



DR. KONRAD STEINER
ABTEILUNGSLEITER

INDUSTRIELL EINSETZBARE MULTISKALENSIMULATION UND KUNDENSPEZIFISCHE SOFTWARELÖSUNGEN

Unsere Abteilung Strömungs- und Materialsimulation entwickelt Multiskalenmethoden und Softwaretools für die Produktentwicklung sowie deren Prozessauslegung. Eine der typischen Herausforderungen ist, die wechselseitige Beeinflussung von Fertigungsverfahren und multifunktionalen lokalen Materialeigenschaften durch Simulation zu beherrschen.

Unsere Abteilung unterteilt sich – auch schon namentlich – in zwei größere Kompetenzbereiche. Der Schwerpunkt »Computergestütztes Materialdesign und Mikrostruktursimulation« hat die numerische Simulation und Optimierung funktionaler Eigenschaften von porösen Materialien und Verbundwerkstoffen im Fokus. Besonders intensiv nachgefragt sind unsere mikromechanischen Simulationsmethoden zur Materialauslegung faserverstärkter Verbundwerkstoffe sowie technischer Textilien. Die effiziente Einbindung der Mikromechanik und -dynamik als Multiskalenmaterialmodell in CAE-Software ermöglicht die detaillierte Vorhersage von lokalem Crash-, Schädigungs- oder auch Kriechverhalten.

Die »simulationsgestützte Auslegung komplexer Strömungsprozesse« befasst sich u. a. mit den dazugehörigen Herstellungsprozessen wie Beschichten, Mischen, Aufschäumen, Einspritzen, Filtrieren und Separieren. Fokus in der industriellen Anwendung liegt auf der Auslegung von Filteranlagen. Insbesondere reaktive Prozesse – wie die katalytische Filtration, das Aufschäumen von Polyurethan oder die elektrochemischen Vorgänge in Batterie- und Brennstoffzellen – bilden wir mit unseren Simulationstools korrekt ab.

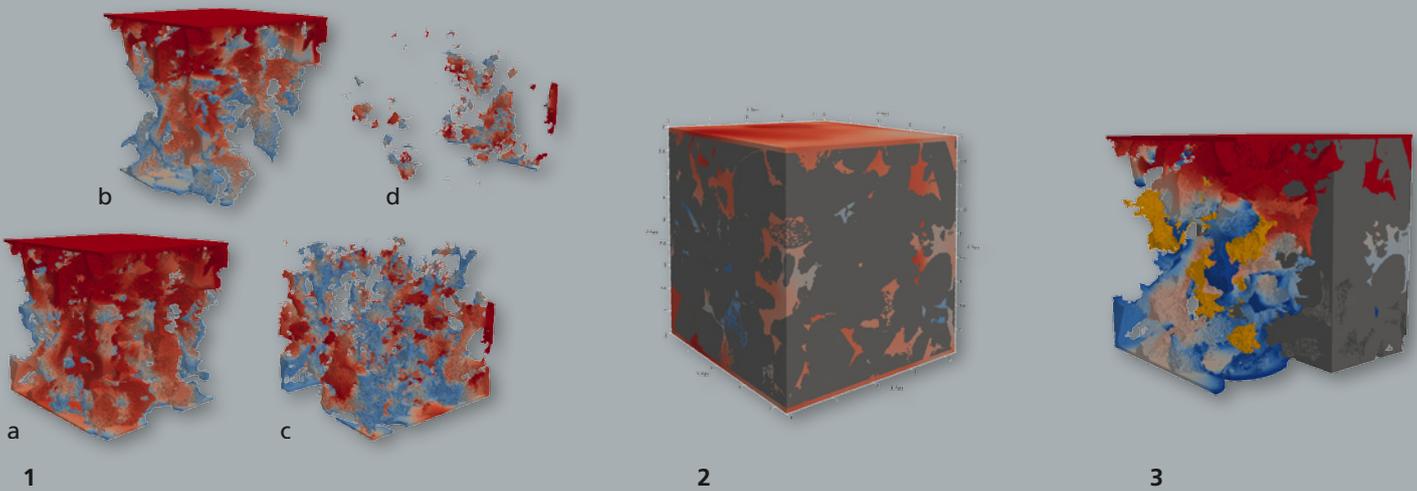
Kontakt

konrad.steiner@itwm.fraunhofer.de
www.itwm.fraunhofer.de/sms

SCHWERPUNKTE

- Technische Textilien und Vliesstoffe
 - Mikrostruktursimulation und virtuelles Materialdesign
 - Leichtbau und Dämmstoffe
 - Filtration und Separation
 - Komplexe Fluide und Mehrphasenströmung
 - Elektrochemie und Batterien
-





