



# Neue Testmethoden für Verbundwerkstoffe

## Automobilindustrie – Gewicht runter. Zugtest mit DIC-Dehnungsanalyse

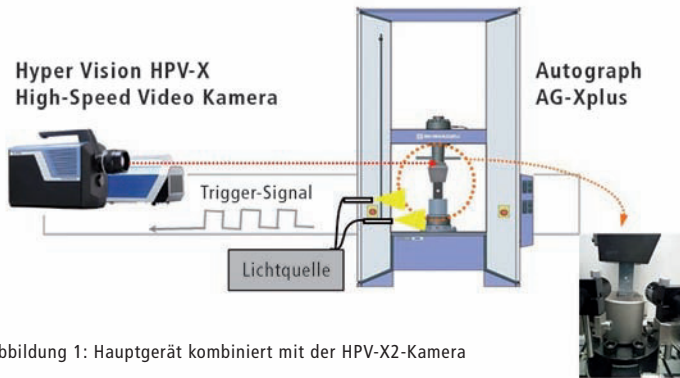


Abbildung 1: Hauptgerät kombiniert mit der HPV-X2-Kamera

Den Energieverbrauch von Autos zu senken und Umweltauflagen zu erfüllen, ist eine der wichtigsten Aufgaben der Automobilhersteller. Ein Lösungsansatz liegt in der Gewichtsreduktion des Wagens, wobei die Sicherheit der Fahrgäste gewahrt bleiben muss.

Zahlreiche neue Werkstoffe werden mit dem Ziel entwickelt, diese Anforderungen auszutariieren. Bei Metallen sind das zum Beispiel hochfester Stahl, Aluminiumlegierungen oder Magnesiumlegierungen. Bei Kunst- und Verbundstoffen wie kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFRP = Carbon Fiber Reinforced Plastic) und glasfaserverstärktem Kunststoff (GFRP = Glass-Fiber Reinforced Plastic) gilt es, Gewichtsreduktion und hohe Festigkeitseigenschaften zu verbinden. Diverse Materialien sind bereits im Einsatz, aber es wird stetig in diese Richtung weitergeforscht.

Bei Verbundmaterialien ist die innere Struktur kompliziert, so dass andere Fehler- oder Versagensarten auftreten können als bei konventionellen Materialien. Wenn sich die Ausfallursache durch strukturelle Analysesimulationen veranschaulichen lässt,

macht die Entwicklung von Automobilteilen aus Verbundmaterialien große Schritte nach vorne. Deshalb ist es wichtig, den Entstehungs- und Zerstörungsmechanismus zu verstehen. Hier wird eine neue Prüfmethode vorgestellt, die die Struktur der Verbundmaterialien rückmeldet. Zusätzlich wird ein dezidiertes Beispiel vorgestellt, obwohl verschiedene Prüftechniken für Verbundmaterialien bereits bestehen.

### Universalprüfmaschine und Hochgeschwindigkeits-Videokamera

Dieser Beitrag erklärt, wie eine Präzisions-Universalprüfmaschine (Autograph AG-X plus 250 kN) und eine Hochgeschwindigkeits-Videokamera (Hyper Vision HPV-X) (Abbildung 1) einzusetzen sind, um das statische Bruchverhalten eines CFRP zu ermitteln, basierend auf der Prüfkraftdämpfungskurve und den Materialbruch-Bildern. Informationen über die Proben sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Ein Loch von 6 mm Durchmesser wird in den Mittelpunkt einer Probe gebohrt. Bruchstellen sind dafür bekannt, sich in Verbundmaterialien leicht von einer

ursprünglichen Schädigungsstelle auszubreiten; ist ein Riss oder Loch vorhanden, ist die Werkstofffestigkeit merklich herabgesetzt. Mit Blick auf einen sicheren Einsatz von CFRP-Materialien, etwa in Flugzeugen, ist es daher extrem wichtig, die Festigkeit von

#### Hinweis

Die im Test verwendete CFRP-Laminatplatte wurde durch Auflaminieren von vorimprägniertem Material hergestellt, mit in einer einzigen Richtung angeordneten Fasern. Der in Tabelle 1 als [+45/0/-45/+90]2s bezeichnete Laminataufbau verweist auf das Auflaminieren von 16 Materiallagen mit +45°, 0°, -45°, und +90° angeordneten Fasern in 2-lagiger Anordnung.

Proben mit offenen Bohrlochern zu bewerten.

#### Die Prüfmaschine erzeugt ein Kamerasignal

Bei diesem Test wurde ein Lastwechsel genutzt, der im Verlauf des Probenbruchs eintrat, um die HPV-X-Hochgeschwindigkeits-Videokamera auszulösen. Konkret wurde die AG-X-plus Präzisions-Universalprüfmaschine darauf eingerichtet, ein Signal zu produzieren, sobald die Prüfkraft auf der Probe ihr Maximum zur Hälfte erreicht (in Abbildung 2 als Maximal-Prüfkraft angegeben). Dieses Signal wird zu der Hochgeschwindigkeits-Videokamera gesendet. Die statische Zugfestigkeitsprüfung und die Brucherfassung wurden unter den Bedingungen in Tabelle 2 durchgeführt. Ein Prüfkraft-Weg-Plot für das Bohrloch-Quasi-Isotrope-CFRP (OH-CFRP) ist in Abbildung 2a dargestellt. Ein Prüfkraft-Zeit-Plot zum Verlauf des Materialbruchgeschehens ist ebenfalls aus Abbildung 2b ersichtlich.

