

Das Delaminationsverhalten von Unidirektionalverbunden als Grundlage für die Charakterisierung und Dimensionierung von FVW-Strukturen

H. Bansemir*, S. Burghagen**, M. Gädke***

*Eurocopter Deutschland GmbH, 81663 München

** Universität der Bundeswehr München, Fakultät für LRT

***DLR Braunschweig

ECD-0151-05-PUB

Kurzfassung

In dieser Veröffentlichung werden Festigkeitsdaten dargestellt, mit denen sich das Delaminationsverhalten von Unidirektionalverbunden bestimmen lässt. Die Eigenschaften von Faserverbundstrukturen können mit den geordneten Daten vorhergesagt und gezielt verbessert werden. Als Faserarten sind verschiedene Glasfasern sowie hochfeste und hochmodulige Kohlefasern für die Versuche verwendet worden. Unterschiedliche Harzarten finden sich in den Testergebnissen ebenfalls wieder. Um die benutzbare Datenmenge zu erhöhen, wurden zwei unterschiedliche bruchmechanische Proben untersucht, analysiert und bewertet. Dabei sollten die hauptsächlich von Eurocopter benutzte „Transverse Crack Tension“ (TCT) Probe und die „End-Notched Flexure“ (ENF) Probe gleiche Kennwerte erzielen. Die Auswertung einer Vielzahl von statischen Tests mit beiden Probenarten von Eurocopter, DLR und Hochschulen ergeben eine ausreichend gute Übereinstimmung der kritischen Energiefreisetzungsraten der verschiedenen Unidirektionalverbunde. Die kritische Energiefreisetzungsrate ist ein Materialkennwert, der das statische Bruchverhalten beschreibt. Das Verhalten unter dynamischer Last wird mit Hilfe von Wöhlerkurven und Delaminationsfortschritten dargestellt. Damit können Schadenstoleranznachweise durchgeführt werden. Die teilweise große Streuung ergibt sich aus der schwierigen Versuchsdurchführung bei der ENF-Probe. Weiterhin hat der Fasergehalt einen größeren Einfluß auf die Energiefreisetzungsrate, als bei den vor längerer Zeit durchgeführten Versuchen vermutet wurde. Bei zukünftigen Versuchen sollte der Fasergehalt immer mitbestimmt werden.

Inhalt

1. Einleitung
2. Vergleich TCT- und ENF-Proben
 - 2.1. Die Transverse Crack Tension(TCT)-Probe
 - 2.2. Die End-Notched Flexure(ENF)-Probe
3. Statische Ergebnisse von TCT- und ENF-Proben
 - 3.1. Statische Ergebnisse aus Versuchen mit der TCT-Probe

3.2. Statische Ergebnisse aus Versuchen mit der ENF-Probe

3.3. Vergleich von TCT- und ENF-Ergebnissen aus statischen Versuchen

4. Dynamische Ergebnisse von TCT- und ENF-Proben

4.1. Delaminationswöhlerkurven

4.2. Delaminationsfortschrittsraten

4.3. Vergleich von TCT- und ENF-Ergebnissen

5. Einflüsse auf das Delaminationsverhalten

5.1. Fasergehalt

5.2. Harzeigenschaften

5.3. Temperatureinfluss

5.4. Maßnahmen zur Verbesserung des Delaminationsverhaltens

6. Zusammenfassung und Ausblick

1. Einleitung

Der frühere Unternehmensbereich Hubschrauber von MBB, jetzt Eurocopter Deutschland, erkannte frühzeitig die Vorteile von Glasfaserverbunden für die Herstellung von Rotorblättern und nutzte sie konsequent für den Hubschrauber BO 105. Bei der späteren Entwicklung des Faserverbund - Hauptrotors der EC 135 mußten erstmals die Sonderbedingungen des Luftfahrtbundesamtes, die „Special Conditions“, die verschärften Sicherheitsanforderungen enthalten, berücksichtigt werden. Für den statischen Nachweis der Faserverbundstrukturen müssen vorgesägte Bauteile getestet und der Einfluß von Temperatur und Feuchte berücksichtigt werden. Beim dynamischen Nachweis konnten jedoch die Kennwerte für Raumtemperatur bei der Erstellung der Wöhlerkurven verwendet werden. Der Restfestigkeitsversuch wurde erstmals auf alle dynamisch belasteten Faserverbundbauteile angewendet.

Delaminationen stellen den überwiegenden Teil der Schäden dar und waren bei den dynamisch hochbelasteten Komponenten des EC 135 Blattes genauer zu untersuchen. Die Bruchmechanik bietet für diese Art von

Versagen eine brauchbare Berechnungsmethode. Mit geeigneten Probenformen, wie zum Beispiel der Transverse Crack Tension (TCT)- Probe, lassen sich die bruchmechanischen Kennwerte Energiefreisetzungsrat G und Rissfortschrittsrate da/dN (mit a = Risslänge und N = Lastwechselzahl) ermitteln. Aus dynamischen Versuchen erhält man Wöhlerkurven für den ersten Anriß und die Rissfortschrittsrate.

