

# Optimierte Wärmeableitung aus Energiespeichern für Serien-Elektrofahrzeuge

Die Qualität der Wärmeabfuhr von Batterien in Richtung Außengehäuse wirkt sich stark auf die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer eines Elektrofahrzeugs aus. Der Wärmeleitpfad zwischen Batteriemodul und Kühlsystem wird in Serielektrofahrzeugen durch pastöse Materialien realisiert. Diese sogenannten Gapfiller weisen eine hohe Wärmeleitfähigkeit und spezifische mechanische Eigenschaften auf. Das Ziel eines laufenden BMWi-Forschungsprojekts ist die Entwicklung einer neuen Generation von Gapfillern mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit und reduzierter Dichte sowie deren Qualifizierung im Hinblick auf den Einsatz im Serienprozess.

Michael Frauenhofer, Marc Gormanns, Martin Simon, Martin Rütters, Holger Fricke

Der Audi E-tron überzeugt durch die Leistungsfähigkeit seines Elektroantriebs. Während sich andere Elektrofahrzeuge nach kurzen Intervallen mit maximaler Leistungsabgabe elektronisch drosseln, um eine Überhitzung der Batterie zu verhindern, behält die Batterie des E-tron durch eine ausgereifte Kühlung ihre spezifische Betriebstemperatur. Um dies zu ermöglichen, hat Audi ein umfassendes Wärmemanagement konzipiert und umgesetzt.

## Rolle der Gapfiller

Der Gapfiller übernimmt die Funktion der Wärmeleitung und des Toleranzausgleichs zwischen Batteriemodul und Batteriegehäuse. Bei der Montage der Batterie wird der Gapfiller mittels Roboter in die Gefache der Batteriewanne appliziert (Bild 1). Anschließend werden die Batteriemodule eingesetzt und verpressen den Gapfiller sukzessive in die zu benetzende Fläche. Die druckempfindlichen Batteriezellen dürfen dabei durch das Verpressen nicht geschädigt werden. Der Gapfiller ist daher

von seinen Fließeigenschaften so formuliert, dass die Verpresskräfte eine Schädigung der Batterie verhindern. Gleichzeitig muss der Spalt zwischen Batterie und Boden vollständig und blasenfrei gefüllt sein. Dieses Konzept läuft bereits seit 2018 in

der Serienproduktion. Bisher wurden über 50.000 Fahrzeuge produziert und verkauft. Die Batterie ist – analog zum Verbrennungsmotor in heutigen Kraftfahrzeugen – Kernkomponente von Elektrofahrzeugen und damit preisbestimmend. Auf-



**Bild 1** > Vor dem Einsetzen der Zellmodule in den Gefacheboden wird ein wärmeleitender Gapfiller eingebracht.

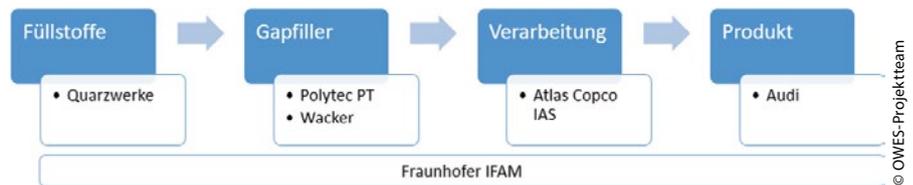
© Audi AG / Stefan Warter

grund der Betriebssicherheit gehen alle derzeitigen Konzepte davon aus, dass die Einzelbatteriezellen in ein Leichtbau-Batteriegehäuse zu integrieren sind. Dieses ist vorteilhaft komplett in der Rohbaukonstruktion des Fahrzeugs integriert, um einen möglichst niedrigen Schwerpunkt des Gesamtfahrzeugs zu ermöglichen. Aus Sicherheitsgründen wird das wasserführende Kühlsystem unterhalb der Batteriemodule angeordnet, um einen Kontakt der Lithium-Ionen-Zellen mit Wasser auch im Crash sicher ausschließen zu können.

Rein auf Polymeren basierende Harze oder Pasten weisen eine intrinsisch geringe Wärmeleitfähigkeit auf, sodass sie für eine effiziente Wärmeableitung mit Partikeln höherer Wärmeleitfähigkeit gefüllt sein müssen. Derzeit werden hier insbesondere keramische Partikel, z. B. aus Aluminiumoxid verwendet, wobei ein hoher Füllgrad angestrebt ist, um durch möglichst dichte Packung der Füllstoffe maximale Wärmeleitfähigkeit zu erreichen.

