

ERMITTLUNG DER KRAFTFLUSSVERTEILUNG UND DER LASTÜBERTRAGUNG AN ZWEISCHNITTIGEN NIET- UND BOLZENVERBINDUNGEN ZWISCHEN CFK-LAMINATEN

W. Becker, C. Sator, P. Zerres

Fachgebiet Strukturmechanik, Fachbereich Maschinenbau, Technische Universität Darmstadt
Hochschulstraße 1, D-64289 Darmstadt

Germany

ZUSAMMENFASSUNG

Um die Kraftflussverteilung und Lastübertragung an zweischnittigen Niet- und Bolzenverbindungen zwischen CFK-Laminaten zu ermitteln, wurden geeignete ebene Modelle erstellt und mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) untersucht. Als zentrale Erkenntnis ist festzuhalten, dass die erhöhte effektive Nachgiebigkeit, die bisher irrtümlich dem Bolzen zugeschrieben wurde, im Wesentlichen auf die Scheibendeformation zurückzuführen ist. Ferner fielen in den numerischen Simulationen besonders hohe Spannungskonzentrationsfaktoren im Lochgrund auf, die aus Sicht des konstruierenden Ingenieurs besonderes Augenmerk verdienen. Die hohe Layup- und Geometrieabhängigkeit der Ergebnisse, genauer des Spannungs- und Verformungsverhaltens, lässt auf ein großes Optimierungspotential schließen.

1. EINFÜHRUNG

Während der letzten Jahrzehnte hat der Einsatz faserverstärkter Composite-Materialien in vielen technischen Bereichen, wie in der Luft- und Raumfahrt erheblich zugenommen. Damit einher geht die Fragestellung nach möglichst leistungsfähigen Fügungen. Nach wie vor ist die Kraftübertragung durch Verbindungselemente wie z.B. Bolzen oder Niete die häufigste Fügetechnik. Während für klassische isotrope Werkstoffe beachtliche Erfahrungen hinsichtlich der konstruktiven Design-Freiheiten, wie etwa einzuhaltender Abstand zu einem freiem Rand, Wahl des Bolzen- oder Nietdurchmessers, Wahl der gegenseitigen Bolzen- oder Nietabstände, bestehen, gibt es vergleichsweise wenig Erfahrungswissen bezüglich der Bolzenfügung von Laminaten. Eine wesentliche Schwierigkeit bei der Auslegung von CFK-Strukturen ist der Nachweis der Verbindungsfestigkeit, da herkömmliche Festigkeitskriterien isotroper Werkstoffe nicht direkt auf Faserverbundwerkstoffe übertragen werden können.

Dieser Problemstellung hat sich insbesondere Huth [1] in seiner Arbeit gewidmet. Dabei wurden zentrische Schnitte durch eine Bolzenfügung studiert und angenommen, dass die erhöhte Nachgiebigkeit im Wesentlichen aus einer Verbiegung des Bolzens resultiert (vgl. BILD 1). Demgegenüber ist die sich einstellende Scheibendeformation um den Bolzen herum nicht näher betrachtet worden. Es ist bemerkenswert, dass diese Ergebnisse bis zum heutigen Tage in der Flugzeugindustrie Verwendung finden, ebenso wie eine Reihe anderer sehr einfacher Modellierungen.

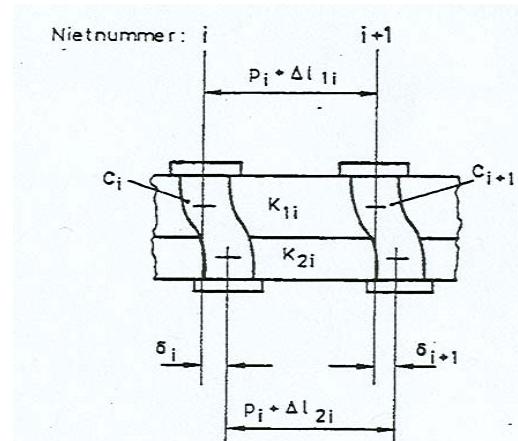


BILD 1. Schnitt durch die Bolzenfügung gemäß Huth [1]

2. GRUNDLAGEN UND MODELLBESCHREIBUNG

2.1. ELASTOMECHANISCHE GRUNDLAGEN

Bei der zu analysierenden Struktur handelt es sich um eine Verbindung zwischen verschiedenen Laminaten mit beliebig vielen Einzelschichten. Ein schematischer Schichtaufbau eines Laminats ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