RESKIN – VORHERSAGE VON AUFLÖSUNGSRATEN IM RESERVOIRGESTEIN

1 Konzentrationen von CO_2 (a), H^+ (b), Ca^{2+} (c) und HO^- (d) während einer reaktiven Transportsimulation in Gesteinsporen

2 Lösung eines Zellproblems für die Berechnung effektiver Transportgrößen für die Bohrkern-Skala

3 Auflösung von Calcitkristallen (gelb) und Konzentration von H^+ -Ionen in Gesteinsporen

Gesteine sind aus verschiedenen Mineralien aufgebaut. Da Lösungs- und Fällungsreaktionen die hydrodynamische Durchlässigkeit und damit den Transport von Chemikalien in Gesteinen verändern, ist die Vorhersage der Auflösraten dieser Mineralien für viele geologische Anwendungen von Bedeutung – z. B. für die Ölgewinnung oder die Kohlendioxidspeicherung im Gestein. Im Projekt ResKin (Reaktionskinetik in Reservoirgesteinen) untersuchen wir gemeinsam mit unseren Verbundpartnern die Lösungskinetik von Mineralien und deren Wechselwirkung mit Transportprozessen im Gestein.

Die gemessenen Auflösraten, selbst für das selbe Mineral, variieren in Experimenten über bis zu zwei Größenordnungen, selbst unter identischen Bedingungen. Dafür werden vier Effekte als Ursachen angenommen:

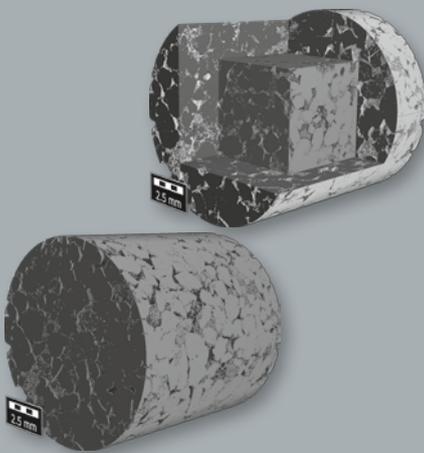
- der Einfluss der Hydrodynamik der Lösungsflüssigkeiten
- die chemische Variabilität der gelösten Mineralien
- die intrinsische kinetische Variabilität des Lösungsprozesses
- die mechanischen Spannungen im Gestein

Skalenübergreifendes Verständnis der Reaktionskinetik erarbeiten

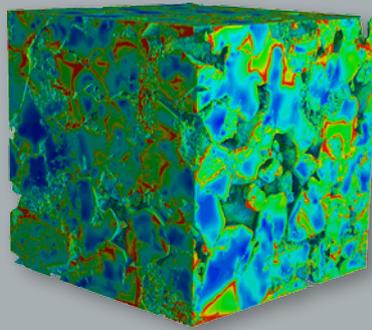
Das Projekt ResKin hat das Ziel, diese Effekte zu untersuchen und ein Modell zu entwickeln, dass die Kinetik der chemischen Reaktionen im Gestein vorhersagt. Dafür wenden wir verschiedene Modellierungs- und Simulationstechniken auf den jeweiligen Längenskalen an. Auf der atomaren Skala (nm) kommen Monte-Carlo-Simulationen zur Untersuchung der Variabilität des Auflösungsprozesses zum Einsatz. Auf der Porenskala (μm) führen wir reaktive Transportsimulationen durch (Abb. 1). Auf der Bohrkernskala (cm) nutzen wir makroskopische Transportmodelle, die sich mit Experimenten vergleichen lassen. Letztendlich koppeln wir durch Mehrskalmodellierung die Simulationstechniken miteinander.

Simulationen mit PoreChem machen Vorhersagen möglich

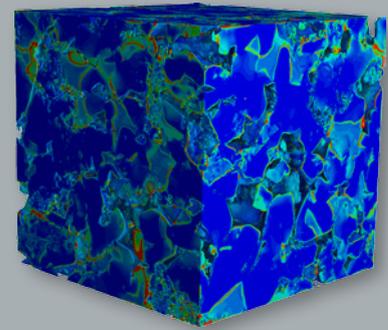
Für das Projekt gilt es, die komplexen chemischen Reaktionen im porösen Gestein zu berechnen – und zwar einschließlich der Auflösungsvorgänge (Abb. 3), bei denen sich die Gesteinsgeometrie während der Simulation ändert. Außerdem müssen Zellprobleme auf der Porenskala zur Berechnung von Transportparametern für die Modelle auf der Bohrkernskala gelöst werden (Abb. 2). Unsere Software PoreChem wurde dafür entsprechend erweitert. Damit ermöglichen unsere Simulationen prädiktive Vorhersagen für Auflösungsprozesse in Reservoirgesteinen.



