

Werkstoffe der Zukunft

WIE FASERVERBUNDE NANOTECHNOLOGISCH OPTIMIERT WERDEN KÖNNEN

Materialien, die etwa beim Bau von Windenergieanlagen eingesetzt werden, müssen hohen Ansprüchen genügen. Moderne faserverstärkte Kunststoffe bieten ein hohes Leistungsspektrum und haben sich beispielsweise im Bereich der Rotorblätter bewährt. Drei Wissenschaftler vom Institut für Statik und Dynamik erklären, wie die Qualität solcher Faserverbunde mithilfe von Nanopartikeln verbessert werden kann.



Die Anforderungen an neue Materialien für moderne tragende Strukturen sind im Allgemeinen sehr hoch: Erwünscht sind multifunktionale Werkstoffe mit hoher Leistungsfähigkeit, die zudem noch langlebig, umweltverträglich und ressourcenschonend sind. Ein gutes Beispiel stellen Rotorblätter von Windenergieanlagen dar (Abbildung 1).

Sie bewirken die Umwandlung von bewegter Luft in mechanische Arbeit und sind somit hauptverantwortlich für den Energieertrag einer Anlage. Windenergieanlagen

werden für eine Lebensdauer von 20 Jahren ausgelegt, in denen sie sowohl Extremsituationen als auch den täglich wechselnden Windverhältnissen widerstehen müssen [4]. Dabei gilt es nicht nur die Festigkeit hoch genug zu wählen, so dass auch »50-Jahres-Böen« schadlos überstanden werden können, sondern es sind vor allem die normalen Windbedingungen mit einer hohen Anzahl von etwa 100 Millionen Lastwechseln über die gesamte Lebensdauer einer Anlage, die zu einer Ermüdung des Materials führen und somit die Bemessung erschweren. Die Belastungen von Rotorblättern

ähneln denen von Tragflügeln, weshalb sich die auch in der Luftfahrt eingesetzten faserverstärkten Kunststoffe mit ihrer herausragend hohen spezifischen Festigkeit durchgesetzt haben. Durch die Ausrichtung der Fasern innerhalb eines Faser-Kunststoff-Verbundes entsteht ein richtungsabhängiger Werkstoff. Dies macht den besonderen Reiz der Faserverbunde aus. Fasern können in einem Bauteil gezielt so angeordnet werden, dass sie Lasten optimal abtragen. Gleichzeitig ist das Versagensverhalten äußerst komplex. Ablösungen an der Faser-Matrix-Grenzschicht beispielsweise sind oft rein äu-

berlich schwer zu detektieren, lösen mitunter aber das plötzliche Versagen aus. Die Abteilung Verbunde am Institut für Statik und Dynamik (ISD) beschäftigt sich im Rahmen von Forschungsprojekten mit der numerischen Simulation solcher Bauteile. Spezielle, selbst entwickelte Materialmodelle ermöglichen die Abbildung der kontinuierlichen Schädigung im Material. In Kombination mit Multiskalenmodellen wird es möglich, Imperfektionen auf unterschiedlichen Längenskalen (zum Beispiel Faserwelligkeiten, Luftporen) explizit zu berücksichtigen und realistischere Vorhersagen der Tragfähigkeit zu treffen.

Die Bauteilqualität hängt bei Faserverbunden stark vom Herstellungsverfahren ab. Insbesondere im Bereich der Luft- und Raumfahrt werden hohe Ansprüche gestellt, daher wird meist das Prepreg-Verfahren eingesetzt. Prepregs (preimpregnated fibers) sind beispielsweise Platten aus unidirektionalen Endlosfasern, die bereits mit Kunstharz getränkt, aber noch nicht ausgehärtet sind. Auf Grund maschineller Fertigung liefern solche Platten hohe Qualität, sind jedoch nur begrenzt haltbar und vergleichsweise kostenintensiv. Dem gegenüber

Dies ist kostengünstiger, da mehrere Funktionen durch nur ein Bauteil realisiert werden können (Integralbauweise). Die Volumenabnahme beim Aushärten der injizierten Flüssigarze, Faserfehlausrichtungen und Poren führen jedoch meist zu Qualitätseinbußen im Vergleich zu Prepregs (Abbildung 3).