Die heute verfügbaren Pasten erreichen außerdem nur Wärmeleitfähigkeiten bis  $3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , was zwei Größenordnungen unterhalb der Wärmeleitfähigkeiten beispielsweise von Aluminium mit  $220 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  liegt. Neben der begrenzten Wärmeleitfähigkeit ergeben sich bei Einsatz dieser Gapfiller folgende Konflikte mit den Anforderungen im Automobilbau:

1. Hochgefüllte Pasten haben eine hohe Dichte, bringen viel Gewicht ins Fahrzeug ein und treten daher in Konflikt mit dem Leichtbau.
2. Hochgefüllte Pasten haben aufgrund der hohen Viskosität einen hohen Fließwiderstand bei der Verarbeitung, weshalb die Prozesse langsam und schonend ablaufen müssen. Dies widerspricht einer kosteneffizienten und schnellen Fertigung.
3. Hochgefüllte Pasten führen aufgrund der Füllstoffe zu einem hohen Verschleiß der Verarbeitungsmaschinen. Die Abrasion steigt und Anlagenkomponenten müssen häufiger ausgetauscht werden.
4. Es mangelt an Konzepten zur automatisierten Serienverarbeitung der Pasten. Bisherige Konzepte sind für Flächen von mehreren  $\text{mm}^2$  im Elektronikbereich ausgelegt. In der Batteriefertigung müssen jedoch Flächen in der Größenordnung von  $\text{cm}^2$  abgedeckt werden.
5. Künstlich synthetisierte sphärische Füllstoffe ermöglichen eine verbes-



**Bild 2** > Zusammenarbeit im Projekt OWES (Optimierte Wärmeableitung aus Energiespeichern für Serien-Elektrofahrzeuge)

serte Verarbeitungsfähigkeit bei hohen Füllgraden. Diese sind derzeit jedoch nicht zu marktgerechten Preisen erhältlich.

### Das Forschungsprojekt OWES

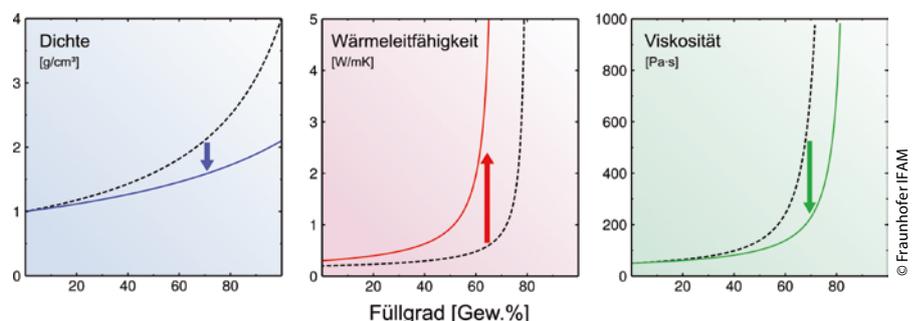
Das Projekt OWES (Optimierte Wärmeableitung aus Energiespeichern für Serien-Elektrofahrzeuge) unter der Leitung von Audi bearbeitet einen breiten materialwissenschaftlichen sowie fertigungstechnischen Forschungs- und Entwicklungsansatz mit den Schwerpunkten:

- Optimierung bisheriger Gapfiller-Konzepte durch verbesserte Füllstoffe,
- Einsatz alternativer (kostengünstiger, leichter) Füllstoffmaterialien,
- neuartige innovative Wärmeabfuhrkonzepte, wie z. B. Leitfähigkeitsgewebe,
- Entwicklung von Prüf- und Simulationsmethoden auf deren Basis Materialien hinsichtlich ihrer Eignung für den Prozess (Quetschströmung, maximale Verpresskräfte, vollständige Füllung, Wärmeleitfähigkeit, Abrasion etc.) beurteilt werden können.
- Etablierung der für die Serienproduktion nötigen bekannten Verarbeitungsverfahren für hochgefüllte Pasten und die Entwicklung neuer, innovativer Verfahren, wie beispielsweise die Gapfiller-Injektion.

Die Zusammenarbeit im Rahmen des Projektkonsortiums – bestehend aus den Materialherstellern Wacker Chemie und Polytec PT, dem Füllstofflieferanten Quarzwerke, dem Anlagenhersteller Atlas Copco IAS sowie dem Forschungsinstitut Fraunhofer IFAM – ist in *Bild 2* schematisch dargestellt.

### Herausforderung in der Formulierung von Gapfillern

Das Erreichen hoher Wärmeleitfähigkeiten bei Gapfillern wird – ausgehend von der sehr geringen Wärmeleitfähigkeit (WLF) typischer Polymere von etwa  $0,2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  – durch Zusatz großer Mengen besser wärmeleitfähiger Partikel erreicht. Als keramische Partikel wird meistens Aluminiumoxid mit mäßiger Wärmeleitfähigkeit und hoher Dichte ( $4 \text{ g/cm}^3$ ) eingesetzt, obwohl mit Bor- oder Aluminiumnitrid Materialien mit deutlich besserer Wärmeleitfähigkeit und niedrigerer Dichte verfügbar sind. Diese Füllstoffe führen jedoch zu hohen Materialkosten. Um mit derzeitigen Partikeln eine signifikante Steigerung der WLF zu erzielen, müssen sehr hohe Füllgrade erreicht werden, wie in *Bild 3* schematisch dargestellt. Bei einer Steigerung des Füllgrads ist es notwendig, neben dem Nachteil der hohen resultierenden Dichte auch Viskosität und Verpressbarkeit mit der erzielbaren Wärmeleitfähigkeit in Einklang zu bringen.