Seit 1990 hat das DLR Braunschweig eine Vielzahl von sorgfältig geprüften bruchmechanischen Daten erzeugt. Diese große Menge an Ergebnissen soll mit denen, die bei Eurocopter seit 1995 bestimmt wurden, verglichen werden.



Bild 1: Der zivile Mehrzweckhubschrauber EC135

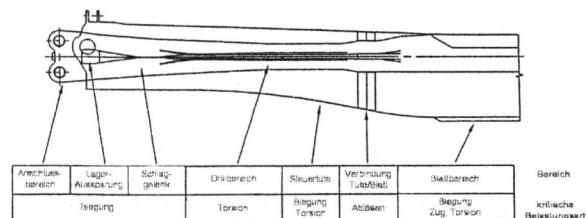


Bild 2: Bereiche der Blattbelastung EC135

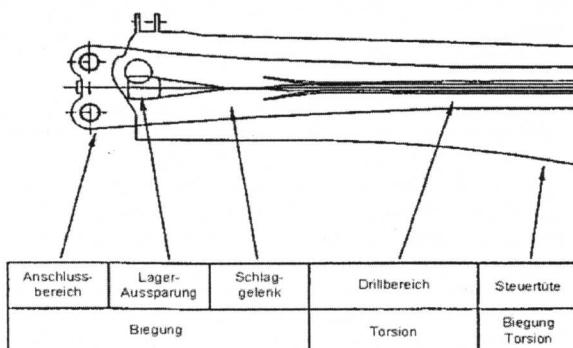


Bild 3: Delaminationsformen am Blatt der EC135

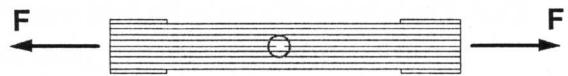


Bild 4: TCT-Test für die Delaminationsform II



Bild 5: TCT-Test für Delaminationsform II einschließlich Delaminationsform I

2. Vergleich der TCT- und der ENF-Probe

Über die elastischen Energien lässt sich die Energiefreisetzungsrat für beide Proben berechnen. Betrachtet man die Funktionsweise der beiden Proben, erkennt man sehr schnell, dass beide Probeformen der gleichen Schubbelastung unterliegen. Damit müssten beide Proben für den reinen Mode II theoretisch die gleichen Werte liefern.

2.1 Die Transverse Crack Tension (TCT)-Probe

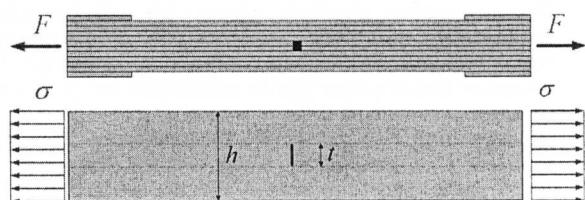


Bild 6: Die innen geschäftete TCT-Probe

Mit Bild 4 lässt sich die elastische Energie vor und nach der Delamination bestimmen.

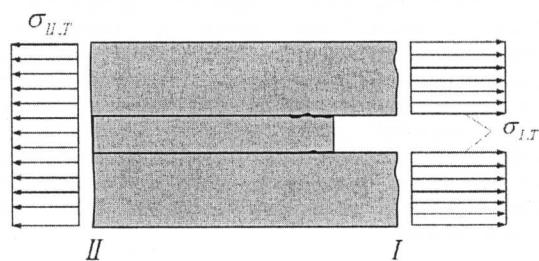


Bild 7: Delaminationsvorgang bei der TCT-Probe

Über die Differenz der beiden elastischen Energien, bezogen auf die entstehenden Rissflächen, gelangt man zur kritischen Energiefreisetzungsrat:

$$(1.1) \quad \Pi_I = \frac{1}{2E} \cdot \frac{h^2}{(h-t)} \cdot \sigma_{II}^2 \cdot b \delta a$$

$$(1.2) \quad \Pi_{II} = \frac{1}{2E} \cdot h \cdot \sigma_{II}^2 \cdot b \delta a$$

$$(1.3) \quad G_{c,TCT} = \frac{\Pi_I - \Pi_{II}}{2b \delta a} = \frac{F_c^2}{4b^2 E} \cdot \frac{t}{h(h-t)}$$

2.2 Die End-Notched Flexure(ENF)-Probe

Die ENF-Probe ist eine 3Punkt-Biegeprobe mit einem vorgefertigten Riss der Länge a .

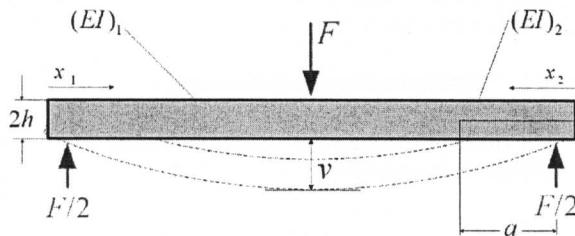


Bild 8: Die ENF-Probe

Mit der elastischen Energie lässt sich auch hier problemlos die Energiefreisetzungsraten berechnen. Sektor II beschreibt die Spannungsverteilung vor dem Riss und Sektor I zeigt die Spannungsverteilung direkt am Riss.

