

Berücksichtigung der Faserorientierung in der strukturmechanischen Simulation

Anisotrope Simulation kurzfaserverstärkter Kunststoffe

Kurzfaserverstärkte Kunststoffe werden für viele technisch anspruchsvolle Anwendungen verwendet. Für effiziente Entwicklungsprozesse und eine hohe Produktqualität müssen die richtungsabhängigen Materialeigenschaften schon in der Bauteilauslegung mitberücksichtigt werden. Oft geschieht dies vereinfacht über die Abminderung der Materialsteifigkeit, genauer ist die Berücksichtigung der effektiven Faserorientierung. Vor- und Nachteile beider Vorgehensweisen werden in diesem Artikel diskutiert.

Mit ihren materialspezifischen Vorteilen bieten Kunststoffe als Konstruktionswerkstoffe Ingenieuren ein breites Anwendungsspektrum. Eine hohe Designfreiheit und sehr gute Verarbeitungseigenschaften erlauben die Herstellung auch komplexer Bauteile in hohen Losgrößen. Die Eigenschaften von Kunststoffen werden häufig durch den Einsatz von Füll- und Verstärkungsstoffen wie beispielsweise Glasfasern deutlich verbessert. Die beigemischten Fasern bilden bei der Produktion der Bauteile ein anisotropes, also richtungsabhängiges Materialverhalten aus. Um die Entwicklungs- und Produktqualität nachhaltig zu steigern, wuchs bei der Bühler Motor GmbH der Wunsch, dieses mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) in Simulationen realitätsnah berücksichtigen zu können.

In der Vergangenheit wurden die Materialeigenschaften von

Kunststoffen isotrop, das heißt richtungsunabhängig, angenommen. Da faserverstärkte Kunststoffe im Allgemeinen richtungsabhängige Eigenschaften aufweisen, ließ sich das Bauteilverhalten durch die isotrope Simulation in manchen Anwendungsfällen aber nur unzureichend vorhersagen. Durch die Kopplung der mechanischen Analyse mit der Spritzgießsimulation können die Faserorientierungen, und damit das anisotrope Verhalten von Kunststoffen, in der strukturmechanischen Simulation berücksichtigt werden.

Realitätsgetreue Abbildung der lokalen Steifigkeitsverhältnisse

Ein Tool, um kurzfaserverstärkte Bauteile unter Berücksichtigung der Materialanisotropie zu simulieren, ist der SFRC-Workflow („Short Fiber Reinforced Composites“) in Ansys Workbench (**Bild 1**). Dieser ist ab der Version 2021 R1 Bestandteil der „Mechanical Enterprise“-Lizenz und wurde bei der Bühler Motor GmbH im Rahmen einer Bachelorarbeit [1] getestet und bewertet. Hierfür stellte Ansys die Software und die Lizenz bereit, die Cadfem GmbH unterstützte mit Know-how. Der Ansys Material Designer ermöglicht es, ein geeignetes, von der

lokalen Faserorientierung abhängiges Materialmodell zu erstellen. Mittels Homogenisierungsverfahren werden aus den (isotropen) linear-elastischen Eigenschaften des Matrix- und Fasermaterials die effektiven orthotropen, linear-elastischen Eigenschaften des Verbundmaterials ermittelt. Eine Kalibrierung anhand von experimentell ermittelten 0°- und 90°-Kraft-Weg-Kurven ermöglicht die Bestimmung des elasto-plastischen Materialverhaltens. Eine einmal erzeugte Materialkarte kann in beliebigen Simulationsprojekten verwendet werden.

Das „Injection Molding Data“-Objekt erlaubt es, die in Spritzgießsimulationen ermittelten Faserorientierungen (wie auch den lokalen Faservolumengehalt, initiale Spannungen und Bindahtinformationen) in Ansys Workbench zu importieren. In Ansys Mechanical können diese Feldgrößen auf das in der strukturmechanischen Simulation verwendete Netz gemappt werden (**Bild 2**). Zusammen mit dem orthotropen Material, das im Ansys Material Designer erzeugt wurde, lassen sich damit die lokalen Steifigkeitsverhältnisse im Bauteil realitätsgetreu abbilden.

Der Workflow ist, inkl. Anwendungsbeispielen, in der Fachliteratur dargestellt [2]. Eine detaillierte Beschreibung ist in der Ansys Hilfe unter „Material Designer User's Guide“ sowie im „Short Fiber Composites Guide“ zu finden [3].

