



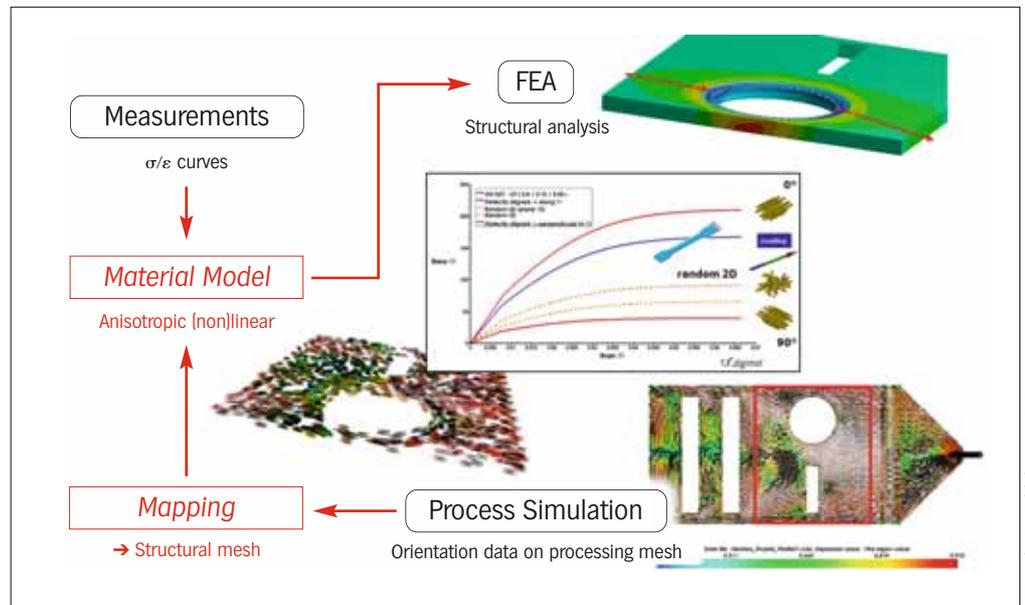
Modellierung und Simulation von Verbundwerkstoffen



Faserverstärkte Kunststoffe zeichnen sich durch ein günstiges Verhältnis von Steifigkeit zu Gewicht und eine große Anpassbarkeit hinsichtlich vieler produktrelevanter Eigenschaften aus. Mit der Digimat-Suite bietet die MSC-Software-Tochter e-Xstream leistungsfähige Simulationswerkzeuge für die Analyse von Materialeigenschaften und macht prozessabhängige Materialdaten für die Berechnung von Composite-Bauteilen verfügbar.



Die Automobilindustrie setzt verstärkt auf CFK (links)



Bilder / Quelle: MSC Software 2013

Prozesskette Materialdaten-Extraktion

Flugzeuge, Elektrofahrzeuge oder Rennyachten sind nur ein paar – wenn auch ziemlich spektakuläre – Beispiele, bei denen faserverstärkte Kunststoffe (FVK) zum Einsatz kommen. Diese Verbundwerkstoffe weisen bei geringem Gewicht hohe spezifische Steifig- und Festigkeiten auf, was sie für Leichtbauanwendungen besonders attraktiv macht. Allerdings sind sie auch wesentlich teurer in der Herstellung als andere Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium oder Stahlguss, was eine genaue Analyse des Einsatzgebiets unumgänglich macht (1).

Bei FVK umgibt eine sogenannte Matrix die Fasern, die durch Adhäsiv- oder Kohäsivkräfte gebunden sind. Es kommt zu einem richtungsabhängigem Elastizitätsverhalten („Anisotropie“), was bei der Simulation und Berechnung weitreichende Konsequenzen hat. Dabei leiten die Fasern die Kräfte, denn durch ihre im Vergleich zur Matrix hohe Steifigkeit ziehen sie die Last regelrecht auf sich. Die Lastübertragung kann über Normal- oder Schubkräfte erfolgen.

