

Den Werkstoff-Balanceakt meistern

Thermomanagement bei batteriebetriebenen E-Fahrzeugen

AUTOMOTIVE, ELEKTRONIK Im Mobilitätssektor vollzieht sich der Wandel vom Verbrennungsmotor zum Elektroantrieb. Die Hersteller neuer Mobilitätsanwendungen stehen hier vor unzähligen Herausforderungen, die sowohl die Konstruktion von Teilen und Komponenten als auch deren Funktionalität betreffen. Bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen spielt das Thermomanagement eine entscheidende Rolle, da bestimmte Umstände zu „thermischem Durchgehen“ führen und letztendlich auch ein ernsthaftes Sicherheitsrisiko darstellen könnten. Kurz gesagt: Werkstoffe und Bauteile, die früher als Standardprodukte galten, erweisen sich heute als ungeeignet. Dieser Umstand macht Zusammenarbeit, gemeinsame Entwicklungsprojekte und detailliertes Know-how im Bereich moderne Werkstoffe unerlässlich.

Entscheidend ist, wie Batterien abgedichtet werden. Daher liegt ein Hauptaugenmerk auf der Entwicklung wärmeleitfähiger Werkstoffe aus verschiedenen Polymeren. Es geht darum, mit den potenziellen Anforderungen in Zusammenhang mit diesen neuen Technologien und mit den Märkten von morgen Schritt zu halten. Gleichzeitig müssen die Standardeigenschaften von Gummidichtungen, darunter etwa deren physikalische Eigenschaften sowie deren Wärme- oder Chemikalienbeständigkeit, allerhöchsten Anforderungen genügen. Nachfolgend stehen die spezifischen Herausforderungen beim Thermomanagement von Batterien im Fokus. Moderne Entwicklungskonzepte im Bereich Wärmeleitmaterialien (TIM, Thermal Interface Materials) sowie Prüfverfahren und Analysen erlauben dabei den nahtlosen Übergang von technologischen Altsystemen zu bedeutsamen neuen Mobilitätsanwendungen.

Immer strengere CO₂-Vorschriften in der EU sowie der steigende Vernetzungsbedarf der Kunden in Form von z.B. Sharing-Mobility-Modellen, haben den Trend hin zu



Von Dr. Hediyyeh Zahabi,
Manager Material Development



Zum Lösungspartner



und Dr. Jakub Kadlcak, Head of Material
Development Mobility and General Industry



Weiterführende Informationen

Dätwyler AG |
www.datwyler.com

neuen, aufstrebenden Mobilitätskonzepten erheblich verstärkt. Dies zeigt sich u.a. bei Themen wie autonomes Fahren und Elektrifizierung.

Um die Anwendungsherausforderungen in Sachen neue Mobilität und Systeme der Zukunft zu meistern, kommen wärmeleitfähige Materialien auf Basis verschiedener Polymere zum Einsatz. Auf dieser Basis sollen die für die neuen Technologien und Märkte prognostizierten Anforderungen erfüllt und gleichzeitig Standardeigenschaften von Gummidichtungen, wie etwa deren physikalische Eigenschaften sowie Hitze- oder Chemikalienbeständigkeit, beibehalten werden.

Zielsetzung des ETEMI™-Projekts (Electrically and Thermally Conductive and Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Materials – elektrisch und thermisch leitfähige Materialien zur Abschirmung elektromagnetischer Interferenzen (EMI)) ist die Entwicklung einer Werkstoffmatrix für neue Mobilitätsanwendungen. Die Palette der Werkstoffe beinhaltet herkömmliche Elastomere, Flüssigsilikon (LSR) und Thermoplaste, wobei alle Projektphasen – von der Entwicklung und Konstruktion bis hin zu den Tests und dem Einstieg in die Serienproduktion – umfassend unternehmensintern unterstützt wurden.

Mit dem Start des Projekts ETEMI™ im Jahr 2020 soll sichergestellt werden, dass Kunden von Hybrid- und batterieelektrischen Fahrzeugen die gesamte Palette systemkritischer Dichtungskomponenten mit erweiterten Funktionalitäten zur Verfügung gestellt werden kann. Dazu zählt z.B. die Abdichtung der Batterie mit wärmeleitenden Elastomermaterialien zur Erzielung struktureller Stabilität, zum Schutz vor Umgebungseinflüssen und zur Unterstützung der Wärmeübertragung von der Batterie.

