

Besonderheiten und Leistungsumfang der neuen nichtlinearen Laminatanalyse-Software AlfaLam.nl

T. Weber*, H. Schürmann**

TU-Darmstadt, Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen
Petersenstraße 30, 64287 Darmstadt
Deutschland

ÜBERSICHT

Für die analytische Auslegung von Laminaten werden derzeit meist lineare Werkstoffgesetze verwendet. Diese Annahme ist, besonders in Bezug auf die matrixdominierten Eigenschaften, nur bedingt zutreffend. So weisen der Schubmodul und der Quermodul der unidirektionalen Schicht ein nichtlineares Spannungs-Verzerrungsverhalten auf [7] [5]. Infolge des nichtlinearen Werkstoffverhaltens kann der Reservefaktor eines Laminats nur bestimmt werden, wenn das Laminat rechnerisch bis zum Versagen belastet wird. Die entwickelte Software ermöglicht dies durch eine sukzessive Laststeigerung in Kombination mit der Degradationsanalyse. Sie berücksichtigt das nichtlineare Werkstoffverhalten zur Bestimmung der wirkenden Schichtspannungen in Kombination mit einem Modul zur Festigkeitsanalyse entsprechend der neu erschienenen *VDI-Richtlinie 2014 Blatt 3:2006*. Das implementierte Degradationsmodell stellt eine Weiterentwicklung der von Schürmann und Puck [4] vorgeschlagenen Methode der konstanten Anstrengung dar. Die Software steht als Open-Source Software zum kostenlosen Download auf der Homepage des Instituts zur Verfügung (www.klub.tu-darmstadt.de).

1 Open-Source Konzept

Die neu entwickelte Software ist modular aufgebaut. Dies bietet die besondere Möglichkeit, das bestehende Programm in Zukunft schnell und effizient erweitern zu können, da sich einzelne Berechnungsmodule leicht gegen zu testende Neuentwicklungen austauschen lassen. Die einzelnen Module sind jeweils im Quellcode selbst, als auch mit Hilfe von Ablaufdiagrammen dokumentiert. Zusätzlich werden die Übergabeparameter der Programmmoduln beschrieben. Neue Theorien können somit effizient überprüft werden, da man nur die entsprechenden Programmmoduln bzw. Berechnungselemente austauschen muss. Die freie Zugänglichkeit des Quellcodes bietet der Faserverbundgemeinde somit die Möglichkeit, die Software auf die eigenen Bedürfnisse anzupassen. Im folgenden werden die wichtigsten Programmbausteine beschrieben.

2 Leistungsumfang lineare Analyse

Basis der nichtlinearen Berechnung sind die Programmmoduln zur linearen Berechnung des Laminats. Sie werden im Rahmen der iterativen, nichtlinearen Berechnungsalgorithmen in Form einer stückweisen Linearisierung verwendet. Auf Grund des modularen Aufbaus bietet sich die Gelegenheit, die lineare und die nichtlineare Analyse zu kombinieren, ohne zusätzlichen Programmieraufwand zu erzeugen.

2.1 Klassische Laminattheorie als Scheiben- und Plattenelement (CLT-Modul)

Grundlage der Software ist die Klassische Laminattheorie. Eine ausführliche Beschreibung der Beziehungen findet sich in [6], sowie in der neu erschienenen *VDI-Richtlinie 2014*. Eingabeparameter sind die mechanischen Kennwerte der UD-Schicht, der Laminataufbau und die am Laminat wirkenden Schnittkräfte- und Momente. Das Programmmodul ermöglicht die Berechnung mit Scheiben- und Plattenbelastungen. Das bedeutet, dass auch die Berechnung von unsymmetrisch geschichteten Laminaten unter Scheibenbelastung möglich ist. Ausgabeparameter des Moduls sind die Steifigkeits- bzw. Nachgiebigkeitsmatrizen, sowie die Verzerrungen des Laminats und die in den einzelnen Schichten wirkenden Spannungen und Verzerrungen (BILD 1).

2.2 Bruchanalyse

Die Bruchanalyse wird aufbauend auf den Ergebnissen des Scheiben-Plattenmoduls, schichtweise durchgeführt. Sie gliedert sich prinzipiell in die zwei auftretenden Versagensformen der UD-Schicht, nämlich in die Faserbruch- und die Zwischenfaserbruchanalyse. Die Software bietet die Möglichkeit zwischen zwei Faserbruchmodellen zu wählen. Als Standardmethode wird die in der *VDI 2014 Blatt 3* vorgeschlagene Theorie verwendet. Die relevanten Einflussparameter der Theorie sind die faserparallelen Festigkeiten R_{\parallel}^+ bzw. R_{\parallel}^- , sowie die in der UD-Schicht wirkende Spannung σ_1 .

