

## Untersuchung von Reibung als Mittel zur Erzielung von Duktilität in Verbundwerkstoffen

Stephan Maidl, M.Sc., Technische Universität München/Imperial College London

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) sind bekannt für ihre hohe Steifigkeit, hohe Festigkeit und guten Ermüdungseigenschaften bei gleichzeitig geringer Dichte. Problematisch ist jedoch, dass sie spröde brechen und somit bis zum finalen Versagen kaum vorwarnende Dehnung zeigen. Daher sind gegenwärtig komplexe Wartungsmaßnahmen und größere Sicherheitszuschläge in der Auslegung von CFK-Bauteilen gegenüber konventionellen Metallbauteilen erforderlich. In diesem Licht erscheint die Einführung von pseudo-duktilen Verhalten in die ansonsten spröden CFK besonders erstrebenswert. [1]

Der zugrundeliegende Ansatz der Arbeit ist an natürlich vorkommendes Perlmutter angelehnt. Obwohl Perlmutter zu 95 % aus sprödem Aragonit ( $\text{CaCO}_3$ ) und nur zu 5 % aus niedrigfesten, aber duktilen Proteinen und Polysacchariden besteht, übertrifft Perlmutter die Zähigkeit des Aragonits um das Tausendfache ohne dabei viel von der Festigkeit einzubüßen (vgl. Abb. 1, rechts). Diese hohe Zähigkeit wird durch eine mauerartige Anordnung von mikroskopisch kleinen Aragonitplättchen und organischen Klebschichten erreicht (vgl. Abb. 1, links). Als einer der Schlüsselmechanismen dieser Struktur wurde die ineinandergreifende Keilform der Plättchen in Kombination mit der materialinhärenten, internen Zwangsbedingung durch die Klebschichten erkannt. Unter Zugbelastung in Längsrichtung (vgl. große, schwarze Pfeile in Abb. 1, Mitte) gleiten die Plättchen aufeinander ab. Die Ausdehnung der Materialstruktur in Querrichtung – verursacht durch die Keilform der Plättchen – wird durch die Verklebung der Plättchen (vgl. kleine, graue Pfeile in Abb. 1, Mitte) behindert. Die durch die Normalkräfte an den Grenzflächen (vgl. kleine, schwarze Pfeile in Abb. 1, Mitte) induzierte Reibung führt zu einer Dehnungshärtung der Struktur, einer Delokalisierung von Versagenserscheinungen (Rissen) und schlussendlich zu einer hohen Maximaldehnung. [2]

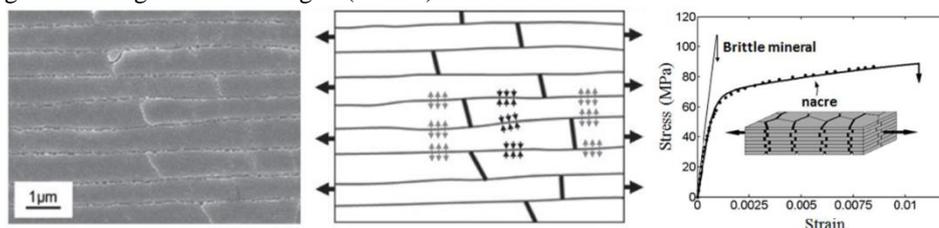


Abb. 1: Elektronenmikroskopaufnahme der Plättchen in Perlmutter (links); entstehende Spannungen bei Zugbelastung in Längsrichtung (Mitte); Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Aragonit und Perlmutter (rechts); alle Bilder aus [2]

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit, die aus **fünf wesentlichen Schritten** bestand, war es herauszufinden, ob es möglich ist durch die Übertragung des beschriebenen Reibungsmechanismus auf CFK, einen festen und zugleich duktilen Werkstoff zu schaffen. Ausgehend von einer **Literaturrecherche** zu natürlichen und menschengemachten Strukturen, die Reibungsmechanismen ausnutzen, wurden **analytische Modelle** hergeleitet, die das Spannungs-Dehnungs-Verhalten dieser Materialien beschreiben. Die Modelle konnten anschließend zur **Entwicklung und Dimensionierung von Probekörpern** aus 3D gedrucktem Kunststoff sowie CFK verwendet werden. Eine große Schwierigkeit der Arbeit war es, ein zuverlässiges Fertigungsverfahren für die keilförmigen CFK-Plättchen zu finden. Ein gangbarer Weg zur **Herstellung der Probekörper** beinhaltet die Aushärtung von Außenhäuten der Plättchen aus Prepregmaterial in  $0^\circ$ -Richtung und mehreren Lagen geschäftetem Prepregmaterial in  $90^\circ$ -Richtung als Füllstoff in einem Werkzeug mit welliger Oberfläche in einem Autoklaven. Schließlich wurden die Proben **Zugversuchen** unterzogen. Die Versuche offenbarten unter anderem, dass nach einer anfänglichen Region mit hoher Steifigkeit (Haftreibung) das Gleiten der Plättchen (Gleitreibung) zum Tragen kam. Die Experimente zeigten weiterhin, dass es möglich ist, mithilfe des Reibungsmechanismus zwischen 15 und 20 % Dehnung in CFK zu erreichen. Die Festigkeit der Proben war mit 20 bis 30 MPa allerdings gering. Dies lag daran, dass die externe Zwangsbedingung in Querrichtung mit sehr elastischen Plexiglasscheiben realisiert wurde, um das Abgleiten der Plättchen aufeinander während der Versuche beobachten zu können. Die durch ein Videoextensometer ermittelten gleichmäßigen Dehnraten über die gesamten Probekörper bestätigten indes die erhoffte lokale Dehnungshärtung.

Das Prinzip des Reibungsmechanismus in natürlichem Perlmutter begleitet von der Delokalisierung des Versagens konnte in einer Laborumgebung mit CFK umgesetzt werden. Um den Weg für reale Anwendungen zu eröffnen, kann die Struktur nun durch Einbringung interner Zwangsbedingungen wie Klebschichten deutlich verfestigt werden.

### Literatur

- [1] Bacarreza O, Maidl S, Robinson P, Shaffer MSP. Exploring the Use of Friction to Introduce Ductility in Composites. ICCM21 - 21st International Conference on Composite Materials 2017.
- [2] Barthelat F. Nacre from mollusk shells: a model for high-performance structural materials. *Bioinspiration & Biomimetics* 2010;5(3):35001.