

Delaminationsberechnung von Faserverbundstrukturen

Fiolka, M.*¹ and Matzenmiller, A.**¹

¹ Universität Kassel, Institut für Mechanik, Mönchebergstr.7, D-34109 Kassel

Das Ablösen der Einzelschichten unidirektional verstärkter Faserverbundlaminare voneinander - die Delamination - ist eine der gefährlichsten Versagensarten, da sie zum globalen Kollaps der Struktur führen kann. Statische, interlaminaire Bruchtests, die zur Ermittlung der Bruchzähigkeit und des Rissfortschrittes dienen, werden mit der Methode der finiten Elemente simuliert.

©2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

1 Einleitung

Die Beschreibung der Delamination in der Prozessschicht erfolgt mit Hilfe von Grenzflächenelementen, wobei vom Modell einer Kohäsivzone an der Risspitze ausgegangen wird. Die Delaminationsinitiierung basiert auf einem Spannungskriterium für die Grenzflächenspannungen. Die Schädigung und damit das Versagen der Grenzfläche hängt von der dissipierten Energie ab. Der Delaminationsfortschritt soll mit FE-Netzen ohne sukzessive Adaption beschrieben werden. Als konstitutive Annahme liegt ein Spannungs-Separations-Modell zu Grunde, wodurch das Versagen der Grenzfläche über die kritische Energiefreisetzungsrates \mathcal{G}_c als dominierender Materialparameter bestimmt wird.

2 Grenzflächenelement

Für die Modellierung von Grenzflächen im Inneren von kontinuierlichen Körpern \mathcal{B} muss zu den bekannten inneren und äußeren virtuellen Arbeiten der Anteil aus dem Spannungsvektor \mathbf{t} und dem zugehörigem Verschiebungssprung Δ in der Grenzfläche \mathcal{S} hinzugefügt werden.

$$\int_{\mathcal{B}} \tilde{\mathbf{T}} \delta \mathbf{E} dV + \int_{\mathcal{S}} \mathbf{t} \cdot \delta \Delta dS = \int_{\mathcal{B}} \rho \mathbf{k} \cdot \delta \mathbf{u} dV + \int_{\partial \mathcal{B}} \mathbf{t}_0 \cdot \delta \mathbf{u} dA \quad (1)$$

Der Verschiebungssprung Δ wird hier ebenso in einem lokalen, orthonormalen Koordinatensystem beschrieben wie auch der Spannungsvektor \mathbf{t} . In der materiellen Darstellung ist $\tilde{\mathbf{T}}$ der zweite Piola-Kirchhoff Spannungstensor, der Vektor \mathbf{k} beschreibt die Volumenkräfte und \mathbf{t}_0 bezeichnet die Oberflächenkräfte. Der Operator \mathbf{P} transformiert zwischen dem virtuellen Verschiebungssprung $\delta \Delta$ und den global definierten virtuellen Verschiebungen $\delta \mathbf{u}^+$ und $\delta \mathbf{u}^-$ an der oberen und unteren Seite der Grenzfläche [1].

$$\delta \Delta = \mathbf{A}^T \mathbf{N} \delta \mathbf{u}^+ - \mathbf{A}^T \mathbf{N} \delta \mathbf{u}^- = \mathbf{P} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{u}^+ \\ \delta \mathbf{u}^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

Die Matrix \mathbf{A} markiert eine orthogonale Transformation der Verschiebungsvektoren zwischen dem lokalen Koordinatensystem in der Grenzfläche und dem globalen Koordinatensystem der Strukturberechnung. Die inneren Elementknotenkräfte \mathbf{f} in der Grenzfläche \mathcal{S} ergeben sich mit den bilinearen Formfunktionen \mathbf{N} im isoparametrischen Einheitsraum aus dem zweiten Summanden der linken Seite von Gl.(1) zu:

$$\mathbf{f} = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \mathbf{P}^T \mathbf{t} \det \mathbf{J} d\xi d\eta, \quad (3)$$

mit $\det \mathbf{J}$ als Jacobi-Determinante. Für die Nachgiebigkeit der Grenzfläche wird zunächst ein Werkstoffmodell der linearen Elastizität eingeführt.

$$\mathbf{t} = \mathbf{D} \Delta; \quad \text{mit } \mathbf{D} = \frac{\partial \mathbf{t}}{\partial \Delta} \quad (4)$$

Der 3x3-Elastizitätstensor \mathbf{D} des Grenzflächenmodells ist nur auf der Hauptdiagonalen mit Steifigkeitskennwerten der Grenzfläche in den drei möglichen Translationsrichtungen besetzt. Die inneren Kräfte gemäss Gl.(3) werden linearisiert. Unter Ausnutzung des Werkstoffmodells von Gl.(4) ergibt sich die Elementsteifigkeitsmatrix \mathbf{k} des Grenzflächenelements.

$$\mathbf{k} = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \mathbf{P}^T \mathbf{D} \mathbf{P} \det \mathbf{J} d\xi d\eta \quad (5)$$

* Corresponding author: DIPL.-ING. M. FIOLOKA PHONE: +49 561 804 2058, FAX: +49 561 804 2720

** PROF. DR.-ING A. MATZENMILLER E-MAIL: post-structure@uni-kassel.de

3 Kohäsivzonenmodell

Die drei Steifigkeitskennwerte der konstitutiven Matrix **D** stehen über ein Rissmodell in Beziehung mit den drei bekannten Bruchmoden der Bruchmechanik. Von Barenblatt [2] ist ein Rissmodell für ideal sprödes Materialverhalten entwickelt worden, wo Kohäsivkräfte zwischen den Rissoberflächen wirken. Der Verlauf der Kohäsivspannungen **t** in Abhängigkeit von der Rissöffnung Δ in der Kohäsivzone wird angenommen. In diesem Beitrag wird ein linear elastisches mit einem ideal sprödem Verhalten kombiniert. Diese Annahme führt zu einem bilinearen Spannungs-Separations-Modell, das für den Modus II in Fig.1 dargestellt ist .