Ziel dieser Arbeit war es festzustellen, welchen Mehrwert eine anisotrope Simulation im Vergleich zum bestehenden System der isotropen Simulation hat. Es sollte beurteilt werden, ob durch die Berücksichtigung der Faserorientie-



Wasserpumpe bFlow C als Beispiel einer mit kurzglasfaserverstärktem Kunststoff hergestellten Komponente. © Bühler Motor

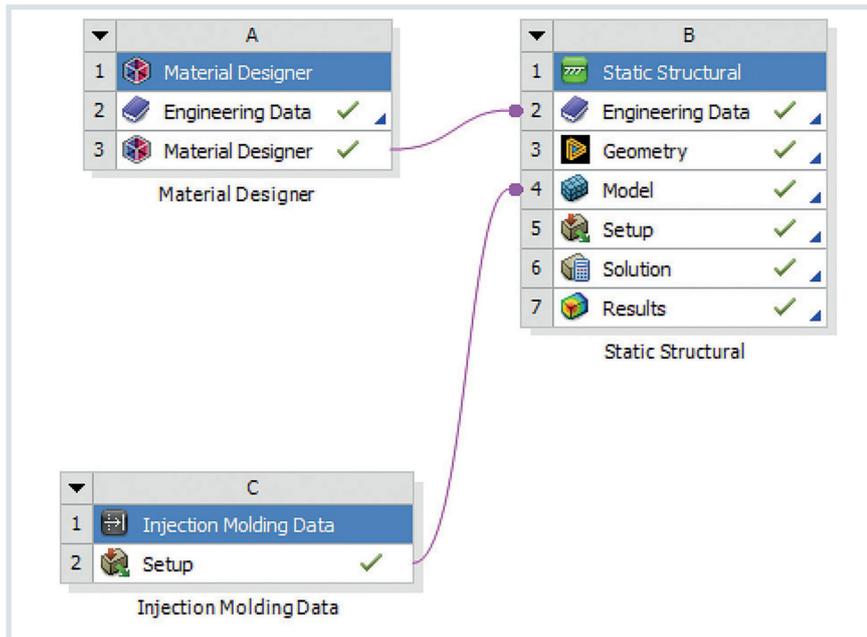


Bild 1. Typischer Workflow zur Simulation kurzfaserverstärkter Werkstoffe in Ansys Workbench. Ansys Material Designer (A): Erstellung eines anisotropen Materialmodells; Injection Molding Data (C): Import der Faserorientierungen; Static Structural (B): Definition des FE-Modells. © Bühler Motor

ung bei kurzfaserverstärkten Kunststoffen die Steifigkeit des Kunststoffs in der strukturmechanischen Simulation realitätsnah abgebildet werden kann. Außerdem wurde untersucht, bei welchem Anwendungsfall die Berücksichtigung der Faserorientierung wirtschaftlich ist oder ob eine pauschale Berücksichtigung der Materialeigenschaften in einer isotropen Simulation mittels Abminderungsfaktoren ausreicht.

Vergleich der isotropen mit der anisotropen Simulation

In einem ersten Schritt wurden Messdaten aus einem in Anlehnung an DIN EN ISO 527 [4] durchgeführten Zugversuch

mit einem teilaromatischen Polyamid mit 40% Glasfasergehalt (PPA-GF40, Hersteller: EMS-Chemie AG) bereitgestellt, um die Simulation mit dem gemessenen Spannungs-Dehnungsverhalten abzugleichen. In Ansys Mechanical wurde der Zugversuch unter Berücksichtigung der lokalen Faserorientierungen (ermittelt mit Autodesk Moldflow Insight 2019) numerisch abgebildet. Im Anschluss wurden die experimentell und virtuell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven miteinander verglichen (**Bild 3**). Dabei zeigte sich, dass der SFRC-Workflow die experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Verläufe mit einer maximalen Abweichung von -8% gut wiedergibt. »

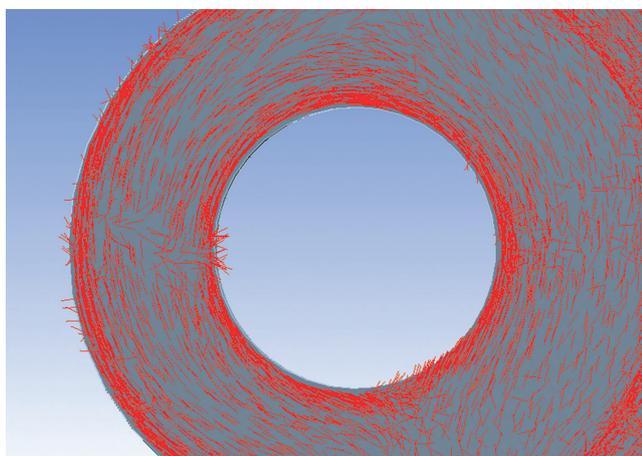


Bild 2. Aus der Spritzgießsimulation gemappte Hauptfaserrichtungen im Bereich einer Durchgangsbohrung am Pumpenkopf in Ansys Mechanical.