1



2



3

FEELMATH – PORENDRUCK IN GESTEIN DIGITAL SIMULIEREN

Durch Computersimulationen und Bildanalyse erhalten wir neue Einsichten in Prozesse, die im Inneren von Gesteinen ablaufen. Im Projekt ResKin haben wir unser Analyse-Tool FeelMath erweitert und untersuchen u. a. Porendruckschwankungen. Es dient zur Berechnung effektiver mechanischer und thermischer Eigenschaften von Mikrostrukturen, die durch Volumenbilder oder analytische Beschreibungen gegeben sind.

Digital Rock Physics (DRP) als innovative Technik für die Bohrkernanalyse

Vorherzusehen, wie sich flüssigkeitsgesättigte Gesteine verformen, ist in vielen Anwendungsgebieten von großer Bedeutung – z.B. beim Fracking von Gesteinen oder in der Geothermie. Die digitale Gesteinsphysik (Digital Rock Physics/DRP) arbeitet bildbasiert und ermöglicht die Abschätzung der Gesteinseigenschaften durch numerische Simulationen anhand von 3D-Scans von Gesteinsproben. Die DRP gilt als innovative Technik zur Simulation von Gesteinseigenschaften, ergänzt Labormessungen und hilft, Erkenntnisse über komplexe Prozesse in heterogenen Materialien zu gewinnen.

Simulationen unter Berücksichtigung von Porendruck

Traditionell fokussiert sich die digitale Gesteinsphysik auf die Durchströmung des Porenraumes mit Öl oder Wasser. In diesem Projekt haben wir unser mikromechanisches Analysetool FeelMath erweitert, um auch den Druck von flüssigkeitsgefüllten Poren auf die Gesteinsmatrix zu berücksichtigen. Diesen nennt man Porendruck. Abhängig von den Randbedingungen wird die poroelastische Reaktion als entwässert (der Porendruck steigt nicht) oder nicht entwässert (der Porendruck steigt, da die Flüssigkeit die Gesteinsprobe nicht verlassen kann) beschrieben. Im letzteren Fall hängt die Steifigkeit des Gesteins von der Steifigkeit des Gesteinsmaterials und vom Druck der Flüssigkeit ab, welcher einer Kompression der Bohrkernprobe entgegenwirkt.

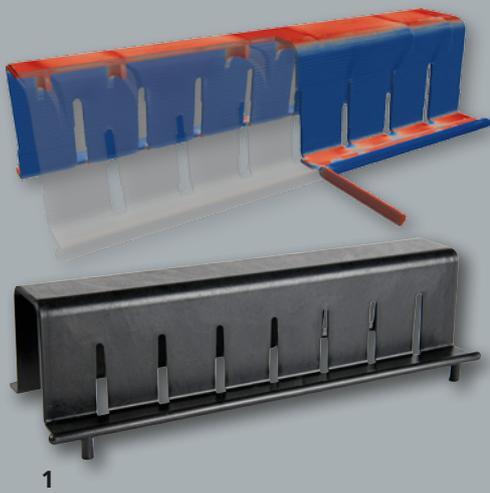
Klassische Theorien ergänzt um innovative Technik der DRP

Beim Entwickeln unserer numerischen Methode für die Analyse von nichtlinearen, poromechanischen Effekten von Gestein – wie Plastizität, Schädigung, Rissbildung – haben wir unsere Methode zunächst mit der Biot-Gassmann-Theorie verglichen. Diese erlaubt es, die Steifigkeit – basierend auf der Steifigkeit der flüssigkeitsfreien Bohrkernprobe – mit flüssigkeitsgefüllten Poren vorherzusagen. Im Gegensatz zur Biot-Gassmann-Theorie werden die Methoden der digitalen Gesteinsphysik direkt auf Gesteine mit geschlossener Porosität angewendet sowie um nichtlineare Effekte im Gesteinsmaterial erweitert.

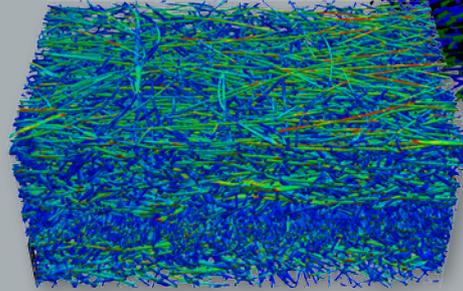
1 Bohrkernprobe (unten) und repräsentatives Volumenelement der Bohrkernprobe (oben)

2 Schädigung aufgrund des Porendrucks

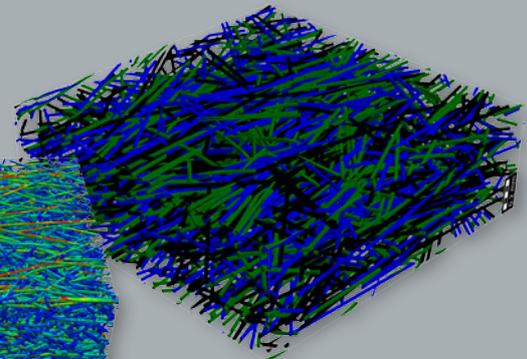
3 Spannungskonzentration aufgrund des Porendrucks