Optional kann mit dem mikromechanischen Modell nach Puck [2] gerechnet werden. Die Theorie berücksichtigt den Einfluss der fasersenkrechten Spannung σ_2 , auf Grund der

*Kontakt und Referent: Thorsten.Weber@klub.tu-darmstadt.de

**Prof. Dr.-Ing Helmut Schürmann, Leiter des Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen

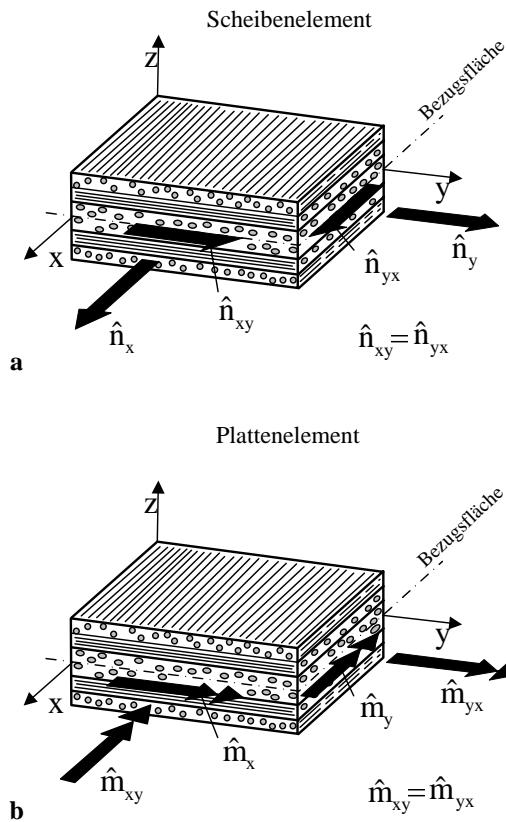


BILD 1: Ebene Beanspruchung eines Scheiben-Plattenelements **a** durch Schnittkraftflüsse $\{\hat{n}\}$ **b** durch Schnittmomentenflüsse $\{\hat{m}\}$; gezeigt sind die positiven Schnittufer und die positiven Wirkrichtungen; entnommen aus [6]

Querkontraktionskopplung in faserparalleler Richtung. Zusätzlich wird die ungleichmäßige Spannungsverteilung, die sich auf Grund der stark unterschiedlichen Elastizitätsmodulen von Faser und Matrix einstellt, durch einen Korrekturfaktor erfasst.

Die Zwischenfaserbruchanalyse wird nach den *Puckschen* Wirkebenenkriterien für ebene Spannungszustände durchgeführt [6]. Es wird in Abhängigkeit von dem wirkenden Spannungszustand zwischen drei unterschiedlichen Bruchmodi unterschieden (BILD 2).

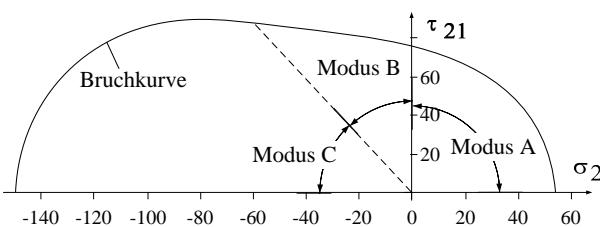


BILD 2: Zwischenfaserbruch-Versagensmodi

Als Ergebnis der Analyse wird für jede Schicht die Anstrengung f_E ermittelt.

$$f_E = \frac{\text{Länge des Vektors } \{\sigma\} \text{ der vorhandenen Spannungen}}{\text{Länge des Vektors } \{\sigma\}^* \text{ der zum Versagen führenden Spannungen}}$$

Optional ist es möglich, den Einfluss der faserparallelen Spannung auf die Zwischenfaserbruchanstrengung nach *Puck* zu berücksichtigen.

2.3 Ausgabemodul der linearen Berechnung

Das Ausgabemodul fasst die Ergebnisse des CLT-Moduls und der Bruchanalyse auf einem Tabellenblatt zusammen. Für die lineare Rechnung wird kein Reservefaktor ausgegeben. Zusätzlich wird der berechnete Spannungszustand anhand der ebenen Versagenskurve bei $\sigma_1 = 0$ dargestellt.

3 Leistungsumfang nichtlineare Analyse

Aufbauend auf den Programmmodulen der linearen Rechnung wird der Berechnungsalgorithmus für das nichtlineare Werkstoffverhalten aufgebaut. Im Unterschied zur linearen Analyse wird die Last gesteigert, bis das Laminat vollständig versagt. Dies ist notwendig, da im Gegensatz zur linearen Berechnung aus dem Schichtspannungszustand keine Aussage über den Reservefaktor getroffen werden kann [6]. Das Verhältnis von maximaler Last zur wirkenden Schnittkraft ergibt den Reservefaktor RF, der für die Bewertung des nichtlinearen Laminatverhaltens die entscheidende Größe darstellt.

$$RF = \frac{n_x^{\text{bei Bruch}}}{n_x^{\text{bei interessierender Betriebslast}}}$$

Zusätzlich zu den linearen Programmteilen werden für die nichtlineare Berechnung weitere Programmmodul zur Beschreibung des Laminatverhaltens entwickelt, die im folgenden Kapitel beschrieben werden.