An dieser Stelle setzt das virtuelle Institut »Nanotechnology in Polymer Composites«

metern können Nanopartikel in den Übergangsbereich zwischen atomaren und kontinuierlichen, makroskopischen Strukturen eingeordnet werden. So kommt es, dass viele Eigenschaften, die aus makroskopischer Sicht größenunabhängig sind, wie etwa die mechanischen Eigenschaften, bei Betrachtung von Nanostrukturen eine Größenabhängigkeit aufweisen [3]. Die Ursache liegt in der hohen spezifischen Oberfläche der Partikel, das



Abbildung 1
Errichtung der REpower 5M, Offshore Windpark Alpha Ventus
Quelle: Matthias Ibeler DOTI 2009

2

Abbildung 2
Harzinjektion, Produktion der ersten Rotorblätter, PN Rotor GmbH, Stade, im Mai 2008
Quelle: Stiftung Offshore Windenergie/DOTI/2008

an. Durch die Zugabe von Nanopartikeln sollen die Eigenschaften von mittels Injektionstechnologie hergestellten Faserverbunden gezielt verbessert werden.

heißt der prozentuale Anteil der Atome an der Oberfläche eines Partikels nimmt mit abnehmender Partikelgröße zu. Bei sehr kleinen Partikeln liegen also sehr viele energierei-

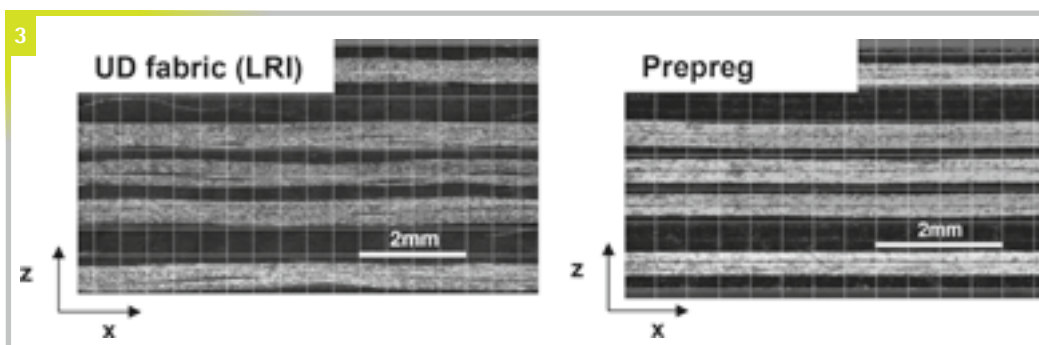


Abbildung 3
Faserfehlausrichtungen im Vergleich: Injektion – Prepreg
Quelle: Pansart, S. [6]

stehen Injektionsverfahren, bei denen trockene Faser-Vorformlinge in einer Form abgelegt werden. Zur Aushärtung erfolgt die Injektion von Harz und Härter (Abbildung 2).

Nanopartikel werden derzeit vielerorts zur Optimierung der Eigenschaften von »traditionellen Materialien« eingesetzt. Auf Grund ihrer Größe von etwa einem bis 100 Nano-

che Oberflächenatome vor, die eine große Angriffsfläche für chemische Reaktionen bieten. Große Partikel haben weniger Atome an der Oberfläche und weisen daher ein eher makro-



Abbildung 4
Virtuelles Institut »Nanotechnology in Polymer Composites«
www.vi-nanocomposites.org

Innovationspotenzial in vielen Anwendungsbereichen verspricht.

Das virtuelle Institut ist interdisziplinär aufgestellt (Abbildung 4). Die Aufgaben der Partner erstrecken sich von der Partikel-Oberflächenmodifizierung bis hin zur Herstellung von Prüfplatten, die mechanischen Tests unterzogen werden. Parallel dazu werden am ISD Simulationen durchgeführt. Die Untersuchungen zeigen, dass durch die Einbettung keramischer Nanopartikel aus Aluminiumoxid (Abbildung 5) oder Böhmit signifikante Verbesserungen der Materialeigenschaften erzielt werden können [2]. Die Partikel bewirken eine verminderte Volumenabnahme des Harzes (Schwund) im Verlauf der Härtung, die mit einer Abnahme von ungewollten Eigen-

skopisches Verhalten auf. Eine Anpassung der Größe der Partikel sowie der Oberflächen er-

möglicht folglich die gezielte Beeinflussung von Materialeigenschaften, was ein großes