1



2



3

CHARAKTERISIEREN UND MODELLIEREN VON LANGFASERVERSTÄRKTEN THERMOPLASTEN

1 Faserorientierungsverteilung im Bauteil aus der Spritzgussimulation

2 Mit FeelMath berechnete Spannungskonzentration auf einer Bauteilprobe

3 Ausschnitt eines digitalen Zwillinges des Verbundwerkstoffs

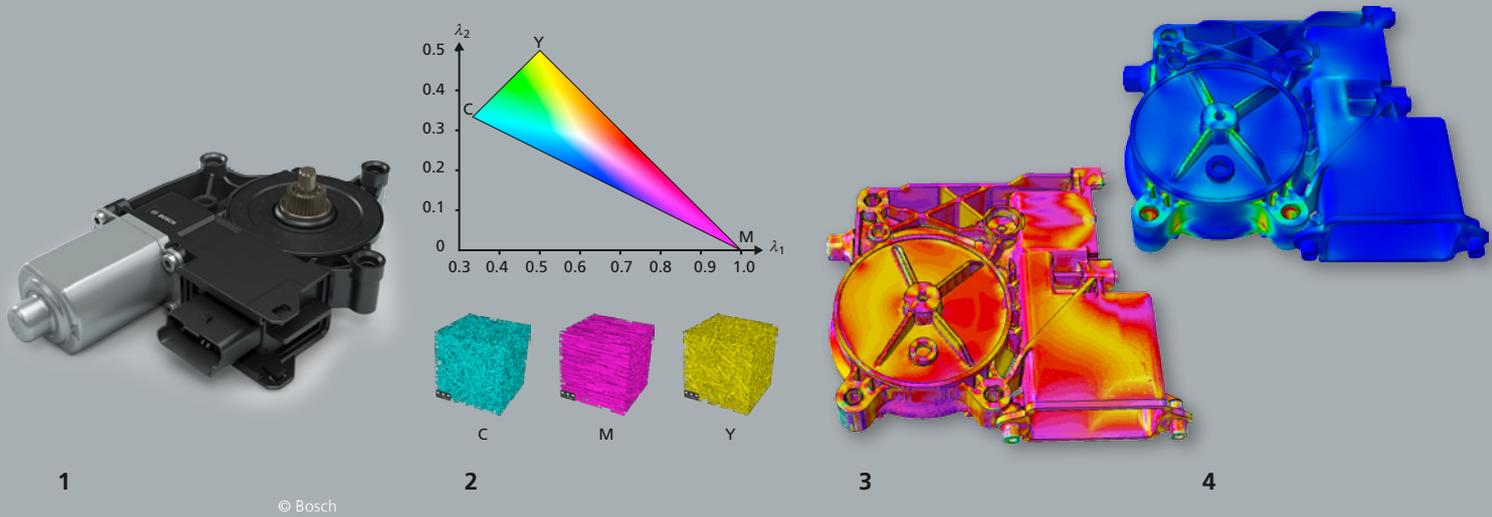
Faserverstärkte Kunststoffe sind leichter und belastungsfähiger als nicht-verstärkte Kunststoffe und sind daher inzwischen in der Automobilbranche eine bevorzugte Materialklasse. Besonders bei sicherheitsrelevanten Bauteilen im Fahrzeug ist es wichtig, Versagen und Schädigung vorauszusagen. In diesem Projekt unterstützen wir Unternehmen aus der Automobilindustrie bei der Analyse und Vorhersage dieser Mechanismen.

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) kommen in crashrelevanten Bauteilen oft zum Einsatz. Bei Crash-Anwendungen verwendet die Industrie bevorzugt lange Fasern, da die Festigkeit mit der Faserlänge zunimmt. Ein weiterer Vorteil von langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT): Sie lassen sich leicht verarbeiten z. B. durch Spritzgießen. Die Modellierung ihres Materialverhaltens ist jedoch eine Herausforderung, denn bei makroskopischer Betrachtung sind die Fasern und die Matrix nicht einzeln, sondern als Gesamtsystem zu sehen. Sie sind in ihrer Beschaffenheit inhomogen und es gilt nichtlineare Effekte auch auf der Mikroskala zu berücksichtigen. In diesem Forschungsprojekt untersuchen wir die Schädigungs- und Versagensmechanismen von LFT.