Mit diesem Projekt will man außerdem weitere Fortschritte in einer Reihe anderer Bereiche erzielen, darunter das Mischen von Spezialverbindungen in hauseigenen Mischanlagen mit speziell entwickelten Mischprogrammen sowie die Fähigkeit zur umfassenden Analyse und Testung neuer Werkstoffe.

Herausforderungen beim Thermomanagement von Batterien

Die Temperaturregulierung der Batterie ist unverzichtbar, um durchgehend deren optimale Funktion sicherzustellen. Batterieleistung und -temperatur sind zudem untrennbar miteinander verbunden. So wirkt sich die Temperatur u.a. auf die Ladezeit, auf die Fähigkeit zur Erhaltung der Kapazität sowie auf den Zustand und die Gesamtleistung der Batterie aus. Gleichzeitig ist die Temperaturregulierung sehr wichtig für die Sicherheit der Fahrzeuginsassen, die aufgrund eines möglichen „thermischen Durchgehens“ gefährdet werden könnten.

Um Batterien abzudichten und ihren Temperaturbereich möglichst stabil zu halten, sind verschiedene Dichtungen mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit erforderlich, die eine effektive Wärmeübertragung und -ableitung unterstützen. Der Einsatz spezieller Füllstoffe (aus nicht-kohlenstoffhaltigen Substanzen) bei herkömmlichen Elastomeren kann deren Wärmeleitfähigkeit verbessern und ihr elektrisches Isolationsvermögen aufrechterhalten. Eine höhere Wärmeleitfähigkeit führt zu einer besseren Wärmeregulierung. Reiner Gummi weist eine Wärmeleitfähigkeit von rd. $0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ auf. Wärmeleitfähiger Füllstoff weist eine Wärmeleitfähigkeit von $> 1,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ auf. Die Industrienorm für wärmeleitfähige Elastomermischungen liegt bei rd. $0,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Eine der Herausforderungen bei der Entwicklung wärmeleitfähiger, jedoch elektrisch isolierender Elastomere besteht darin, Härte und Dichte des Werkstoffs gering zu halten. Je höher der Füllstoffgehalt, desto höher ist im Optimalfall die Wärmeleitfähigkeit. Durch den hohen Füllstoffgehalt erhöhen sich jedoch auch Härte und Dichte des Elastomers. Die hohe Härte des Elastomers kann je nach Anwendung dessen Dichtleistung beeinträchtigen. Die hohe Dichte des Elastomers wiederum läuft dem Ziel der Gewichtsreduzierung entgegen, die beim neuen Mobilitätstrend angestrebt wird.

Infolgedessen gilt es, Elastomerverbindungen mit hoher Wärmeleitfähigkeit zu entwickeln, wobei Härte und Dichte des Elastomers möglichst gering bleiben müssen. Es gibt verschiedene Arten von Wärmeleitmaterialien. Zu diesen zählen z.B. herkömmliche „feste“ Gummimischungen, Schaumstoffe, Kunstharze, Klebstoffe usw. Diese Materialien können u.a. im Form-in-Place-Verfahren (Schaumstoffe, Klebstoffe, Kunstharze und allgemein wärmehärtende Materialien) und in Form von eigenständigen Dichtungen (Gummimischungen) verarbeitet werden.

Gewichtsreduzierung

Verkleinerung und kompakte Bauweise zählen zu den Hauptzielen der Automobilzulieferer, um bei den Massnahmen zur Emissionsreduzierung eine führende Rolle einnehmen zu können.

Bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen ist die Reduzierung des Gewichts enorm wichtig. Jede Gewichtseinsparung birgt das Potenzial einer Effizienz- und Reichweitensteigerung. Die dynamische Entwicklung des Elektrofahrzeugmarktes kommt nicht zuletzt der Umwelt zugute. Und auch der geringere Materialeinsatz wird sich in dieser Hinsicht positiv auswirken.

Im Sinne eines solchen Ansatzes konzentriert man sich hier auf Lösungen, bei denen bereits in der frühen Entwicklungsphase eine Gewichtsreduzierung realisiert wird. Durch die Entwicklung von Werkstoffen mit einer – im Vergleich zu derzeit auf dem Markt erhältlichen Produkten – geringeren Dichte trägt man zusätzlich zur Gewichtsreduzierung von Fertigerzeugnissen in den Lieferketten der Automobilindustrie bei.