**Bild 3** > Einfluss des Füllgrades auf Dichte, WLF und Viskosität auf herkömmliche Materialien (gestrichelt) und im Projekt angestrebte verbesserte Materialien (farbig)

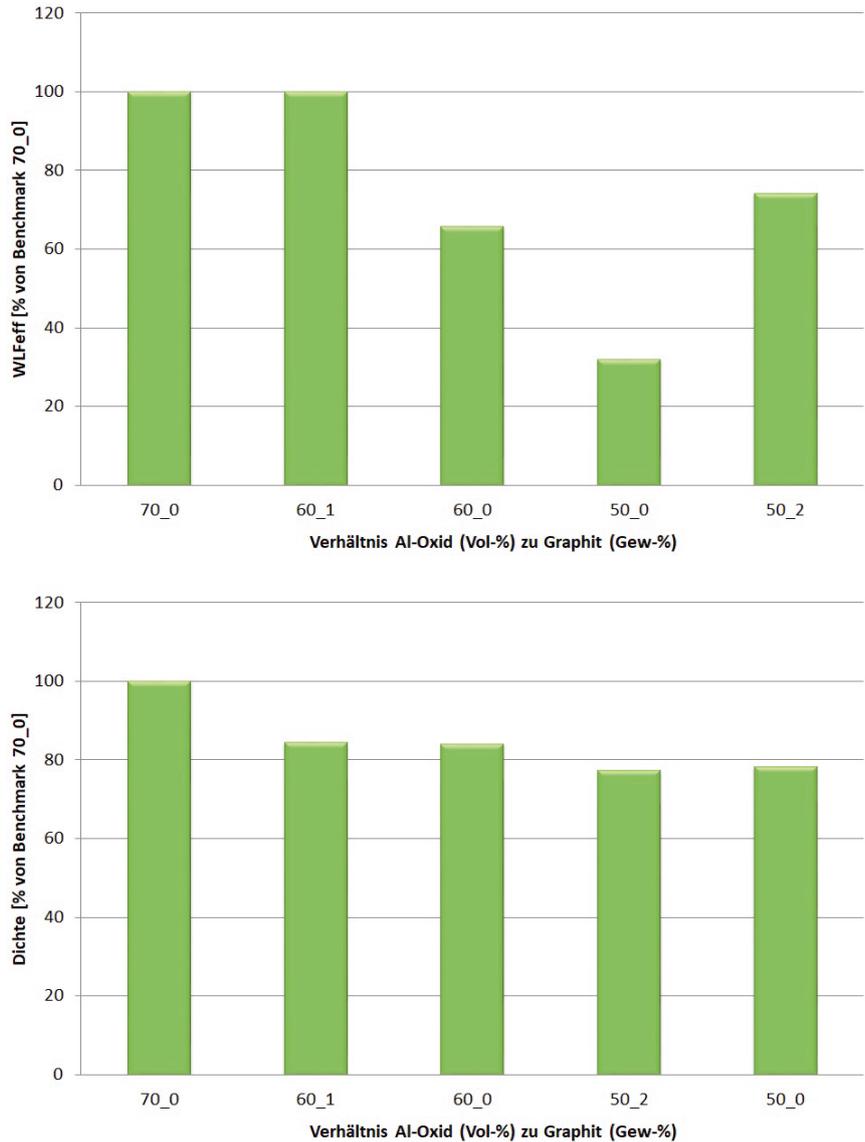
### Weiterentwicklung keramischer Füllstoffe

Innerhalb des Projekts OWES konnten durch die sehr erfolgreiche Weiterentwicklung von Gapfillern auf Basis von Aluminiumoxid deutliche Verbesserungen der Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig weitgehendem Erhalt der Verpressbarkeit erzielt und somit die gesteckten Ziele weit übertroffen werden. Durch die enge Zusammenarbeit des Füllstoff- und der Gapfillerhersteller wurden die Wärmeleitfähigkeiten von knapp unter 3 W/(m·K) zu Projektbeginn auf 5 W/(m·K) bei gleichbleibenden Verarbeitungseigenschaften gesteigert. Kernpunkte der Entwicklung sind eine verbesserte Sphärizität, eine engere Größenverteilung und individuell auf die Polymermatrix angepasste Oberflächenbeschichtungen der Partikel. Diese Materialien werden derzeit am Fraunhofer IFAM bezüglich ihrer Verarbeitungseigenschaften umfassend charakterisiert und anschließend auf seriennahen Anlagen beim Projektpartner Atlas Copco verarbeitet.