Ein wichtiges Unterscheidungskriterium ist neben der Art der Fasern deren Länge. Beim kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff zum Beispiel, auch CFK (carbonfaserverstärkter Kunststoff oder englisch: carbon-fiber-rein-

forced plastic, CFRP), werden Fasern aus Kohlenstoff verwendet. Neben organischen werden auch anorganische, metallische und nachwachsende Fasern als Verstärkung verwendet. Kurzfasern haben eine Länge von 0,1 bis 1 mm, Langfasern bis 5 cm (2). Kurzfasern werden in der Spritzgusstechnik eingesetzt und können direkt mit einem Extruder verarbeitet werden. Die bisherigen Kurzfasertechnologien sind in ihrer Effektivität mit dem konventionellen Spritzgussverfahren allerdings nicht zu vergleichen (3). Die verwendeten Pressverfahren erfordern meist sehr teure Werkzeuge und werden deshalb nur bei Großserien eingesetzt. Fortschritte verspricht man sich hier durch langfaserverstärkte Kunststoffe. Anwendungsfälle, in denen bisher Leichtmetalle oder Duroplaste eingesetzt wurden, lassen sich durch entsprechend verstärkte Thermoplaste kostengünstiger herstellen (3).

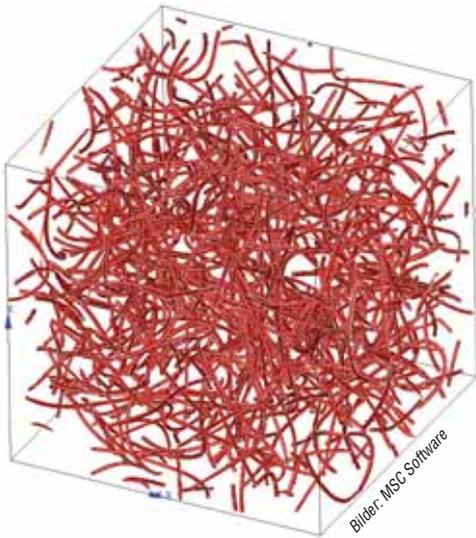
Brücke zum Design

Freilich nicht nur der Fertigungsprozess, sondern auch der Entwicklungsprozess von Produkten aus FVK will beherrscht sein. Während des Fertigungsprozesses treten in der Kavität unterschiedliche Strömungs-

geschwindigkeiten und -richtungen auf, die lokal zu unterschiedlicher Dichte und Ausrichtung der Fasern führen und damit zu nichtlinearen anisotropen Materialeigenschaften. Diese müssen in Simulation und Berechnung berücksichtigt werden, denn die Wahl des korrekten Materialmodells ist eine Grundvoraussetzung für jede realistische Analyse. Während man bei konventionellen orts- und richtungsunabhängigen („isotropen“) Werkstoffen vereinfachend von bestimmten, aber konstanten Eigenschaften über die gesamte Struktur ausgeht, ist dies aufgrund ihrer Anisotropie bei FVK eben nicht möglich.

FVK lassen sich physikalisch auf unterschiedlichen mechanischen Ebenen beschreiben. In einem sogenannten mikromechanischen Ansatz betrachtet man die einzelne, in der Matrix gebettete Faser in Form eines zweiphasigen Gemisches. Es lassen sich Spannungen und Dehnungen in Faser und Matrix berechnen.

In einem makromechanischen Modellierungsansatz wird der Verbund als homogen angesehen. Das heißt, seine Eigenschaften sind vom Ort unabhängig, jedoch weiterhin richtungsabhängig. Mit Hilfe der Makromechanik erhält man globale Spannungs- und Dehnungswerte als mittlere Größen. Beide



Modellierung eines Langfasermaterials

Modellierungsansätze unterscheiden sich deutlich im Rechenaufwand.

