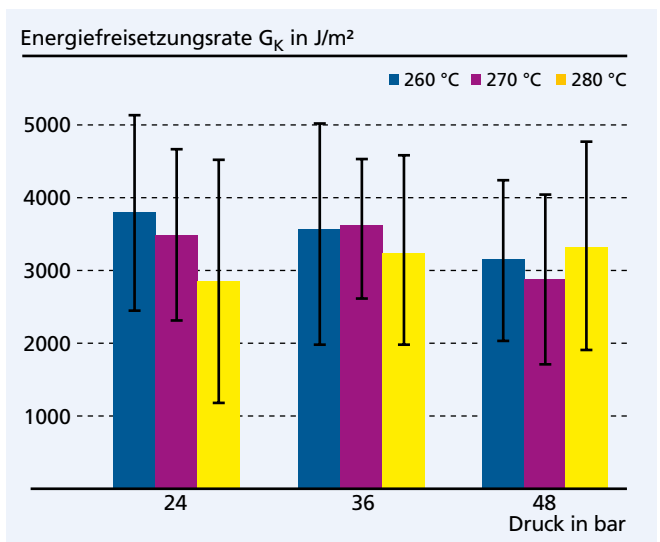


EINFLUSS DER FASER-MATRIX-GRENZFLÄCHEN AUF DIE DELAMINATION VON UD-VERBUNDEN

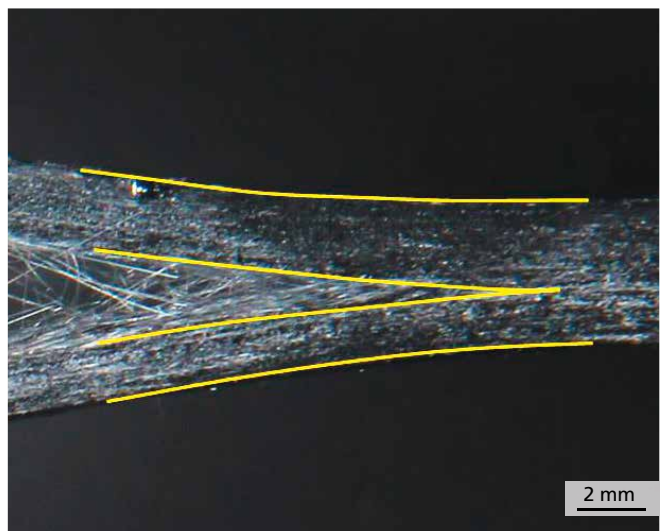
Für kosteneffektiven Leichtbau in der Automobil- sowie der Transportbranche wächst der Einsatz faserverstärkter Kunststoffe stetig an. Während für diskontinuierlich faserverstärkte Strukturen duomere wie auch thermoplastische Kunststoffe Verwendung finden, dominieren im Bereich der kontinuierlichen Faserverstärkung derzeit duomere Matrixsysteme, wie Epoxidharze. Bei letztgenannten kann die alternative Nutzung thermoplastischer Kunststoffe helfen, Taktzeiten und damit Produktionskosten zu senken. Eine vielversprechende Prozesstechnologie ist das Automated Tape Placement (ATP), bei welcher unidirektionalverstärkte (UD) Tapes entsprechend der Geometrie des späteren Bauteils sowie dessen Lasten geschichtet und anschließend konsolidiert werden. Zur Auslegung derart gefertigter Bauteile sind das Delaminationsverhalten des Schichtverbunds sowie der Einfluss schwankender Prozessparameter auf dasselbe von zentraler Bedeutung. Das Delaminationsverhalten bezüglich verschiedener Versagensmoden wird beispielsweise im Double-Cantilever-Beam(DCB)-Test bezüglich des Modus I und im End-Notched-Flexure(ENF)-Test bezüglich des Modus II bewertet.

