

## **Sonderforschungsbereich 381, Teilprojekt C5**

W. Lutz, S. Schmauder

„Modellierung der Schädigung in Bauteilen aus Kurzfaserverbundwerkstoffen  
mit duktiler oder spröder Matrix“

- Förderperiode 2004 - 2006 -

Der Sonderforschungsbereich (SFB) 381 (<http://www.isd.uni-stuttgart.de/sfb381>) hatte das Ziel, an unterschiedlichen Faserverbundwerkstoffen die Gesetzmäßigkeiten ihres Schädigungsverlaufs zu untersuchen, um daraus eine werkstoffübergreifende Systematik zu ermitteln. Diesem Ziel liegt die Vorstellung zugrunde, dass die unterschiedlichen Schädigungsverläufe von Werkstoffen spezielle Ausprägungen allgemeingültiger Prinzipien sind, bei deren Zusammenspiel einzelne Mechanismen dominieren können.

Im Rahmen des SFB 381 beschäftigte sich das Teilprojekt C5 am Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) mit der Modellierung der Schädigung in Faserverbundwerkstoffen mit duktiler und spröder Matrix. In den vergangenen Förderperioden von 1997 bis 2003 wurden verschiedene Ansätze zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens und zur Modellierung der Schädigungsentwicklung in Faserverbundwerkstoffen mit duktiler Matrix entwickelt und Modellierungen des Schädigungsverlaufs in kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffen auf der Mikro-, Meso- und Makroebene durchgeführt. Die dabei gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen auf dem Gebiet der Verknüpfung mikro- und makromechanischer Längenskalen wurden in dieser Förderperiode auf die Modellierung von Bauteilen übertragen. Dazu wurden numerische Untersuchungen zum Schädigungsverlauf und zur Ermüdung an Proben aus kurzfaserverstärkten (Glas- und Cellulosefasern) Verbundwerkstoffen mit Polymer- bzw. Gipsmatrix durchgeführt. Die numerischen Untersuchungen wurden in enger Abstimmung mit den experimentellen Teilprojekten A5, A11 und B1 durchgeführt. In der Zusammenarbeit der Simulationsgruppe (Teilprojekte C2, C5 und C7) wurde ein besseres Verständnis für das Versagen von Proben und Bauteilen gewonnen. Wesentliche Arbeiten des Teilprojekts C5 sind in die Kapitel 2.1.3 [1], 3.1 [2], 3.2 [3] und 4.1 [4] des Buchs „Damage and its evolution in fiber-composite materials - simulation and non-destructive evaluation“ (Hrg.: G. Busse, B.-H. Kröplin, F. K. Wittel) eingeflossen. Die Ergebnisse, die nach dem Schreiben der Buchkapitel entstanden, sind in [5, 6, 7, 8] beschrieben.

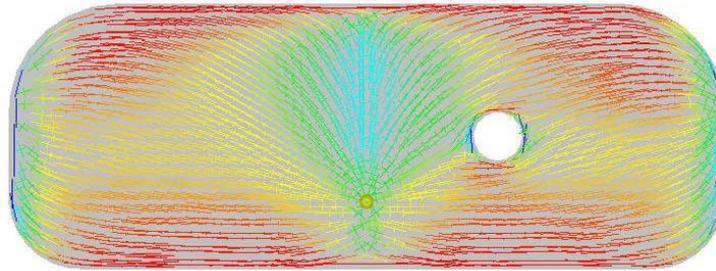
### **a.) Schwerpunkt 1 (duktiler Matrix)**

#### **Spritzgegossene Proben**

Im ersten Schwerpunkt wurde das Verformungsverhalten und die Schädigungsentwicklung an Bauteilen mit Bindenähten aus kurzfaserverstärkten spritzgegossenen Thermoplasten numerisch untersucht. Zur Einbeziehung lokaler Orientierungsunterschiede wurde die Faserausrichtung im Bauteil mittels Spritzgießsimulation berechnet (Abb. 1). Bei den nachfolgenden Berechnungen wurde sowohl die lokale Schädigung als auch das globale Werkstoffverhalten in einem Bauteil mit und ohne Loch sowie der Schädigungsverlauf bei statischer Belastung simuliert. An Proben mit einheitlich ausgerichteten Fasern wurden numerische Untersuchungen innerhalb einiger quasi-statischer Belastungszyklen durchgeführt. Die Lebensdauer und die reduzierte Steifigkeit von spritzgegossenen Proben wurden numerisch mittels Riss-

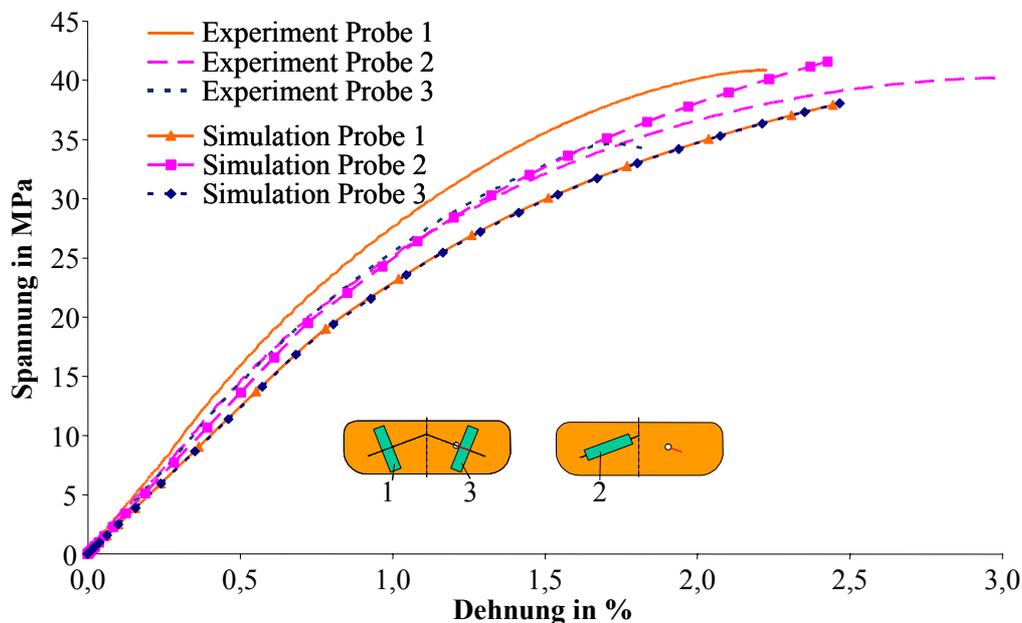
fortschrittsimulationen bestimmt. Die Ergebnisse des Schwerpunkts 1 sind in [1] und [4] dargestellt. Neue Ergebnisse werden in [5] detailliert aufgeführt.