Digitaler Zwilling für Werkstoffe

Gemeinsam mit Forschenden vom Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM analysieren wir diese Mechanismen an einer realistischen Geometrie – sowohl experimentell als auch mithilfe von Simulationen. Im ersten Schritt erstellt unser Strömungslöser FLUID eine Vorhersage über die Orientierung der Fasern im gesamten Bauteil. Anhand von CT-Bildern an charakteristischen Positionen wird dann überprüft, ob die Vorhersage der Faserorientierung genau ist. Nachdem wir die geometrischen Eigenschaften des Materials vollständig beschrieben haben, erzeugen wir auf dieser Basis digitale Zwillinge des Verbundwerkstoffs.

Mithilfe einer dynamisch-mechanischen Analyse (DMA) am reinen Polymermatrixmaterial bestimmen wir die nichtlinearen Materialparameter und berücksichtigen Effekte wie Plastifizierung oder Schädigung. So konnten wir zeigen, dass wir mithilfe unseres Softwaretools FeelMath das Materialverhalten mit hoher Genauigkeit vorhersagen können. Gleichzeitig bleibt der experimentelle Aufwand gering. Das mikromechanische Modell und die Faserorientierung aus der Spritzgussimulation dienen mehreren Zwecken. Wir führen so virtuelle Experimente zur Kalibrierung von makroskopischen Modellen durch und reduzieren die experimentellen Kosten. Mit den digitalen Zwillingen des Verbundwerkstoffs untersuchen wir den Einfluss geometrischer und physikalischer Parameter – wie z. B. Faserlänge, Faserorientierung oder Dehnrage. Auf der folgenden Seite zeigen wir, wie das mikromechanische Modell mit einer makroskopischen mechanischen Simulation mit Multiskalenmethoden gekoppelt werden kann.



EFFIZIENTE MULTISKALEN-VERFAHREN FÜR KURZ-FASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE

In industriellen Anwendungen sind Bauteile aus kurzfaserverstärkten Polymerverbundwerkstoffen häufig zyklischen Belastungen ausgesetzt. In einer Kooperation mit Bosch haben wir eine Multiskalen-Simulationsmethode entwickelt, um Einblick in das viskoelastische Verhalten und das Ermüdungsverhalten dieser Bauteile zu erhalten.

Die elastischen und nicht-linearen Materialeigenschaften von Spritzgussteilen hängen stark von der lokalen Faserorientierung ab, die innerhalb des Bauteils kontinuierlich variiert. Aufgrund des hohen Längen-Durchmesser-Verhältnisses der Fasern und des großen Unterschieds zwischen der Makro- und der Mikroskala des Bauteils ist die Auflösung einzelner Fasern nicht möglich. Um dieses Problem zu überwinden und die Wechselwirkung zwischen der Mikrostruktur und dem makroskopischen Verhalten zu erfassen, haben wir eine gekoppelte FEM-FFT-Methode (Finite-Elemente-Methode, Fast-Fourier-Transformation-Methode) auf zwei Skalen verwendet.

Materialmodelle für die Entwicklung digitaler Zwillinge

Der grundlegende Schritt dieser Methode ist die Charakterisierung des mechanischen Verhaltens auf der Mikroskala (siehe auch AIF-Versagen). Gemeinsam mit unserem Projektpartner Bosch untersuchen wir das viskoelastische Verhalten und das Ermüdungsverhalten von kurzglasfaserverstärkten Thermoplastproben. Unser Projektpartner stellt uns mechanische Messungen und CT-Bilder zur Verfügung, um das Verhalten von Proben mit spezifischen Faserorientierungen zu analysieren. Auf dieser Basis entwickeln wir geeignete Materialmodelle, um digitale Zwillinge des Verbundwerkstoffs im Mikromaßstab der Proben zu erstellen.

Zweistufiger Ansatz mit Vollfeldsimulationen und Modellordnungsreduktionen

Wir erarbeiteten einen zweistufigen Ansatz, um den numerischen Aufwand der gekoppelten FEM-FFT-Multiskalen-Methode zu reduzieren. Im ersten Schritt verwenden wir einen hocheffizienten Mikroskalenlöser, unser Softwaretool **FeelMath**, um Vollfeldsimulationen an repräsentativen Volumenelementen der Mikrostruktur für Probenfaserorientierungen durchzuführen. Mittels Modellordnungsreduktionsverfahren erhalten wir dann effektive Materialmodelle für diese Faserorientierungen und erfassen sie in einer Datenbank. Mit diesem Datenbankkonzept reduzieren wir den numerischen Aufwand drastisch, so dass das Multiskalen-Verfahren erstmals für industrielle Probleme einsetzbar und für unseren Partner nutzbringend anwendbar ist.