Langlebigkeit der Werkstoffe

Thermische Alterung

Ein wichtiger, auch in der Simulationsphase zu kontrollierender Parameter ist die thermische Alterung. Die Werkstoffe werden bei höchsten Temperaturen (bis zu 150 °C) und bei tiefsten Temperaturen (bis zu -40 °C) getestet – wenngleich in der Praxis der tatsächliche durchschnittliche Betriebsbereich bei rund 60 °C liegt. Daher ist es nicht notwendig, Werkstoffe zu verwenden, die Temperaturen bis zu 250 °C widerstehen. Jedoch müssen sie bei hohen und niedrigeren Temperaturen eine garantiert einwandfreie Funktionalität bieten, und dies ohne jeglichen Verfall.

Feuerbeständigkeit

Auch die Feuerbeständigkeit muss bei der Entwicklung von Lösungen im Bereich Thermomanagement berücksichtigt werden. Da die Brandgefahr zu den wichtigsten Sicherheitsaspekten bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen zählt, haben die zu entwickelnden Werkstoffe bestimmte Anforderungen an die Feuerbeständigkeit zu erfüllen. Hier geht man davon aus, dass für die Mehrzahl der für Elektrofahrzeuge verwendeten Werkstoffe bestimmte Anforderungen an die Feuerbeständigkeit gelten. Die bisher meistbeachtete Norm in diesem Bereich ist offenbar UL94. Die UL94 beschreibt Prüfungen zur Brennbarkeit von Polymermaterialien für Teile in Geräten und Anwendungen. Sie sollen als vorläufiger Hinweis auf ihre Eignung hinsichtlich der Brennbarkeit für eine bestimmte Anwendung dienen. Die Klassifizierung ist wie folgt definiert:

- HB: Langsames Brennen einer horizontal eingespannten Probe. Brenngeschwindigkeit < 76 mm/min bei Dicke < 3 mm oder Abbruch des Brennvorgangs vor 100 mm.
- V-2: Verlöschen einer vertikal eingespannten Probe innerhalb von 30 s. Das Herabtropfen von brennenden Partikeln ist zulässig.
- V-1: Verlöschen einer vertikal eingespannten Probe innerhalb von 30 s. Das Herabtropfen von brennenden Partikeln ist zulässig, solange sie nicht entzündet sind.
- V-0: Verlöschen einer vertikal eingespannten Probe innerhalb von 10 s. Das Herabtropfen von brennenden Partikeln ist zulässig, solange sie nicht entzündet sind.
- 5VB: Verlöschen einer vertikal eingespannten Probe innerhalb von 60 s. Kein Herabtropfen zulässig. Bildung von Brandlöchern in der Werkstoffprobe zulässig.

- 5VA: Verlöschen einer vertikal eingespannten Probe innerhalb von 60 s. Kein Herab-tropfen zulässig. Bildung von Brandlöchern in der Werkstoffprobe nicht zulässig.

Diese Voraussetzungen sind bei der Werkstoffentwicklung zu berücksichtigen. Ein Projekt befasst sich aktuell mit der Entwicklung feuerfester Werkstoffe, bei denen die Einhaltung der Kriterien der Klasse V-0 im Mittelpunkt steht und die Zusammensetzung der Rezepturen zudem halogenfrei sein muss.

Überblick über die Entwicklung eigenständiger Dichtungen und deren Vorteile

Zwecks Abdichtung des Batteriegehäuses kommen i.d.R. lose Dichtungen, Cure-in-Place- (CIP) oder Form-in-Place-Lösungen (FIP) zum Einsatz. Diese sind zwar durchaus effektiv, unterliegen jedoch gewissen Einschränkungen. So etwa können CIP-Dichtungen nach ihrer Fixierung nicht mehr geöffnet werden, ohne das Batteriesystem zu zerstören. FIP-Dichtungen können im Gegensatz dazu geöffnet werden, weisen allerdings keine optimale Lebensdauer auf, da sie separate Elastomer-Komponenten erfordern, die permanent mit dem Gehäusemetall verbunden sind.

Deshalb wurde für diese Dichtstelle eine faltbare Dichtung entwickelt. Sie besteht aus hochwertigen Elastomer-Werkstoffen mit definiert eingefügten Metallplatten. Die Dichtung kann den Teilegeometrien entsprechend spezifiziert und eingesetzt werden. Mithilfe dieser Kombination kann die Batterie für Recycling-Zwecke bzw. im Rahmen eventuell erforderlicher Reparaturen oder Wartungsarbeiten beschadigungsfrei geöffnet werden. Dies ist nur einer der vielen Vorteile. Faltbare Dichtungen sowie die Fertigungstechnologie bieten darüber hinaus eine einfache Handhabung und die Möglichkeit des Versands sehr großer Teile. Dabei gibt es grundsätzlich keine Beschränkungen in puncto Abmessungen. Dichtung und Gehäuse bilden hier eine integrierte „Einheit“, um Einbaufehler zu minimieren.