3.1 Beschreibung des nichtlinearen Berechnungsalgorithmus

Im Unterschied zu linearen Berechnungen gilt das *Hooke'sche* Gesetz für nichtlineares Werkstoffverhalten nicht. Eine Laminatberechnung unter Verwendung des CLT-Moduls ist für diesen Fall nur iterativ möglich. Die iterative Vorgehensweise ist in [7] und der *VDI-Richtlinie 2014 Blatt 3* beschrieben.

Für die Berechnung des Reservefaktors ist es erforderlich, den nichtlinearen Verlauf der Schichtspannung, der sich im Verlauf der Lastaufbringung ergibt, zu ermitteln. Der nichtlineare Berechnungsalgorithmus setzt sich aus einer Kombination der iterativen Schichtspannungsbestimmung und einer inkrementellen Laststeigerung zusammen. Der Aufbau ist in BILD 3 zu sehen.

Die vorgegebene Last wird in Lastinkremente, die vom Benutzer frei wählbar sind, unterteilt. Das Laminat wird mit dem ersten Lastinkrement belastet und unter Verwendung des CLT-Moduls iterativ berechnet [7]. Zur Beschreibung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens unter Berücksichtigung der Interaktionseffekte, gibt es zwei Methoden. Es kann wahlweise mit Messdaten oder einem von *Puck* [3]

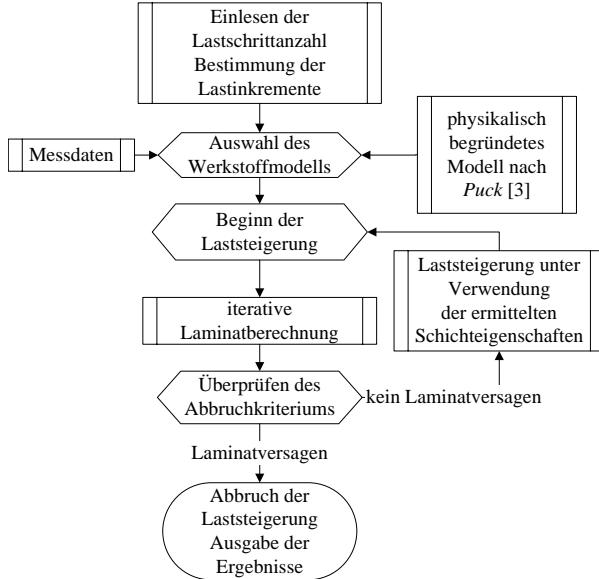


BILD 3: Ablaufdiagramm des nichtlinearen Berechnungsalgorithmus

neu entwickelten Werkstoffmodell gerechnet werden. Die Methode zur Verwendung von Messdaten ist in [7] dokumentiert. Das Werkstoffmodell von *Puck* stellt eine halb-empirische Näherungsgleichung dar. Es berücksichtigt den Einfluss der wirkenden Spannungskombination σ_2 und τ_{21} auf den Verlauf der Werkstoffnichtlinearitäten, indem ein analytischer Zusammenhang zwischen den Sekantenmodulen $E_{\perp s}$, $G_{\perp\parallel s}$ und der Anstrengung f_E hergestellt wird. Konvergiert die Iteration für den gegebenen Lastschritt, so werden die neu ermittelten Sekantenmodule $E_{\perp s}$ und $G_{\perp\parallel s}$ als Startwerte für die Berechnung mit dem nächsten Lastinkrement genutzt.

Die Bruchanalyse kann mit dem linearen Bruchanalysemodul durchgeführt werden, da die Anstrengung eine eindeutige Aussage liefert, ob die Laminatschicht die ermittelten Schichtspannungen erträgt oder nicht. Das Ergebnis der Bruchanalyse wird als Kriterium zur Steuerung des Lastabbruchs genutzt. Basierend auf der Annahme, dass das Laminat infolge eines ersten Zwischenfaserbruchs einer Schicht nicht zwangsläufig total versagt, werden die betroffenen Schichten im weiteren Programmablauf mit Hilfe des Degradations-Moduls berechnet. Es wird in 3.3 beschrieben.