Durch den Einsatz des sogenannten Kombinierten Einheitszellenmodells (KEZM) [9] im Zusammenspiel mit der Finite-Elemente-Methode, kann das mechanische Verhalten von Verbundwerkstoffen mit einer gewissen Orientierung der Fasern durch die Mittelung der Ergebnisse von verschiedenen 2D- und 3D-Zellenmodellen numerisch beschrieben werden, die eine einzelne Faser in drei orthogonalen Hauptebenen im Verbundwerkstoff repräsentieren. Durch eine adäquate Integration der Ergebnisse aller Faserorientierungen können die Spannung/Dehnung-Kurven im Zug- und Druckbereich des globalen Materials simuliert werden, einschließlich der Auswirkungen von Eigenspannungen.



**Abb. 1:** Bestimmung der Faserorientierung mittels Spritzgießsimulation

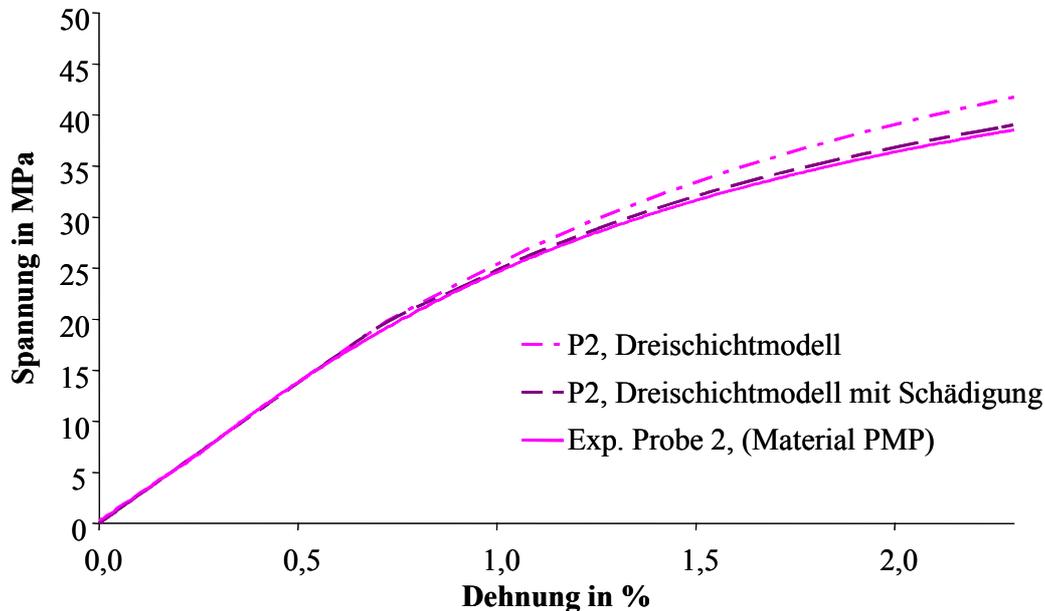
Als eine Erweiterung des KEZM wurde das Statistische Kombinierte Einheitszellenmodell (SKEZM) [10] entwickelt, um Faserversagen und Faser/Matrix-Ablösung zu betrachten durch die Anwendung der Weibull-Statistik und der Mischungsregel. Die Parameter des Weibull-Schädigungsgesetzes wurden über inverse Modellierung durch den Vergleich von Simulation und Experiment bestimmt. Das Statistische Kombinierte Einheitszellen-Modell wurde auf statische und zyklische Beanspruchungsbedingungen für kurzfaserverstärkte Polymer-Verbundwerkstoffe mit einheitlicher Faserorientierung angewandt.



**Abb. 2:** Fließkurven als Resultat der Simulation mit tiefenaufgelöster Faserorientierungsverteilung und Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen der Proben 1 bis 3

Das mechanische Verhalten von kurzfaserverstärkten Polymermatrixverbundwerkstoffen mit unterschiedlichen Faservolumenanteilen wurde in diesem Abschnitt der Arbeiten untersucht (Abb. 2). Die kombinierten Einheitszellenmodelle (KEZM) sind geeignet, um das elastisch-plastische mechanische Verhalten von kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffen zu simulie-

ren. Insbesondere für den Anfangsbereich der Spannung/Dehnung-Kurve des untersuchten Materials konnten gute numerische Ergebnisse erhalten werden (Abb. 3). Das Statistische Kombinierte Einheitszellenmodell (SKEZM) kann eingesetzt werden, um zusätzlich die Schädigungseigenschaften von kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffen unter Einbeziehung von Faserbrüchen und/oder Schädigung in der Faser/Matrix-Grenzschicht vorherzusagen (Abb. 3). Mit dem entwickelten SKEZM ist es möglich, das mechanische Verhalten von kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffen unter Berücksichtigung der Schädigung zwischen Matrix und Faser zu simulieren.



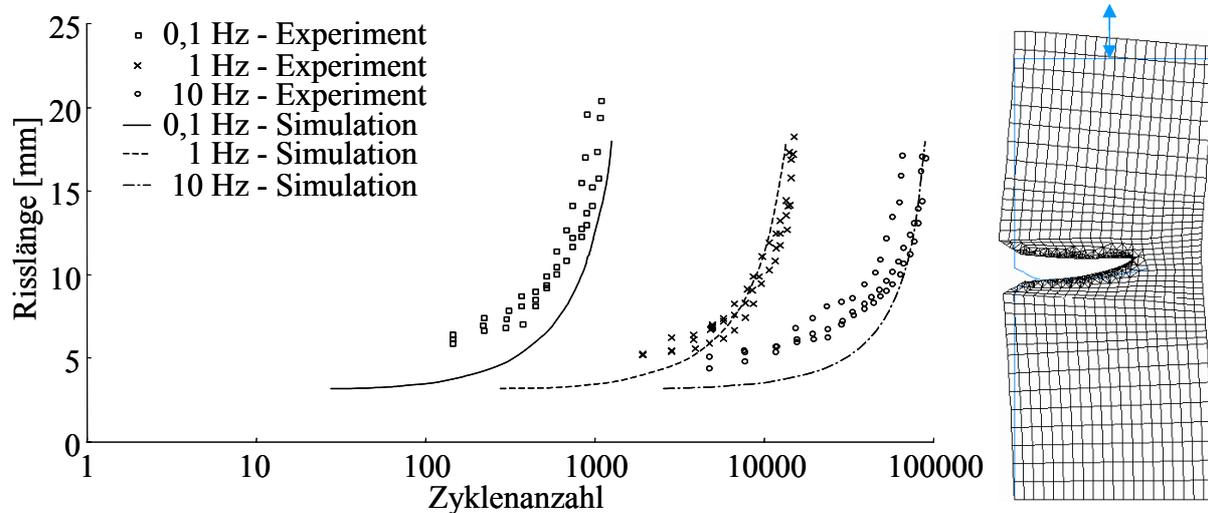
**Abb. 3:** Auswertung der Weibullanalyse für Probe 2 mit den Weibullparametern  $m = 2,4$  und  $\sigma_0 = 50$  bis 140 MPa und Vergleich mit dem Experiment

Aus numerischen und experimentellen Ergebnissen wurden für die untersuchten spritzgegossenen Polymer-Matrix-Composite-Materialien (PMC) die Weibull-Parameter bestimmt. Das mikromechanische Ermüdungs-Schädigungs-Modell basiert auf einem statistischen mikroskopischen Schädigungsgesetz. Die statistische Schädigung wurde durch ein Weibull-Schädigungsgesetz unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Faservolumenanteilen im Verbundwerkstoff bestimmt.