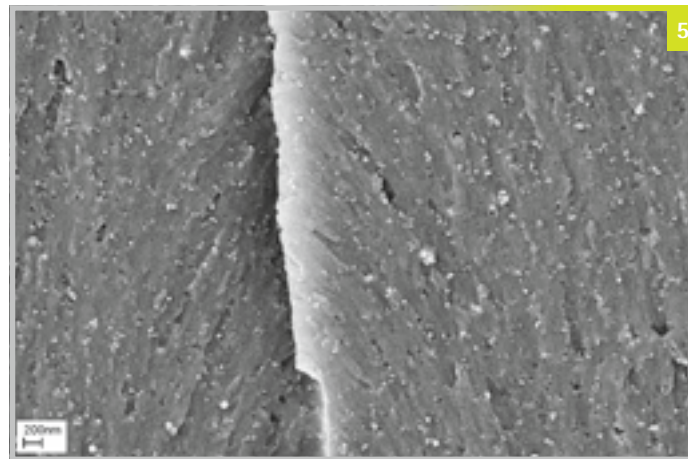
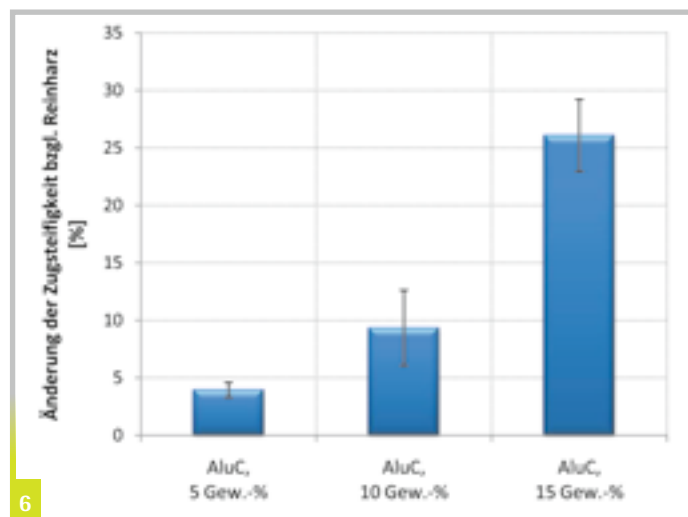


Abbildung 5
REM Aufnahme: zehn Gewichtsprozent Al₂O₃-Partikel in Epoxidharz
Quelle: DLR

spannungen im Bauteil einhergeht. Für die Matrix konnten in Abhängigkeit des Partikelgehalts und der -größe unterschiedliche Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften identifiziert werden. Bei hohem Partikelgehalt ist ein Anstieg der Matrix-Steifigkeiten und -festigkeiten zu verzeichnen (Abbildung 6), während bei geringeren Gehalten die Zunahmen der Bruchdehnungen auftreten. Im Kohlefaser-Matrix-Verbund sind insbesondere die um circa 20 Prozent gesteigerten Druckfestigkeiten, die erhöhte Resistenz gegenüber Stoßbelastungen und eine gesteigerte Risszähigkeit hervorzuheben [1].

Abbildung 6
Änderung der Zugsteifigkeiten für unterschiedliche Gewichtsprozentanteile in Bezug auf Reinharz
Quelle: DLR



Die detaillierte Identifikation der Mechanismen, die die Veränderungen im Materialverhalten bewirken, ist Gegenstand aktueller Forschung. Eine verbreitete These ist das Auftreten einer Interphase zwischen Partikel und polymerer Matrix, deren Eigenschaften eine Mischform der Reinharz- und Partikeleigenschaften darstellt [1,7]. Diese Zwischenphase bewirkt eine