Diese Zuverlässigkeit beim Einbau ist ausschlaggebend für die Überlegenheit gegenüber losen, manuell zu installierenden Dichtungen. Jeder manuelle Einbau birgt das Risiko menschlichen Versagens und mangelnder Präzision. CIP- und FIP-Dichtungs-lösungen auf Silikonbasis werden zwar in automatischen Prozessen eingesetzt, sind aber noch schwieriger präzise zu platzieren, da die für das Aushärten erforderliche Zeit von den jeweiligen Umgebungsbedingungen abhängt.

Bei der faltbaren Dichtungen ermöglichen die Metallteile mit integrierter Halterung gemäß OEM-Spezifikation eine sehr präzise robotergestützte Installation seitens der OEM oder der Batteriehersteller. Der Wegfall des manuellen Einbaus spart Zeit und

verbessert die Produktionseffizienz auf Seiten der Batteriehersteller. Basierend auf der internen Fachkompetenz im Werkstoffbereich kann eine ausgesprochen starke Haftung zwischen Metall und Elastomer gewährleistet werden. Die hausinterne Technologie stellt sicher, dass die Kombination aus Metall und Elastomer als Einheit funktioniert. Die Metallelemente der faltbaren Dichtung lassen sich auch zwischen Gehäuse und Deckel der Batterie positionieren, sodass die elektrische Leitfähigkeit bessere Werte im Vergleich zu losen Dichtungen sowie CIP- oder FIP-Alternativen erzielt.

Experimentelle Verfahren

Überblick über Wärmeleitmaterialien

Bei Wärmeleitmaterialien (TIM, Thermal Interface Materials) handelt es sich um Basis-komponenten, die beim Thermomanagement batteriebetriebener Elektrofahrzeuge zum Einsatz kommen. Sie werden zwischen den Batteriezellen und den Kühlkomponenten eingesetzt. Ihre Aufgabe ist es, überschüssige Wärme von den Batteriezellen abzuführen. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der TIM wird eine maximale Wärmeableitung zwischen den warmen und kalten Oberflächen der Batterie erzielt. Dies ist entscheidend, um die Funktionalität der Batterie zu verbessern, ihre Lebensdauer zu verlängern und ein „thermisches Durchgehen“ zu verhindern.

Wärmeleitmaterialien sind üblicherweise Verbundwerkstoffe, die u.a. aus einer Polymermatrix sowie aus wärmeleitfähigen Füllstoffpartikeln aus Metall, Keramik oder kohlenstoffhaltigen Materialien bestehen. In **Tab. 1** sind häufig genutzte wärmeleit-

Füllstoff	Kategorie	Wärmeleitfähigkeit (W/(m·K))
Aluminium	Metall	234
Kupfer	Metall	386
Silber	Metall	427
Kohlenstoffnanoröhren (CNT)	Kohlenstoff	1.000 - 4.000
Kohlefaser	Kohlenstoff	300 - 1.000
Graphen	Kohlenstoff	2.000 - 6.000
Graphit	Kohlenstoff	100 - 400
β -Siliciumnitrid (β -Si ₃ N ₄)	Keramik	103 - 200
Hexagonales Bornitrid (h-BN)	Keramik	185 - 300
Aluminiumnitrid (AlN)	Keramik	100 - 300
Diamant	Keramik	1.000
β -Siliciumcarbid (β -SiC)	Keramik	120
α -Aluminiumoxid (α -Al ₂ O ₃)	Keramik	30

Tab. 1: Wärmeleitfähigkeit häufig genutzter wärmeleitfähiger Füllstoffe [1]

fähige Füllstoffe und deren jeweilige Wärmeleitfähigkeit aufgelistet. Nachfolgend wird die frühe Entwicklungsphase wärmeleitfähiger, elektrisch isolierender Elastomerverbindungen mit verschiedenen Füllstoffen und Zieleigenschaften vorgestellt. Dabei werden zunächst die Auswirkungen des Füllstoffgehalts auf die Eigenschaften des Zielwerkstoffs behandelt. Der zweite Abschnitt erläutert die Entwicklung von EPDM-Werkstoffen mit der Zielsetzung, einen hohen Wärmeleitfähigkeitswert in Kombination mit einer optimalen allgemeinen Ausgewogenheit der Materialeigenschaften zu realisieren.