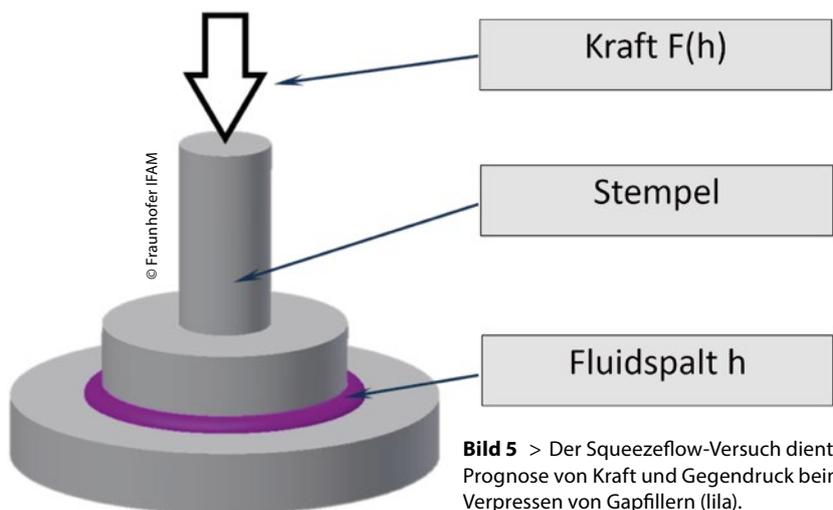
### Aluminium als Füllstoff für Gapfiller

Metalle und Kohlenstoffmaterialien kommen für Anwendungen in Frage, bei denen die Thermal-Interface-Materialien (TIMs) keine elektrische Isolationswirkung besitzen müssen, wie z. B. die Anbindung des Batteriemoduls an das Kühlmodul. In TIMs für Hochleistungsanwendungen wird Silber in der Mikroelektronik eingesetzt. Für eine großflächige Anwendung ist vor allem Aluminium aufgrund der geringen Dichte (2,7 g/cm<sup>3</sup>) und des niedrigen Preises aussichtsreich. Die Wärmeleitfähigkeit übertrifft die von Aluminiumoxid um den Faktor 7.

Bei Einsatz von Aluminiumpulvern konnten lediglich verarbeitbare Pasten bis zu einem Füllgrad von 60 Vol.-% mit einer resultierenden Wärmeleitfähigkeit von maximal 2 W/(m·K) hergestellt werden. Es zeigte sich, dass der hohe thermische Übergangswiderstand von Aluminium zur Polymermatrix eine gute Wärmeleitfähigkeit behindert. In ausführlichen Simulationsrechnungen konnte aufgezeigt werden, dass der Einsatz von Aluminium nur für perkolierende Strukturen, wie z. B. senkrecht stehende Stäbchenstrukturen, zu hohen Wärmeleitfähigkeiten führt. In diesen tritt der ungünstige Übergangswiderstand nur bei Ein- und bei



**Bild 4** > Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten bei Ersatz von Aluminiumoxid durch Zusatz von Graphit (oben) und entsprechende Dichten der Mischungen (unten)



**Bild 5** > Der Squeeze-flow-Versuch dient der Prognose von Kraft und Gegendruck beim Verpressen von Gapfillern (lila).

Austritt aus der Struktur auf. Die Strukturen müssen filigran sein und im Füllgrad beschränkt werden, um die Kompressibilität des TIM zu gewährleisten. Eine weitergehend Optimierung solcher Strukturen wird derzeit im Projekt OWES weiter verfolgt.

### Kohlenstoffbasierte Füllstoffe

Durch die Fokussierung auf Nanotubes und Graphene kann leicht übersehen werden, dass auch gewöhnlicher Graphit eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit besitzt und sich daraus Kompositmaterialien mit sehr hohen Wärmeleitfähigkeiten herstellen lassen. So wird über Komposite aus synthetischem Graphit in einer Polypropylenmatrix berichtet, die bei einem Füllgrad von 30 Vol.-% Wärmeleitfähigkeiten von über 20 W/(m·K) erreichen [1]. Vorteilhaft ist hier außerdem, dass Graphit – wie alle Kohlenstoffmaterialien – nur eine geringe Dichte besitzt (2,3 g/cm<sup>3</sup>), so dass sich daraus Gapfiller mit geringem Gewicht herstellen lassen.

Bei Einsatz von nanoskaligem Graphit konnte eine sehr starke Steigerung der Viskosität festgestellt werden. Es ließen sich damit trotz niedriger Viskosität der Polymermatrix von nur 200 mPa·s lediglich Füllgrade von max. 6,5 Vol.-% mit Wärmeleitfähigkeiten von maximal 1,8 W/(m·K) erzielen. Bei Einsatz von kugelförmigem Graphit mit Partikelgrößen von 30 µm wurden hohe Füllgrade bis 65 Vol.-% erreicht, jedoch blieben die WLF unterhalb

von 1,5 W/mK. In einem weiteren Ansatz wurde angestrebt, bei bestehenden AlOx-gefüllten Gapfillern durch Zusatz von geringen Mengen Graphit „hybride Systeme“ herzustellen, bei denen der Wärmeübergang zwischen den Partikeln verbessert wird.