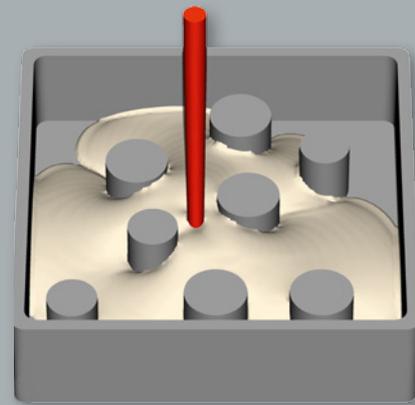
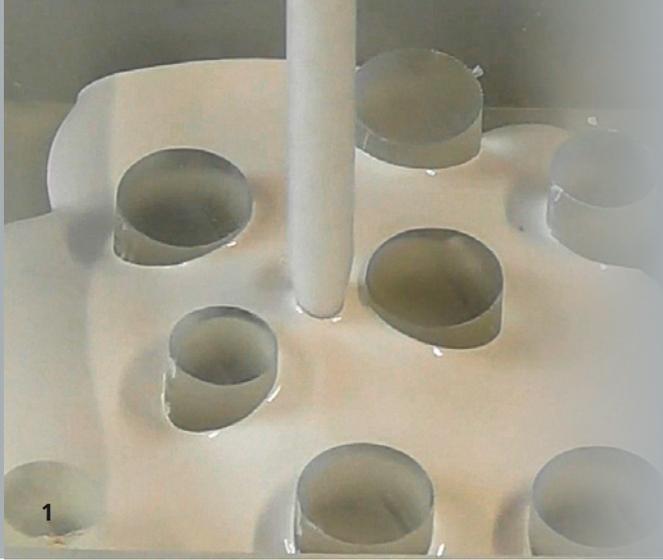
1 Elektrischer Fensterheberantrieb mit kurzfaserverstärktem Kunststoffgehäuse

2 Mittels der zwei größten Eigenwerte des Faserorientierungstensors zweiter Stufe (λ_1, λ_2) aufgespanntes Faserorientierungsdreieck; (C) isotrope, (M) unidirektionale, (Y) planar isotrope Faserorientierung

3 Mit einer FLUID-Spritzgussimulation ermittelte, lokale Faserorientierungsverteilung des Fensterheberantriebsgehäuses auf dem Finite-Elemente-Netz im Farbcode von Abb.2 dargestellt

4 Lokale von Mises-Spannungsverteilung, simuliert mit der datenbankbasierten Multiskalen-Methode





VERGUSSPROZESSSIMULATION VON ELEKTRO- NISCHEN BAUTEILEN

1+2 Vergussmasse Front-
position: Experiment und
Simulation

Durch Vergießen werden elektronische Bauteile durch partikelverstärkte Polyurethanharze komplett umschlossen, um ihre Zuverlässigkeit zu sichern. Im Projekt SOVEB (Simulationsgestützte Optimierung des Vergussprozesses elektronischer Bauteile) simulieren wir diesen Prozess mit unserer Software FLUID, damit Unternehmen ihre Produktionsschritte optimieren können.

Die rasante Entwicklung der Mikroelektronik hat dazu geführt, dass aus isolierten elektronischen Komponenten zunehmend hochintegrierte Bauteilsysteme werden. Daraus resultiert u. a. eine hohe Wärmeabgabe während des Betriebs. Aber auch Anforderungen wie Langzeitstabilität und Funktionssicherheit steigen mit der Komplexität. Ein Beispiel: LEDs sind empfindliche, elektronische Komponenten und benötigen zusätzlichen Schutz gegen Beschädigung etc.

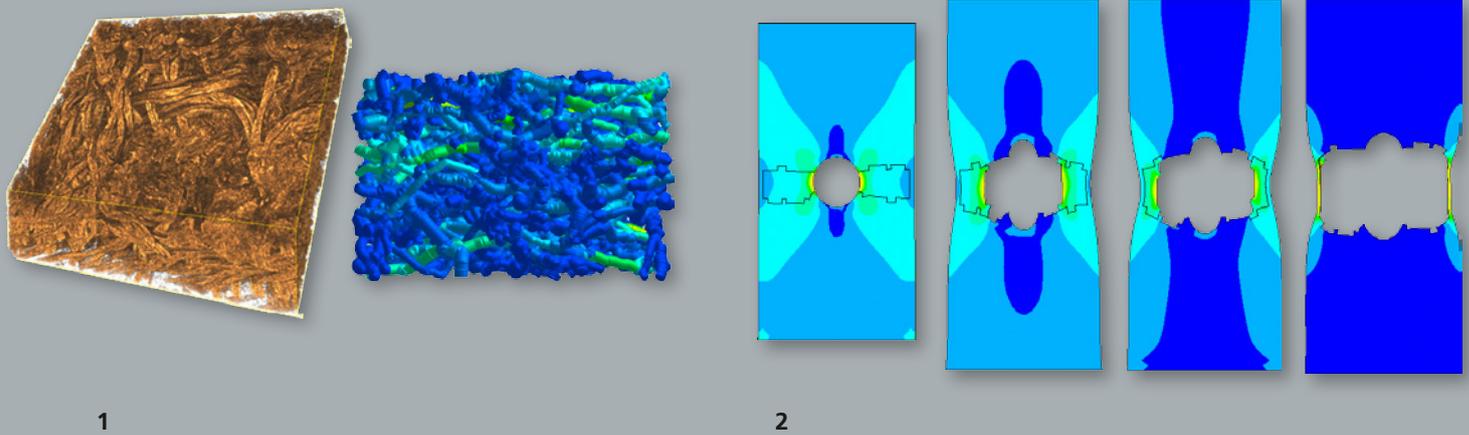
Partikelverstärkte Harze zum Schutz von elektronischen Geräten