Experimentelle Verfahren

Werkstoffe

Für den ersten Teil der Studie wurde ein nicht-kohlenstoffhaltiger Füllstoff in einer EPDM-Elastomermatrix verwendet. Die Referenzformulierung des Werkstoffs ist eine mit Peroxid vulkanisierte Standardverbindung mit mittlerem Rußgehalt. Im zweiten Teil sind die Ergebnisse der Werkstoffentwicklung mit verschiedenen Arten wärmeleitfähiger Füllstoffe aus Kohlenstoff, Metall und Keramik in einer mit Peroxid vulkanisierten Standard-EPDM-Verbindung aufgezeigt.

Herstellung der Werkstoffe

Die Gummimischungen wurden an einer offenen Walze mit einer Kapazität von 1,5 l hergestellt. Zum Mischen der Werkstoffe wurde ein einfaches EPDM-Mischprogramm verwendet.

Probenherstellung

Durch Vernetzung des Werkstoffs mit optimaler Vulkanisation in einer Heißvulkanisationspresse wurden Prüfproben mit einer Stärke von 2 mm und 6 mm hergestellt.

Eigenschaft	Prüfmethode
Dichte	ISO 2781
Härte	ISO 48-4
Mikrohärte	ISO 48-2
Zugfestigkeit	ISO 37-1
Reissdehnung	ISO 37-1
Druckverformungsrest	ISO 815-1
DSC	DIN 51007

Tab. 2: Liste der Eigenschaften und der vorgegebenen Prüfmethode (Quelle: Dätwyler)

Werkstoffeigenschaften

Zur Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften wurden standardisierte Verfahren und Prüfbedingungen verwendet. **Tab. 2** zeigt die Prüfmethode für die Messung der physikalischen Eigenschaften der Proben.

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit wurde gemäß den Anweisungen des Geräteherstellers mit dem Gerät LCR 8110G durchgeführt.

Bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde ein Thermal THB-100 (Transient Hot Bridge Instrument) eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Heißdrahtverfahrens bzw. des von Linseis gelieferten Transient-Hot-Strip-Verfahrens (DIN EN 993-14, DIN EN 993-15).

Ergebnisse und Erörterung

Auswirkungen des prozentualen Füllstoffvolumenanteils auf die Eigenschaften

Zunächst wurden die Auswirkungen des Füllstoffvolumenanteils auf die Wärmeleitfähigkeit des EPDM-Werkstoffs untersucht. Aufgrund des hohen Füllstoffgehalts von 40% musste das Mischprogramm für den Werkstoff geringfügig angepasst werden. Zudem musste der Zusammensetzung Verarbeitungöl beigefügt werden, um eine homogene Einmischung des Füllstoffs in die Matrix sicherzustellen und etwaige Probleme beim Mischen zu vermeiden.

Bild 1 zeigt, dass der Füllstoffvolumenanteil bei der Erzielung eines zufriedenstellenden Wärmeleitfähigkeitswerts eine maßgebliche Rolle spielt. Es gilt: Je höher der Füllstoffgehalt, desto höher der Wärmeleitfähigkeitswert.

Um eine hohe Wärmeleitfähigkeit zu erreichen, ist eine Füllstoff-Füllstoff-Wechselwirkung erforderlich, da die Wärmeübertragung durch Phonon-Phonon-Kopplung bestimmt wird. Um Wärmeleitfähigkeit zu erzielen, müssen die Füllstoffpartikel einen wärmeleitfähigen Weg von der einen zur anderen Seite des Wärmeleitmaterials (TIM) bilden, also zwischen den beiden mit dem TIM in Berührung kommenden Oberflächen. Wenn der Füllstoffgehalt zu gering ist, um einen verbundenen Weg durch die Polymermatrix (eine Perkolationsschwelle) zu bilden, ist das TIM nicht wärmeleitfähig. Eine schematische Darstellung des Füllstoffgehalts und der Perkolationsschwelle in einem TIM ist beispielhaft in **Bild 2** gezeigt [2].

Es hat sich gezeigt, dass die Werkstoffeigenschaften bei unterschiedlichem Füllstoffgehalt erheblich abweichen. Ein höherer Gehalt an wärmeleitfähigem Füllstoff führt zu einer höheren Wärmeleitfähigkeit, jedoch auch zu einer höheren Dichte bzw. Härte (**Bild 3**).