Heraus aus dem Elfenbeinturm

Das seit 2012 zu MSC Software mit Euro-pazentrale in München gehörende belgische Unternehmen e-Xstream hat in den vergangenen zehn Jahren mit der Digimat-Softwarefamilie ein Lösungsportfolio entwickelt, das ein sehr breites Spektrum für Bestimmung, Modellbildung und simulationstechnische Verarbeitung der Materialkenn-daten von Composite-Werkstoffen abdeckt. Ziel war es, mit dem Spin-off der belgischen Universität Louvain La Neuve vielversprechende Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis zu überführen.

Durch seinen modularen Aufbau können mit Digimat anspruchsvolle Aufgabenstellungen ganz gezielt gelöst werden: als eigenständiges virtuelles Materiallabor, als Material-Interface zu den marktgängigen Codes für die strukturmechanische Berechnung oder als vollständiges Interface zwischen Spritzgießsimulation und Strukturmechanik.

Durch den von e-Xstream verfolgten Ansatz einer multiskalaren Modellierung können von Untersuchungen der Mikrostruktur eines Werkstoffes bis hin zu umfassenden Analysen auf Systemebene alle Bereiche abgedeckt werden. Die Software Suite richtet sich an Materialhersteller und -lieferanten, an deren Kundenkreis aus der Automobil- und Luftfahrtindustrie, aber auch an Anwender aus dem Elektronikbereich und vielen anderen Branchen. Die gebotenen Module, die einzeln oder kombiniert eingesetzt werden können, haben folgende Charakteristika:

Digimat-MF – Mean-Field Homogenization. Auf Basis der Homogenisierungstheorie (Mittelwerttheorie) wird das Ma-

„Das Vertrauen kommt mit der Erfahrung“

Herr Dr. Seyfarth, wären Sie genötigt, die zugrunde liegende Idee von Digimat in einem Satz zu formulieren, was würden Sie sagen?

Aus dem Herstellverfahren folgt das Materialverhalten der Werkstoffe. Und ganz klar, diese wirken sich auf die Bauteileigenschaften aus. Dabei geht es uns stets darum, die mikromechanische Modellierung so konsequent anzuwenden, dass sie im industriellen Umfeld genutzt werden kann. Gerade für polymerbasierte Werkstoffe wie Composites spielt dies eine immer größere Rolle. Neben Kurz- und Langfasermaterialien bieten wir inzwischen auch Berechnungsmodelle für gewebte Materialien.

Auch die Hersteller von Faserverbundwerkstoffen nutzen Simulationstechniken ganz gezielt, um bestimmte Materialeigenschaften zu erreichen. Wie passt dies zum Angebot von e-Xstream?

Ganz einfach, das war die erste Kundenbasis, die wir gewinnen konnten! Die Materialhersteller hatten sehr schnell verstanden, was wir leisten. Über die Jahre hinweg hat sich Digimat zum Standard auf dem Markt entwickelt, insbesondere bei der Analyse von kurzfaserverstärkten Werkstoffen, die beispielsweise beim Spritzguss zum Einsatz kommen. Selbst Materialhersteller, die eigenentwickelte Tools verwenden, nutzen Digimat für die Kommunikation mit ihren Kunden. Oder auch wenn Rechnungen zwischen dem Kunden und dem Materialhersteller aufgeteilt werden, kommt Digimat zum Einsatz, weil es ein kommerzieller Code ist.