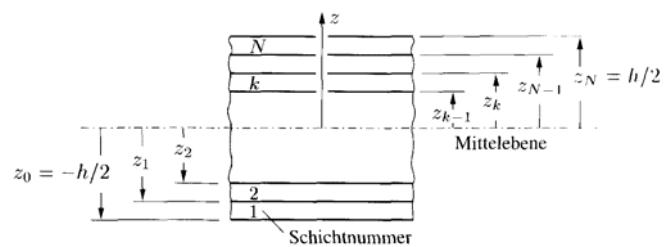


BILD 2. Schematischer Laminataufbau

Jede Einzelschicht weist linear-elastisches und im Allgemeinen anisotropes Verhalten auf. Das konstitutive Verhalten des

Gesamtlaminats wird im Rahmen der klassischen Laminattheorie zweckmäßig mit Hilfe der Laminatsteifigkeitsmatrix bzw. ABD-Matrix beschrieben:

$$(1) \quad \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

Dabei stellen die Schnittkräfte und -momente die über die Laminatdicke h integrierten Spannungen der Einzelschichten dar. Die effektiven Lamineigenschaften sind wesentlich durch die Schichtenfolge oder das sogenannte *Layup* bestimmt. Zur Charakterisierung des Laminats wird der bewährte Laminat-Code eingesetzt. Dabei gibt man in eckigen Klammern der Reihe nach die einzelnen Lagenwinkel an, die sich ergeben, wenn man das Laminat gedanklich in z-Richtung durchquert. Bei symmetrischem Aufbau bezüglich der Mittelebene wird der tiefgestellte Index S verwendet; $[+/- 45^\circ]_s$ steht beispielweise für ein symmetrisches viersechigtes Laminat.

Für viele technische Fragestellungen ist eine möglichst genaue Beurteilung der Festigkeit eines Werkstoffs von entscheidender Bedeutung, nicht zuletzt auch zur Optimierung der Werkstoffausnutzung. Die Festigkeitshypothesen für isotrope Werkstoffe sind für Laminate im Allgemeinen nicht anwendbar. Hier sind aufwendigere Kriterien erforderlich, welche der Anisotropie in Aufbau, Steifigkeit und Festigkeit gerecht werden. Typische Versagensmechanismen für Laminate sind zum Beispiel:

- Faserbruch
- Matrixbruch
- Faser-Matrix-Ablösung
- Delamination
- ...

Weiterhin sollen die verschiedenen Belastungsarten und ihre Wechselwirkung untereinander in die Beurteilung eingehen. Für Optimierungsrechnungen und zur numerischen Weiterverarbeitung ist außerdem eine einparametrische Aussage über die Festigkeit wünschenswert, wodurch die Formulierung von Festigkeitsrestriktionen erleichtert wird. Aus den vielen verfügbaren Festigkeitshypothesen für Laminate wird zur Verwendung in dieser Arbeit das Festigkeitskriterium nach Tsai-Wu [7] gewählt, welches viele der obigen Eigenschaften auf sich vereint. Danach wird für die Festigkeit der Einzelschicht eines Laminats die Erfüllung folgender Bedingung gefordert:

$$(2) \quad T = \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + \sigma_1 \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) + \sigma_2 \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) < 1,$$

wobei T den Tsai-Wu-Versagensindex,
 X_t die longitudinale Zugfestigkeit,
 X_c die longitudinale Druckfestigkeit,
 Y_t die transversale Zugfestigkeit,

Y_c die transversale Druckfestigkeit,
 S die Scherfestigkeit

der Einzelschicht beschreiben. Die Indizes 1,2,3 kennzeichnen hier die Transformation der Spannungen ins Materialhauptachsensystem. Eine Beurteilung der Festigkeit eines Laminats erfordert die Auswertung des Kriteriums (2) für jede Einzelschicht. In dieser Arbeit soll das Konzept der Versagensdefinition im Sinne eines „First Ply Failure“ verwendet werden. In das Kriterium (2) gehen ausschließlich die innerhalb der klassischen Laminattheorie ermittelbaren Spannungen σ_1 , σ_2 und τ_{12} ein. Versagen durch die interlaminaren Spannungen σ_3 , τ_{13} und τ_{23} wird also nicht erfasst und würde die Betrachtung in einer erweiterten Analyse erfordern.

Neben dem Tsai-Wu-Index wird der Spannungskonzentration im Lochgrund Aufmerksamkeit gewidmet. Als Spannungskonzentrationsfaktor ist der Quotient aus maximaler Umfangsspannung (bzw. Radialspannung) im Lochgrund und eingeleiteter Spannung am unteren Scheibenrand definiert.