### Kohlenstoff-AlOx-Hybridsysteme

Für eine systematische Studie wurden Graphit-AlOx-Hybridsysteme hergestellt, wobei zu AlOx-Formulierungen mit 50, 60 und 70 Vol.-% jeweils 0, 1 oder 2 Gew.-% Graphit (entsprechend 0, 0,43 und 0,87 Vol.-%) zugesetzt wurden. Wie in *Bild 4* (oben) zu erkennen, blieb die Wärmeleitfähigkeit bei Austausch von 10 Vol.-% AlOx durch 0,43 Vol.-% Graphit voll erhalten. Ebenso blieben die Verarbeitungseigenschaften auf gleichem Niveau bestehen. Bei einer 50 Vol.-% AlOx-Formulierung konnte durch Zusatz von 0,87 Vol.-% Graphit die Wärmeleitfähigkeit mehr als verdoppelt werden. Dabei ist, wie in *Bild 4* (unten) gezeigt wird, neben den geringeren Kosten dieser Materialien auch die Verringerung der Dichte anzuführen, die sich positiv auf das Fahrzeuggesamtgewicht auswirkt.

Derzeit werden weitere Anstrengungen im Projekt OWES unternommen, um Perkolatoneffekte bei kohlenstoffbasierten Füllstoffen im Hinblick auf einen verbesserten Wärmeübergang nutzbar zu machen.

### Fertigungseigenschaften

Im Serienfertigungsprozess bei Audi werden applizierte Raupen standfester Gapfiller beim Montieren der Batterie verpresst. Die Verarbeitungseigenschaften der aktuell eingesetzten Gapfiller sind spezifisch auf diesen Prozess angepasst. Bei der Montage wird das großflächige Applikationsbild durch das Absenken der Batterie auf kleine Spalte verpresst. Beim Verpressen wird der Gapfiller durch den sich verengenden Spalt gedrückt. Die Spaltströmung des hochviskosen Polymersystems bewirkt eine Kraft gegen das Absenken der Batterie in Form eines Drucks auf die Batterieunterseite mit einem Druckmaximum im Mittelpunkt der Kontaktfläche. Dieser Vorgang ist für die industrielle Fertigung so zu justieren, dass

1. der lokale Gegendruck die druckempfindliche Batterie nicht beschädigt,
2. das Applikationsbild des Raupenauftrags zu einer vollständigen, gleich-

mäßigen und blasenfreien Spaltfüllung führt und

3. Taktzeiten sowie Toleranzen eingehalten werden.

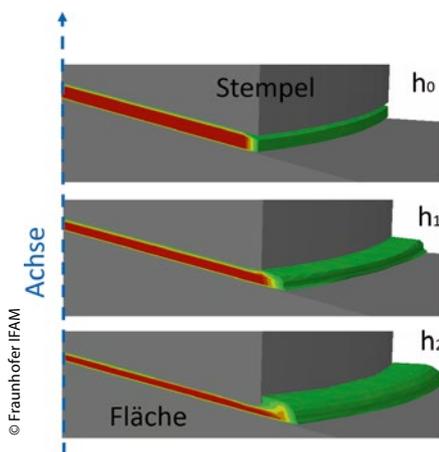
Um in der Phase der Materialelektion und der Qualifikation aufwendige Versuche an Baugruppen zu vermeiden, wurden ab 2015 neue Messprogramme zur Ermittlung spezifischer Materialkennwerte entwickelt. Die Messprogramme zur Ermittlung des Widerstands gegen Quetschströmung (Squeeze-flow) sind inzwischen als Werksnorm bei Audi etabliert. Entsprechende Materialkennwerte werden durch Audi erhoben oder durch die Materiallieferanten beigegeben. Diese Kennwerte erweisen sich im Hinblick auf die Suche nach Gapfillern mit passendem Eigenschaftsprofil als außerordentlich hilfreich.

### Simulation des Verpressens

Quetschströmungen sind in der Klebtechnik wohl bekannt: Sie treten im allgemeinen Fall beim Fügen der Substrate auf. Der Druck im Klebstoff kann beim Verquetschen auf geringe Spalthöhen unerwartet stark ansteigen. In Untersuchungen des Fraunhofer IFAM zum Hybridfügen [2-5] wurde durch gekoppelte Fluid-Struktursimulationen (FSI) auf Basis der „Volume-of-Fluid-Methode“ (VOF) ermittelt, dass der Druck im Klebstoff zu einer plastischen Verformung der metallischen Substrate führen kann. In den FSI-Simulationen hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die Strömung des Fluids auf einem ortsfesten (Euler-)Gitter und die Verformung der Fügeteile auf einem stofffesten (Lagrange-)Gitter zu berechnen. In den zitierten Arbeiten des Fraunhofer IFAM zum Hybridfügen wurde der Squeeze-flow-Versuch als geeignete Messmethode zur Ermittlung der Gegenkraft des Klebstoffes gegen ein Verpressen eingeführt.