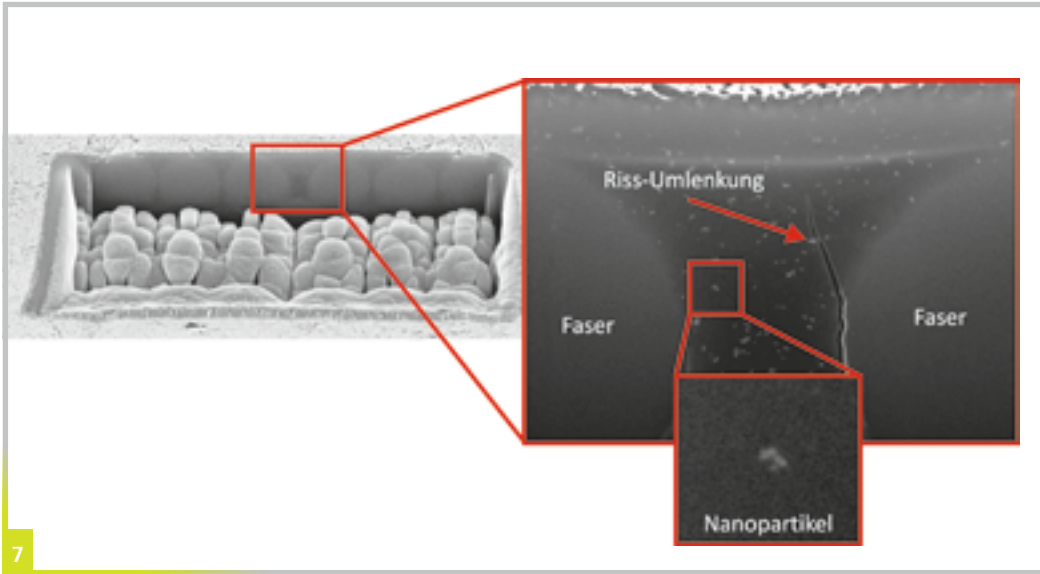


Abbildung 7
REM-Aufnahme einer mittels FIB präparierten Faserverbund-Platte mit Nanopartikeln
Quelle: AAC, Wien

Immobilisierung der Polymerketten und somit im Extremfall bei sehr vielen kleinen Partikeln mit entsprechend vielen Atomen an der Oberfläche eine starke Versprödung des Materials. Der Übergang ist fließend, so dass sich bei geringen Gehalten nur geringe Störungen des Polymernetzwerks ergeben. Die bei Faserverbunden auftretenden erhöhten Druckfestigkeiten lassen sich auf den Versagensmechanismus zurückführen. Unter Druck verhalten sich Fasern ähnlich wie einfache Stäbe. Ab einer gewissen Belastung kommt es zum plötzlichen Ausknicken. Durch die erhöhten Steifigkeiten von nanopartikelverstärkten Matrizen wird dies behindert. Weiterhin fungieren die Nanopartikel als Rissstopper (Abbildung 7), was die erhöhte Risszähigkeit erklärt.

Zur Erweiterung des Verständnisses der Vorgänge auf der Nanoebene werden am ISD atomistische Simulationsmodelle entwickelt, die auf der Partikelmechanik beruhen. Im Gegensatz zur Kontinuumsmechanik wird das physikalische System dabei nicht als ein Körper, sondern diskret durch elementare Teilchen (zum Beispiel Atome) und deren Wechselwirkungen beschrieben.

Für realistische Systeme, die aus mehreren Millionen Teil-

te kombinieren und so bereits heute wirklichkeitsnahe Berechnungen ermöglichen.

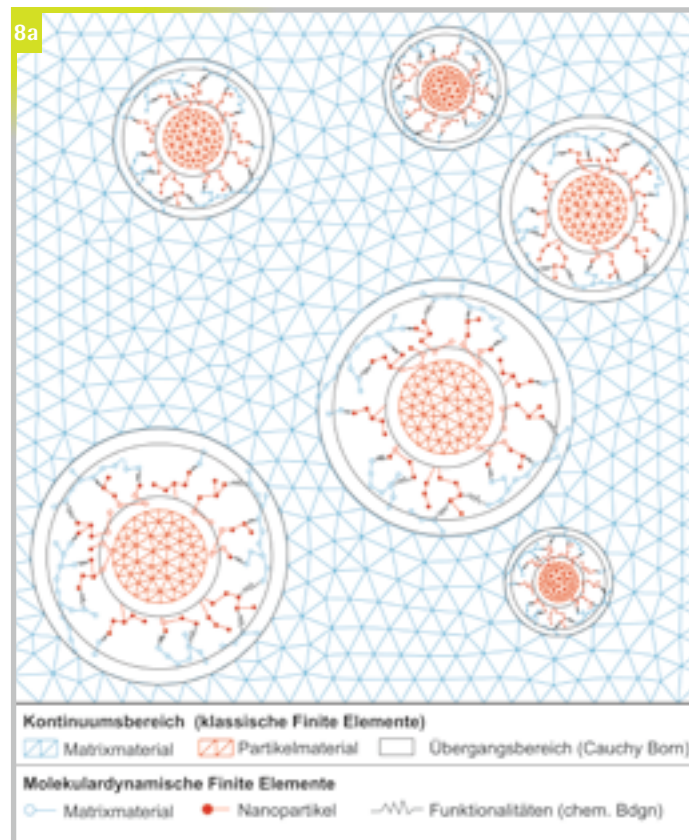
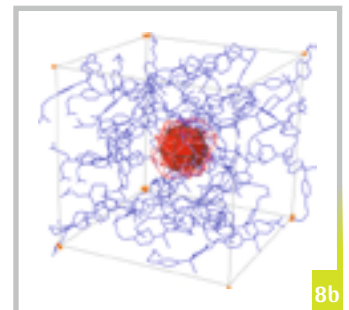