Als Schädigungsmechanismen wurden Faser/Matrix-Interface-Versagen und Faserbrüche berücksichtigt. Die Ergebnisse wurden in Form von Fließkurven auf heterogene mesoskopische Modelle übertragen, bei denen eine zufällige Verteilung des Faservolumenanteils nach Gauß angenommen wurde. In den mesoskopischen Modellen mit lokal unterschiedlichen Faservolumengehalten wurden bei einer breiteren Verteilung des Faservolumengehalts bessere Steifigkeits- und Ermüdungseigenschaften dokumentiert. Das vorgeschlagene Ermüdungsmodell kann auf verschiedene faserverstärkte Werkstoffe angewandt werden, wenn die Weibull-Schädigungsparameter für den jeweiligen Verbundwerkstoff vorliegen. Es zeigte sich, dass das vorgeschlagene Modell das experimentelle mechanische Verhalten der untersuchten Zug- und Druckproben vorhersagen kann.

Die Ergebnisse der Rissfortschritts-Simulationen mit FRANC2D sind in Abb. 4 für unterschiedliche Prüffrequenzen dargestellt. Die Parameter des Paris-Gesetzes [11] wurden für jede Frequenz separat ermittelt. Weiterhin spielt auch die Ausrichtung der Probe bezüglich der Schmelzfront eine große Rolle. Die Proben wurden einer Platte mit ihrer Längsachse in Verarbeitungsrichtung entnommen [12]. Bei einer Ausrichtung senkrecht zur Verarbeitungsrichtung ändern sich die Paris-Parameter  $A$  und  $m$  deutlich.  $A$  nimmt längs der Verarbeitungsrichtung

tung niedrigere Werte an im Vergleich zu den Proben, die senkrecht ausgerichtet sind. Dies resultiert in niedrigeren Rissfortschrittsgeschwindigkeiten senkrecht zur Verarbeitungsrichtung [12].



**Abb. 4:** Risslänge in Abhängigkeit der Zyklenzahl für 20 M.- % glasfaserverstärkte Polypropylenproben bei verschiedenen Lastfrequenzen; experimentelle Daten aus [12]

Bei höherer Lastfrequenz wird eine deutlich höhere Anzahl an Zyklen erreicht (Abb. 4). Insbesondere bei einer Frequenz von 1 Hz wird eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation erzielt. Die Ergebnisse variieren bei geringen Änderungen der Paris-Parameter A und m sehr stark. Daher ist die exakte Bestimmung von A und m essentiell für die Simulation der Lebensdauer der Proben. Die Unterschiede der Ergebnisse für verschiedene Frequenzen deuten auf viskoelastische Kriechprozesse an der Risspitze hin.

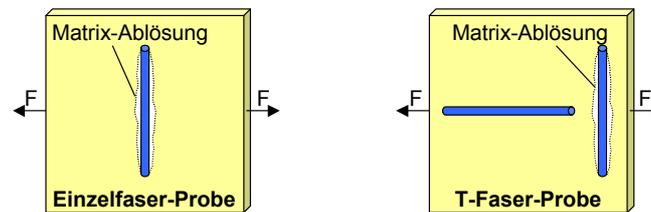
#### *Schlussfolgerungen*

Mit den Arbeiten in der 4. Förderperiode des Teilprojekts C5 konnte die Anwendbarkeit des KEZM und SKEZM für Bauteile mit Durchbrüchen und Bindenähten nachgewiesen werden. Die Verknüpfung von mikroskopischen und makroskopischen Längenskalen, die Berücksichtigung lokaler Faserorientierungen und die Integration von statistischer Schädigung führt zu einer deutlichen Verbesserung der Vorhersagen für das mechanische Verhalten von Bauteilen. Aufgrund der durchgeführten Rissfortschrittssimulationen wird ein Potenzial gesehen, die Modelle je nach lokaler Faserorientierung im Bereich großer Deformationen für Matrixrisse zu erweitern.

#### **Modellproben**

Die Werkstoffgruppe der thermoplastischen Faserverbundwerkstoffe wird wegen zahlreicher Vorteile im industriellen Einsatz zukünftig an Relevanz gewinnen. Dabei gilt das Spritzgießen als eines der bedeutendsten Verfahren in der Kunststoffverarbeitungstechnologie. Da die spezifischen lokalen Faserorientierungen die Eigenschaften des Bauteils maßgeblich beeinflussen, ist es wichtig, das Materialverhalten für verschiedene praxisrelevante Faserkonfigurationen zu untersuchen. Bei spritzgegossenen Bauteilen treten Kern- und Mantelschichten auf. Die Fasern in der Mantelschicht sind hauptsächlich in Verarbeitungsrichtung orientiert, in der Kernschicht senkrecht dazu. Aufgrund dieses schichtartigen Aufbaus wirken äußere Beanspruchungen meist in einigen Bereichen in spritzgegossenen Verbundwerkstoffbauteilen auch senkrecht zur Faserlängsachse. Bei Bindenähten liegen die Fasern bei den Untersuchungen in [1] über den gesamten Querschnitt in der gleichen Richtung wie in der Mantelschicht vor. Bei Beanspruchung senkrecht zur Bindenaht wirkt sich diese Faserorientierungskonfiguration stark auf das mechanische Verhalten und den Schädigungsprozess aus [16]. Daher sind Bin-

