich die Aushärtezeit durch Temperaturerhöhung gezielt verkürzen. Eine Wärmebehandlung bei 80 bis 120 °C für 30 bis 60 min bringt die meisten Systeme auf > 90 % der Endfestigkeit. Dies ist in Fertigungslinien mit definierten Taktzeiten ein entscheidender Vorteil gegenüber feuchtigkeithärtenden Systemen.

Serienüberwachung und Qualitätssicherung

Mit der Serienfreigabe ist die Arbeit am Klebprozess (Tab. 1) nicht abgeschlossen – sie be-

ginnt in einer neuen Dimension. Die Klebverbindung wirkt als unsichtbares Fügeelement. Anders als Schraubverbindungen kann sie nicht nachgezogen und anders als Schweißnähte nicht zerstörungsfrei geprüft werden. Die serienbegleitende Qualitätssicherung muss daher auf die Beherrschung und Überwachung der Prozesse ausgerichtet sein, anstatt lediglich auf Fehler zu reagieren.

Bewährte Inline-Parameter für Silikon-Kleprozesse sind:

- Raupengeometrie und -position (kamerabasierte Auftragskontrolle, 100 % inline möglich)
- Auftragsmenge (gravimetrisch oder volumetrisch, stichprobenartig)
- Hautbildungszeit als Indikator für Klebstoffqualität und Umgebungsbedingungen
- Shore-A-Härte an Prüftafeln aus dem Serienmaterial (täglich oder chargenbezogen)
- Mischungsverhältnis-Kontrolle bei 2K-Systemen (anlageninterne Überwachung)

Zusätzlich empfiehlt sich eine periodische Validierung durch zerstörende Prüfung am Fügepaar. Schäl- oder Zugscherproben aus der laufenden Produktion – mindestens wöchentlich oder bei jedem Rohstoffchargenwechsel – liefern die notwendige Sicherheit, dass der qualifizierte Prozesszustand erhalten geblieben ist.

Treten im Serienbetrieb Aushärtestörungen auf – klebrige Oberflächen, partiell weiche Zonen, unvollständige Haftung –, ist systematisch nach den Ursachen zu suchen. Das können beispielsweise sein:

- Inhibierung durch neue Materialien,
- Änderungen in der Substratoberfläche,
- abgelaufene Lagerzeiten,
- falsch eingestellte Dosieranlagen oder
- veränderte Klimabedingungen (Temperatur < 10 °C oder relative Luftfeuchte < 30 % verlangsamen die Kondensationsvernetzung erheblich).

Besondere Herausforderungen bei Silikon-Klebstoffen

Silikon auf Silikon

Das Fügen von Silikon auf Silikon – etwa beim Ankleben eines Silikonformteils an eine bereits ausgehärtete Silikondichtung – ist prozessseitig anspruchsvoll. Die niedrige Oberflächenenergie ausgehärteter Silikone erschwert die Benetzung durch flüssige Klebstoffe erheblich. Bewährte Lösungsansätze sind:

- atmosphärische Plasmaaktivierung der Klebfläche,
- Einsatz von Silan-Primern auf Vinylbasis sowie
- additionsvernetzende Systeme mit selbsthaftender Formulierung.

Die Haftfestigkeit bleibt auch bei optimaler Vorbereitung in der Regel deutlich unterhalb der Kohäsionsfestigkeit des Silikons selbst.

Kriechneigung und Langzeitverhalten

Silikon-Klebstoffe weisen aufgrund ihrer elastomeren Natur eine ausgeprägte Kriechneigung unter dauerhafter statischer Last auf. Dies schließt Silikone für hochbelastete Strukturklebungen (z. B. lasttragende Metall-Metall-Verbindungen) weitgehend aus. Ihr Einsatzgebiet umfasst elastisch-dichtende Verbindungen, die Schwingungskopplung sowie Anwendungen, bei denen die Verformbarkeit der Klebschicht gefordert ist, nicht jedoch solche, bei denen Steifigkeit und hohe Festigkeit im Vordergrund stehen. Im Lastenheft muss diese Grenze klar definiert sein.

Kontamination der Fertigungsumgebung

Ausgehärtetes Silikon setzt durch Abrieb oder Ausgasung niedermolekulare zyklische Siloxane frei (typisch D4, D5, D6). Diese Verbindungen können sich auf benachbarte Substrate ablagern und dort die Haftung nachfolgender Beschichtungen oder Klebstoffe dauerhaft beeinträchtigen – ein Phänomen, das in der Lackiertechnik als Silikon-Kontamination bekannt und gefürchtet ist. In gemischten Fertigungsumgebungen – etwa, wenn Silikondichtstoffe neben Lackierprozessen oder Schweißarbeiten eingesetzt werden – sind räumliche Trennung und geregelte Prozessfolgen zwingend erforderlich.

Fazit

Ein industrieller Klebprozess mit Silikon-Klebstoffen ist weit mehr als das Aufbringen eines Materials aus einer Kartusche. Er ist ein strukturierter, qualifizierter und überwachter Prozess – von der Substratanalyse und Systemauswahl über die Oberflächenvorbereitung und Prozessqualifizierung bis zur Serienüberwachung.

Silikon-Klebstoffe bieten in diesem Rahmen ein einzigartiges Leistungsprofil. Thermische Beständigkeit, dauerhafte Elastizität, breite Substratverträglichkeit und – in alkoxy-vernetzter, zinnfreier Formulierung – ein regulatorisch unkritisches Profil, das den Anforderungen moderner Industrien gerecht wird. Ihre spezifischen Herausforderungen – Inhibierungsrisiken, Kriechneigung, Silikon-Kontamination – sind beherrschbar, wenn sie von Anfang an in der Prozessplanung berücksichtigt werden.

Die Erfahrung zeigt: Wer frühzeitig in Beratung, Qualifizierung und Prozesstechnik investiert, spart in der Serienfertigung vielfach mehr – an Ausschuss, Nacharbeit und Feldausfällen. Technologisch kompetente Beratung und ein strukturiertes Qualifizierungsvorgehen sind deshalb keine optionalen Leistungen, sondern integraler Bestandteil eines professionellen Klebprozesses.

Literatur zu diesem Thema

- [1] Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6. Auflage, Springer Vieweg, Berlin/Heidelberg 2009.
- [2] DVS/EWF Merkblatt 3305: Qualifizierung von Klebprozessen – Anforderungen und Prüfverfahren. DVS Media, Düsseldorf, aktuelle Fassung.
- [3] DIN 2304-1: Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse – Teil 1: Prozesskette Kleben. Beuth Verlag, Berlin, aktuelle Fassung.
- [4] OTTO-CHEMIE, Hermann Otto GmbH: Produktdatenblätter und technische Merkblätter zu RTV-1- und RTV-2-Silikonklebstoffen. Fridolfing, aktuelle Ausgaben. Online verfügbar: otto-chemie.de.
- [5] Europäische Chemikalienagentur (ECHA): SVHC-Kandidatenliste gemäß Artikel 59 der REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, aktuelle Fassung. Helsinki 2025. Online verfügbar: echa.europa.eu.