Polyurethanharz sind ein typisches Beispiel für Vergussmassen zur kompletten Umschließung von Elektronikbauteilen. Sie schützen empfindliche elektronische Komponenten nicht nur vor Stößen, Vibrationen, Feuchtigkeit, sondern auch vor Überhitzung der Komponenten. Die Vergussmassen erreichen ihre hohe Wärmeleitfähigkeit durch die Hinzugabe von Partikeln. Diese unterscheiden sich in Form, Größe und Füllmaterialbeladung. Die resultierende Vergussmasse aus partikelverstärkten Polyurethanharzen bildet eine extrem hochviskose Suspension, die für Simulationen sehr anspruchsvoll ist.

Entwicklung optimaler Simulationswerkzeuge für industrielle Anwendungen

Um die Dynamik solcher Suspensionen korrekt zu beschreiben, verwenden wir Strömungsmodelle und eine angepasste numerische Diskretisierung. Nach der Parameteridentifikation der Viskositätsparameter führen wir mit unserer Software FLUID numerische Studien durch, um die richtige Materialverteilung bei der Formfüllung vorherzusagen. Durch die Simulationsstudien im Vorfeld, optimieren wir Bahn und Dynamik der Einfülldüse wie auch das Werkzeugdesign.

Unsere Ergebnisse (siehe Abbildung) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen, die das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM durchgeführt hat. Das entwickelte Simulationswerkzeug steht somit der Industrie sowohl für Auslegungs- und Optimierungsstudien zur Verfügung, aber auch als Softwaretool, um die Zusammensetzung der Vergussmassen und ihre effiziente industrielle Verarbeitung im Voraus zu berechnen.



SIMULATION UND VORHERSAGE DER MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN VON LEDER

Lange Faserbündel, die sich in Netzwerke verzweigen und an vielen Stellen verwoben sind – so sieht die Mikrostruktur von Leder aus. Makroskopisch gesehen, ist Leder ein anisotropes Material. Zum Einsatz kommt es in Autositzen, Möbeln oder Kleidung. Im vorgestellten Projekt – gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) – dreht sich alles um die Vorhersage der Ledereigenschaften.

Die Eigenschaften von Leder hängen von der Anordnung der Faserbündel, ihrer Dicke, Länge und ihren Eigenschaften ab. Da Leder ein Naturprodukt ist, weist es gegenüber Kunststoffen und Textilien viel ungleichmäßigere Materialeigenschaften auf. Unter den Bedingungen der industriellen Massenfertigung ergibt sich die Notwendigkeit, die Produkte am Computer zu entwerfen und das Verhalten vorab zu beurteilen. Gemeinsam mit der Abteilung »Bildverarbeitung« und dem Forschungsinstitut für Leder- und Kunststoffbahnen FILK simulieren wir das Verhalten mittels Modellierungs- und Homogenisierungsmethoden auf Grundlage von Mikro-CT-Bildern der Struktur und der gemessenen viskoelastischen Eigenschaften der Faserbündel.

Mikroskopische Simulationen mit der Software FISFT

Die CT-Aufnahmen weisen darauf hin, dass das Leder aus vielen Faserbündeln besteht, deren Orientierung entlang der Schichtdicke variiert (Abb. 1). Anhand der gemessenen Eigenschaften der Faserbündel simulieren wir das Verhalten der Struktur mithilfe unserer Software FISFT. Diese ermöglicht die Berechnung von großen Fasersystemen für große Verformungen mit gleichzeitigem Kontaktgleiten an Millionen von Knotenpunkten. Dabei berücksichtigt FISFT den Einfluss der Gleitreibung in Faserbündelknoten auf das Lederverhalten.