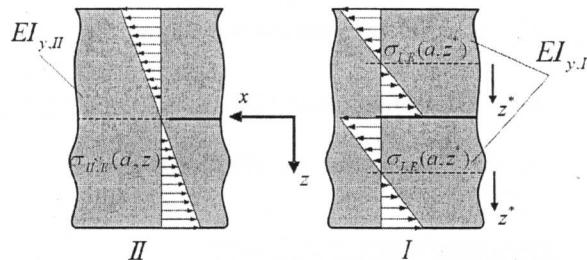


Bild 9: Delaminationsvorgang bei der ENF-Probe

Es ist zu beachten, dass aufgrund des eingebrachten Risses die auftretende Spannung von der Risslänge abhängig ist.

$$(1.4) \quad \Pi_I = \frac{1}{48E} \left(\frac{M(a)}{I_{y,I}} \right)^2 \cdot h^3 \cdot b\delta a$$

$$(1.5) \quad \Pi_{II} = \frac{1}{3E} \left(\frac{M(a)}{I_{y,II}} \right)^2 \cdot h^3 \cdot b\delta a$$

Über die Differenz der elastischen Energien bezogen auf die entstandene Rissfläche ergibt sich die kritische Energiefreisetzungsrate zu der dargestellten Form.

$$(1.6) \quad G_{c,ENF} = \frac{\Pi_I - \Pi_{II}}{b\delta a} = \frac{9F_c^2 \cdot a^2}{16E \cdot b^2 \cdot h^3}$$

3. Statische Ergebnisse von TCT- und ENF-Proben

Eine Vielzahl von Versuchsergebnissen finden sich in den unterschiedlichen Quellen des DLR und von Eurocopter Deutschland. Mit den statischen Tests lassen sich die kritischen Energiefreisetzungsraten sowie die Delaminationsspannung für ein Material

ermitteln. Diese Kennwerte lassen sich sehr gut für die Dimensionierung von FVW-Strukturen nutzen.

3.1 Statische Ergebnisse aus Versuchen mit der TCT-Probe

Die hier dargestellten Daten, stammen aus Versuchen mit innen geschäfteten TCT-Proben, die bei Eurocopter durchgeführt wurden. Bei außen geschäfteten TCT-Proben ergeben sich aufgrund des zusätzlichen Mode I – Einflusses (Schälen) geringere Werte für die kritische Energiefreisetzungsraten und für die Delaminationsspannung.

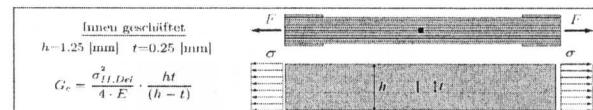


Bild 10: Innen geschäftete TCT-Probe mit Geometriedaten

Kurzbezeichnung	$\sigma_{c,II}$ [N/mm ²]	$G_{c,II}$ [N/m]	E-Modul [N/mm ²]
innen geschäftet			
E-Glas/913	779	1101	43060
R-Glas/913	897	1315	47790
T300/913	1141	750	135700

Tab. 1: Statische Testergebnisse TCT-Probe

Wie sowohl die Tabelle als auch die Diagramme zeigen, haben E-Glas und R-Glas zwar die höheren kritischen Energiefreisetzungsraten, dennoch verfügt T300 aufgrund seines deutlich höheren E-Moduls über die bessere Delaminationsspannung.

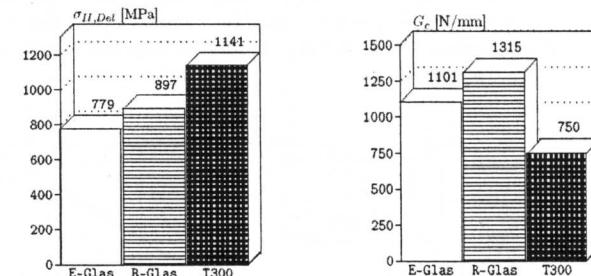


Bild 11: Kritische Energiefreisetzungsrate und Delaminationsspannung aus statischen Tests

3.2 Statische Ergebnisse aus Versuchen mit der ENF-Probe

Die hauptsächlich von dem DLR durchgeführten statischen Versuche mit der ENF-Probe zeigten aufgrund der Eigenschaften der Probe größere Probleme bei der Ermittlung der Messergebnisse. Ein Auszug aus den Messergebnissen zeigt Tab. 2.

Prepreg-Kunzweichung	G_c [N/mm]	F_c [N]	E-Modul [N/mm²]	Probendicke $2h$ [mm]	Probenbreite b [mm]	Probenlänge $2l$ [mm]	Aufspannküpfung a [mm]
E-Glas/913	1019	817	46058	4.0	25	100	25
T300/913	482	956	133441	4.0	25	100	25
AS4/PEEK	2418	2932	103000	4.40	24.3	145	35

Tab. 2: Statische Testergebnisse ENF-Probe

Ganz klar zeigt sich der Unterschied von E-Glas/913 und T300/913 auch in diesen Werten der kritischen Energiefreisetzungsraten. Aber ganz besonders sticht AS4/PEEK hervor. Aufgrund einer hohen Schubfestigkeit zeigt sich ein sehr hoher Wert der kritischen Energiefreisetzungsraten und damit ist ein positives Delaminationsverhalten dieses Materials zu erwarten.