3.2 Einfluss des Faserwinkels auf den Berechnungsalgorithmus

Infolge der inkrementellen Laststeigerung wird von dem Berechnungsalgorithmus der Verzerrungsverlauf des Laminats, bzw. jeder Einzelschicht in Abhängigkeit des aufgebrachten Lastinkrements ermittelt. Der sich einstellende Verzerrungszustand wirkt direkt auf die Lage der Fasern im Laminat und bietet somit die Möglichkeit den Faserwinkel dementsprechend anzupassen. Die mechanischen Grundlagen werden in [7] beschrieben. Die Änderung der Faserwinkel wirkt sich direkt auf die Steifigkeit des gesamten

Laminats aus und somit auf die Traganteile der einzelnen Schichten. Um dies zu berücksichtigen wird ein zusätzlicher Iterationsschritt durchgeführt, der diese Veränderungen berücksichtigt. Konvergiert die Iteration, stellt sich ein neuer, den Faserwinkeländerung angepasster, Schichtspannungszustand in den einzelnen Schichten ein.

3.3 Beschreibung des neu entwickelten Degradationsmodells

Grundlage der Degradationstheorie ist die Annahme, dass eine in ein Laminat eingebettete UD-Schicht nach erfolgtem Zwischenfaserbruch des Modus A oder B weiterhin eine reduzierte Last übertragen kann und nicht zum Versagen des gesamten Laminats führt. Diese Annahme gilt nicht für den Zwischenfaserbruch mit Modus C. In diesem Fall kommt es infolge der wirkenden Druckbelastung zu einem Keilbruch, der zu einem Aufspalten des Restlaminats und dessen Totalsversagen führt. Weiterhin wird angenommen, dass es nicht möglich ist, dass die hohen Spannungen, die infolge eines Faserbruchs umgelagert werden müssten, vom Laminat aufgenommen werden können. Eine weitere Laststeigerung nach Faserbruch einer Einzelschicht ist dementsprechend nicht sinnvoll.

Die zentrale Aufgabe des Degradationsmoduls gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden die Ergebnisse der Bruchanalyse bewertet und für die Steuerung der Abbruchbedingung des nichtlinearen Berechnungsalgorithmus genutzt. Im zweiten Teil werden den Schichten mit Zwischenfaserbruch des Modus A oder B reduzierte, dem Schädigungsgrad entsprechende, Sekantenmodule $E_{\perp s}$ und $G_{\perp\parallel s}$ zugeordnet. Für die Ermittlung der reduzierten Steifigkeiten gibt es unterschiedliche Theorien zur Steuerung der Modulreduktion. In der *VDI-Richtlinie 2014 Blatt 3* wird die von *Puck* [2] entwickelte und von *Knops* [1] bestätigte Theorie vorgeschlagen. Die Reduktion der Sekantenmodule erfolgt in dieser Theorie anhand von gemessenen Abminderungskurven. Die Sekantenmodule $E_{\perp s}$ und $G_{\perp\parallel s}$ werden in Abhängigkeit von der wirkenden „Überanstrengung“ ($f_E - 1$) und des vorliegenden Bruchmodus separat anhand der gemessenen Werte reduziert. Nachteil dieser Methode ist es, dass die Abminderungskurven nur für die geprüften Lamine gültig sind und dementsprechend für jeden veränderten Laminataufbau neu gemessen werden müssen. Da das neu entwickelte Laminatanalyseprogramm „AlfaLam.nl“ für allgemeine Laminataufbauten verwendet werden soll, erscheint die vorgeschlagene Methode auf Grund des hohen Versuchsaufwands und der bis jetzt nur für den Kreuzverbund gemessenen Abminderungskurven als nicht geeignet. In dem neu entwickelten Programm wird deshalb die von *Schürmann* und *Puck* vorgeschlagene Methode der „maximalen Schichtanstrengung“ verwendet [4], die unabhängig von dem gewählten Laminataufbau eingesetzt werden kann und unabhängig von Messwerten ist. Die Methode wurde im Laufe der Programmierung an die neuesten Entwicklungsergebnisse angepasst und weiterentwickelt. Sie basiert auf der Annahme, dass die Anstrengung der betroffenen Schicht den Wert eins nicht überschreitet.

ten kann. Die Sekantenmodule werden iterativ abgemindert, dass die beschriebene Anforderung eingelöst wird. Die iterative Abminderung erfolgt nicht in festen Schritten, sondern wird an die vorliegenden Spannungszustände bzw. den vorliegenden Bruchmodus entsprechend angepasst.