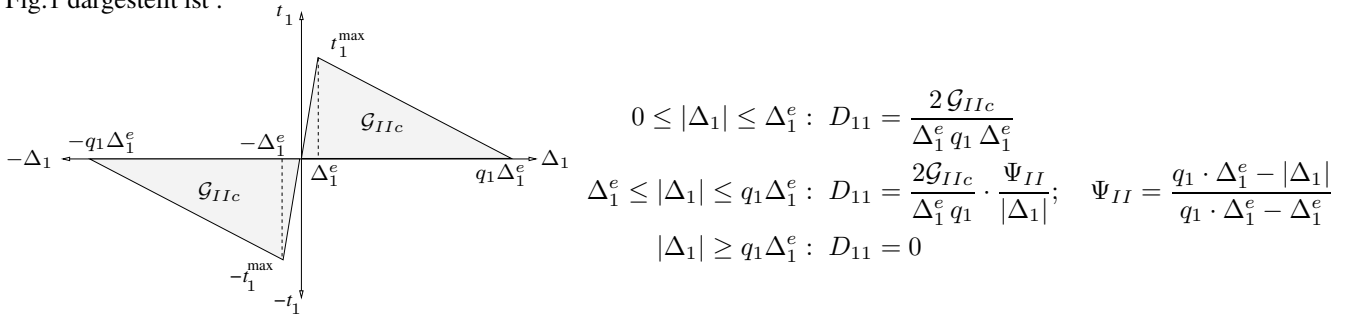


Fig. 1 Spannungs-Separations-Modell im Modus II

Das Integral über die Spannungs-Separations-Beziehung ist identisch mit der kritischen Energiefreisetzungsrate \mathcal{G}_{IIc} . Beim bilinearen Spannungs-Separations-Modell ergibt sich für eine gegebene extremale Grenzflächenspannung t_1^{max} der Separationsübergang bei Δ_1^e - siehe Fig.1 - und die maximale Separation beim Wert $q_1 \Delta_1^e$, wo die Grenzfläche vollständig versagt.

4 Numerische Beispiele

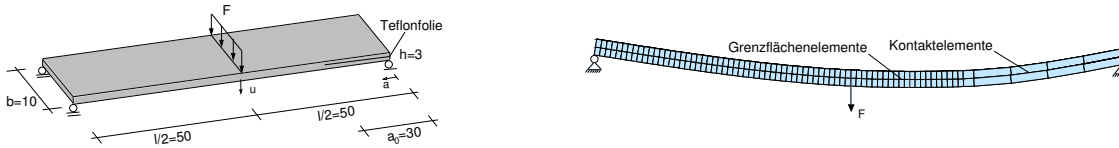


Fig. 2 Skizze der ENF-Probe und des FE-Modells

Der „End Notched Flexure“-Test (ENF) ist ein weit verbreiteter interlaminaer Bruchtests für den Modus II - siehe Fig.2. Eine analytische Näherungslösung auf der Grundlage von Balkenmodellen kann aus [3] entnommen werden. Das FE-Netz besteht aus 148 volumetrischen Schalenelementen [4], 69 Grenzflächenelementen und 5 Kontaktelementen. Die Breite der Probe wird mit einem Element abgebildet. Die Ergebnisse der Simulation liefern eine sehr gute Übereinstimmung mit der analytischen Lösung - siehe Fig.3, wo die äussere Kraft F über der Verschiebung am Kraftangriffspunkt aufgetragen ist. Unterschiedlich große Werte von q_1 haben nur einen geringen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse, die für $q_1 = 3$ und $q_1 = 1000$ in Fig.3 dargestellt sind.

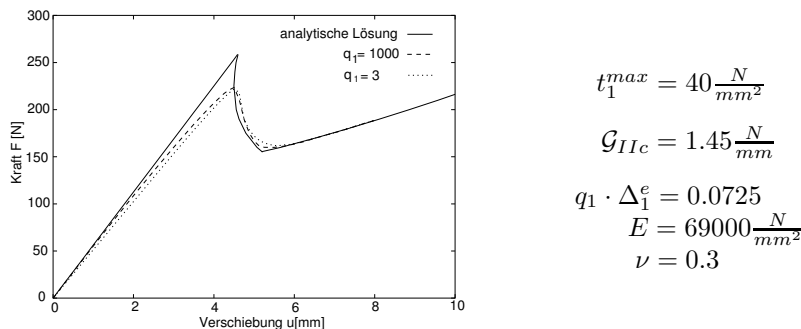


Fig. 3 Last-Verschiebungskurve der ENF-Probe

References

[1] V. K. Goyal, E. R. Johnson, C. G. Davila, Irreversible constitutive law for modeling the delamination process using surface discontinuities, Composite Structures, **65**, 289-305, (2004).
 [2] G. Barenblatt, Mathematical theory of equilibrium cracks, Advances in Applied Mechanics, **7**, 56-129, (1962).
 [3] Y. Crisfield, G. Davies, Progressive delamination using interface elements, Journal of composite materials, **32**, 1246-1272, (1998).
 [4] M. Fiolka, A. Matzenmiller, Zur Erfassung der transversalen Normalspannung in Schalen, Proc. Appl. Math. Mech., 2004, **4**, 310-311, (2004).