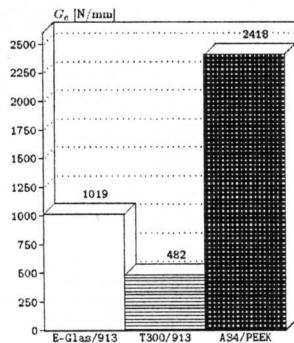


Bild 12: Kritische Energiefreisetzungsraten aus statischen Tests für ENF

3.3 Vergleich von TCT- und ENF-Ergebnissen aus statischen Versuchen

Um die angesprochene theoretische Gleichheit der Messwerte von TCT- und ENF-Probe zu überprüfen, wurden in der unten dargestellten Grafik die Messwerte der ENF-Probe (vertikal) über den Messwerten der TCT-Probe (horizontal) für die unterschiedlichen Materialien aufgetragen.

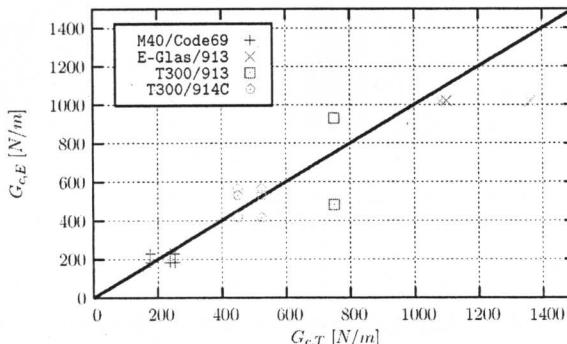


Bild 13: Vergleich der stat. Versuchsergebnisse von TCT- und ENF-Proben

Es zeigt sich eine ausreichend gute Übereinstimmung der ermittelten Kenwerte. Die Abweichungen resultieren aus den unterschiedlichen Charakteristiken der Proben, die sich in bestimmten Messfehlern widerspiegeln.

4. Dynamische Ergebnisse von TCT- und ENF-Proben

Die zyklischen Tests ermöglichen Aussagen zum Delaminationsbeginn und zum Delaminationsfortschritt eines Materials.

4.1 Delaminationswöhlerkurven

Mit dem nachfolgenden Weibull-Ansatz lassen sich Wöhlerkurven erstellen:

$$(1.7) \quad \sigma_o = \sigma_D + \frac{\sigma_B - \sigma_D}{e^{\left(\left(\frac{\log N}{\alpha}\right)^{\beta}\right)}}$$

σ_o Oberspannung

σ_B stat. Delaminationsspannung ($= \sigma_{II,Del}$)

σ_D Dauerfestigkeit (Threshold Spannung)

α, β Parameter der Weibullkurve

Innen geschäftete TCT-Proben

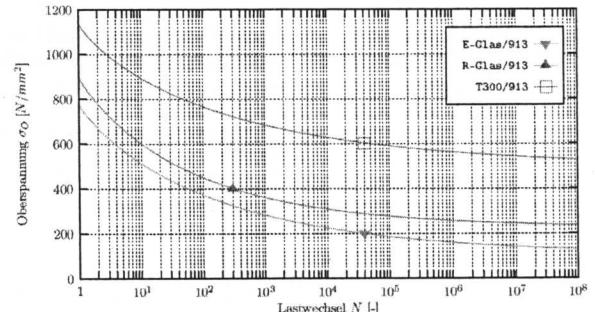


Bild 14: Wöhlerkurven für innen geschäftete TCT-Proben (Oberspannung über Lastwechsel) für $R=0$

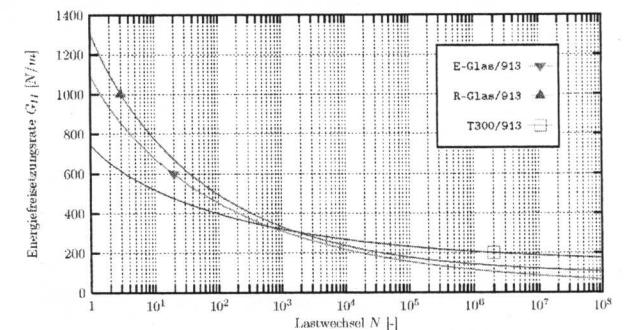


Bild 15: Wöhlerkurven für innen geschäftete TCT-Proben (Energiefreisetzungsrates über Lastwechsel)

Außen geschäftete TCT-Proben

Bei den außen geschäfteten Proben zeigen sich auch im dynamischen Verhalten niedrigere Werte

durch den Einfluss der Schälspannungen (Mode I).