2.2. MODELLIERUNG DER BOLZENVERBINDUNG

Wie bereits erwähnt, wird die Bolzenverbindung durch ein ebenes Scheibenmodell idealisiert. Für die Berechnungen wurde ein parametrisiertes Modell erstellt, welches nicht nur leichte Änderungen der äußeren Geometrie ermöglicht, sondern auch eine nicht-äquidistante Knotenverteilung erlaubt (BIAS). So ist es möglich das Netz zu einer Seite hin feiner und gleichzeitig auf der anderen Seite größer aufzulösen. Wie in BILD 4 zu erkennen ist, wurde der Bereich um den Lochgrund wesentlich feiner als der äußere Randbereich diskretisiert, um bei möglichst geringem Rechenaufwand auftretende Spannungskonzentrationen gut auflösen zu können.

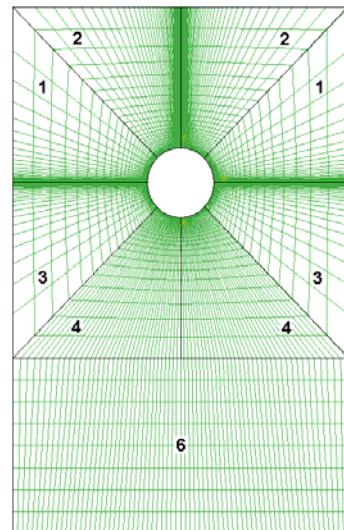


BILD 3. Modellaufbau und Vernetzung der Scheibe

Typische Scheibenabmessungen waren etwa: Breite 140 mm, Lochdurchmesser 20 mm, obere und untere Scheibenhälfte 60 mm.

Alle Berechnungen wurden mit ABAQUS unter Verwendung von S4 - Schalenlementen durchgeführt. Diese Elemente werden über die Spezifikation eines Laminatlagenaufbaus definiert.

Jedes S4 - Element besteht aus 4 Knoten mit 6 Freiheitsgraden (3 Translationen und 3 Rotationen), vgl. BILD 4.

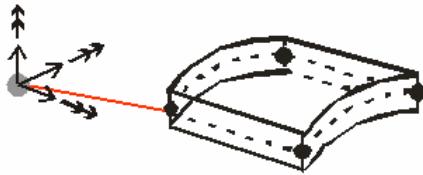
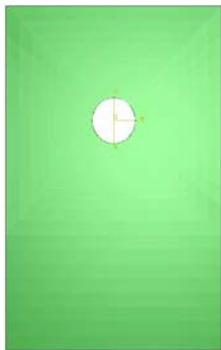


BILD 4. Freiheitsgrade des S4 - Schalenelements

Als Material wurden linear-elastisches, isotropes Epoxidharz (E-Modul $E = 5000 \text{ MPa}$, Querkontraktionszahl $\nu = 0,3$) und linear-elastisches, orthotropes CFK (E-Moduln $E_1 = 135000 \text{ MPa}$, $E_2 = E_3 = 8500 \text{ MPa}$; Schubmoduln $G_{12} = G_{13} = 4200 \text{ MPa}$, $G_{23} = 3972 \text{ MPa}$; Querkontraktionszahl $\nu = 0,35$) zugrundegelegt.

Aus der folgenden Abbildung geht schließlich noch das verwendete Koordinatensystem für die Faserausrichtung hervor.



Koordinatensystem:

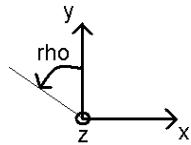


BILD 5. Koordinatensystem und Winkelzählung für Faserausrichtung

Die Bolzenmodellierung als starrer Festkörper -erreicht durch festgehaltene Lochgrundknoten- erwies sich bei der Untersuchung mehrerer Fragestellung als unzureichend, so dass die Studie letztendlich als Kontaktproblem durchgeführt wurde. Dabei wurde der Bolzen sowohl als starre Scheibe wie auch als deformierbare Scheibe simuliert. In beiden Fällen wurde das Zentrum des Bolzens geeignet fixiert und am unteren Scheibenrand eine Gleichstreckenzuglast aufgebracht.

Neben dem einzelnen Bolzen wurden auch zwei in Reihe geschaltete Bolzen untersucht, vgl. BILD 6.