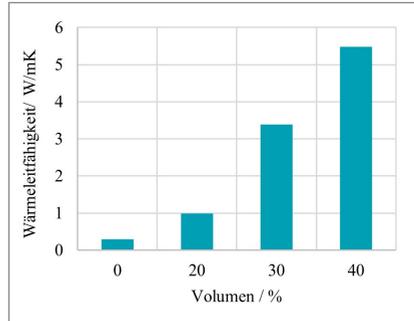


Bild 1: Prozentualer Füllstoffvolumenanteil und Wärmeleitfähigkeit (Bild: Dätwyler)

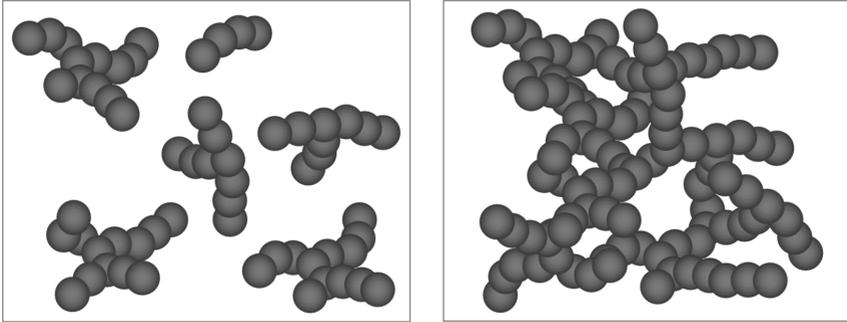
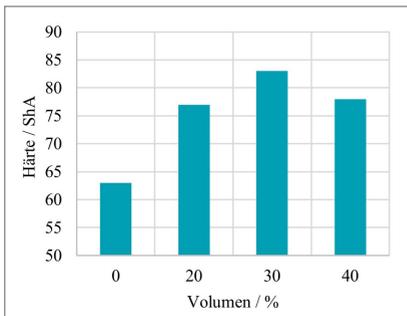
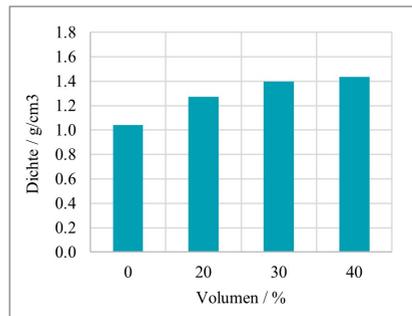


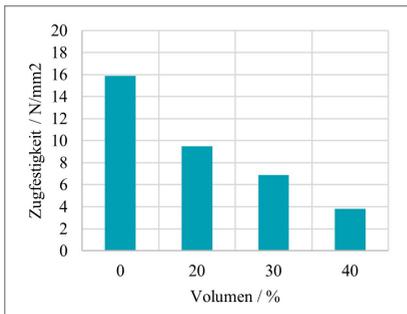
Bild 2: Links berühren sich die Füllstoffpartikel nicht. Deshalb wird keine Perkolationschwelle erreicht. Rechts ist das leitfähige Füllstoffnetzwerk beispielhaft dargestellt (Bild: Dätwyler)



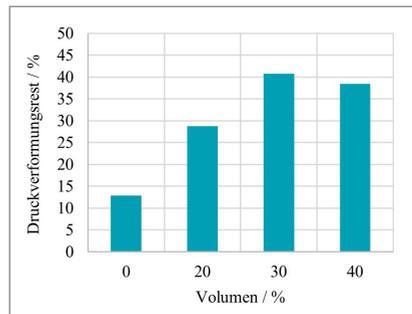
a



b



c



d

Bild 3: Füllstoffvolumenanteil und a) Härte, b) Dichte, c) Zugfestigkeit und d) Druckverformungsrest (Bild: Dätwyler)

Die Masse des Wärmeleitmaterials (TIM) mit einer Dichte von $2,5 \text{ g/cm}^3$ in der Studie wäre um rd. 1,8 kg höher als die eines TIM mit einer Dichte von nur $1,4 \text{ g/cm}^3$. Die eigenen Wärmeleitmaterialien weisen bei gleichzeitiger Beibehaltung einer hohen Wärmeleitfähigkeit hinsichtlich ihrer Dichte einen Vorteil auf und sind daher im Vergleich zu anderen Produkten auf dem Markt leichter. **Tab. 3** zeigt einen Vergleich der Wärmeleitmaterialien von eigenen mit einigen handelsüblichen Wärmeleitmaterialien.