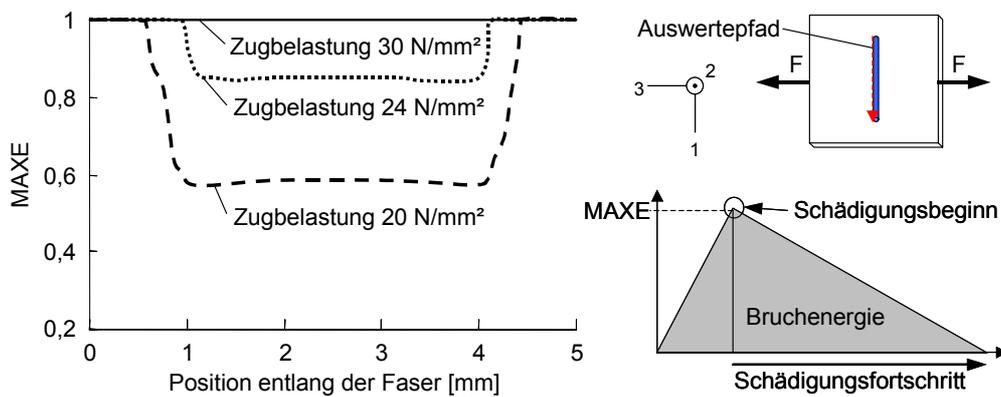
denähte in der Regel als Schwachstellen bekannt. Bei Bindenähten und bei Kern/Mantel-Strukturen können sich Fasern auch T-förmig zueinander anordnen. Daher stellt diese Konfiguration zusammen mit senkrecht zur Faserlängsachse beanspruchten Einzelfasern den Schwerpunkt der Untersuchungen im der Modellproben des Schwerpunkt 1 dar (Abb. 5).



**Abb. 5:** Beanspruchung senkrecht zur Faserlängsachse am Beispiel einer Einzelfaser und von zwei T-förmig angeordneten Fasern

Zur Abschätzung der Schädigungsrelevanz der unterschiedlichen Faserorientierungen wurden mittels numerischer Simulationen im Vergleich zu spannungsoptischen Experimenten die lokale Schädigung zwischen Faser und Matrix anhand von Modellproben untersucht. Die experimentelle Basis dieser Arbeit stellen spannungsoptische Aufnahmen mittels konfokaler Laserscanning-Mikroskopie dar. Dazu wurden in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt B1 (IKP-ZfP) Modellproben mit unterschiedlich orientierten Fasern hergestellt. Die im Experiment spannungsoptisch beobachtete Schädigung wurde numerisch in örtlicher und zeitlicher Auflösung nachvollzogen, um aus den Berechnungen ein gegenüber den experimentellen Ergebnissen verbessertes Verständnis für den Schädigungsverlauf zu gewinnen.

Die Bestimmung des Schädigungsvorgangs in Form der Ablösung der Matrix von der Faser von kurzfaserverstärkten Thermoplasten unter definiertem Belastungszustand wurde mit Hilfe der inversen Modellierung durch den Vergleich von Experiment und Simulation erreicht. Um den Schädigungsvorgang im fasernahen Bereich zu ermitteln, wurden Modellproben insitu bei der Durchführung von Zugversuchen mittels Spannungsoptik zerstörungsfrei untersucht. Begleitend dazu wurden im Rahmen der Arbeiten des Teilprojekts C5 FE-Berechnungen durchgeführt. Dabei hat sich durch die gewählte Beanspruchungskonfiguration, bei der die Faser quer zur Belastungsrichtung orientiert ist, die Grenzschichtablösung als hauptsächliches Versagensverhalten herauskristallisiert. Der Ablösevorgang der Matrix von der Faser wurde mit Kohäsivelementen simuliert. Das eingesetzte Einzelfaser-Modell besteht aus einem grob vernetzten äußeren und einem fein vernetzten inneren Matrixbereich, der Faser sowie der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix. Die Grenzfläche wurde über Kohäsivelemente realisiert, die an Fasermantel und -stirnflächen unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, da bei Beanspruchung senkrecht zur Faserlängsrichtung die Grenzflächen an den Faserstirnflächen anderen Belastungen im Vergleich zum Fasermantel ausgesetzt sind. Die numerischen Untersuchungen wurden an einer Einzelfaserprobe, die senkrecht zur Beanspruchungsrichtung ausgerichtet ist und zwei T-förmig angeordneten Fasern durchgeführt. Die Herstellung der Proben wurde zur Einbeziehung von Eigenspannungen durch die Simulation der Abkühlung am Anfang der FE-Berechnung berücksichtigt. Über die Ermittlung der sekundären Hauptspannungsdifferenzen war es möglich, die spannungsoptischen Abbildungen zu simulieren und so Rückschlüsse auf Ablösung und Spannungszustand zu gewinnen. Die Randbedingungen und Belastungswerte des FE-Modells entsprechen den experimentellen Bedingungen während des Zugversuchs. Die Werkstoffkennwerte für die Simulation wurden durch Experimente in [32] ermittelt und mit Literaturwerten ergänzt. Die Implementierung der Spannungsoptik in die FE-Berechnung erlaubte eine effektive Rückkopplung der Simulationsergebnisse an die experimentellen spannungsoptischen Abbildungen. Die Parametrisierung des Versagens- und Schädigungsverhaltens erlaubt dabei einen iterativen Vergleich sowie eine flexible Feinabstimmung zwischen den real beanspruchten Proben und den Simulationen.



**Abb. 6:** Verlauf des MAXE-Kriteriums entlang der Faser bei unterschiedlicher äußerer Beanspruchung

Die Simulationsergebnisse der quer zur Beanspruchung liegenden Faser zeigten, dass die Faser/Matrix-Ablösung entlang des Fasermantels, von den äußeren Faserenden her beginnt und sich in Richtung Fasermitte fortsetzt (Abb. 6). Dies deutete sich bereits in den Berechnungen mit intakt modellierter Faser/Matrix-Anbindung anhand der spezifischen Spannungssituation (Spannungsmaxima im Bereich der Faserenden) an und wurde nach initiiertem Grenzschichtablösung in der Simulation bestätigt. Im Faserquerschnitt beginnt der Ablösevorgang in der Symmetrieebene des Halbmodells durch Schädigung und Versagen der Kohäsionselemente und breitet sich in Richtung Fasergrund aus. Dies konnte durch den Vergleich der simulierten und experimentell gewonnenen spannungsoptischen Abbildungen nachgewiesen werden.

Für die T-förmig angeordneten Fasern wurden Berechnungen mit und ohne Schädigung der Faser/Matrix-Grenzfläche mittels Kohäsivelementen durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse der FE-Berechnungen mit denen aus der Einzelfaser-Simulation verglichen, wobei jeweils die Modelle mit bzw. ohne Debonding gegenübergestellt wurden. Bei den Ergebnissen für perfekte Faser/Matrix-Anbindung, d. h. ohne Grenzschichtablösung ergaben sich keine Unterschiede für die Komponenten des Spannungstensors  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$ . Die Faser in Zugrichtung beeinflusst in geringem Maße die Grenzschichtablösung der Querfaser. Dies zeigt sich beim Vergleich der Spannungstensorkomponente  $\sigma_{11}$  entlang der querbeanspruchten Faser. Aufgrund des Abstandes der beiden T-förmig angeordneten Fasern ist der Einfluss der Längsfaser auf die Ablösung der querliegenden Faser jedoch gering. In der Matrix sind im fasernahen Bereich an der Fasermitte für das Einzelfaser-Modell geringe Zugspannungen vorhanden. Demgegenüber stehen die Druckspannungen bei den T-förmig angeordneten Fasern in diesem Bereich. Dieses Phänomen wird auf die Faser/Matrix-Anbindung der Faser in Zugrichtung zurückgeführt.