Degradation Bruchmodus A Im Bruchmodus A werden die Bruchflächen auf Grund der positiven Querspannung σ_2^+ auseinander gezogen. Die Spannung in der Schicht kann demzufolge nicht über die Bruchspalte gesteigert werden. Der nichtlineare Verlauf wird deshalb durch eine Parallele zur Abszisse mit dem

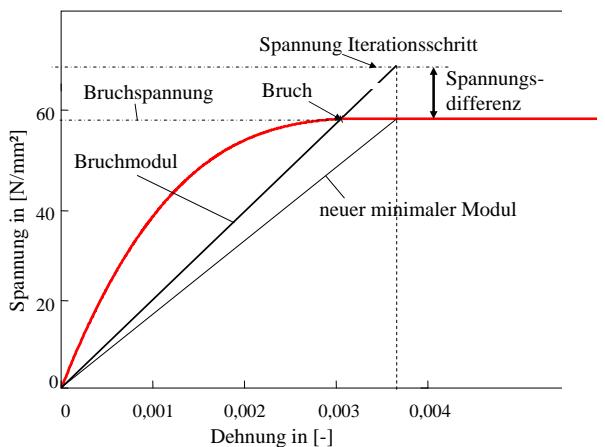


BILD 4: Abminderung des Sekantenmoduls im Bereich des Bruchmodus A

Wird nun im Verlauf der Laststeigerung eine höhere Spannung ermittelt, wird der Sekantenmodul mit Hilfe des iterativen, nichtlinearen Berechnungsalgorithmus solange abgemindert, bis die ermittelte Schichtspannung auf der modifizierten nichtlinearen Spannungs-Verzerrungskurve liegen kommt. Das Verfahren wird sowohl für den Quermodul $E_{\perp s}$, als auch für den Schubmodul $G_{\perp \parallel s}$ angewendet. Grund des geringeren Schubsekantenmoduls (im Modus des Zwischenfaserbruchs), im Vergleich zum nur gering nichtlinearen Verhalten des Querzugmoduls, wie Querzugmodul, auf Grund der Kurvencharakteristik, automatisch stärker abgemindert als der Schubmodul. Dies entspricht den Versuchsergebnissen von Knops [1]. Fällt die Spannung auf Grund von Lastumlagerungen im Verlauf der Laststeigerung ab, wird für die iterative Berechnung der Sekantenmodul aus den letzten konvergierten Lastschritten verwendet. Eine Steigerung des Sekantenmoduls ist im Degradationsbereich des Modus A nicht möglich, da dies einer „Heilung“ der Schicht entsprechen würde (BILD 5).

Degradation Bruchmodus B Der Schubmodul $G_{\perp \parallel s}$ wird analog zum Vorgehen im Modus A abgemindert. Im Bereich des Modus B ergibt sich, auf Grund der rissenschließenden Wirkung der Querdruckspannung $\sigma_2^{(-)}$, ein anderes Verhalten für den Querdruckmodul $E_{\perp s}^{(-)}$ als bei Modus A.

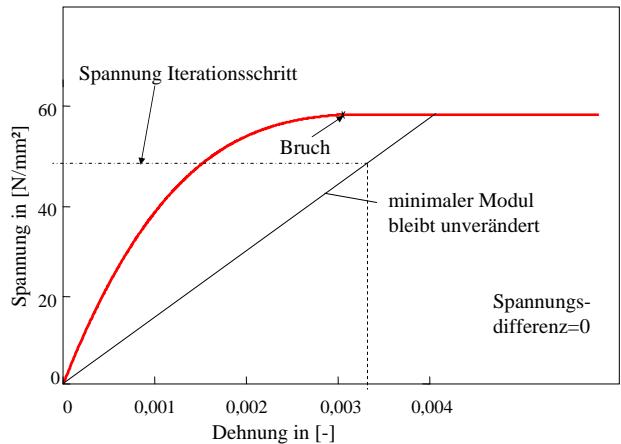


BILD 5: Bruchmodus A: Ein erneuter Anstieg des Sekantenmoduls ist nach erfolgtem Zwischenfaserbruch nicht möglich

In diesem Fall ist eine Laststeigerung möglich, da über die entstandene Bruchfläche weiterhin Lasten übertragen werden können. Die nichtlineare Werkstoffkennlinie wird deshalb mit Hilfe einer Geraden konstanter Steigung verlängert. Als Steigung wird die Tangentensteigung der Bruch-

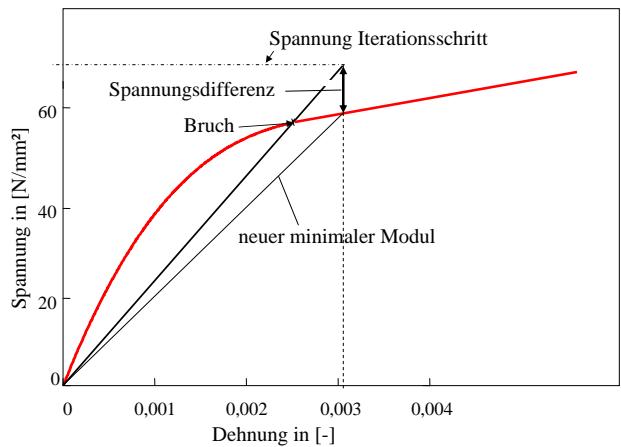


BILD 6: Abminderung des Querdruckmoduls im Bruchmodus B

Der Sekantenmodul wird dementsprechend weniger stark abgemindert als im Bruchmodus A und die Spannung kann weiter gesteigert werden. Wie bereits im Modus A ist eine „Heilung“ der Schicht nicht möglich und dementsprechend kann der Sekantenmodul nach erfolgter Rissbildung infolge von Laststeigerung nicht mehr ansteigen.