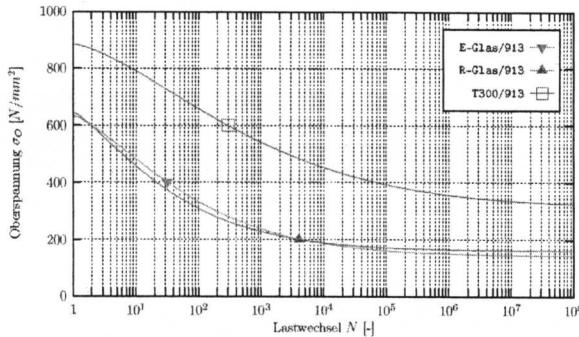


Bild 16: Wöhlerkurven für außen geschäftete TCT-Proben und $R=0$

4.2 Delaminationsfortschrittsraten

Die Delaminationsfortschrittsraten werden mit dem Paris-Gesetz dargestellt:

$$(1.8) \quad \frac{da}{dN} = c \cdot G_{II,max}^n$$

In der doppelt logarithmischen Darstellung liefert der Faktor n den Anstieg der Geraden.

Der Delaminationsfortschritt liefert Aussagen zur Lebensdauerabschätzung und über die Restfestigkeit einer Struktur.

TCT-Proben

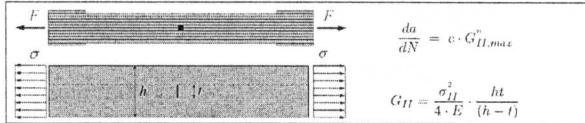


Bild 17: TCT-Probe und Paris-Gesetz

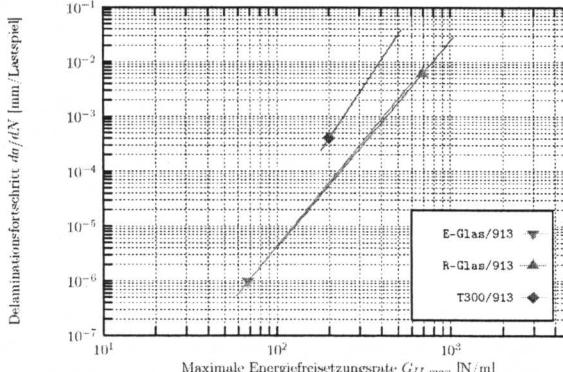


Bild 18: Delaminationsfortschrittsraten für TCT-Proben (E-Glas/913, R-Glas/913 und T300/913)

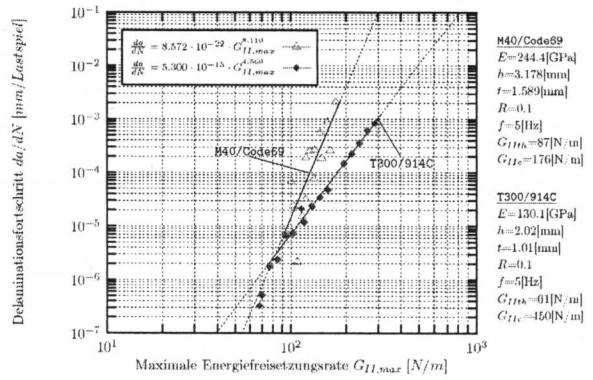


Bild 19: Delaminationsfortschrittsraten für TCT-Proben (M40/Code69 und T300/914C)

ENF-Proben

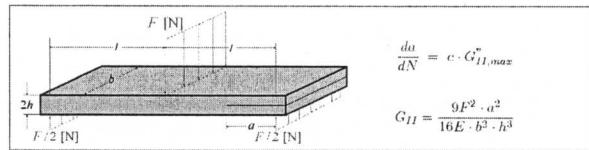


Bild 20: ENF-Probe und Paris-Gesetz

Die von dem DLR durchgeführten dynamischen Versuche mit der ENF-Probe hatten nur die Darstellung des Delaminationsfortschritts zum Gegenstand. Diese Versuche fanden ausschließlich für unidirektionale Kohlefaserverbunde statt.

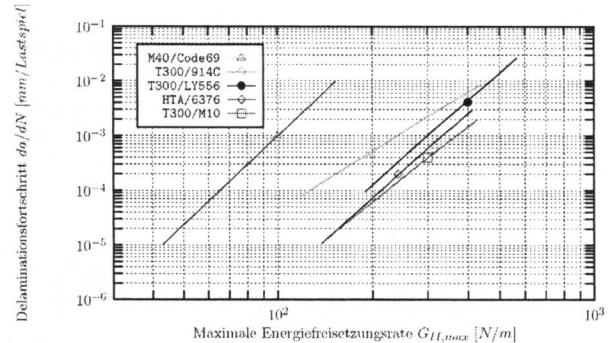


Bild 21: Delaminationsfortschrittsraten für ENF-Proben aus Kohlefaserverbunden

Hier zeigt sich beim Delaminationsfortschritt über der Energiefreisetzungsrates das Material M40/Code69 als weit abgeschlagen. Doch auch hier darf die Steifigkeit der verwendeten Materialien nicht unberücksichtigt bleiben.

4.3 Vergleich von TCT- und ENF-Ergebnissen bei dynamischen Versuchen

Tabelle 3 zeigt den direkten Vergleich der dynamischen Kennwerte aus dem Parisgesetz mit der zusätzlichen Angabe des auf die Threshold-Spannung abgestimmten Werts G_{IIth} und den auf die Delaminationsspannung abgestimmten Wert G_{Ile} .