Insgesamt zeigen die simulierten Phasenbilder eine hohe Übereinstimmung mit den experimentellen Abbildungen. Die Modellierung des Schädigungs- bzw. Versagensverhaltens der Faser/Matrix-Grenzschicht durch Kohäsivelemente mittels Dehnungsmaximum-Kriterium für den Schädigungsbeginn und einem energiebasierten Benzeggagh-Kenane-Kriterium [13] für den Schädigungsfortschritt führten zu einer realitätsnahen Simulation des Ablösevorgangs. Der Vergleich einzelner Komponenten des Spannungstensors nach Auswertung der Simulationsergebnisse gab im Vergleich zu den experimentellen spannungsoptischen Abbildungen einen besseren Einblick in den tatsächlichen Spannungszustand im Probeninneren als Funktion der Grenzschichtablösung.

### *Schlussfolgerungen*

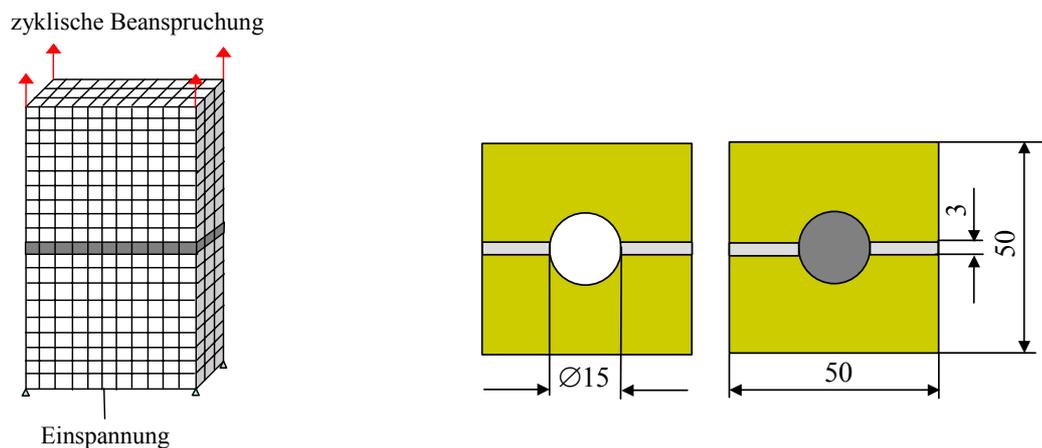
Mit den Ergebnissen für die Modellproben konnten neue Erkenntnisse für die lokalen Schädigungsinitiierungsorte unter Berücksichtigung der geometrischen Lagen und Orientierungen der Fasern gewonnen werden. Die Ergebnisse dienten als Input für die Simulation des Schä-

digungsverlaufs am Loch und an der Bindenaht auf der Längenskala des spritzgegossenen Bauteils.

### b.) Schwerpunkt 2 (spröde Matrix)

Im zweiten Schwerpunkt wird die Schädigungsentwicklung in einem Bauteil mit Loch aus einem Faserverbundwerkstoff (FVW) mit spröder Matrix untersucht. Dabei handelt es sich um cellulosefaserverstärkte Gipswerkstoffe, deren Bedeutung in der Bauindustrie wächst, da ihr Verhalten durch die hohe Energiedissipation bei zyklischer Beanspruchung Vorteile z. B. bei Erdbeben bietet. Das Material zeigt ein makroskopisches Verhalten, das dem eines duktilen Materials mit ausgeprägter Dehnungsentfestigung ähnelt.

Der Cellulosefaser/Gips-Verbundwerkstoff hat sich in jüngster Zeit ein breites Anwendungsspektrum im Bauwesen erobert. Bei den Schädigungsvorgängen dieses Werkstoffs besteht noch Forschungsbedarf, da bisher nur wenige Untersuchungen durchgeführt wurden. Ein weiteres Ziel des Teilprojekts C5 bildeten daher numerische Studien zur Schädigungsentwicklung in einem Zugstab und einem Bauteil aus einem Cellulosefaser/Gips-Verbundwerkstoff mit Loch (Abb. 7) und Berechnungen zur Abschätzung der reduzierten Steifigkeit von solchen Bauteilen. Die Simulation des Schädigungsverlaufs der Bauteile erfolgte für statische und quasi-statisch zyklische Beanspruchungen.

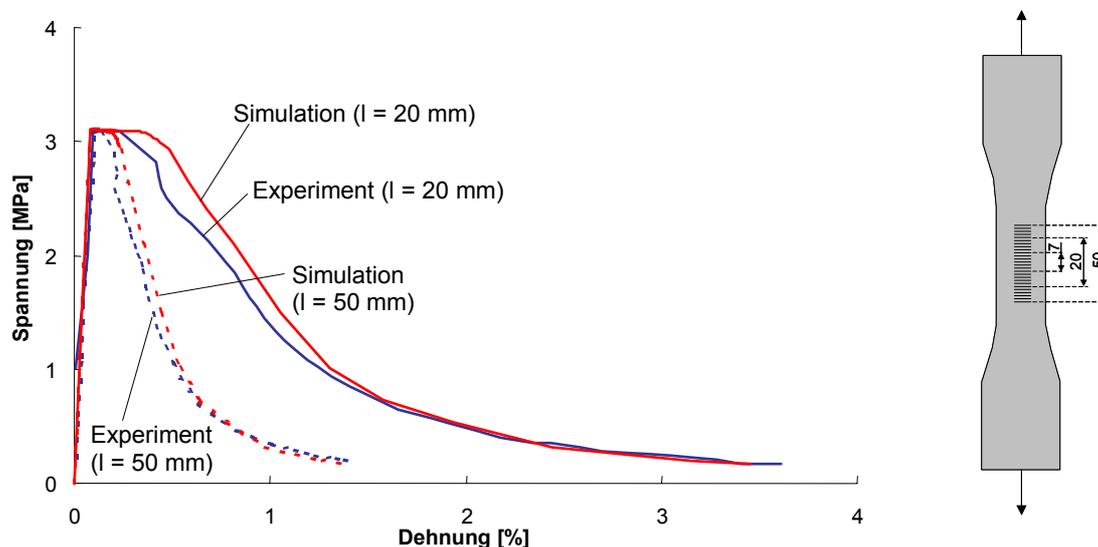


**Abb. 7:** Simulierte Probengeometrie mit Erweichungsbereich in der Mitte: Zugstabgeometrie (links) und Probe mit Loch bzw. stabförmigem Verbindungselement (rechts)