Eine Degradation im Bereich des Bruchmodus C findet auf Grund der Keilwirkung des Schichtbruchs nicht statt. Das Programm weist den Benutzer darauf gesondert hin.

Besonderheiten Im Laufe der Berechnungstests ergaben sich neue Erkenntnisse, die in dem modifizierten Degradationsmodell berücksichtigt werden. Als Beispiel dafür, dient das in BILD 7 dargestellte Ergebnis eines auf Zug belasteten AWV's.

Der Verlauf der Schichtspannungen zeigt, dass es trotz der

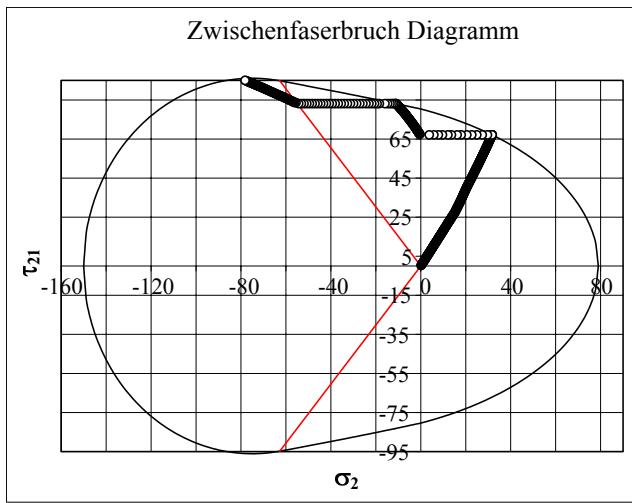


BILD 7: Ergebniss der nichtlinearen Laminatanalyse (AWV 45, GFK)

Laststeigerung zu einem Abfall der Anstrengung in einer Schicht kommen kann. Dies ist die Folge der neuen Verteilung der Traganteile im Laminat, die sich auf Grund der degradierten Schichtmodule einstellt. Es ist infolge dessen möglich, dass der Bruchmodus im Verlauf der fortgeföhrten Laststeigerung wechselt. Tritt ein solcher Moduswechsel auf, müssen Übergangsbedingungen bestimmt werden, damit die Degradation sinnvoll fortgesetzt werden kann. Die Vorgehensweise muss noch durch Versuche bestätigt werden.

3.4 Ausgabemodul der nichtlinearen Berechnung

Für die nichtlineare Berechnung werden zusätzlich zu den bereits aus dem linearen Ausgabemodul bekannten Werten, der Reservefaktor und der Verlauf der einzelnen Schichtspannungen in einem Zwischenfaserbruchdiagramm angezeigt. Optional kann auch das Last-Verzerrungsverhalten des Laminats in einem Diagramm angezeigt werden.

4 Berechnung von Plattenbelastungen mit dem nichtlinearen Berechnungsmodul

Im Fall von Plattenbelastungen stellen sich Spannungsgradienten sowie Verzerrungsgradienten über der Wanddicke der einzelnen Schichten ein. Die Klassische Laminattheorie und die Festigkeitsanalyse von Laminaten reduziert die Eigenschaften der Einzelschichten für die Berechnung jedoch auf diskrete Werte. Dies führt besonders bei der Laminatanalyse mit nichtlinearem Werkstoffverhalten und bei der Bestimmung des Schwächungsfaktors (Berücksichtigung des Einflusses von faserparallelen Spannungen auf den Zfb, siehe *VDI-Richtlinie 2014 Blatt 3*) zu Problemen. Während der Berechnung mit nichtlinearem Werkstoffverhalten werden in jedem Iterationsschritt die Sekantenmoduli der UD-Schichten an Hand der ermittelten Schichtverzerrungen neu bestimmt. Es stellt sich nun die Frage, welcher Wert, im Fall der Plattenbelastung, für die UD-Schicht

verwendet wird, der Modul auf der Ober- oder der Modul auf der Unterseite einer Schicht (BILD 8).