Im Bereich der Materialdatenbanken tut sich einiges – immer mehr Systemanbietern versuchen ihr Glück. Erntezunehmender Wettbewerb für e-Xstream? Nein. Eine Datenbank lag zu keinem Zeit-

punkt im Fokus von Digimat. Zwar haben wir eine im Angebot, die mit öffentlich zugänglichen Informationen gespeist wird, weil wir mit Materialherstellern zusammenarbeiten, aber Composite-Materialien sind so komplex, dass darüber hinaus individuelle Untersuchungen notwendig sind, beispielsweise um das Crash-Verhalten oder Phänomene wie Kriechen genau zu verstehen. Unsere Kommunikationsplattform hierfür heißt „Digimat MX“. Diese Plattform enthält, wenn die Materialhersteller sie uns zur Verfügung stellen, Materialmodelle und Ergebnisse spezieller anisotroper Messungen. Auch finden sich dort unsere eigenen, generischen Materialmodelle. Das Ganze ist so strukturiert, dass Material-experten mit Anwendern effizient zusammenarbeiten können. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, Materialmodelle verschlüsselt zur Verfügung zu stellen. Materialhersteller haben ja teilweise sehr viel Aufwand in ihre quantitativen Modelle investiert, den sie geschützt sehen wollen. Der Anwender einer Spritzgussimulation zum Beispiel kann auf ein verschlüsseltes Modell zugreifen. Zwar weiß er dann nicht im Detail, was im Bauteil geschieht, aber er hat die richtige Phänomenologie parat.

Wie schlagen Sie die Brücke zu MSC und deren Lösungen?

Wir bieten dafür Schnittstellenmodule an. Aber wir legen großen Wert auf Offenheit, weil der CAE-Markt ein offener ist. An dieser Strategie hat sich auch nach der Übernahme durch MSC Software nichts geändert. So bieten wir auch weiterhin unsere Schnittstellen zu Abaqus, Ansys, LS-Dyna, PAM-Crash und Samcef an.

An welchen Themen arbeiten Sie verstärkt?

Ein großes Standbein sind für uns die kurzfaserverstärkten Werkstoffe. Wir sind aber



Jan Seyfarth, Produktmanager bei e-Xstream, über die Simulationspraxis zur Funktionsabsicherung von Produkten aus faserverstärkten Kunststoffen.

auch auf forschungsintensiven Gebieten von Langfaser-Anwendungen engagiert. Langfaser-Werkstoffe haben eine noch viel komplexere Mikrostruktur als die kurzfaserbasierten. Diese Fasern neigen zur Clusterbildung und liegen ungeordnet in der Thermoplast-Matrix.

Ein anderes Thema sind Thermoplast-Schaumguss-Verfahren mit Kurzfaser-Füllstoffen, bei denen die Thermoplastmatrix aufgeschäumt wird. Hier gilt es, die Wechselwirkung von Fasern und Schaumstruktur modelltechnisch abzubilden.

Über MSC Software getrieben ist unser verstärktes Engagement in der Flugzeugindustrie, etwa bei endlosfaserverstärkten Materialien, bei denen eine Kontinuumsverstärkungsphase vorhanden ist, oder auch bei gewebten Werkstoffen. Wenn Sie so wollen, lässt sich unser Fokus wie folgt zu-

sammenfassen: faserverstärkte Polymere, und zwar in allen Varianten, die man so auf dem Markt findet.

Wie bekommt der Anwender Vertrauen in die Modellierung?

Letzlich durch die Erfahrung. Deswegen sage ich ja immer, dass unser wichtigstes Standbein Kurzfaser-Anwendungen sind. Hier haben wir sehr viel Erfahrung gesammelt. Wir wissen sehr genau, welche Messungen als Grundlage der Validierung nötig sind. Im Grunde genommen werden über einen Reverse-Engineering-Prozess, der anisotrop an den Composite-Materialien durchgeführt wird, die Materialparameter extrahiert. So können wir unseren Kunden ein parametrisiertes Modell in verschiedenen Qualitätsstufen bieten:

Qualitative Modelle. Die generischen

Modelle von Digimat sind derartiger Natur. **Semiquantitative Modelle.** Existierende Materialdaten können mit wenig Aufwand modifiziert werden, etwa durch eigene Messungen.