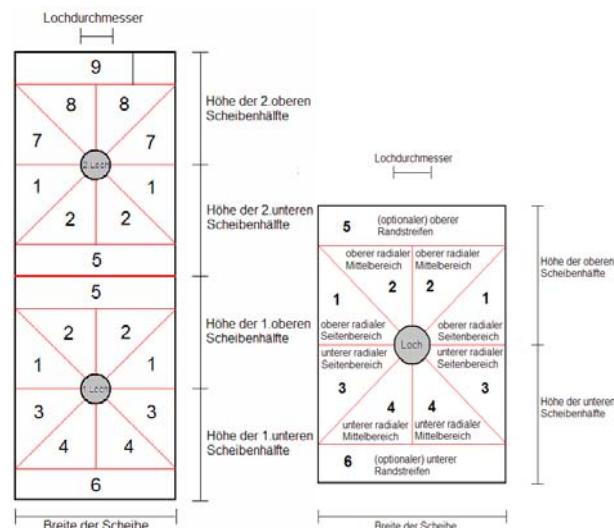


BILD 6. Zwei in Reihe geschaltete Bolzen und einzelner Bolzen

Außer der einzelnen freien Scheibe wurde noch der Fall mehrerer in x-Richtung „periodisch“ angeordneter Scheiben untersucht. Durch die Periodizität wird eine Querkontraktion der Scheibe unterbunden; Im Modell wird dies realisiert, indem an der Einzelscheibe die Verschiebungen aller Knoten an rechter und linker Scheibenkante in x-Richtung durch Gleitlagerung unterbunden werden.

3. FINITE ELEMENTE BEISPIELE

Untersucht wurden die isotrope Scheibe sowie die folgenden Layups:

- $[0^\circ/90^\circ]s$,
- $[+/- 45^\circ]s$,
- $[0^\circ/90^\circ/+/-45^\circ]s$
- $[0^\circ/+/-45^\circ/90^\circ]s$ (%).

Während die drei ersten Laminat gleiche Einzelschichtdicken besitzen, zeichnet sich das mit (%) gekennzeichnete Layup durch folgenden Aufbau aus: Die Gesamtdicke setzt sich aus 60% 0° -Schicht, jeweils 15% $+/- 45^\circ$ -Schichten und 10% 90° -Schicht zusammen. Der Aufbau $[0^\circ/90^\circ/+/-45^\circ]s$ wird auch als quasi-isotrop bezeichnet und zeigt in allen betrachteten Fällen das erwartete, nahezu isotrope, Verhalten.

In allen nachfolgenden Diagrammen wird der angegebene Winkel vom untersten Lochpunkt im mathematischen Sinne positiv gezählt.

Ferner wurde der Einfluss der äußeren Geometrie, speziell das Verhältnis von Scheibenbreite b zu Lochdurchmesser d (b/d -Verhältnis) untersucht.

3.1. Einzelter starrer Bolzen

Zunächst werden die Ergebnisse für den Fall einer Lochscheibe mit einem starren Bolzen unter Zuglast (10 N/mm) vorgestellt.

In der folgenden Abbildung ist ein Vergleich des Spannungskonzentrationsfaktors für die Umfangsspannung zwischen einer Lochscheibe ohne Bolzen, welche an der Oberseite gelagert ist, und der Lochscheibe mit Bolzen dargestellt. Die Scheibe besitzt eine Breite von 100 mm und einen Lochdurchmesser von 20 mm, also ein b/d -Verhältnis von 5; die obere bzw. untere Lochscheibenhälfte sind 50 mm bzw. 100 mm.

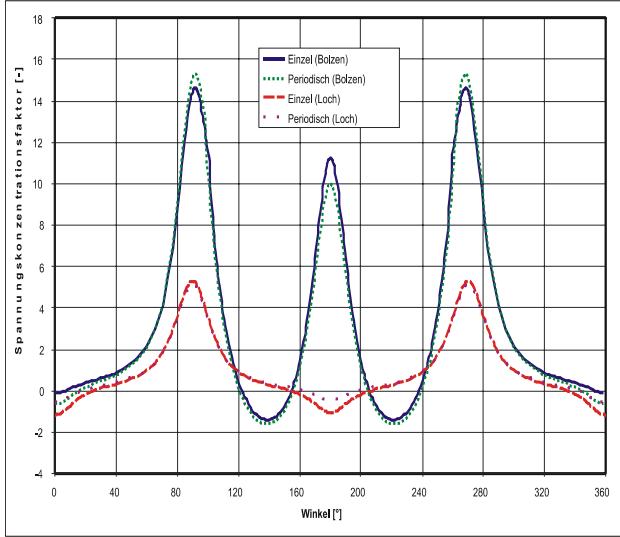


BILD 7. Spannungskonzentrationsfaktor der Umfangsspannung im Lochgrund eines $[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$ - Laminats

Deutlich zu erkennen ist der enorm hohe Spannungskonzentrationsfaktor von über 14. Zum Vergleich sei auf den Spannungskonzentrationsfaktor einer unendlich ausgedehnten, isotropen Lochscheibe unter Zugelastung hingewiesen; dieser beträgt lediglich 3 und lässt sich im Rahmen der Elastizitätstheorie exakt berechnen. Auf weitere Abbildungen muss aus Platzgründen verzichtet werden, es sei jedoch auf die Symmetrie aller Verläufe hingewiesen. In den folgenden Tabellen sind die maximalen Spannungskonzentrationsfaktoren zusammen mit dem Ort des Auftretens für alle untersuchten Layups zusammengefasst.