Berechnung der Relaxationszeit von Leder

Wir untersuchen zudem, wie die Relaxationszeit des Ledermaterials mit dem Relaxationsverhalten des Faserbündels zusammenhängt. Auf Grundlage unserer bisherigen Analyseergebnisse konnten wir zeigen, dass sich das makroskopische Relaxationsverhalten berechnen lässt, indem wir das Relaxationsverhalten eines einzelnen Faserbündels mit dem rein strukturellen geometrischen Faktor multiplizieren, den wir aus den CT-Aufnahmen ermitteln. Diese Vermutung konnten wir bestätigen – anhand experimenteller Daten von Zugversuchen für Leder und Faserbündel. Wir führen außerdem makroskopische Simulationsanalysen von Ledern durch. Dabei berücksichtigen wir die Festigkeit der Garne, die Faserbündelstruktur sowie die berechneten homogenisierten Eigenschaften und lokalen Spannungen. (Abb. 2).

1 Mikro-CT-Segmentierung des Leders und seines FIFST-Modells: Die langen, gekrümmten Zylinder sind verzweigt, miteinander verwoben und an vielen Stellen gekreuzt.

2 Zugsimulation der Leder-schäden in der Nähe eines Lochs; So berechnen wir das anisotrope Wachsen eines gestanzten Loches im Leder voraus, das bei Zugbelastungen entsteht und sagen so realistische Materialbeanspruchungen vorher.





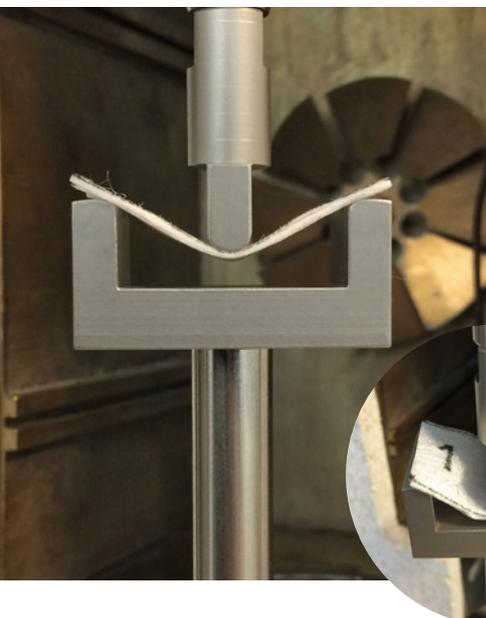
STRUCTUR.E: NEUES PROJEKT ZUM SCHNELLLADEN IN DER E-MOBILITÄT



Da lange Wartezeiten für Elektrofahrzeuge an Ladestationen künftig der Vergangenheit angehören sollen, erforschen wir in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekt »structur.e« Methoden, welche die Schnellladefähigkeit von Batterien verbessern sollen. In einem großen Projektkonsortium unter der Koordination der Volkswagen AG arbeiten zehn Unternehmen und Forschungseinrichtungen nicht nur an der Entwicklung neuer Elektrodenkonzepte, sondern auch an geeigneten Charakterisierungsmethoden.

Diese Arbeiten werden darüber hinaus durch computerbasierte Simulationsmethoden unterstützt, die wir bei uns am ITWM entwickeln. Dabei geht es um die prädiktive Simulation der Batteriezelleigenschaften, die sich aus den verschiedenen Strukturierungskonzepten ergeben. Die Fraunhofer-Ausgründung Math2Market erstellt hierfür die Strukturmodelle. Zusammen mit dem Projektpartner DLR entwickeln wir Modelle und implementieren sie in unserer Simulationssoftware BEST. Durch die enge Verzahnung zwischen Experiment und Simulation verbessern wir im Projekt Langlebigkeit und Leistungsfähigkeit der Zellen und beschleunigen deren Entwicklung.

AIF-PROJEKT FÜR VERBESSERTE FILTERSIMULATIONEN



Bei der Simulation von Filtrationsvorgängen wird das Filtermedium in der Regel als starres Material modelliert. In vielen wichtigen Anwendungen trifft dies allerdings nicht zu: Der bei der Durchströmung des Medium entstehende Differenzdruck führt zu einer Verformung, was z. B. bei gefalteten Filtern erhebliche Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und entsprechenden Messungen nach sich ziehen kann.

Die Wechselwirkung zwischen Strömungs- und Strukturmechanik in Filtermedien ist ein komplexes Phänomen und daher eine große Herausforderung für experimentelle Untersuchung und Modellbildung. Die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) fördert ein Projekt, in dem wir gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik der TU Kaiserslautern an der adäquaten Berücksichtigung der Verformung in der Modellierung forschen. Dadurch können Simulationen die Auslegung innovativer und optimierter Filterbauteile noch besser unterstützen. Das Forschungsvorhaben stößt in der Filtrationsbranche auf sehr großes Interesse und eine Reihe renommierter Unternehmen aus diesem Bereich engagiert sich im projektbegleitenden Ausschuss.