© Bühler Motor

Info

Autoren

Vanessa Kett ist seit 2019 studienbegleitend zunächst im Bereich Testing und anschließend im Fachgebiet Simulation bei der Bühler Motor GmbH in Nürnberg tätig; Vanessa.Kett@buehlermotor.com

Dr. Jörg Helfenstein ist seit 2012 bei der Cadfem (Suisse) AG als Berechnungsingenieur im Bereich Strukturmechanik tätig; Joerg.Helfenstein@cadfem.ch

Im Profil

Die **Bühler Motor GmbH**, Nürnberg, steht für anspruchsvolle mechatronische Antriebslösungen. Das Know-how geht dabei weit über DC-/BLDC-Kleinstmotoren, -Kleingetriebemotoren und Pumpen hinaus. Das 1855 gegründete Unternehmen, das heute 1450 Mitarbeiter zählt und sich seit über 125 Jahren im Besitz der Familie Furtwängler befindet, vereint als globaler Hidden Champion Tradition und Innovation. Mit elf Standorten auf drei Kontinenten, seiner hochentwickelten Prozesskompetenz und eigenem Prototyping, Simulations- und Testlabors bedient Bühler vor allem die Automobilindustrie, Aviation und zahlreiche Industrieanwendungen.

www.buehlermotor.de

Schon seit 1985 stärkt **Cadfem** die praktische Nutzung der Simulation in Wirtschaft und Wissenschaft. Mit über 250 Mitarbeitern vertreibt der Ansys Elite Channel Partner die Produkte der Ansys, Inc., des weltweit größten unabhängigen Entwicklers von Simulationssoftware, ergänzt um weitere Software- und IT-Lösungen, umfassenden Service sowie den für den Kundenerfolg nötigen Know-how-Transfer. Die Cadfem-Gesellschaften in Deutschland, Österreich und der Schweiz agieren als Teil der internationalen Cadfem Group.

www.cadfem.net

Praxisnutzen

Folgende Vorteile einer anisotropen Simulation wurden identifiziert:

- Beanspruchungsorientierte Simulation
- Realistische Vorhersage des Bauteilhaltens
- Einsparung von Entwicklungs- und Testzeiten
- Reduzierung der Bauteilversuche
- Optimierung des Materialeinsatzes

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter

www.kunststoffe.de/onlinearchiv

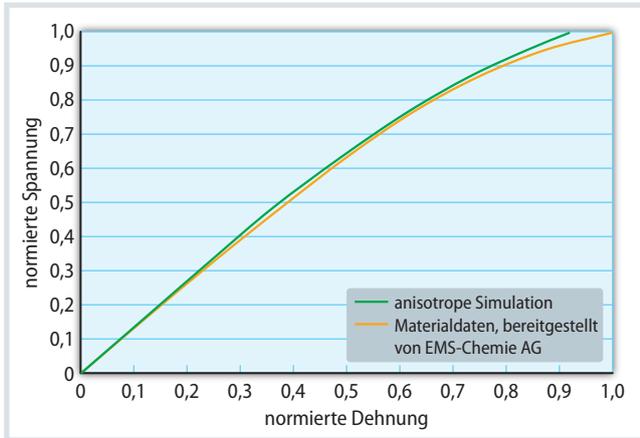


Bild 3. Vergleich zwischen dem gemessenen Spannungs-Dehnungs-Verlauf und den simulierten Werten für einen nach DIN EN ISO 527 durchgeführten Zugversuch (Material: PPA-GF40). Quelle: Bühler Motor; Grafik: © Hanser

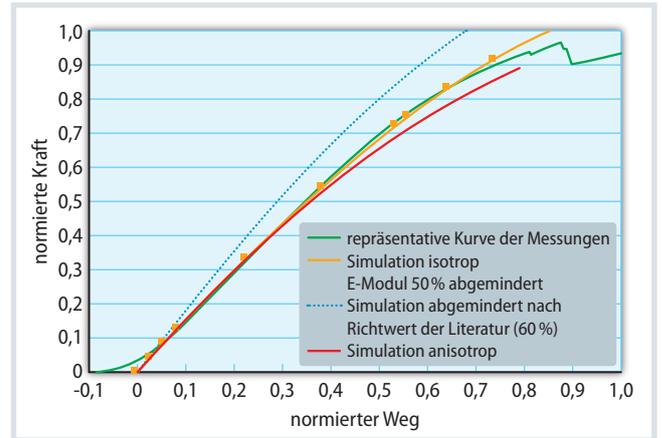


Bild 4. Vergleich verschiedener Bauteilsimulationen mit experimentell ermittelten Werten eines Bauteilversuchs (normierte Werte).