Die Simulationen des Materialverhaltens des cellulosefaserverstärkten Gipsverbundwerkstoffs wurden mit der Finite-Elemente-Methode durchgeführt. Der Cellulosefaser/Gips-Verbundwerkstoff verhält sich ähnlich wie quasi-spröde Materialien. Daher wurde das Plastic-Damage-Modell von Lubliner [14] und Lee [15] verwendet, das auch bei zyklischer Beanspruchung anwendbar ist. Ursprünglich wurde das Plastic-Damage-Modell für quasi-spröde Materialien wie z. B. Beton, Keramik und Gestein entwickelt. Das Modell vereint klassische Plastizität und Kontinuums-Schädigungsmechanik. Daher hat das Modell ein breites Anwendungspotenzial und ermöglicht die Simulation des mechanischen Verhaltens des hier vorliegenden Materials. Das Modell bezieht Steifigkeitsdegradation aufgrund von Schädigung im plastischen Bereich durch zwei unabhängige skalare Schädigungsparameter für Zug- und Druckbeanspruchung mit ein. Die Auswirkung der Schädigung wird durch das Ersetzen der wahren Spannung in allen Spannungsdefinitionen durch die reduzierte effektive Spannung eingeführt. Das Modell basiert weiterhin auf einem Steifigkeits-Erholungs-Schema, um die Auswirkungen des Öffnens und Schließens von Mikrorissen zu simulieren.

Die Modellierung wurde mit dem FEM-Programm ABAQUS durchgeführt. Hier ist bereits eine Implementierung des Plastic-Damage-Modells vorhanden. Die notwendigen Materialpa-

parameter werden aus den Verbundwerkstoffeigenschaften abgeleitet, die aus einachsigen Versuchen gewonnen werden. Wie die Untersuchungen zeigten, konnte mit dem vorliegenden Modell das statische Verhalten von Zugstäben unter Zugbeanspruchung zufriedenstellend simuliert werden (Abb. 8), jedoch zeigten sich bei Anwendung des Modells bei quasi-statisch zyklischen Versuchen starke Diskrepanzen zwischen Simulation und Experiment. Daher wurde das Modell insbesondere im Entlastungs- und Wiederbelastungsbereich modifiziert.



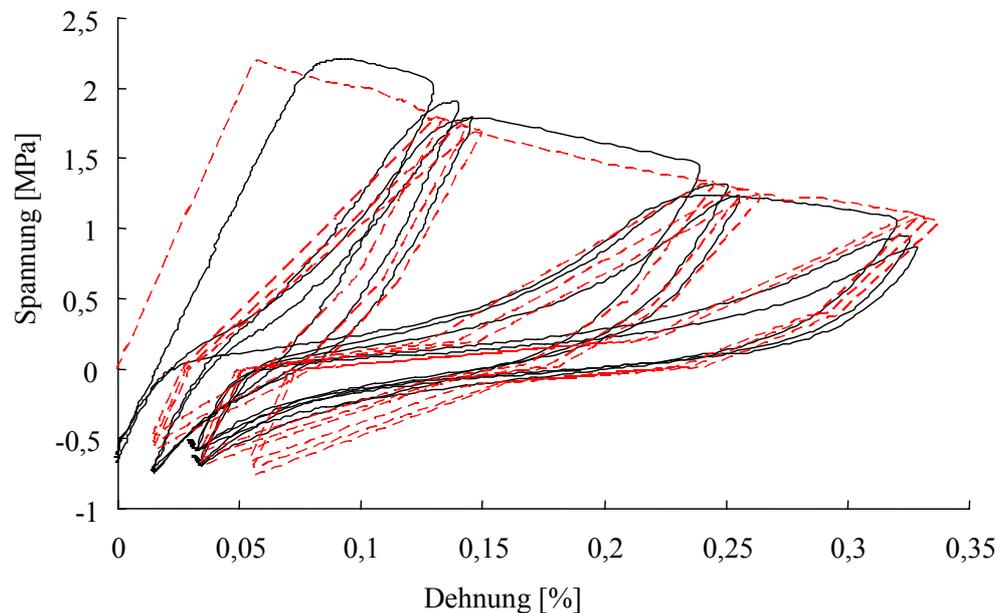
**Abb. 8:** Simulation des cellulosefaserverstärkten Gipswerkstoffs bei statischer Zugbeanspruchung mit Hilfe des Plastic-Damage-Modells für die Messlängen 20 und 50 mm im Vergleich zum Experiment

Zur Anwendung dieses Modells wurden die dafür notwendigen Materialparameter aus den Experimenten ermittelt. Als wichtiger Materialparameter wurde der Dilatationswinkel  $\psi$ , der die Richtung der plastischen Dehnungsincremente beeinflusst, über inverse Modellierung bestimmt. Bei einem Dilatationswinkel von  $\psi = 53^\circ$  wird die Richtung der plastischen Dehnungsincremente identisch zur Beanspruchungsrichtung. Dies führt zu einer geringeren Energiedissipation und damit zu einer guten Näherung zwischen Experiment und Simulation. Die Simulationen wurden für statische Zugbeanspruchung und quasi-statisch zyklische Beanspruchungen von Schulterproben bzw. für den Erweichungsbereich durchgeführt.

Die Simulationen der statischen Beanspruchungen zeigten gute Ergebnisse für verschiedene Messlängen über die die Dehnung gemittelt wurde. Die Einführung eines geschwächten Bereichs in Form einer Zone mit geringfügig reduzierter Fließspannung führte zu einer realitätsnahen Simulation der Dehnungslokalisierung und lieferte eine gute Approximation des Materialverhaltens mit dem Experiment. Die Darstellung des Schädigungsparameters  $d$  als Konturplot spiegelt anschaulich die Schädigung in Form eines Riss- bzw. Schädigungsbandes wider, das während des Experiments auftritt.

Zur Simulation der dehnungsgeregelten quasi-statisch zyklischen Beanspruchung wurde das in ABAQUS implementierte Modell im elastischen Entlastungs- und Wiederbelastungsbereich modifiziert. In diesem Bereich der Spannung/Dehnung-Kurve zeigt das Material unterschiedlichste Steifigkeiten (Abb. 9). Basierend auf den Formulierungen des Plastic-Damage-Modells aber unter Berücksichtigung des komplexen Verhaltens im Entlastungs- und Wiederbelastungsbereich wurde eine Material-Subroutine „GET\_DAMAGE“ entwickelt, die es ermöglichte, das quasi-statisch zyklische Materialverhalten in guter Näherung zum Experiment zu beschreiben. Die Simulationen mit quasi-statisch zyklischer Beanspruchung wurden zunächst auf den Erweichungsbereich (Schädigungsband) begrenzt. In Arbeiten, die nach Fer-

tigstellung des Buchkapitels [4] durchgeführt wurden, konnten die Simulationen auch auf Strukturen, wie sie im Bauwesen eingesetzt werden, wie z. B. Anschlüsse von Gipsfaserplatten an Holz mit stiftförmigen Verbindungsmitteln erweitert werden. Die Ergebnisse des Schwerpunkts 2 werden in [4, 5] vorgestellt.