maximale Spannungskonzentrationsfaktoren [-]

	Einzelscheibe	periodische Scheibe
isotrop:	6,7	6,5
$[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$:	14,6	15,3
$[+/- 45^{\circ}]_s$:	12,3	12,3
$[0^{\circ}/90^{\circ}/+/- 45^{\circ}]_s$:	6,8	6,5
$[0^{\circ}/+/- 45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ (%):	10,1	9,6

dazugehörige Winkel in $^{\circ}$:

	isotrop:	$[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$:	periodische Scheibe
isotrop:	93,6	91,4	96,5
$[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$:	91,4	91,4	91,4
$[+/- 45^{\circ}]_s$:	135,0	135,0	135,0
$[0^{\circ}/90^{\circ}/+/- 45^{\circ}]_s$:	94,5	97,7	97,7
$[0^{\circ}/+/- 45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ (%):	92,2	92,7	92,7

Mit Ausnahme des $[+/- 45^{\circ}]_s$ - Layups befindet sich der Ort des maximalen Faktors immer an nahezu gleicher Stelle.

Der Spannungskonzentrationsfaktor für die Radialspannung wurde ebenfalls untersucht. Ein Vergleich mit Lochscheibe ohne Bolzen erübrigt sich hier, da am freien Lochrand keine Radialspannungen auftreten. In BILD 8 sind exemplarisch die Verläufe für die Einzelscheibe und die periodische Scheibe eines $[+/- 45^{\circ}]_s$ - Laminats gegenübergestellt.

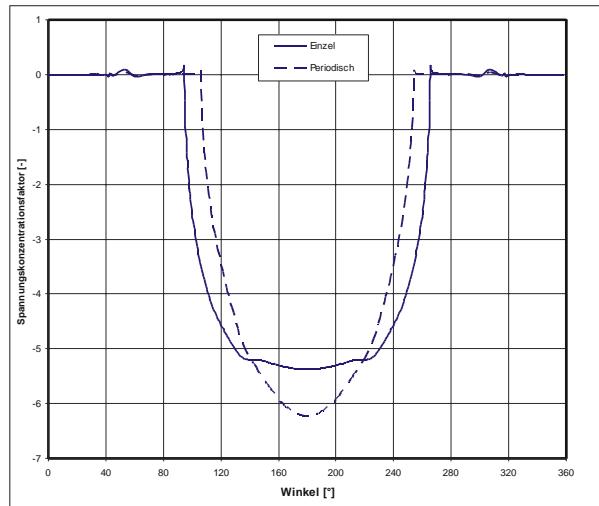


BILD 8. Spannungskonzentrationsfaktor der Radialspannung im Lochgrund eines $[+/- 45^{\circ}]_s$ - Laminats

Auch in diesem Fall liegt eine Symmetrie aller Verläufe vor. Die Faktoren sind stets negativ und das Maximum bzw. Minimum liegt bei allen Layups zwischen -5,5 und -6,5.

Nachdem in den bisherigen Untersuchungen das b/d -Verhältnis konstant gehalten wurde, soll nun die nachfolgende Abbildung 9 den Einfluss dieses Verhältnisses auf die maximalen Spannungskonzentrationsfaktoren (für die Radial- und die Umfangsspannung) wiedergeben. Es sei angemerkt, dass die obere Scheibenhöhe bei 50 mm und die untere Scheibenhöhe bei 100 mm festgehalten wurden.

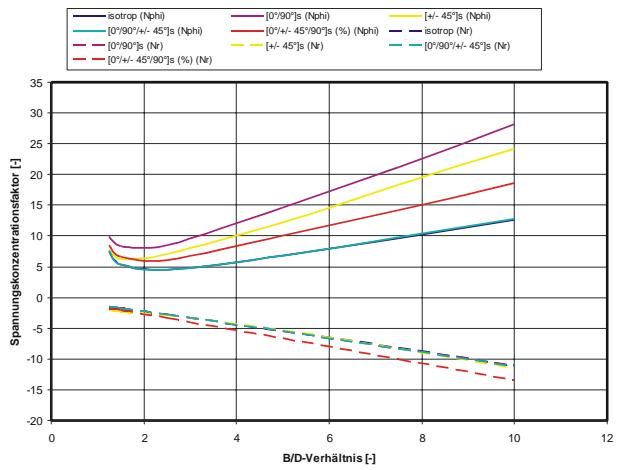


BILD 9. Verlauf der maximalen Spannungskonzentrationsfaktoren in Abhängigkeit des b/d -Verhältnisses

BILD 9 gibt lediglich die Verläufe für die Einzelscheibe wieder; bei der periodischen Scheibe sind kaum Unterschiede festzustellen. Die Verläufe für die Radialspannung sind nahezu identisch und für die Umfangsspannung qualitativ gleich. Gut erkennbar ist in allen Fällen das vorliegende Minimum, welches sich stets in der näheren Umgebung von $b/d = 2$ befindet. Angemerkt sei, dass die Lage der maximalen Spannungs konzentrationen nur wenig (etwa 3°) vom b/d -Verhältnis beeinflusst werden.