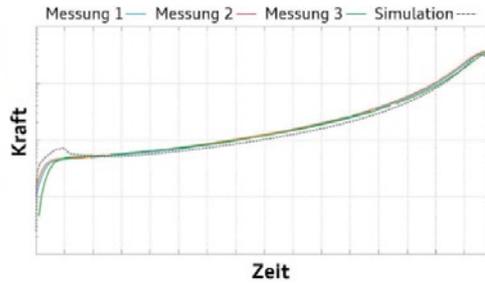
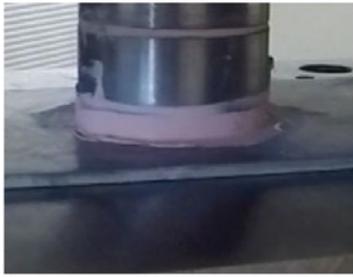
### Squeeze-flow-Versuch

Beim Squeeze-flow-Versuch ist ein rotationssymmetrischer Stempel mit Durchmesser  $D$  axial verfahrbar gelagert (*Bild 5*). Der Stempel wird mit einer Geschwindigkeit  $v$  niedergefahren. Der Spalt zwischen der Unterseite des Stempels und einer Arbeitsfläche ist mit dem Polymermaterial gefüllt. Die bei der axialen Bewegung des Stempels auftretende Kraft  $F(h)$  und die Höhe des Spalts  $h(t)$  werden gemessen. Die Stempelbewegung bewirkt ein radiales Ausquetschen des Klebstoffes aus dem



**Bild 6** > Simulation eines Squeeze-flow-Versuchs auf Basis rheologischer Daten, die durch Fluid-Struktursimulationen (FSI) ermittelt wurden; die Färbung entspricht dem Füllgrad nach der „Volume-of-Fluid-Methode“ (VOF).

© Audi AG



**Bild 7** > Experiment zur Durchbiegung eines Blechs durch die Strömung eines rosafarbenen Gapfillers (links) und Vergleich mit der Simulation (rechts)

Spalt. Der maximale hydrostatische Druck im Klebstoff tritt auf der Symmetrieachse ( $r=0$ ) auf. Entscheidend für die Messqualität sind die exakte Parallelität von Stempel und Arbeitsfläche, die Geschwindigkeitsregelung und die sehr genaue Messung des Spalts  $h(t)$ .

Der Squeeze-flow-Versuch wurde in der zitierten Literatur auch als Methode etabliert, um Materialmodelle für die Simulation der Spaltströmung bei Verpressvorgängen experimentell zu validieren. Aufgrund der einfachen, axial-symmetrischen Geometrie lassen sich Varianten mit hoher Rechengeschwindigkeit bestimmen und mit Messwerten vergleichen. Die Materialmodelle zur Simulation des polymeren Fluids werden auf Basis von rheologischen Messungen ermittelt. Hierbei kommen je nach Komplexität des Strömungsverhaltens des Fluids verschiedene rheologische Verfahren und Messmethoden zum Einsatz. Zu bestimmen sind beispielsweise Scherratenabhängigkeit, Fließgrenze, Härtung, Temperaturabhängigkeit sowie das viskoelastische und thixotrope Verhalten des fluiden Polymers.

### Fluid-Struktursimulationen

Die Simulation des Squeeze-flow-Versuchs kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Die Simulationemethode und die Simulationssoftware müssen so gewählt werden, dass alle relevanten physikalischen Effekte und Parameter der geplanten industriellen Anwendung durch Modell und Software beschreibbar sind. Zur Simulation der Verpressvorgänge von Gapfillermaterial ist Software zu nutzen, die die Möglichkeit zur FSI bietet, um Strömungssimulation und Struktursimulation zu koppeln. So kann sowohl die Quetschströmung des Gapfillers durch das Absenken der Batterie in Richtung Batterietrog als auch die elastische Verformung des Batterietrogs durch den hydrostatischen Druck des Gapfillers beschrieben werden. Exemplarisch ist in *Bild 6* ein Zylindersektor aus einer dreidimensionalen FSI-Simulation auf Basis der VOF-Methode dargestellt. Man erkennt den sich gegen die Arbeitsfläche (Fläche) absenkenden Stempel (grau) bei Spalthöhen von  $h_0$  (initial),  $h_2$  und  $h_3$ . Zwischen Stempel und Fläche ist der fluide

Gapfiller dargestellt. Der Gapfiller wird auf einem ortsfesten Gitter durch die VOF-Methode modelliert. Eine rote Färbung bedeutet, dass die jeweilige Zelle vollständig mit Gapfiller gefüllt ist. Die Färbungen gelb und grün zeigen eine unvollständige Füllung der Rechenzelle an. Zellen ohne Gapfiller sind ausgeblendet und Randzellen geschnitten. Dargestellt ist das Herausdrücken des Gapfillers aus dem sich auf Spalthöhe  $h_2$  und  $h_3$  verengenden Spalt. Neuere Forschungsansätze [6] haben das Ziel, die Spaltströmung mit einem reduzierten Modellierungsaufwand zu simulieren.