**Abb. 9:** Vergleich des Spannung/Dehnungs-Diagramms von Experiment und Simulation (gestrichelt) für eine Zugstab-Probe (Abb. 7, links) mit Erweichungsbereich

#### *Schlussfolgerungen*

Basierend auf den erreichten Ergebnissen in diesem Schwerpunkt kann das modifizierte Materialmodell auf Strukturen mit komplexer Geometrie übertragen werden, z. B. auf Gipsfaserplatten, die auf Holzrahmenkonstruktionen befestigt sind und im Hausbau verwendet werden.

#### **c.) Schwerpunkt 3 (Mechanismen-Toolbox)**

Ein weiteres Ziel war es, die für kurzfaserverstärkte Verbundwerkstoffe im Rahmen des SFB vom Teilprojekt C5 entwickelten Material- und Schädigungsmodelle an ein einheitliches Format des verwendeten FE-Systems ABAQUS anzupassen und in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt C2 für eine Toolbox unter dem Gesichtspunkt der numerischen Behandlung von FVWn aufzubereiten. Die Ergebnisse sind in [16 - 18, 5] dargestellt. Für die Integration in die Mechanismen-Toolbox wurde das im Teilprojekt C5 entwickelte Kombinierte Einheitszellenmodell (KEZM) zur Simulation der Verformung gewählt [9]. Dieses Modell ist auf unterschiedliche Komposite anwendbar. Das KEZM-Modell wurde in dieser und in den vergangenen Förderperioden für MMC-Materialien sowie kurzglasfaserverstärkte Kunststoffe angewandt. In Form von Beispielen wurden die Modelle für die „Mechanismen-Toolbox“ (Teilprojekt C2) aufbereitet, vom Teilprojekt C2 implementiert [17, 18] und anschließend im Teilprojekt C5 für MMC- und PMC-Materialien verifiziert. Das modifizierte Skript wurde durch den Vergleich mit der Auswertung eines Metallmatrixverbundwerkstoffs aus [9] verifiziert.

#### *Schlussfolgerungen*

Der Vorteil des Python-Skripts liegt in der automatischen Netzgenerierung, was die Auswertung des KEZM stark beschleunigt und die Handhabung sowie die Ermittlung von Materialgesetzen vereinfacht.

#### d.) Literatur

- [1]\* S. Predak, H. Gerhard, I. Solodov, O. Bullinger, N. C. Davidson, W. Lutz, *Short fiber reinforced thermoplastics*, Kap. 2.1.3 in: G. Busse, B. H. Kröplin, F. Wittel (Eds.): *Damage and its evolution in fiber-composite materials*, ISD-Verlag, Stuttgart, 2006, pp. 157-192
- [2]\* W. Lutz, K. Zhu, S. Schmauder, *FEM-Modeling of acoustic emission in short fiber reinforced composites*, Kap. 3.1 in: G. Busse, B. H. Kröplin, F. Wittel (Eds.): *Damage and its evolution in fiber-composite materials*, ISD-Verlag, Stuttgart, 2006, pp. 297-310
- [3]\* H. M. Deuschle, W. Lutz, H. Gerger, S. Schmauder, *Simulation of photoelasticity in a glass fiber polymer matrix composite*, Kap. 3.2 in: G. Busse, B. H. Kröplin, F. Wittel (Eds.): *Damage and its evolution in fiber-composite materials*, ISD-Verlag, Stuttgart, 2006, pp. 311-321
- [4]\* W. Lutz, M. Dong, K. Zhu, S. Schmauder, *Modeling of damage in fiber and particle reinforced composites*, Kap. 4.1 in: G. Busse, B. H. Kröplin, F. Wittel (Eds.): *Damage and its evolution in fiber-composite materials*, ISD-Verlag, Stuttgart, 2006, pp. 325-359
- [5]\* W. Lutz, S. Schmauder, *Modellierung der Schädigung in Bauteilen aus Kurzfaserverbundwerkstoffen mit duktiler oder spröder Matrix*, in: G. Busse, Sonderforschungsbe-  
reich 381 "Charakterisierung des Schädigungsverlaufes in Faserverbundwerkstoffen  
mittels zerstörungsfreier Prüfung - Ergebnisbericht 2004-2006, Stuttgart 2007
- [6]\* W. Lutz, F. Guo, S. Schmauder, R. Finn, S. Aicher, *Simulation of the cyclic loading and damage behavior of cellulose fiber reinforced gypsum composites*, in C. U. Grosse: *Advances in Construction Materials*, Springer, 2007 (eingereicht)
- [7]\* W. Lutz, H. Gerger, S. Schmauder, H. Gerhard, G. Busse, *FEM simulations of photoelasticity patterns of fiber reinforced model specimens including fiber matrix debonding*, Conference Proceedings of the 7th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), Los Angeles, USA, 16. - 22.7.2006
- [8]\* W. Lutz, H. Gerger, S. Schmauder, *Modellierung der Schädigungsentwicklung in einem glasfaserverstärkten Werkstoff mit thermoplastischer Matrix*, in: H.-G. Fritz, C. D. Eisenbach: 20. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 3V7, Stuttgart, 14. - 15.03.2007 (eingereicht)
- [9]\* M. Dong, S. Schmauder, T. Bidlingmaier, A. Wanner, *Prediction of the mechanical behaviour of short fiber reinforced MMCs by combined cell models*, *Comp. Mat. Sci.* 9, 1997, pp. 121-133
- [10]\* K. Zhu, S. Schmauder, *Prediction of the failure properties of short fiber reinforced composites with metal and polymer matrix*, *Comp. Mat. Sci.* 28(3-4), 2003, pp. 743-748
- [11] P. C. Paris, F. Erdogan, *A critical analysis of crack propagation laws*. *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering* 85, 1963, pp. 528-534
- [12] A. Pegoretti, T. Ricco, *Fatigue behaviour of fiber reinforced polypropylene*, *Proceedings of the 8th European Conference on Composite Materials (ECCM8)*, Neapel, 1998
- [13] M. L. Benzeggagh, M. Kenane, *Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus*, *Comp. Sci. Tech.* 49, 1996, pp. 439-49.
- [14] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, E. Oñate, *A plastic-damage model for concrete*, *Int. J. Solids Structures*, 25 (3), 1989, pp. 229-326
- [15] J. Lee, G. L. Fenves, *Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures*, *J. Eng. Mech.* 124(8), 1998, pp. 892-900
- [16] M. d'Ottavio, F. K. Wittel, B. Kröplin, *An open toolbox for damage simulation*, *NDT.net*, 12 (12), 2006, pp. 1-11
- [17] F. K. Wittel, M. d'Ottavio, *An open toolbox for damage simulation*, Kap. 5.1 in: G. Busse, B. H. Kröplin, F. Wittel (Eds.): *Damage and its evolution in fiber-composite ma-*