Als nächstes werden die Ergebnisse der Festigkeitsanalyse vorgestellt. Auch hier wurden die vorigen Scheibenabmessungen mit einem b/d -Verhältnis von 5 verwendet. Um zu brauchbaren Tsai-Wu-Werten zu gelangen, waren jedoch verschiedene Lasten für die verschiedenen Layups erforderlich. Die Angriffsstreckenlast in y -Richtung beträgt für die isotrope Scheibe 10 N/mm, für das $[0^\circ/90^\circ]_s$ -Laminat 30 N/mm, für das $[+/- 45^\circ]_s$ -Laminat 40 N/mm sowie für die Layups $[0^\circ/90^\circ/+/-45^\circ]_s$ und $[0^\circ/+/-45^\circ/90^\circ]_s$ (%) jeweils 60 N/mm. Exemplarisch sind in BILD 10 die Verläufe für das $[0^\circ/90^\circ/+/-45^\circ]_s$ -Laminat dargestellt.

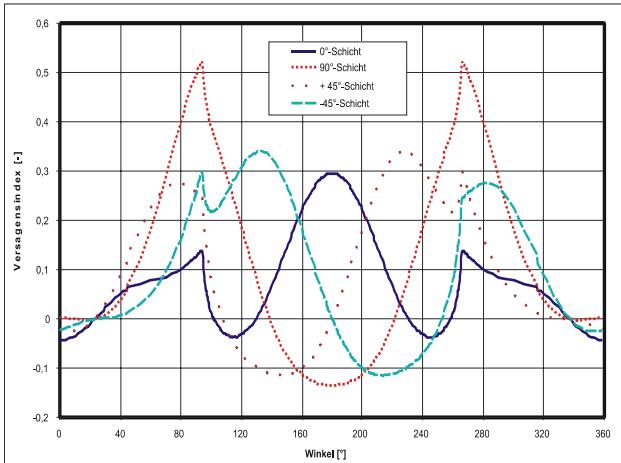


BILD 10. Verlauf der Tsai-Wu-Versagensindizes für die $[0^\circ/90^\circ/+/-45^\circ]_s$ - Einzelscheibe

Die Maximalwerte in den versagensmaßgebenden Schichten und die dazugehörigen Orte (Winkel) sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

	Lagerung	Max. Tsai-Wu-Index [-]	zugehöriger Winkel in $^\circ$
isotrop	Einzel	0,27	93,6
	periodisch	0,25	96,5
$[0^\circ/90^\circ]_s$ => 90°-Schicht	Einzel	0,39	94,8
	periodisch	0,42	94,8
$[+/- 45^\circ]_s$ => +/- 45°-Schicht	Einzel	0,45	231,4; 128,5
	periodisch	0,44	221,2; 139,9
$[0^\circ/90^\circ/+/-45^\circ]_s$ => 90°-Schicht	Einzel	0,52	93,9
	periodisch	0,48	96,9
$[0^\circ/+/-45^\circ/90^\circ]_s$ (%) => 0°-Schicht	Einzel	0,46	179,6
	periodisch	0,46	179,6

Vorstehende Tabelle wurde mit einem konstanten b/d -Verhältnis von 5 ermittelt. Wie schon zuvor bei den Spannungskonzentrationsfaktoren soll auch hier der Versuch einer Minimierung bzw. Optimierung bezüglich des b/d -Verhältnisses unternommen werden. In BILD 11 ist der Verlauf des Tsai-Wu-Index über das b/d -Verhältnis in der versagensmaßgebenden Schicht für das $[+/- 45^\circ]_s$ -Laminat dargestellt.

