

# 1 Einleitung

Neben der Entdeckung und Nutzbarmachung isotroper Werkstoffe, wie zum Beispiel Stein, Bronze und Eisen, spielten auch die Verbundwerkstoffe bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt eine wichtige Rolle in der menschlichen Entwicklungsgeschichte. So ist die Kombination von Lehm und Stroh zur Herstellung von Ziegeln aus der Ausgrabung der Stadt Çatal Höyük bekannt [6,7]. Diese Funde lassen sich auf ca. 8000 v. Chr. datieren und stellen, neben der Stadt Jericho, die erste nachgewiesene Stadtgründung dar. Bei der Herstellung von Lehmziegeln unterschied sich die Zielsetzung bei der Werkstoffentwicklung nicht wesentlich von den Entwicklungen in der Gegenwart: Es soll durch die Kombination zweier unterschiedlicher Werkstoffe ein neuer Werkstoff entstehen, dessen Eigenschaften die seiner einzelnen Komponenten übertreffen. Bei dem oben genannten Beispiel bildet einerseits das Stroh eine Verstärkung des Lehms und ermöglicht so erst die Herstellung hinreichend großer und selbsttragender Strukturen, andererseits würde ohne den Lehm das Stroh nicht über die notwendigen Barriereigenschaften verfügen.

Bei der Entwicklung polymerer Faserverbundwerkstoffe soll die große Festigkeit der Fasern in Zugrichtung, insbesondere auch im Bezug auf ihre niedrige Dichte, durch den Einsatz einer polymeren Matrix für geometrisch bestimmte Bauteile nutzbar gemacht werden. Die Matrix dient hierbei, neben der Formgebung, der Lasteinleitung in die Fasern und dem Schutz der Fasern vor Umwelteinflüssen und dem abrasiven Verschleiß durch gegenseitigen Kontakt. Außer den Matrixeigenschaften sind die Eigenschaften der Faser-Matrix-Grenzfläche entscheidend für die Lastverteilung in Faserverbundwerkstoffen.

Ein frühes Beispiel für den Einsatz von Verbundwerkstoffen mit polymerer Matrix stellen die MICARTA<sup>®</sup>-Flugzeugpropeller aus der Zeit ab etwa 1920 dar [8- 11]. Bei diesem Werkstoff handelt es sich um mit Baumwollgewebe verstärktes Phenol-Formaldehydharz. Einen Überblick über die weitere Verwendung von Kunst- und Verbundwerkstoffen in den Anfängen des Flugzeugbaus gibt [12]. Glasfaserverstärktes Epoxidharz findet bereits seit den 50er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts Verwendung in industriell gefertigten Gütern. Ein frühes Beispiel für ein solches Produkt ist der amerikanische Sportwagen Chevrolet Corvette, der am 20. Juni 1953 der Öffentlichkeit präsentiert wurde [13] und bei dessen Produktion bis heute eine Karosserie aus diesem Material verwendet wird.

Der Grund für die zunehmende Bedeutung der Faserverbundwerkstoffe liegt in ihrem weiten Eigenschaftsspektrum, das es ermöglicht, Werkstoffe konstruktionsgerecht auszuwählen bzw. herzustellen. Diese Vorgehensweise, den Werkstoff der Belastung anpassen zu können, erlaubt Konstruktionen, die sich in einem besonders hohen Maße an der geforderten Funktion orientieren. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit aus Verbundwerkstoffen besonders leichte und steife Bauteile zu fertigen. Diese Bauteile ermöglichen, zum Beispiel beim Einsatz in

Flugzeugen oder Kraftfahrzeugen, durch Verringerung des Gesamtgewichts die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und somit der Schadstoffemission. Dieser Aspekt wird bedingt durch die limitierte Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe, sowie zusätzlich durch immer strengere Emissionsgrenzwerte, in der Zukunft noch größere Bedeutung erlangen.

Bis in die Gegenwart wird die Konstruktion von Strukturbauteilen jedoch durch ein, im Wesentlichen nur auf Empirie basierendes, unvollständiges Wissen erschwert. Die mangelnde Kenntnis der inneren Vorgänge und ihrer Umsetzung in berechenbare makroskopische Eigenschaften ist gegenwärtig nur durch hohe Sicherheitsfaktoren und konservative Auslegungskriterien kompensierbar. Als Folge dieser Situation ist ein erheblicher Teil des Anwendungspotentials der polymeren Verbundwerkstoffe bis jetzt ungenutzt.