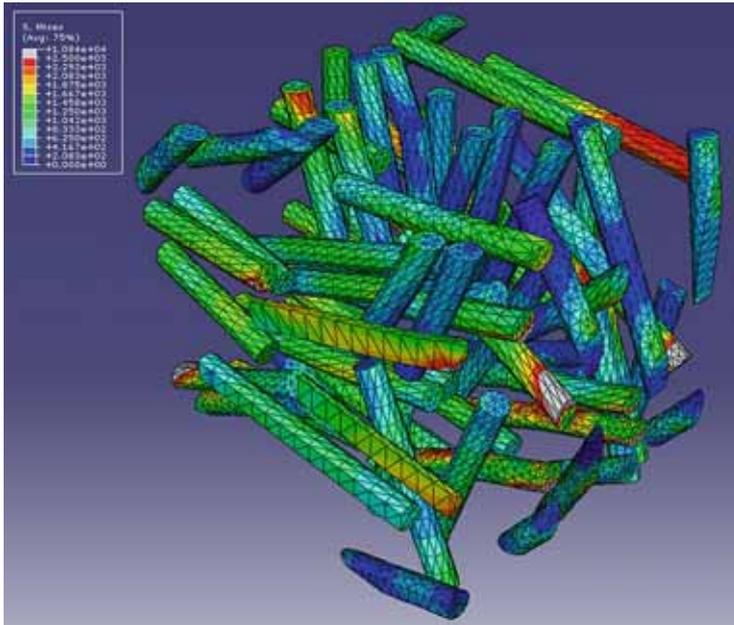
Quantitative Modelle. Diese werden von Materialhersteller – zum Teil verschlüsselt – zur Verfügung gestellt.

Wann werden Sie entsprechende Modelle für Langfaser-Kunststoffe bieten?

Binnen Dreijahresfrist dürften wir den gleichen Stand erreicht haben wie bei den Kurzfasern. Durch die Übernahme von MSC wird der industrialisierte Ansatz in unserem Geschäftsmodell noch weiter forciert.

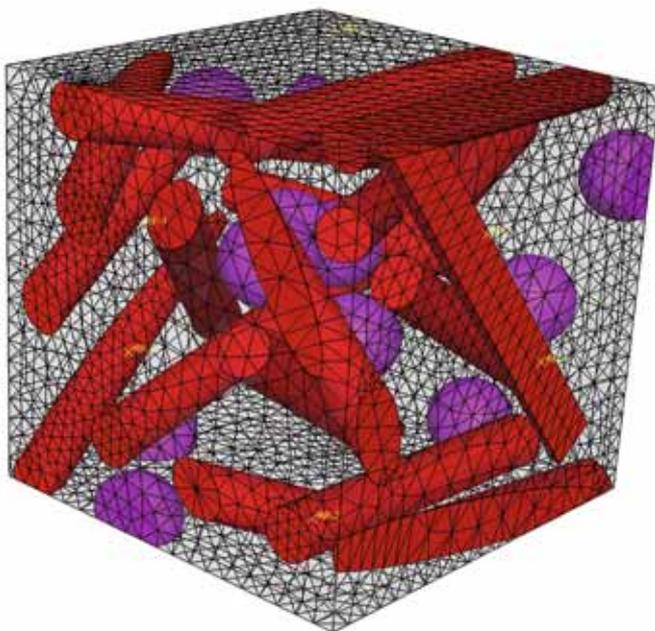
Vielen Dank für Ihre Stellungnahme!

Interview: BERNHARD D. VALNION



Simulation eines Kurzfasermaterials

Bilder: MSC Software



Vernetzung von Kurzfasern

terialverhalten komplexer Multi-phasen-Systeme beschrieben. So kann beispielsweise das nichtlineare Verhalten glasfaserverstärkter Polymere in Abhängigkeit von den Ausgangsmaterialien und der Morphologie der Mikrostruktur (Faseranteil, -länge und -orientierung) sehr genau wiedergegeben werden.