Prepreg-Kunststoffschichtung	ENF				TCT (innen)			
	c [$\frac{\text{mm}^2}{\text{N} \cdot \text{m}} (\frac{\text{N}}{\text{mm}})^{-1}$]	n	$G_{IIc} [\text{N}/\text{m}]$	$G_{IIm} [\text{N}/\text{m}]$	c [$\frac{\text{mm}^2}{\text{N} \cdot \text{m}} (\frac{\text{N}}{\text{mm}})^{-1}$]	n	$G_{IIc} [\text{N}/\text{m}]$	$G_{IIm} [\text{N}/\text{m}]$
T300/M10	$1.778 \cdot 10^{-15}$	4.578	930	92.3	$2.875 \cdot 10^{-15}$	4.784	750	137
T300/913	$3.234 \cdot 10^{-14}$	4.344	530	60.0	$5.300 \cdot 10^{-15}$	4.560	450	60.9
T300/LY66	$1.820 \cdot 10^{-16}$	5.144	705					
M40/Codex9	$1.580 \cdot 10^{-14}$	5.398	229	86.6	$3.106 \cdot 10^{-16}$	5.639	175.5	80.6
HTA/6376	$1.175 \cdot 10^{-16}$	5.123	834	92.1				

Tab. 3: Kennwerte für Delaminationsfortschrittsraten von TCT und ENF

Den grafischen Vergleich von TCT und ENF für T300/914C zeigt die folgende Grafik.

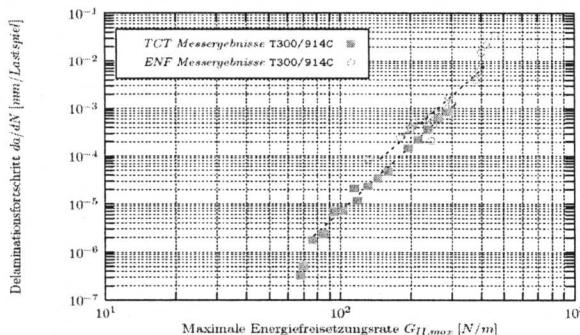


Bild 22: Vergleich der dynamischen Versuchsergebnisse von TCT- und ENF-Proben für T300/914C

Man erkennt sehr deutlich die gute Übereinstimmung der Messwerte der beiden Probeformen für dieses Material und erhält damit die Bestätigung für die angenommene Gleichheit der Versuchsergebnisse.

5. Einflüsse auf das Delaminationsverhalten

Viele Parameter haben Einfluss auf die Delamination von Unidirektionalverbunden und lassen den Prozeß selbst als komplexen Sachverhalt erscheinen.

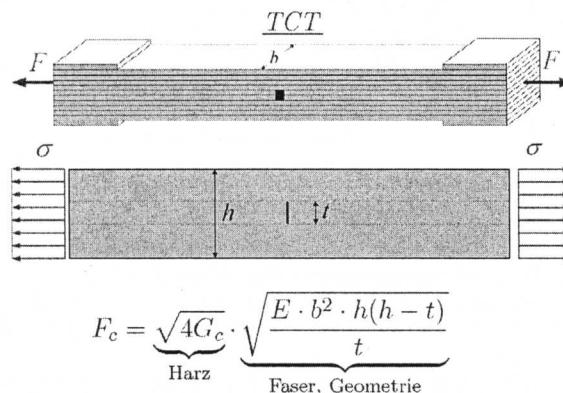


Bild 23: TCT-Probe mit Einflussfaktoren

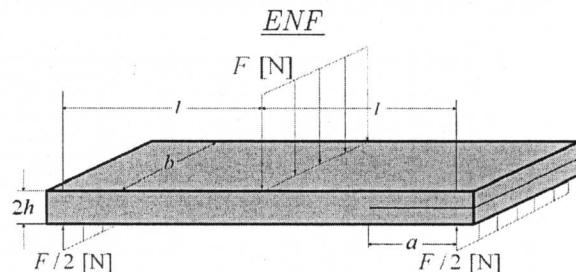


Bild 24: ENF-Probe mit Einflussfaktoren

Die vorangegangene bruchmechanische Betrachtung einer Schärfung ist ein Weg zur Beschreibung dieses physikalischen Sachverhalts. Eine weitere Möglichkeit ist die Darstellung mit der Berechnung einer Klebung, wie sie aus der Literatur bekannt ist.

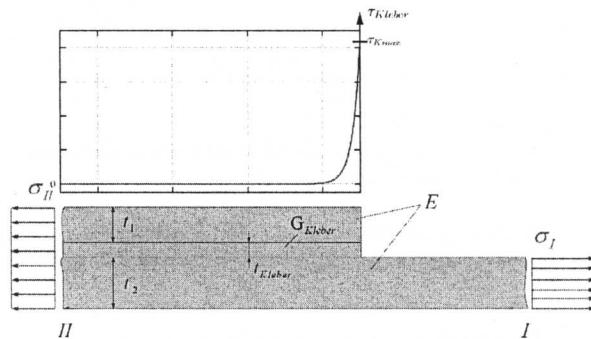


Bild 25: Schubspannungsverteilung in einer Klebverbindung

Delaminationsspannung nach der „shear lag“-Theorie für eine Klebverbindung

$$(1.9) \quad \sigma_{II} = \underbrace{\tau_{Kmax}}_{\text{Harz}} \sqrt{\frac{t_{Kleber}}{G_{Kleber}}} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{E}{t_1} \cdot \frac{t_2}{(t_1 + t_2)}}}_{\text{Faser, Geometrie}}$$