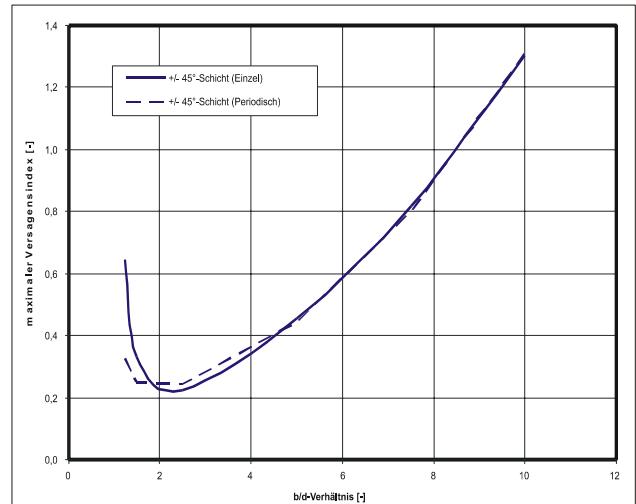


BILD 11. Verlauf der maximalen Tsai-Wu-Versagensindizes für das $[+/- 45^\circ]_s$ - Laminat

Angemerkt sei, dass der Verlauf *aller* Kurven, also für alle betrachteten Layups, ähnlich ist und in jedem Fall ein ausgeprägtes Minimum in der Umgebung von $b/d = 2$ existiert. Die Ergebnisse der Minimierung sind in folgender Tabelle festgehalten.

maximale Tsai-Wu-Versagensindizes [-]:

	Einzelscheibe	Period. Scheibe
isotrop	0,15	0,14
$[0^\circ/90^\circ]_s$; 90°-Schicht	0,18	0,21
$[+/- 45^\circ]_s$; plus 45°-Schicht	0,22	0,22
$[0^\circ/90^\circ/+/-45^\circ]_s$; 90°-Schicht	0,30	0,27
$[0^\circ/+/-45^\circ/90^\circ]_s$ (%) ; 90°-Schicht	0,21	0,20

zugehörige b/d -Verhältnisse [-] und Winkel in $^\circ$:

Isotrop	2,1; 91,1	2,0; 97,3
$[0^\circ/90^\circ]_s$; 90°-Schicht	1,8; 89,2	1,8; 92,4
$[+/- 45^\circ]_s$; plus 45°-Schicht	2,4; 60,0	1,9; 227,2
$[0^\circ/90^\circ/+/-45^\circ]_s$; 90°-Schicht	2,2; 91,1	2,0; 98,0
$[0^\circ/+/-45^\circ/90^\circ]_s$ (%) ; 90°-Schicht	2,0; 89,2	1,9; 91,4

Schließlich soll das globale Verformungsverhalten der Scheibe betrachtet werden. Die folgenden Abbildungen zeigen einige Scheibendeformationen in stark vergrößertem Maßstab.

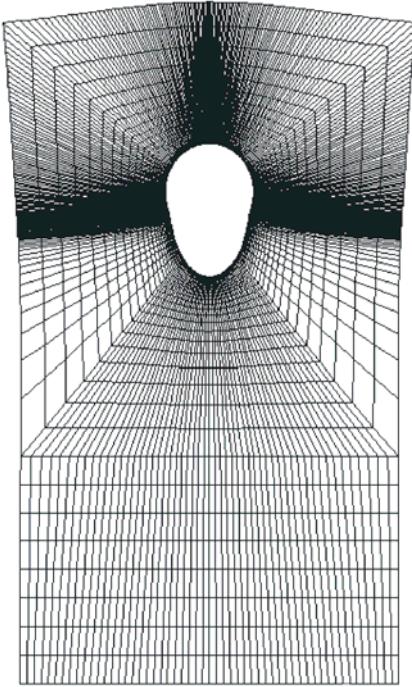


BILD 12. Skalierte Verformungsfigur der Einzelscheibe aus isotropem Material

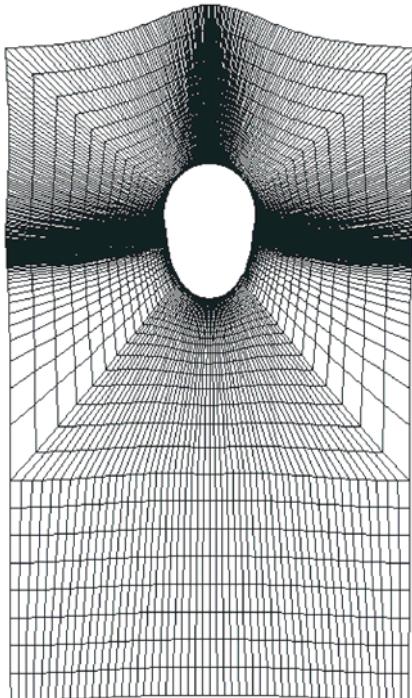


BILD 13. Skalierte Verformungsfigur der Einzelscheibe mit $[0^\circ/90^\circ]s$ -Laminataufbau