### Simulation der Batteriemontage

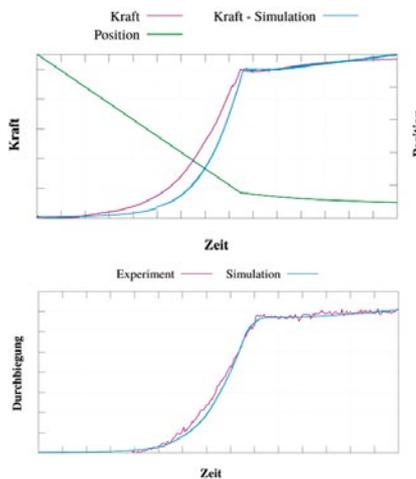
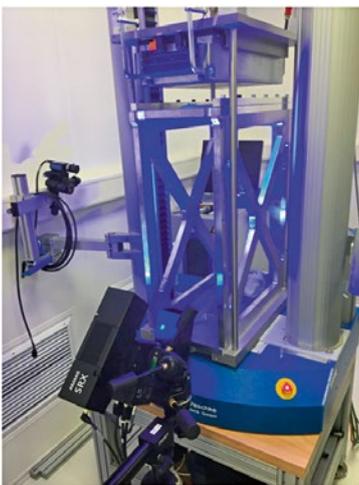
Rheologische Kenngrößen und der Squeeze-flow-Versuch erlauben den Vergleich verschiedener Gapfiller. Für die Auslegung des Produktionsprozesses von Hochvolt-(HV)-Batterien ist es jedoch notwendig, die beim Setzprozess der Module auftretenden Kräfte genau zu kennen und das Applikationsbild der Raupen so zu justieren, dass sich eine optimale, luftblasenfreie Füllung des Spalts zwischen Batterie und Boden ergibt. Hierfür werden bei Audi zwei unterschiedliche Simulationemethoden eingesetzt, die sich auf folgende Produktgeometrien beziehen:

- Aufbauten mit mittlerer Spalthöhe und Fließwegen, aber komplexer angrenzender Bauteilstruktur und
- Kavitäten mit extrem kleinen Spalthöhen und aufgrund der Modulgröße langen Fließwegen.

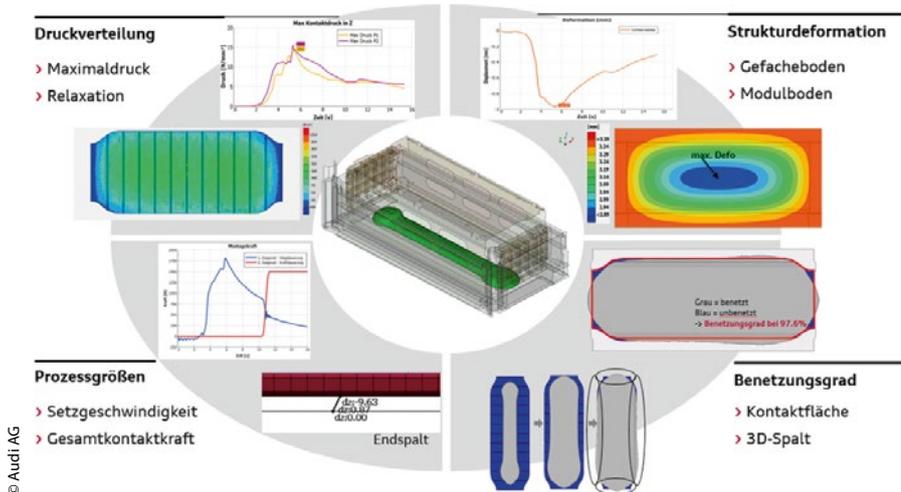
Beide Simulationemethoden basieren auf der FSI und beschreiben Wechselwirkungen zwischen der Verformung der strukturellen Bauteile und den Fließkräften beim Verpressen des Gapfillers. Die mechanische Simulation bildet unter Einsatz einer Vielzahl an performanten Kontakttypen die Steifigkeit und Festigkeit der Komponenten ab. Die Fluidsimulation basiert auf Materialmodellen, die sich aus den rheologischen Messungen der Gapfiller ergeben und nutzt das VOF-Verfahren. Mit den Simulationen wird das Verpressen des Gapfillers – ausgehend von den applizierten Raupen bis zur vollständigen Füllung des Spalts – genau nachgebildet.

Anfänglich wurden diese Simulationemethoden erfolgreich an kleinen Testbauteilen erprobt und verifiziert (*Bild 7*). Vor der Übertragung auf reale Bauteile wurden aufwendige Versuchsaufbauten in der Größenordnung der Batterie für ei-

© Audi AG



**Bild 8** > Vergleich von Experiment und Simulation auf Bauteilebene



**Bild 9** > Bedeutung der Simulation eines Gesamtbauteils für die Produktion

nen weiteren Abgleich eingesetzt und eine finale Validierung durchgeführt. Ziel dieser schrittweisen Vorgehensweise war es, gegebenenfalls skalenbedingte numerische Effekte zu erkennen, um somit jegliche Fehlerquellen und Ungenauigkeiten auszuschließen, da sich die Güte der Simulationsmethoden mit dem schrittweisen Vorgehen detailliert bewerten lässt. Bei Simulationen mit hoher Prognosequalität müssen im Validierungsvorgang keinerlei „Feinkalibrierungen“ mehr vorgenommen werden. Die von Audi entwickelten Simulationsmethoden zeigten eine sehr hohe Prognosequalität, sodass eine Freigabe für den produktiven Einsatz auf Bauteilebene erfolgen konnte. *Bild 8* zeigt den Aufbau in der Größe eines Batteriegehäuses mit verformbaren Strukturteilen, ausgestattet mit einer Vielzahl an Sensoren, um den inneren Zustand der Kavität sowie die Prozessgrößen zu erfassen.