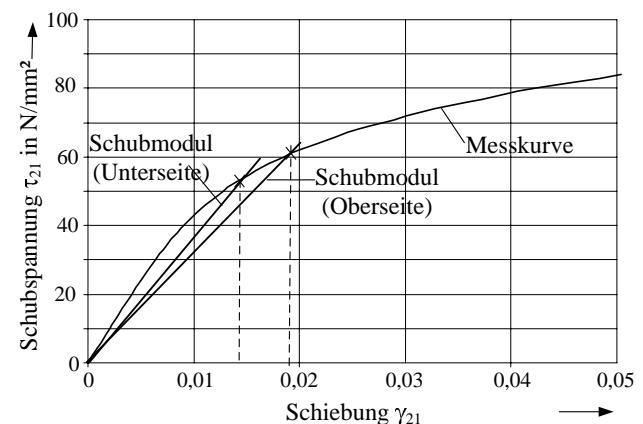


BILD 8: Unterschiedliche Schubmoduli an der Schichtunter- bzw. Schichtoberseite infolge einer Verdrillung der UD-Schicht

Für die Bestimmung der Zfb-Anstrengung unter Berücksichtigung der Abminderung durch überlagerte faserparallele Spannungen muss zusätzlich bestimmt werden, ob abgemindert wird, Fb vor Zfb auftritt oder nicht abgemindert wird (BILD 9).

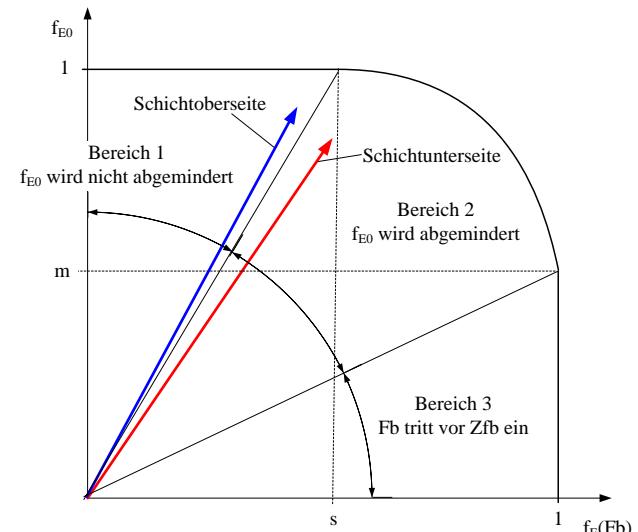


BILD 9: Fallunterscheidung für die Abminderung infolge faserparalleler Anstrengung

Mit dem Ziel eindeutige Berechnungsergebnisse zu erzeugen, muss eine Methode entwickelt werden, mit der es möglich ist, die über der Schichtdicke variierenden Spannungen und Verzerrungen auf einen für die Schicht charakteristischen Ersatzwert um zurechnen. Für die Bestimmung des Wertes sind verschiedene Methoden vorstellbar z.B. (BILD 10):

- Verwendung des Werts im Flächenschwerpunkt
- Verwendung des max. Werts der Schicht
- Arithmetisches Mittel aus Schichtober/-Unterseite $m=1$
- Quadratisches Mittel $m=2$

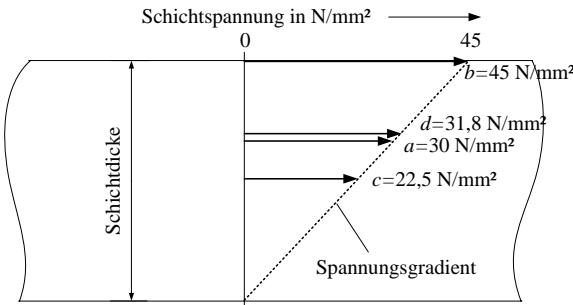


BILD 10: Darstellung der unterschiedlichen Mittelungsmethoden mit Ergebnissen für das gewählte Beispiel

Noch schwieriger gestaltet sich das Geschehen für Schichten, bei denen ein Vorzeichenwechsel innerhalb der Schicht stattfindet (BILD 11).

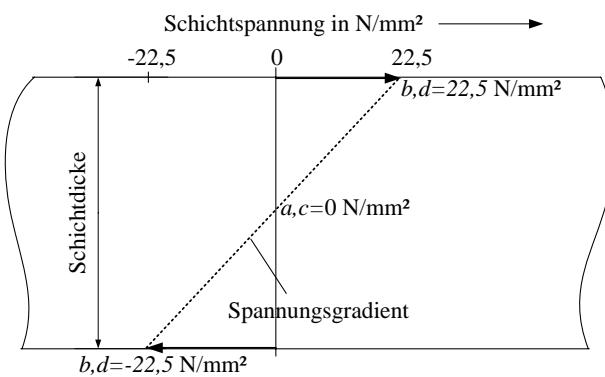


BILD 11: Darstellung der unterschiedlichen Mittelungsmethoden für eine Schicht, in der ein Vorzeichenwechsel auftritt