Digimat-FE – Homogenisierung auf Basis einer Finite-Elemente-Modellierung (FEM). Das Modul bereitet die Geometrie von Mikrostrukturen für eine detaillierte FE-Analyse in externen FE-Solvern auf. Durch die vielfältige Wahl an Parametern können nahezu beliebige Mikrostrukturen nachgebildet werden. Die resultierende Geometrie steht in verschiedenen Dateiformaten wie Iges oder

Step für die FEM zur Verfügung. Analysen im Material können über eine direkte Schnittstelle für Abaqus und Ansys oder auch in weiterer Verwendung der Geometrieformate in MSC Nastran, Marc oder LS-Dyna durchgeführt werden.

Digimat-CAE – Schnittstelle zu Strukturmechanik und Spritzgussimulation. Über dieses Interface kann Digimat-MF zum Import von nichtlinearen Materialeigenschaften in Ansys und LS-Dyna verwendet werden. Dabei wird das Modul als benutzerdefinierte Subroutine mit dem jeweiligen Solver verlinkt. Dadurch kann die bislang verwendete Materialbeschreibung vollständig durch die in Digimat erzeugten Materialmodelle ersetzt werden.

Digimap-Map – Mapping Tool. Mit diesem Werkzeug lassen sich die in der Spritzgussimulation ermittelten 2D-/3D-Informationen wie Faserorientierungen, initiale Spannungen oder Temperaturen auf das in der Strukturmechanik verwendete Netz übertragen. Zudem ist es möglich, einzelne Teile aus dem Spritzguss in Baugruppen zu integrieren.

Micros – Design von Sandwichstrukturen. Dieses Modul dient der mikromechanischen Modellierung von Composite-Sandwichstrukturen. Unter Verwendung der implementierten Standardtests (Biege- und Scherversuche) können Composite-Platten entwickelt und optimiert werden. Die erforderlichen Materialdaten werden entweder auf makroskopischer Ebene angegeben oder auf Mikrostrukturniveau über den Homogenisierungsansatz erzeugt.

Kernstück für den Aufbau eines Materialmodells ist Digimat-MF. Vereinfacht gesagt werden dabei lokal auf mikroskopischer Ebene sogenannte Pseudo-Grains mit Bereichen gleicher Konsistenz in Hinsicht auf Matrix, Faser, Dichte und Orientierung gebildet, die auf makroskopischer Ebene zu größeren Bereichen mit gemittelten Eigenschaften zusammengefasst werden. Im nächsten Schritt wird mit Messdaten, entweder frei verfügbar (nach ISO 527) oder aus eigenen Versuchen, das zuvor erzeugte Makro-modell gewissermaßen kalibriert. Um diese Daten der Strukturanalyse zugänglich zu machen, muss die Ausrichtung der Fasern bekannt sein. Diese Funktion wird über die Prozesssimulation bestimmt. Über einen Mapping-Prozess schließlich werden diese Daten auf das FE-Netz projiziert. Da dies sehr performant abläuft, kann Digimat-MF direkt an die Strukturanalyse angekoppelt werden.

Die Genauigkeit eines Materialmodells und damit die Präzision der gesamten Berechnung ist letztlich eine Frage des Aufwands, den man bereit ist zu investieren. Ein quantitatives Materialmodell setzt tiefgreifendes Expertenwissen voraus, versetzt dafür aber den Anwender in die Lage, dynamisches Verhalten wie Kriechen, Ermüdung und Versagen eines Designs treffsicher vorherzusagen.

BERNHARD D. VALNION

INFOCORNER

(1) ECONOMIC ENG. 5/2013, S. 36 ff., Göller, Baden-Baden

(2) de.wikipedia.org/wiki/Faserverstärkter_Kunststoff

(3) www.kern.de

Weitere Informationen zu Digimat unter

www.mscsoftware.com/de/product/digimat