Im Fall einer zu hohen Härte der Wärmeleitmaterialien ist die Passform der Batterie möglicherweise nicht so gut wie bei weicheren Werkstoffen oder gar Schäumen. Auch die Dämpfung und Befestigung der Batterie unter Verwendung von Material mit einer zu hohen Härte fällt unter Umständen weniger günstig aus. Beim Vergleich der Zugfestigkeit zeigt sich, dass der Unterschied zwischen Mischungen mit einem Volumenanteil von 20% und 40% leitfähigem Füllstoff beträchtlich ist (**Bild 3c**). Es obliegt den Ingenieur:innen festzulegen, welche Zugfestigkeitswerte noch als Kompromiss für eine hohe Wärmeleitfähigkeit akzeptiert werden können. Dasselbe gilt für den Druckverformungsrest (**Bild 3d**). Die Daten zeigen, dass der Druckverformungsrest mit steigendem Gehalt an wärmeleitfähigem Füllstoff zunimmt. Einer der Aspekte, die diesen Effekt erklären, hängt möglicherweise mit dem Zusammenbruch des Füllstoffnetzes in der Verbindung zusammen, der als Payne-Effekt bekannt ist. Dieser Aspekt kann durch Änderungen im Mischverfahren und durch eine Optimierung der Füllstoffdispersion verbessert werden. Letztere konzentriert sich auf die zunehmenden Füllstoff-Polymer-Wechselwirkungen [3]. In Anbetracht der vorliegenden Daten ist in der Entwicklungsphase auch stets die Ausgewogenheit der verschiedenen Eigenschaften von Wärmeleitmaterialien zu bedenken.

Nr.	Wärmeleitmaterialien	Wärmeleitfähigkeit (W/(m·K))	Dichte (kg/m ³)
1	TIM 3 (eigenes Material)	3,4	1.400
2	TIM 4 (eigenes Material)	5,5	1.440
3	Handelsüblicher Werkstoff A	4,5	3.150
4	Handelsüblicher Werkstoff B	4,0	3.100
5	Handelsüblicher Werkstoff C	3,6	2.850
6	Handelsüblicher Werkstoff D	3,6	3.000
7	Handelsüblicher Werkstoff E	4,1	2.700
8	Handelsüblicher Werkstoff F	3,0	2.900
9	Handelsüblicher Werkstoff G	5,0	3.000
10	Handelsüblicher Werkstoff H	3,0	2.840

Tab. 3: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit und Dichte der Wärmeleitmaterialien von eigenen mit anderen Produkten auf dem Markt (Quelle: Dätwyler)

Auswirkungen unterschiedlicher Füllstoffarten auf die Eigenschaften

Durch Tests mit verschiedenen wärmeleitfähigen Füllstoffen konnten unterschiedliche Füllstoffgehalte und Wärmeleitfähigkeitswerte erzielt werden. Das Hauptaugenmerk lag darauf, den höchsten Wärmeleitfähigkeitswert bei geringstmöglicher Härte und Dichte zu erzielen. Die **Tab. 4** zeigt eine Übersicht über die verfügbaren wärmeleitfähigen Werkstoffe.

Um die Perkolationsschwelle zu erreichen, sind die Morphologie des Füllstoffs und das Aspektverhältnis wichtige Variablen, die zu unterschiedlich intensiven Füllstoff-Füllstoff-Wechselwirkungen für die Wärmeübertragung führen. Diese beiden Variablen sind auch wesentliche Parameter, welche die verstärkende Wirkung des Füllstoffs auf die Gummimatrix beeinflussen. Das Ziel ist daher, einen hohen Wärmeleitfähigkeitswert in Verbindung mit einer optimalen Gesamtbilanz der Werkstoffeigenschaften zu erreichen.

In der Simulationsstudie des Schnellladevorgangs eines aus acht Batteriemodulen mit insgesamt 416 Zellen bestehenden Batteriepacks wurde nachgewiesen, dass Material mit einer Wärmeleitfähigkeit von 3,4 W/(m·K) ein Gleichgewicht der Batterietemperatur bei Werten möglich macht, die um 6 K niedriger liegen als bei einem Material mit einer Wärmeleitfähigkeit von 1 W/(m·K). Dies ist in **Bild 4** gezeigt.