Die Methoden a und c liefern in diesem Fall sehr kleine Werte oder sogar den Wert null. Wird die Methode b oder d verwendet, muss von dem eingesetzten Rechenalgorithmus entschieden werden, ob die Werte positiv oder negativ ausgegeben werden sollen. Dies hat einen Einfluss auf das nichtlineare Werkstoffverhalten, hier ist besonders der richtungsabhängige Quermodul betroffen, und das Spannungsverhältnis, dass zur Bestimmung der vorliegenden Interaktion verwendet wird. Alle aufgeführten Methoden werden aktuell im Rahmen einer Vergleichsstudie getestet, mit dem Ziel die realitätsnächste Variante auszuwählen. Hierfür wurde das neue Berechnungsprogramm modifiziert, indem die Einzelschichten des zu untersuchenden Laminats virtuell in sehr dünne UD-Schichten unterteilt wird. Für die Berechnung der dünnen Schichten ist die Verwendung des Maximalwertes geeignet. Die Ergebnisse dieser modifizierten Berechnungen werden mit den verschiedenen Methoden verglichen. Konvergiert eine der vorgeschlagenen Näherungslösungen gegen diese Ergebnisse, so wird sie im weiteren für die Berechnung der UD-Schichteigenschaften verwendet. Die Methoden werden zusätzlich danach bewertet, ob sie konservative Ergebnisse liefern oder nicht. Da die Testreihe aktuell noch nicht vollständig abgeschlossen ist, wird in dem Programm derzeit die Methode der ma-

ximalen Anstrengung verwendet. Der Berechnungsalgorithmus selektiert die Schichtseite mit der höheren Anstrengung und verwendet sie für die Berechnung. Sollten bis zum Abschluss der Testreihe, bzw. der Implementierung der neuen Berechnungsmethode, Probleme bei der Berechnung von Plattenbelastungen auftreten, wird dem Benutzer empfohlen den Laminataufbau manuell feinschichtig einzugeben, d.h. die einzelnen UD-Schichten sollten weiter unterteilt werden.

Ein weiterer Effekt der bei der nichtlinearen Berechnung von Plattenbelastungen unbedingt berücksichtigt werden muss ist, dass sich die Neutralebenen infolge der Spannungsumlagerungen verschieben. Durch die Verschiebung ändert sich der elastische Hebelarm und es entstehen Zusatzmomente. Dies ist besonders im Rahmen von Stabilitätsberechnungen wichtig. Zusatzmomente und die Verschiebung der neutralen Faser sollen zusätzlich ausgegeben werden, damit der Konstrukteur diesen Effekt bei der Auslegung berücksichtigen kann.

5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der aktuellen Programmtests werden wichtige Einflussgrößen auf die Laminatanalyse qualitativ und quantitativ ausführlich untersucht, um so die Unterschiede zwischen der linearen und nichtlinearen Berechnung deutlich herauszuarbeiten. Aus den Ergebnissen wird eine „Kontrollliste“ erarbeitet, die dem Anwender der Software einen Überblick über die wichtigsten Unterschiede aufzeigt.

Der nichtlineare Aufbau von thermischen Eigenspannungen ist derzeit nicht eindeutig geklärt. Für die exakte, quantitative Bestimmung von Eigenspannungen muss das nichtlineare und temperaturabhängige Verhalten der UD-Schicht berücksichtigt werden. Eine weitere wichtige Erweiterung des Programms stellt die Laminatanalyse bei erhöhten Temperaturen dar. In der Spannungs- und Bruchanalyse müssen dann eine Reihe von gegenläufigen Werkstoffeigenschaften berücksichtigt werden. Diese sollen mit Hilfe des nichtlinearen Berechnungsmoduls, dem neuen Modul zur Berechnung der thermischen Eigenspannungen und temperaturabhängigen Steifigkeiten bzw. Festigkeiten, erfasst werden.

Literatur

- [1] KNOPS, Martin: *Sukzessives Bruchgeschehen in Faserbundlaminaten*, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Fakultät für Bergbau, Maschinenwesen, Diss., 2003
- [2] PUCK, Alfred: *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten – Modelle für die Praxis*. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1996. – Buch ist vergriffen, jedoch elektronisch verfügbar unter <http://www.klub.tu-darmstadt.de/forschung/download.php>

- [3] PUCK, Alfred ; MANNIGEL, Martin: Physically Based Stress/Strain-Analysis for the inter-fibre-fracture analysis of FRP Laminates. In: *Composites Science and Technology* (to be published 2007)
- [4] PUCK, Alfred ; SCHÜRMANN, Helmut: Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. In: *Composites Science and Technology* (1998), S. 1045–1067
- [5] SCHRÖDER, Bernd: *Untersuchungen zum Spannungs-Verformungsverhalten von unidirektional faserverstärkten Kunststoffen bei Querbelastung, bei Schubbelastung und bei kombinierter Belastung aus Querzug und Schub*, Universität Gesamthochschule Kassel, Diplomarbeit, 1983
- [6] SCHÜRMANN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin Heidelberg New York : Springer Verlag, 2005
- [7] WEBER, Thorsten ; SCHÜRMANN, Helmut: Verbesserung der nichtlinearen Versagensanalyse von Laminaten. In: *DGLR-Symposium*. Friedrichshafen : Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e.V., 26.-29. September 2005