---

\* eigene Arbeiten

- terials: simulation and non-destructive testing, ISD-Verlag, Stuttgart, 2006, pp. 475-480
- [18] M. d'Ottavio, F. K. Wittel, J. Reiser, *Mechanisms based toolbox: prototypical implementation of tools*, Kap. 5.2 in: G. Busse, B. H. Kröplin, F. Wittel (Eds.): *Damage and its evolution in fiber-composite materials: simulation and non-destructive testing*, ISD-Verlag, Stuttgart, 2006, pp. 481-518
- [19] A. Pegoretti, T. Ricco, *Fatigue fracture of neat and short glass fiber reinforced polypropylene: effect of frequency and material orientation*, J. Comp. Mat. 34(12), 2000, pp. 1009-1027
- [20] P. Wawrzynek, A. R. Ingraffea, *Interactive finite element analysis of fracture process: an integrated approach*, Theor. Appl. Fract. Mech. 8, 1987, pp. 137-150
- [21] R. H. Dodds, P. M. Vargas, *Numerical evaluation of domain and contour integrals for nonlinear fracture mechanics: formulation and implementation aspects*, Report, University of Illinois at Urbana-Champaign, Dept. of Civil Engineering, 1988
- [22] F. Erdogan, G. C. Sih, *On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear*, J. Basics Eng. 85, 1963, pp. 519-525
- [23] S. Aicher, R. Finn, *Fracture characterization of cellulose fiber gypsum composites subject to inplane tension loading*, Otto Graf Journal 15, 2004, pp. 91-102
- [24]\* M. R. Kabir, W. Lutz, K. Zhu, S. Schmauder, *Fatigue modeling of short fiber reinforced composites with ductile matrix under cyclic loading*, Comp. Mat. Sci. 36(4), 2006, pp. 361-366
- [25]\* T. Rahman, W. Lutz, R. Finn, S. Schmauder, S. Aicher, *Simulation of the mechanical behavior and damage in components made of strain softening cellulose fiber reinforced gypsum materials*, Comp. Mat. Sci. 39, 2007, pp. 65-74
- [26]\* K. Zhu, S. Schmauder, R. Stöbel, S. Predak, G. Busse, W. Lutz, *The failure properties of short fiber reinforced composites with polymer matrix with consideration of the fiber/matrix-debonding*, International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS) 2004, Shanghai/China, 17. - 20.05.2004
- [27]\* W. Lutz, G. Lasko, S. Schmauder, S. Predak, O. Bullinger, H. Gerhard, G. Busse, *Injection moulding simulation of a glass fibre reinforced component with a weldline to calculate fibre orientation and resulting mechanical properties*, in: H.-G. Fritz, C. D. Eisenbach: 19. Stuttgarter Kunststoffkolloquium“, Stuttgart, 4V5, 2005, pp. 1-11
- [28]\* T. Rahman, W. Lutz, R. Finn, S. Schmauder, S. Aicher, *Simulation of the mechanical behavior and damage in components made of strain softening cellulose fiber reinforced gypsum materials*, Vortrag, IWCM15, Düsseldorf, 19.-20.09.2005
- [29]\* W. Lutz, S. Schmauder, *Modellierung spritzgegossener kurzglasfaserverstärkter Polypropylen-Formteile*, Simulation von Verarbeitungsprozessen und prozessgerechter Bauteilgestaltung - Fokus Polymere, 2. - 3.11., Poster, Fürth, 2005
- [30]\* W. Lutz, S. Schmauder, *Modeling of damage in short fiber reinforced components with ductile or brittle Matrix*, 6. Leipziger Fachtagung „Innovationen im Bauwesen - Faserverbundwerkstoffe“ 1. - 2.12.2005
- [31]\* W. Lutz, H. Gerger, S. Schmauder, *Multi-scale modeling of fiber reinforced composites*, Conference on Damage in Composite Materials 2006 (CDCM06), Stuttgart, 2006
- [32]\* S. Predak, I. Solodov, H. Gerhard, N. Schlatterer, W. Lutz, G. Busse, *Kombination von ZFP-Verfahren zur Material- und Schädigungscharakterisierung von kurzfaserverstärkten Thermoplasten*, in: H.-G. Fritz, C. D. Eisenbach: 20. Stuttgarter Kunststoffkolloquium“, 5V5, Stuttgart, 14. - 15.03.2007 (eingereicht)
- [33]\* W. Lutz, T. Rahman, S. Schmauder, R. Finn, S. Aicher, *Simulation cellulosefaserverstärkter Gips-Verbundwerkstoffe*, Kap. 19 in: F. Dehn, K. Holschemacher, N. V. Tue, *Faserverbundwerkstoffe*, Bauwerk-Verlag, Berlin, 2005, S. 273-288

---

\* eigene Arbeiten

### **Master-, Diplom- und Studienarbeiten**

- [34] T. Rahman, *Simulation of the damage development in components made of cellulose fiber reinforced gypsum material*, COMMAS Master Thesis, Institut für Materialprüfung Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF), Universität Stuttgart, 2005 (Betreuer: W. Lutz, S. Aicher)
- [35] H. Gerger, *Modellierung der spannungsoptisch beobachteten Schädigung unterschiedlich orientierter Fasergruppen eingebettet in Polycarbonat*, Modeling of photoelasticity damage patterns of differently oriented fibre groups embedded in polycarbonate, Diplomarbeit, Institut für Materialprüfung Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF), Universität Stuttgart, 2005 (Betreuer: W. Lutz, H. Gerhard)
- [36] F. Guo, *Simulation of the static and cyclic loading behaviour and the damage development of cellulose fiber reinforced gypsum components*, COMMAS Master thesis, Institut für Materialprüfung Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF), Universität Stuttgart, 2006 (Betreuer: W. Lutz, S. Aicher)
- [37] J. Herrmann, *Modellierung der Schädigungsentwicklung in kurzfaserverstärkten spritzgegossenen Bauteilen unter Berücksichtigung der lokalen Faserorientierung*, Studienarbeit, Institut für Materialprüfung Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF), Universität Stuttgart, 2006 (Betreuer: W. Lutz)

### **e.) Kontakt**

Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF)  
Pfaffenwaldring 32  
70569 Stuttgart

Prof. Dr. S. Schmauder    Tel.: +49 711 685-62556  
siegfried.schmauder (at) mpa.uni-stuttgart.de

Dr. W. Lutz                    Tel.: +49 711 685-62701  
wolfgang.lutz (at) mpa.uni-stuttgart.de