Abbildung 8
Links: Mehrskalensimulationsmodell (Schema); unten: MD-FEM-Modell – Partikelkern (rot): Kontinuums-elemente, Matrix (blau): MD Elemente



chen bestehen, steigt der Rechenaufwand enorm an. Daher werden Mehrskalensimulationsmodelle eingesetzt, die die Vorteile beider Modellierungskonzepte

Im Ingenieurwesen hat sich die Finite Elemente Methode (FEM) zur numerischen Simulation der Deformation von Bauteilen unter äußeren Be-



**Prof. Dr.-Ing. habil.
Raimund Rolfes**

Jahrgang 1960, leitet seit 2005 das Institut für Statik und Dynamik an der Leibniz Universität Hannover. Kontakt: r.rolfes@isd.uni-hannover.de



PD Dr.-Ing. habil. Lutz Nasdala

Jahrgang 1971, ist seit 2005 Privatdozent am Institut für Statik und Dynamik an der Leibniz Universität Hannover. Kontakt: nasdala@isd.uni-hannover.de



M.Sc. Andreas Kempe

Jahrgang 1983, ist seit 2008 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Statik und Dynamik an der Leibniz Universität Hannover tätig. Kontakt: a.kempe@isd.uni-hannover.de

anspruchungen etabliert. Die komplexen Geometrien realer Strukturen werden dabei durch eine Vielzahl von Finiten Elementen (zum Beispiel Quader) angenähert. Mithilfe dieser Elemente wird dann die Gesamtdeformation berechnet. Die am ISD entwickelte molekulardynamische Finite Elemente Methode (MDFEM) [5] stellt eine Erweiterung dieser Methode zur Simulation nanoskaliger Strukturen dar. Für diesen Zweck wurden spezielle Finite Elemente für molekulardynamische Kraftfelder, die die Interaktionskräfte zwischen Atomen beschreiben,

hergeleitet. So konnte das Verhalten von Kohlenstoffnanoröhren und Elastomeren unter mechanischer Beanspruchung analysiert werden. Auf Basis der MDFEM wird derzeit ein Mehrskalmodell zur Simulation von nanopartikelverstärktem Matrixmaterial entwickelt. Der Fokus liegt auf der Partikel-Matrix-Grenzschicht, die mittels molekulardynamischer finiter Elemente detailliert abgebildet wird, während für die umliegende Matrix und den Partikelkern eine kontinuumsmechanische Modellierung angewendet wird (Abbildung 8).

So können repräsentative Volumen mit mehreren Partikeln und Matrixmaterial, unterschiedlichen Partikeloberflächen, -größen und -formen untersucht werden. Das Ziel besteht letztlich darin, eine ideale Konfiguration vorherzusagen. Bei optimaler Ausschöpfung des Potenzials im Hinblick auf Kosten und Nutzen sowie der Etablierung von großmaßstäblichen Herstellungsprozessen besteht in naher Zukunft die Möglichkeit, die eingangs erwähnten Rotorblätter von Windenergieanlagen nanotechnologisch zu optimieren.

Referenzen

- 1 Arlt, C., Exner, W., & Riedel, U. (2010). Von Nano zu Makro: Mechanismen zur Verstärkung von Faserkunststoffverbunden. Gehalten auf der Nanotechnologie für Faserkunststoffverbunde 26.-27. Mai 2010.
- 2 Arlt, C., & Riedel, U. (2008). Nanostrukturierte Hochleistungsfaserverbunde – Bessere Eigenschaften von CFK durch Integration keramischer Füller. *LightweightDesign*, 6.
- 3 Dittmeyer, R., Keim, W., Kreysa, G., & Oberholz, A. (2003). *Winnacker-Küchler: Chemische Technik: Prozesse und Produkte. Band 2: Neue Technologien* (5. Aufl.). Wiley-VCH Verlag.
- 4 Hau, E. (2008). *Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit* (3. Aufl.). Springer, Berlin.
- 5 Nasdala, L., Kempe, A., & Rolfes, R. (2010). The Molecular Dynamic Finite Element Method (MDFEM). *CMC: Computers, Materials & Continua*, 19(1), 57–104.
- 6 Pansart, S. (2008). A comprehensive explanation of compression strength differences between various CFRP materials through a novel micro-meso model. DLR Forschungsbericht 2008-03, DLR, ISSN 0939-2963.
- 7 Schadler, L. (2007). Nanocomposites: Model interfaces. *Nature Materials*, 6(4), 257–258.