Charakterisierung der Bruchzähigkeit

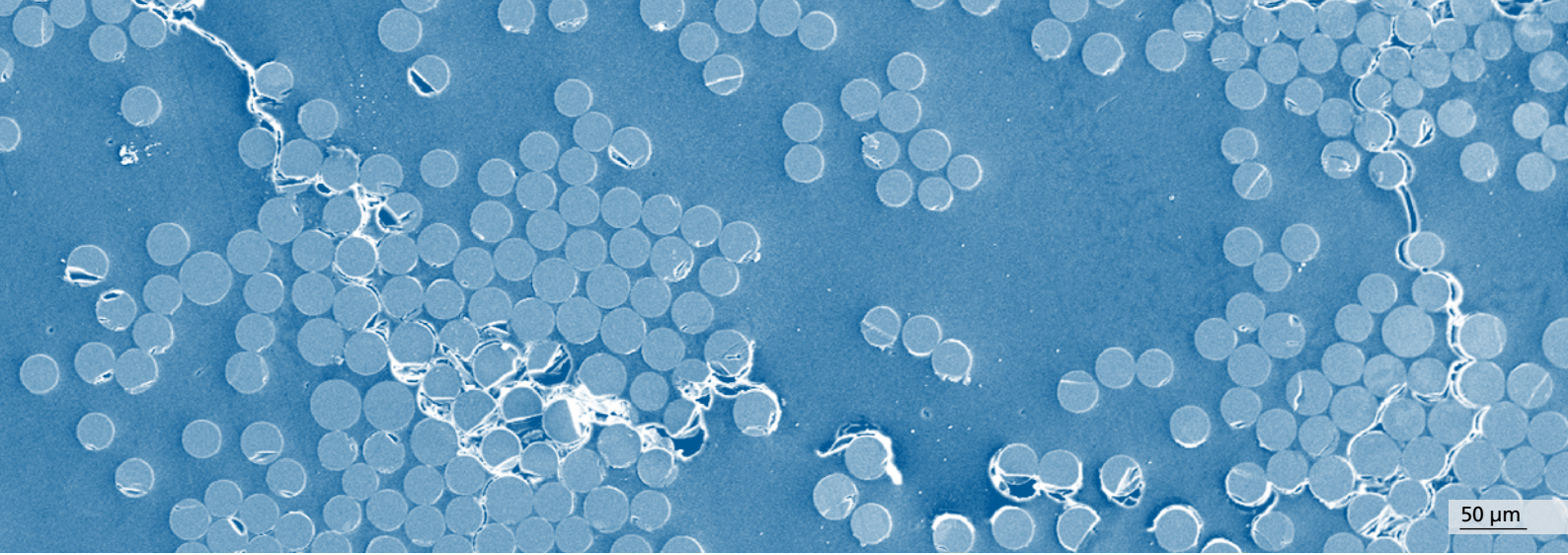
Ziel des DCB-Versuchs ist es, die interlaminaire Bruchzähigkeit im Modus I zwischen zwei Laminatschichten in Richtung der Faserverstärkung zu bestimmen. Hierzu wird das Versuchsmaterial mithilfe einer Teflonfolie so präpariert, dass sich zwei Schichten an einer bestimmten Stelle während des Konsolidierungsprozesses nicht miteinander verbinden und so ein Anriss entsteht. Die Probe wird während des Tests so belastet, dass sich die Flanken des Anrisses öffnen und der Riss in das Material vordringt. Während des Versuchs wird die anliegende Last aufgezeichnet und die Risslänge vermessen, wodurch die



1 Ergebnisse der DCB-Versuche: ermittelte kritische Energiefreisetzungsrates in Abhängigkeit variiertes Konsolidierungsprozessparameter.



2 DCB-Probe während des Versuchs: starke Faserbrückenbildung und asymmetrischer Rissverlauf.



3 REM-Aufnahme von Mikrorissen, welche in Faserbündeln initiieren und über Faser-Matrix-Grenzflächen zusammenwachsen.

Bruchzähigkeit in Form der kritischen Energiefreisetzungsrates G_{IC} bestimmt werden kann. Diese entspricht dem Quotienten aus der für das Risswachstum aufgebrauchten Energie und der neu entstandenen Rissfläche.

Abbildung 1 stellt die Ergebnisse dieser Versuche in Abhängigkeit der Prozessparameter Konsolidierungstemperatur (270 °C, 280 °C und 290 °C) und Konsolidierungsdruck (24 bar, 36 bar und 48 bar) in Form des arithmetischen Mittelwerts und der Standardabweichung dar. Deutlich zu erkennen ist hier die signifikante Streuung über alle untersuchten Prozessparametersätze hinweg. Hier drängt sich die Frage auf, ob das geprüfte Material tatsächlich eine derartige Streuung aufweist und wodurch diese Streuung verursacht wird. Nähere Betrachtungen des Risswachstums sowie der dabei auftretenden Effekte sind daher von grundlegender Bedeutung, um zu klären, welchen Einfluss die Mikrostruktur des Werkstoffs auf das im makroskopischen Versuch beobachtete Bruchverhalten hat.

Zusammenhang zwischen ermittelter Risszähigkeit und Mikrostruktur

Abbildung 2 zeigt eine DCB-Probe gegen Ende des Versuchs bei einem Risswachstum von etwa 45 mm. Auffallend sind hier vor allem zwei Dinge: zum einen ein asymmetrischer, außerhalb der Probenmitte liegender Rissverlauf (Rissflanken gelb hervorgehoben) und zum anderen eine große Anzahl ausgezogener Fasern. Der Riss breitet sich demnach auch über Laminatschichtgrenzen hinweg aus, was zur Bildung von Faserbrücken führt, welche die Rissflanken miteinander verbinden. Das hier beobachtete Delaminationsverhalten entspricht nicht den Annahmen der Prüfnorm, da einerseits die Bruchfläche nicht eben ist und andererseits versagende Faserbrücken Energie dissipieren, welche in den entsprechenden Prüfnormen so nicht berücksichtigt ist.

Mit Blick auf die Mikrostruktur liegen die Fasern in dicht gepackten Bündeln vor, welche untereinander keiner Fernordnung unterliegen (Abbildung 3). Im Vergleich zu einem duromeren Prepreg-System ist das hier untersuchte Material während des Konsolidierungsprozesses fließfähig, wodurch die interlaminaren Grenzflächen verschwimmen und Fernordnungen aufgelöst werden. Da der Faserverlauf innerhalb des Verbunds daher eine Komponente in Bauteildickenrichtung aufweisen kann, kommt es zur Faserbrückenbildung. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, dass Mikrorisse innerhalb der Faserbündel weit vor der Hauptrissfront entstehen und sich über Faser-Matrix-Grenzflächen ausbreiten, bis sie zusammenwachsen (Abbildung 3). Hierbei ist auffällig, dass das Versagen zunächst von den Faser-Matrix-Grenzflächen ausgeht und erst nach vollständig versagten Grenzflächen auf die Matrix übergeht. Auf diese Weise entsteht ein makroskopisch sehr unebener Riss entlang der Fasern.

Michael Schober, Dr. Jörg Hohe