Die Motivation dieser Arbeit liegt in dem Wunsch, aus der Kenntnis mikromechanischer Vorgänge das Versagens- und Verformungsverhalten von Faserverbundwerkstoffen mit polymerer Matrix verstehen und beschreiben zu können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll der Versuch unternommen werden, den Versagensfortschritt in unidirektional verstärkten Faserverbundwerkstoffen, auf der Grundlage der Werkstoffeigenschaften der Verbundwerkstoffkomponenten, in einem kommerziellen FEM-Programm abzubilden. Auf dieser Grundlage entsteht hierdurch ein direkt im Konstruktionsprozess nutzbares Werkzeug, welches eine werkstoffgerechte Auslegung entsprechender Bauteile ermöglicht.

Als signifikante Werkstoffeigenschaften werden der temperatur- und dehnungsabhängige E-Modul des Matrixwerkstoffs und die statistische Verteilung der Faserfestigkeit untersucht. Basierend auf diesen Werkstoffeigenschaften wird der Vorgang der Lastumleitung, hervorgerufen durch eine gebrochene Faser, untersucht, da hierin ein wesentlicher Schlüssel zum Verständnis der inneren Vorgänge in einem Faserverbundwerkstoff liegt. Besondere Aufmerksamkeit verdient in diesem Zusammenhang die Berücksichtigung und korrekte Berechnung der thermischen Eigenspannungen, die, bedingt durch die Verarbeitungsprozesse bei erhöhten Temperaturen, in Verbundwerkstoffen auftreten.

Aus der Simulation der Lastumlagerung in der Umgebung gebrochener Fasern, folgt die Beschreibung der Verteilung und Höhe der mechanischen Spannungen in den Nachbarfasern. Diese Spannungsverteilung hängt unmittelbar vom Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Matrixwerkstoffs ab und bewirkt, gemeinsam mit der statistischen Faserfestigkeitsverteilung, den Versagensfortschritt in einem unidirektional verstärkten Faserverbundwerkstoff. Das Kriterium zur Beschreibung des Versagensfortschritts ist die Zunahme der Anzahl der Faserbrüche und die daraus folgende Reduktion des E-Moduls des Verbundwerkstoffs.

---

## 2 Grundlagen

### 2.1 Polymere Verbundwerkstoffe

Ein Faserverbundwerkstoff besteht aus den beiden Komponenten Matrixwerkstoff und Verstärkungsfasern. Darüber hinaus hat die Faser-Matrix-Grenzfläche einen Einfluss auf mikromechanische Versagensvorgänge im Verbundwerkstoff. Die Funktion der Matrix in einem Faserverbundwerkstoff ist, neben der Formgebung, die Lasteinleitung in die Fasern und der Schutz der Fasern vor Umwelteinflüssen und der Schädigung durch gegenseitigen Kontakt.

Als Matrixwerkstoffe wurden ursprünglich nur Duroplaste eingesetzt, hauptsächlich ungesättigte Polyesterharze und Epoxidharze. Erst zu einem späteren Zeitpunkt erlangten Thermoplaste, auf Grund ihrer leichteren und damit preiswerteren Verarbeitbarkeit, eine größere Bedeutung als Matrixwerkstoff. Darüber hinaus werden auch faserverstärkte Elastomere hergestellt.

Die am häufigsten verwendeten Verstärkungsfasern sind Glasfasern und Kohlenstofffasern. In geringerem Umfang kommen auch keramische Fasern und hochorientierte Polymerfasern, wie Polyethylen- und Aramidfasern, zur Anwendung.

Die polymeren Verbundwerkstoffe unterscheiden sich, neben den verschiedenen Werkstoffkombinationen, durch die Länge und Orientierung der Fasern. In Duroplasten liegen die Fasern endlos als unidirektionale Faserlagen oder als Gewebe vor. Aus der Kombination mehrerer unidirektionaler Faserlagen, im gleichen oder unterschiedlichen Winkel zueinander, entsteht ein Laminat, welches die häufigste Form von Faserverbundwerkstoffen in Strukturbauteilen darstellt. Im Gegensatz zu den Duroplasten werden in Thermoplasten hauptsächlich Kurzfasern eingesetzt, da die Verstärkungsfasern in dieser Form mit den Thermoplasten gemeinsam verarbeitet werden können.

Als Modellwerkstoffe für die vorliegende Arbeit wurden Glasfasern, Epoxidharz und Polycarbonat gewählt. Zusätzlich wurden aus experimentellen Gründen (siehe Kap.3.4) Saphirfasern zur Herstellung von Modellverbunden verwendet.

Der Gegenstand der weiteren Untersuchungen sind in Faserrichtung belastete unidirektionale, endlosfaserverstärkte Verbundwerkstoffe.

Der Versagensfortschritt in einem unidirektional endlosfaserverstärkten Verbundwerkstoff ist in Abb.2.1 schematisch wiedergegeben.