Abbildung 2a lässt sich dahingehend interpretieren, dass die

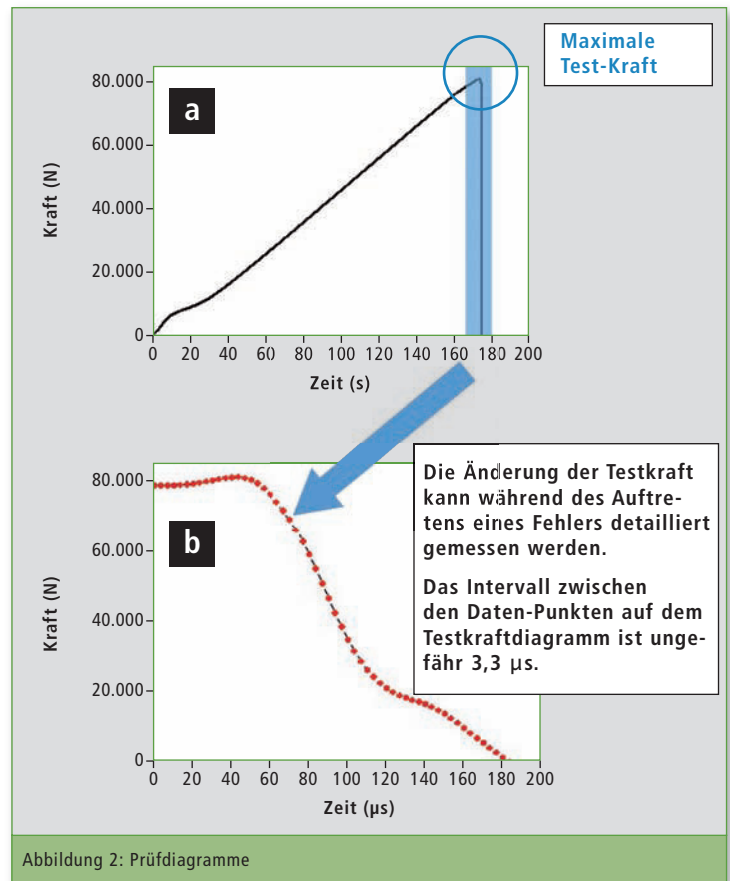


Abbildung 2: Prüfdiagramme

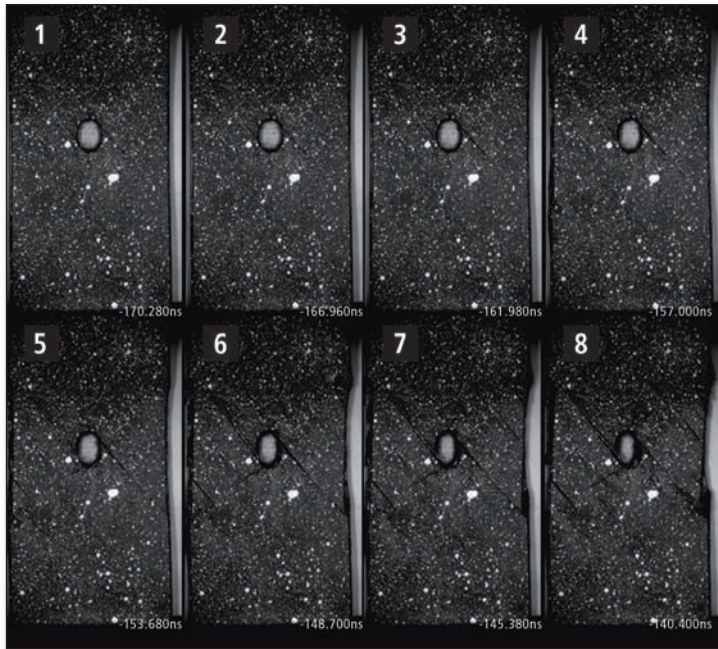


Abbildung 3: Bruchüberwachung

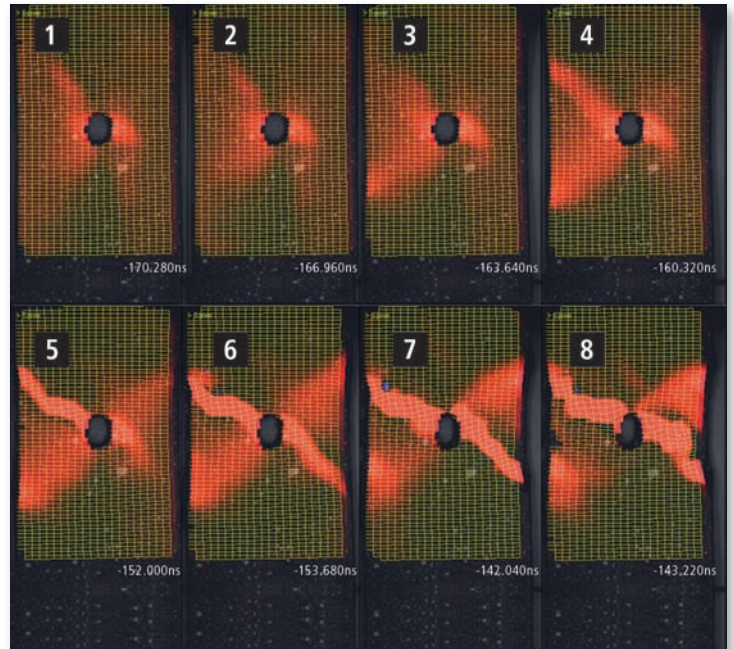


Abbildung 4: Bruchbeobachtung (DIC-Analyse)

Laminatstruktur	Maße L (mm) x B (mm) x T (mm) Lochdurchmesser (mm)
[+45/0/-45+90] <sub>2s</sub>	150 x 36 x 2,9, Ø6

Tabelle 1: Informationen zum Testprüfling

Probe in dem Moment brach, als die maximale Prüfkraft erreicht war, zum Zeitpunkt der plötzlichen Probeentlastung. Dieses Testsystem kann dazu eingesetzt werden, eine Hochgeschwindigkeitsabtastung durchzuführen, um im Detail eine Prüfkraftänderung im Bereich der maximalen Prüfkraft zu messen. Das Zeitintervall zwischen den Datenpunkten im Prüfkraft-Plot beträgt 3,3 µs, siehe Abbildung 2b.

Die Aufnahmen 1 bis 8 in Abbildung 3 zeigen das Probenverhalten während des Bruchvorgangs im Bereich des Bohrlochs. Aufnahme 1 stellt den Rissbildungsmoment dar, der in der Oberfläche der +45°-Lage auftritt. In diesem Bild deformiert die angewandte Zuglast das runde Bohrloch, mit einem etwa 1,4-fach größeren Lochdurchmesser in Zugrichtung als senkrecht zur Zugrichtung. In Aufnahme 2 schreiten entstandene Risse um das runde Loch entlang der Oberfläche in der +45°-Lage voran. In den Aufnahmen 3 bis 6 lässt sich im äußeren Erscheinungsbild der Probe eine wesentliche Veränderung nah am Ende eines Risses beobachten,

der sich nach unten rechts vom runden Bohrloch fortsetzt. Dies lässt vermuten, dass nicht nur die Oberflächenschicht, sondern auch innere Schichten brechen. Basierend auf Aufnahmen des gleichen Gebiets und dem Zustand der inneren Schichten, der sich am Rand des runden Bohrlochs in den Aufnahmen 7 und 8 erkennen lässt, hat sich der innere Bruch schnell in dem 18 µs dauernden Zeitintervall zwischen den Aufnahmen 3 und 8 entwickelt.