Quelle: Bühler Motor; Grafik: © Hanser

In einem zweiten Schritt erfolgte eine Validierung anhand eines Bauteiltests. Bei dem untersuchten Bauteil handelt es sich um den Kopf einer Wasserpumpe des Typs bFlow C (Titelbild) von Bühler Motor. Dieser Pumpenkopf wird aus einem kurzglasfaserverstärkten Material hergestellt. Der Test selbst besteht darin, den Pumpenkopf mit einer Druckkraft zu belasten und die dadurch erzeugte Deformation zu messen.

Mit dem Ansys Material Designer wurden die Eigenschaften des im Bauteil verwendeten kurzfaserverstärkten Materials numerisch ermittelt. Eine anschließende Simulation des Bauteilversuchs konnte das gemessene Bauteilverhalten gut annähern (Bild 4). Es kam zu einer maximalen Abweichung der Dehnung von -9%. Diese ist im Rahmen der Abweichungen, die durch die Fertigung der Teile und die Streuung der einzelnen Messkurven zu erwarten ist.

Als alternative Modellierungsvariante wurde eine Simulation mit isotropem Material (ohne Berücksichtigung der lokalen Faserorientierung) durchgeführt. Dazu wurde der E-Modul des Materials, der mittels Zugprüfung eines kurzfaserverstärkten Probenkörpers nach DIN EN ISO 527 ermittelt wurde, um 50% reduziert. Damit ließ sich im Vergleich mit dem Bauteiltest eine noch bessere Übereinstimmung erzielen. Dies ist allerdings nur möglich, weil der Abminderungsfaktor in mehreren Schleifen anhand eines Bauteiltests bestimmt wurde. Ein in der Literatur [5] gängiger Abminderungsfaktor von 0,6 lieferte deutlich schlechtere Ergebnisse (Bild 4).

Im Rahmen der Arbeit wurde ein erhöhter Rechenaufwand für die Simulation unter Berücksichtigung des anisotropen Werkstoffverhaltens festgestellt. Da dieser stark geometrieabhängig ist, lässt sich keine allgemeine Aussage über den Mehraufwand machen.

Einsatz der anisotropen Simulation im Produktentwicklungsprozess

Soll das Materialverhalten kurzfaserverstärkter Kunststoffe in einer isotropen Simulation berücksichtigt werden, wird typischerweise mit Abminderungsfaktoren für den E-Modul gearbeitet. In der Literatur empfohlene Abminderungsfaktoren können allerdings nur für grobe Abschätzungen verwendet werden. Genauere, zum Belastungsfall und Bauteil gehörende Abminderungsfaktoren lassen sich in zeit- und kostenintensiven Bauteiltests ermitteln. Diese Abminderungsfaktoren sind nicht ohne Weiteres auf andere Bauteile oder Belastungsfälle übertragbar. Diesem Aufwand, der für jedes Bauteil und jeden Belastungsfall erneut getrieben werden muss, steht im Falle einer anisotropen Simulation die Erstellung der notwendigen Materialkarte gegenüber. Hierbei handelt es sich allerdings um einen Arbeitsschritt, der für jedes im Einsatz stehende Material nur einmalig erforderlich ist. Bei einer entsprechend gepflegten Materialdatenbank wird sich dieser Aufwand langfristig reduzieren.

In einer isotropen Simulation werden die durch die Faserorientierung entstehenden Bereiche lokal unterschiedlicher

Steifigkeiten nicht abgebildet. Damit ist es unmöglich, die lokalen Beanspruchungen in den Bauteilen richtig vorherzusagen. In einer anisotropen Simulation hingegen gelingt es, den Einfluss von Schwachstellen, wie zum Beispiel die Steifigkeit von Bindenähten, genauer zu charakterisieren. Somit ist eine zielgerichtete Auslegung der Kunststoffbauteile möglich, was Entwicklungs- und Testzeiten verkürzen kann. Zugleich erlaubt eine anisotrope Simulation eine belastungsgerechte Optimierung des Bauteils, die den Materialeinsatz reduzieren kann.

Fazit

Ist man noch in der Konzeptfindung, sollte eine isotrope Simulation mit nach der Literatur abgemindertem E-Modul ausreichen, um das Bauteilverhalten grob abschätzen zu können. Eine im Entwicklungsprozess möglichst frühe Berücksichtigung der Faserorientierung in der strukturellen Simulation ermöglicht es, potenzielle Schwachstellen im Design bereits frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden. Kritische Bereiche können kostengünstig entschärft und verbessert werden. Dadurch werden weniger Prototypen benötigt und der Testaufwand wird geringer.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die anisotrope im Vergleich zur isotropen Simulation viele Vorteile bietet. Es muss jedoch im Einzelfall entschieden werden, für welche Produkte und zu welchem Zeitpunkt diese Art der Simulation einen ausreichenden Mehrwert bringt. ■