Eigenschaft	Norm	Einheit	TIM-Referenz	TIM 1	TIM 2	TIM 3	TIM 4
Original							
Dichte	ISO 1183	g/cm ³	1,040	1,620	1,434	1,399	1,436
Härte		ShA	63	75	76	80	78
Mikrohärte	DIN 53519	IRHD	63	77	79	83	80
Zugfestigkeit	ISO 37	N/mm ²	15,9	9,3	6,1	6,0	3,8
Reissdehnung	ISO 37	%	364	344	284	294	342
Druckverformungsrest 24 h / 130 °C	ISO 815-1	%	12,9	24,9	20,5	40,7	38,4
DSC (T _g)		°C	-53	-53	-53	-54	-55
Elektrische Eigenschaften – Impedanz (20 - 10.000 Hz)							
Spezifischer Widerstand		Ω·cm	1,35·10 ⁷	2,14·10 ⁷	4,76·10 ⁷	6,74·10 ⁷	1,39·10 ⁸
Impedanz		Ω	2,03·10 ⁶	3,23·10 ⁶	7,17·10 ⁶	1,02·10 ⁷	2,10·10 ⁷
Wärmeleitfähigkeit bei 23 °C							
Wärmeleitfähigkeit		W/m·K	0,30	0,62	0,74	3,4	5,5
Spezifische Wärmekapazität, C _p		KJ/kg·K	1,333	1,202	1,271	0,889	1,036

Tab. 4: Bewährte Lösungen (Quelle: Dätwyler)

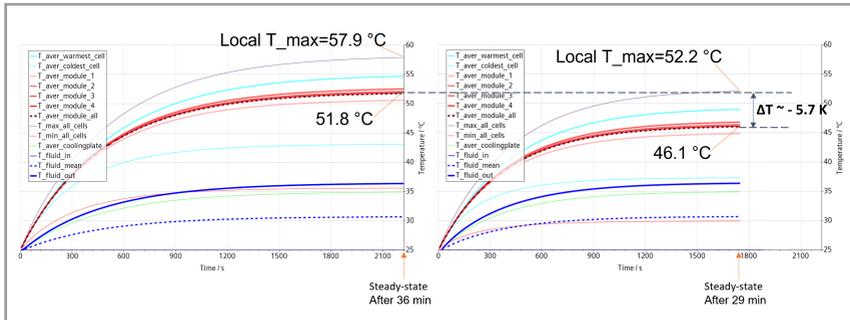


Bild 4: Simulationsstudie zum Vergleich der Kühlleistung von zwei Wärmeleitmaterialien mit 1 W/(m·K) und 3,37 W/(m·K) (Bild: Dätwyler)

Die Auswirkungen der Wärmeleitfähigkeit von Wärmeleitmaterialien auf die Kühlleistung beim Thermomanagement von Batterien sind folglich klar ersichtlich. Eine neue Entwicklung weist eine Wärmeleitfähigkeit von 5,5 W/(m·K), eine Dichte von rd. 1,4 g/cm³ und eine Härte von 78 ShA auf. Bei der Analyse der Wärmeleitfähigkeit wurden je nach Prüfaufbau signifikante Unterschiede bei den Messergebnissen festgestellt. Um eine effiziente Wärmeübertragung vom Sensor zur Probe zu erzielen, bedarf es im Rahmen der Messung der Wärmeleitfähigkeit von Wärmeleitmaterialien unbedingt einer glatten, ebenen Oberfläche. Wärmeleitmaterialien mit einem Füllstoffvolumenanteil von >30% lieferten im Vergleich zu geringeren Füllstoffanteilen zu uneindeutige Ergebnisse mit geringer Reproduzierbarkeit. Dies könnte an der hohen Oberflächenrauheit und an Unzulänglichkeiten der Probe aufgrund des hohen Füllstoffgehalts liegen. Daher mussten die vom Gerät empfohlenen optimierten Prüfparameter (Zeit und Stromstärke) verwendet werden, um eine verlässlichere Messung durchführen zu können. Hieraus ergab sich, dass unterschiedliche Prüfparameter Ergebnisse mit Unterschieden von 1,5 W/(m·K) bis 3 W/(m·K) liefern können. Die größte Differenz war bei dem TIM mit dem höchsten Füllstoffgehalt festzustellen [4].

Fazit

Der erste Teil der vorgestellten experimentellen Studie zeigt den Einfluss der Füllstoffgehalts auf die Wärmeleitfähigkeit, wobei Folgendes gilt: Je höher der Füllstoffgehalt, desto höher ist auch die Wärmeleitfähigkeit. Gleichzeitig zeigte sich, dass sich der Füllstoffgehalt in erheblichem Maße auf andere mechanisch-physikalische Eigenschaften wärmeleitfähiger Werkstoffe auswirkt. Es ist daher äußerst wichtig, ein ausgewogenes und auf die jeweilige Anwendung zugeschnittenes Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit und der physikalischen Eigenschaften eines Werkstoffs zu erzielen.