#### Digitale Bildkorrelationsanalyse (Digital Image Correlation = DIC)

DIC-Analyse, vorgenommen an den Aufnahmen zu den Bruchbeobachtungen in Abbildung 3: Schwarz kennzeichnet in der Probe gering belastete Bereiche der Oberflächenschicht, und rot Bereiche unter erheblicher Belastung. Bei Betrachtung der Aufnahmen 1 bis 4 (in Abbildung 4) ergibt sich, dass sich die Belastung im Umfeld des runden Bohrlochs diagonal nach oben-links (-45°) und nach unten-links (+45°) verteilt. Die Aufnahmen 5 bis 8 zeigen die Fokussierung der Belas-

Test-Maschine	AG-Xplus
Kapazität der Lastzelle	250 kN
Jig	Oben: 250 kN Non-Shift-Keilgriffe (mit Trapezfalzzähnen an den Griffflächen für Kompositmaterialien) Unten: 250 kN, schnelle Trigger-fähige Griffe
Grip space	100 nm
Loading speed	1 mm/min
Test-Temperatur	Raum-Temperatur
Software	TRAPEZIUM X (single)
Bruchbeobachtung	HPV-X high-speed video camera (Aufnahmegeschwindigkeit 600 kfps*)
DIC-Analyse	StrainMaster (LaVision GmbH)

Tabelle 2: Prüfbedingungen (\*fps steht für Bilder pro Sekunde. Dies bezieht sich auf die Anzahl von Frames, die in einer Sekunde aufgenommen werden können).

tung diagonal in Richtung unten rechts (-45°) und oben rechts (+45°) vom Bohrloch in Bereiche, welche in den Aufnahmen 1 bis 4 nicht ersichtlich waren. Dies weist auf ein Ereignis in der Oberflächenschicht der Probe hin, das Bruchabläufen ähnelt, die oft in Zugfestigkeitsprüfungen formbarer Metallwerkstoffe festgestellt werden, beispielsweise Rissausbreitung in Richtung der maximalen Scherspannung.