Delaminationsspannung nach der Bruchmechanik einer Klebverbindung

$$(1.10) \quad \sigma_{II} = \underbrace{\sqrt{2G_c}}_{\text{Harz}} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{E}{t_1} \cdot \frac{t_2}{(t_1 + t_2)}}}_{\text{Faser, Geometrie}}$$

Vergleicht man nun die beiden Beziehungen miteinander, ergibt sich eine Interpretation für die kritische Energiefreisetzungsrates aus Faktoren, die man aus der Berechnung einer Klebung kennt.

$$(1.11) \quad G_c = \frac{1}{2} \cdot \tau_{Kmax}^2 \cdot \frac{t_{Kleber}}{G_{Kleber}}$$

Mit dieser Gleichung lassen sich mögliche Einflussfaktoren auf das Delaminationsverhalten identifizieren.

Bei der Betrachtung der Gleichung liegt die Annahme nahe, dass sich die Energiefreisetzungsraten nur aus Größen, die den Kleber (Harz) charakterisieren, zusammensetzen. Dass dem nicht so ist, zeigt der Vergleich von Materialien die dasselbe Harzsystem verwenden.

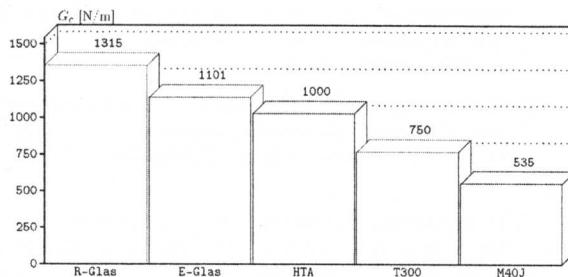


Bild 26: Kritische Energiefreisetzungsraten für das Harzsystem 913 in Kombination mit unterschiedlichen Fasertypen

Aufgrund dieser Tatsache ist die Delamination als Prozeß zu betrachten, der sich aus einer Kombination von Faser und Harz ergibt.

5.1 Der Fasergehalt

Der Fasergehalt, so haben Versuche gezeigt, hat einen maßgeblichen Einfluss auf die kritische Energiefreisetzungsraten und damit auf das Delaminationsverhalten. Bei der Verbindung zur Größe t_{Kleber} erkennt man, dass bei steigendem Fasergehalt die Kleberschichtdicke und damit auch die kritische Energiefreisetzungsraten sinken muss.

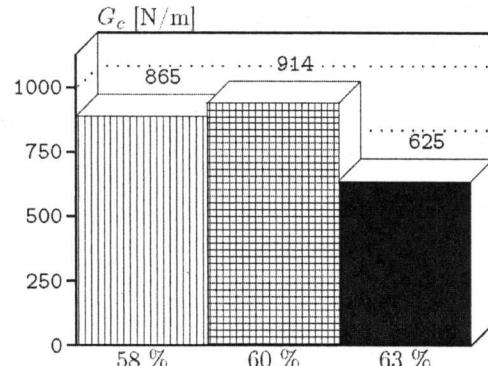


Bild 27: Vergleich der statischen Versuchsergebnisse von TCT- und ENF-Proben

Die vorhandenen Versuchsergebnisse zeigen ein ähnliches Bild. Kann man bis zu einem Fasergehalt von 60% noch einen Anstieg der kritischen Energiefreisetzungsraten verzeichnen, fallen die Werte bei größer werdendem Fasergehalt stark ab.

5.2 Harzeigenschaften

Neben dem erkennbaren Einfluss des Schubmoduls des Harzsystems auf das Delaminationsverhalten, zeigt auch die Schubfestigkeit des entsprechenden Materials einen Zusammenhang mit der kritischen Energiefreisetzungsraten.

Harzsystem	Faser	Energiefreisetzungsraten [N/mm]		ILSS stat. Tau0 [MPa]	ILSS R=-1 Tau10^-7 [MPa]
		außen	innen		
Nasslaminat	R-Glas RC-10	0.70	1.00	=70	=20
Prepreg	R-Glas RC-10	1.01	1.40	98	26

Tab. 4: Vergleich von kritischer Energiefreisetzungsraten mit interlaminarer Schubfestigkeit

5.3 Temperatureinfluss

Auch der Einfluss der Temperatur auf das Delaminationsverhalten der UD-Verbunde wurde untersucht.

Faser	Matrix	Dicke von durchgehenden und unterbrochenen Lagen		E-Modul [MPa]		Delaminationsspannung [MPa]		Energiefreisetzungsraten [N/mm]	
		$t_{1,1} [mm]$	$t_{2,2} [mm]$	256 K	77 K	256 K	77 K	256 K	77 K
E-Glas innen	V913	0.26	1.04	41563	54926	921	929	1.658	1.277
M40J innen	V913	0.26	1.04	201150	259584	1151	1220	0.535	0.466

Tab. 5: Temperatureinfluss auf Delaminationsspannung und kritischer. Energiefreisetzungsraten

Trotz des deutlichen Anstiegs der Steifigkeit der Materialien erkennt man keine nennenswerte Veränderung im Bereich der Delaminationsspannungen.