### Praktischer Einsatz der Simulation

Audi nutzt diese Simulationen bereits seit einigen Jahren erfolgreich im industriellen Prozess, um in einer frühen Phase Grenzwerte für Materialien zu ermitteln. Gesamtstrukturen werden ohne Probleme berechnet. Ein wesentlicher Vorteil der neu entwickelten Methode ist, dass der Parallelisierbarkeit keine Grenzen gesetzt sind und somit nach wenigen Tagen bereits eine große Anzahl an Varianten simuliert werden kann, aus der die optimalen Prozess- und Produktparameter abgeleitet werden. Die Simulationen auf Gesamtbauteilebene sind verifiziert und zeigen eine sehr hohe Prognosequalität.

*Bild 9* fasst das Audi-Simulationskonzept zusammen. Mittels der Druckverteilung am Modulboden lässt sich bewerten, ob eine unzulässige Belastung vorliegt und innerhalb welcher Zeit der Druck abgebaut wird. Berechnet wird auch die Deformation der Strukturkomponenten, um zu ermitteln, ob es sich um eine elastische oder plastische Verformung handelt. Wesentlichen Einfluss auf die Produkteigenschaften hat der Benetzungsgrad durch den Gapfiller, da dieser entscheidend für die Effizienz der Kühlung ist. Durch die hohe Prognosequalität und Rechengeschwindigkeit der Simulationen lassen sich Taktzeit und Grenzwerte der Fertigung exakt vorhersagen.

### Fazit

Gapfiller sind zur Kühlung der Batteriezellen eines Elektromobils zwingend notwendig. Allerdings müssen sie ihre Performance nicht nur durch ihre Wärmeleitfähigkeit beweisen. Neben dem Preis des Materials spielt zunehmend auch sein Gewicht eine wichtige Rolle für die Selektion. Neue Ansätze zur Optimierung der Gapfiller werden im Projekt OWES durch eine angepasste Füllstoffauswahl entwickelt und erprobt. Zur Verarbeitung der Gapfiller in der Serienproduktion müssen die Fließigenschaften der Gapfiller genau auf den Produktionsprozess abgestimmt sein. Der Squeeze-flow-Versuch bietet sich als Möglichkeit zur Materialqualifizierung an. Zum virtuellen Erproben des Verpressens von Gapfillern bei der Montage der Batteriezellen werden durch Audi seit Jahren gekoppelte Fluid-Struktursimulationen mit hoher Prognosequalität eingesetzt. Diese

Gesamtpalette an erarbeiteten Methoden ermöglicht eine schnelle und fortlaufende Optimierung von Material und Prozess durch ausgereifte materialwissenschaftliche und virtuelle Werkzeuge. //

### Förderhinweis und Dank

Das Verbundvorhaben OWES „Optimierte Wärmeableitung aus Energiespeichern für Serien-Elektrofahrzeuge“ (FKZ O3E-TEOOTB) wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Für diese Förderung und Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt.

### Literaturverzeichnis

- [1] J. King et al: Thermal Conductivity of Carbon-filled Polypropylene-based Resins. Journal of Composite Materials 44 (2010)
- [2] H. Fricke, T. Vallée: Numerical Modeling of Hybrid-bonded Joints. The Journal of Adhesion 92 (2016) 652-664
- [3] H. Fricke, M. Israel: Unterschiedliche Werkstoffe prozesssicher verbinden-Simulation von Hybridfügeprozessen. Adhäsion Kleben u. Dichten 55 (2011) [7-8] 24-29
- [4] M. Israel, H. Fricke: Qualitätssicherung beim Hybridfügen. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechbearbeitung e.V. – Forschungsbericht Nr. 330 (2011)
- [5] S. Niese, H. Fricke: Taschenbildung und Klebstoffverdrängung zwischen Hybridfügepunkten. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechbearbeitung e.V. - Forschungsbericht Nr. 424 (2015)
- [6] M. Müller, Y. Tong, H. Fricke, T. Vallée: An efficient numerical model for the evaluation of compression flow of high-viscosity adhesives. International Journal of Adhesion and Adhesives 85 (2018), 251-262

### Die Autoren

**Dr. Michael Frauenhofer**  
**Marc Gormanns**  
**Martin Simon**  
 Audi AG

**Dr. Martin Rütters**  
**Dr. Holger Fricke**  
 – korrespondierender Autor –  
 (holger.fricke@ifam.fraunhofer.de)  
 Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Bremen