Die Kenntnisse über die Eigenspannungen in den einzelnen Materialien könnten jedoch zur Verbesserung des Delaminationsverhaltens genutzt werden (Druckvorspannung).

5.4 Maßnahmen zur Verbesserung des Delaminationsverhaltens

- Einbringen weicher Schichten zur Absenkung der Schubspannungsspitze
- Verwendung von Harzen mit hoher Schubfestigkeit (z.B. PEEK)
- Erhöhung der Schubfestigkeit durch Druckvorspannung

6. Zusammenfassung und Ausblick

- Die bruchmechanischen Eigenschaften von Unidirektionalverbunden sind für die Dimensionierung von Faserverbundstrukturen ausreichend bekannt.
- Für die Dimensionierung können TCT und ENF Daten verwendet werden. In weiten Bereichen ergibt sich eine gute Übereinstimmung der gewonnenen Ergebnisse.
- Die Dimensionierung kann sowohl für statische als auch für dynamische Belastungen durchgeführt werden.
- Die bekannten Delaminationsfortschritte können für die Restfestigkeit von Strukturen vorteilhaft genutzt werden.

Schrifttum

- [1] S. Burghagen, Das Delaminationsverhalten von Unidirektionalverbunden, Diplomarbeit am Institut für Leichtbau, Universität der Bundeswehr München, 2005
- [2] H. Rapp, Berechnungen von Delaminationen in Aufdopplungen und Ausschärfungen, Interner Bericht Eurocopter Deutschland, 1993
- [3] R.B. Pipes, L.A. Carlsson, Hochleistungsfaser-verbundwerkstoffe, Teubner Verlag, 1989
- [4] D. Broek, The Practical Use of Fracture Mechanics, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1989
- [5] M.R. Wisnom, Prediction of Delamination in Tapered Unidirectional Glass Fibre Epoxy with Dropped Plies under Static Tensions and Compressions, AGARD-SMP Specialist's Meeting on Debonding/Delamination of Composites, 1992
- [6] M.R. Wisnom, W.C. Cui, M. Jones, A Comparison of Fracture Criteria to Predict Delamination of Unidirectional Glass/Epoxy Specimens with Cut Central Plies, International Conference on Fibre Reinforced Composites, 1992
- [7] A.J. Russel, K.N. Street, The Effect of Matrix Toughness on Delamination: Static and Fatigue Fracture Under Mode II Shear Loading of Graphite and Fibre Composites, Toughened Composites ASTM STP 937, 1995
- [8] G.B. Murri, R.H. Martin, Characterisation of Mode I and Mode II Delamination Growth and Thresholds in AS4/PEEK Composites, Composite Materials Testing and Design Vol.9 ASTM STP 1059, 1990
- [9] T.K. O'Brien, Composite Interlaminar Shear Fracture Toughness, G_IIC: Shear Measurement or Shear Myth, Composite Materials Fatigue and Fracture Vol.7 ASTM STP 1330, 1998
- [10] H. Bansemir, S. Emmerling, Fatigue Substantiation and Damage Tolerance Evaluation of Fiber Composite Helicopter Components, Applied Vehicle Technology Panel: Applications of Damage Tolerance Principles for Improved Airworthiness of Rotorcraft, Corfu Greece, 1999
- [11] R. Prinz, M. Gädke, Characterisation of Interlaminar Mode I and Mode II Fracture in CFRP Laminates, Proc. of Internat. Conference: Spacecraft Structures and Mechanical Testing, Noordwijk, 1991
- [12] M. Boelingen, C. Nawrath, Bruchmechanische Analyse des Biege-Drillstrukturelements des Hauptrotorblattes für einen Mehrzweckhubschrauber, Diplomarbeit an der Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Institut für Mechanik, 1995
- [13] M. Boelingen, C. Nawrath, Bruchmechanisches Verhalten von Faserverbunden im Hinblick auf die Verbesserung der Eigenschaften von Hubschrauberrotoren, Studienarbeit an der Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1994
- [14] Th. Notzon, Analyse und Versuche an geschäfteten Laminaten im Hinblick auf die Verbesserung der Festigkeitseigenschaften von Rotorblättern, Diplomarbeit an der Universität der Bundeswehr München, Institut für Luftfahrttechnik und Leichtbau, 1993.
- [15] H. Gerwig, Bestimmung der Energiefreisetzungsraten beim Wachsen von Delaminationen in CFK-Probestäben bei Schubbelastung (Mode II), Diplomarbeit an der Technischen Universität Braunschweig, Institut für Allgemeine Mechanik und Festigkeitslehre, 1989
- [16] P. Auer, Fracture Toughness – Untersuchungen an verschiedenen Compositesystemen mit Hilfe der TCT-Probe, Interne Bericht Eurocopter Deutschland, 1996
- [17] H. Bansemir, O. Haider, Fiber Composite Structures for Space Applications – Recent and Future Developments, Cryogenics Vol.38, Elsevier Science Ltd., 1998