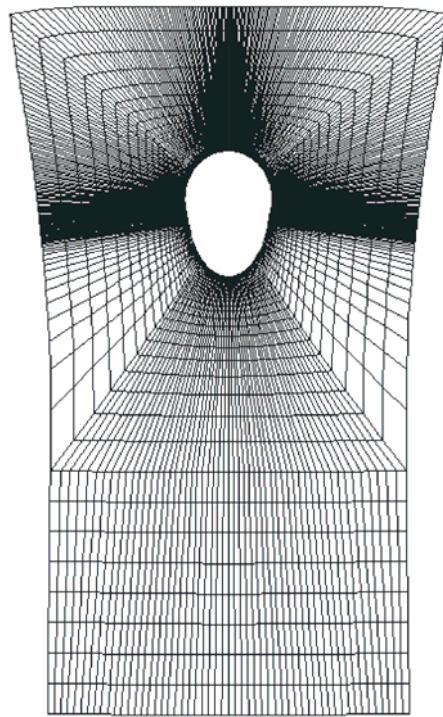


BILD 14. Skalierte Verformungsfigur der Einzelscheibe mit $[+/- 45^\circ]s$ -Laminataufbau

Beim Vergleich fällt der große Einfluss des Laminataufbaus auf das Verformungsverhalten der Scheibe auf. Man beachte etwa den Unterschied in der Querkontraktion des $[+/- 45^\circ]s$ und des $[0^\circ/90^\circ]s$ -Laminats.

Im direkten Anschluss an diese qualitativen Aussagen soll noch die relative Nachgiebigkeit des starren Bolzens betrachtet werden. Der Begriff „relative Bolzennachgiebigkeit“ wird gewählt, da der starre Bolzen keine wirkliche Nachgiebigkeit besitzt. Verglichen werden die Verschiebungen der Kraftangriffsfläche einer Vollscheibe ohne Loch mit der gelochten Scheibe ($b/d = 5$), bei einer Streckenlast von 10 N/mm. Die Abmessungen der Vollscheibe wurden so gewählt, dass die Vollscheibe der unteren Lochscheibenhälfte entspricht.

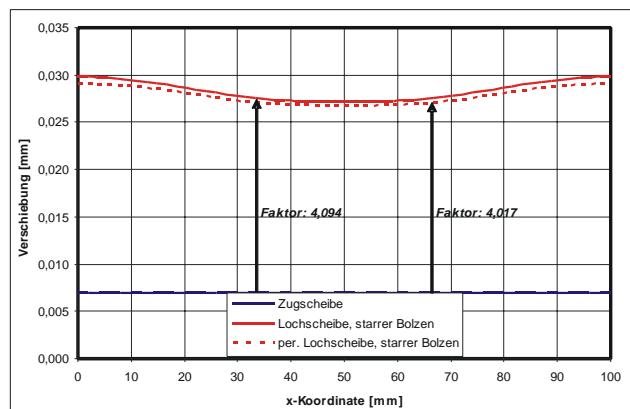


BILD 15. Verschiebung der Kraftangriffsfläche für Vollscheibe und Lochscheibe bei $[0^\circ/90^\circ]s$ -Laminataufbau

Besonders auffällig sind die großen Verschiebungen; je nach betrachtetem Layup ist die Verschiebung der Kraftangriffsfläche bis zu 4 mal so groß wie die einer Vollscheibe. Die bisherige Annahme, dass die erhöhte effektive Nachgiebigkeit der Verbindung dem Bolzen zuzuschreiben ist, entspricht nicht der Realität, sondern es handelt sich um einen ausgeprägten Scheibeneffekt.

Zuletzt soll der Einfluss des b/d -Verhältnisses auf die relative Bolzennachgiebigkeit diskutiert werden. Wählt man, motiviert durch vorige Ergebnisse, das b/d -Verhältnis zu 2 und berechnet erneut die Verschiebungen für den $[0^\circ/90^\circ]_s$ - Laminataufbau, erhält man einen maximalen Verschiebungsfaktor von 2,3.

3.2. Zwei in Reihe angeordnete starre Bolzen

Im vorigen Abschnitt wurde der Fall einer Lochscheibe mit einem Bolzen ergiebig untersucht. Nun wird die Scheibe modifiziert und mit 2 starren in Reihe angeordneten Bolzen versehen; bereits in BILD 6 wurde ein schematischer Modellaufbau gezeigt. Die Scheibe wurde für alle folgenden Untersuchungen mit den b/d -Verhältnissen 5 und 2 studiert. Auf die detaillierte Angabe der Abmessungen soll verzichtet werden.

Zunächst wird die Lastverteilung auf die beiden Bolzen bei variierendem Lochabstand (1-facher, 2-facher und 3-facher Lochdurchmesser) betrachtet. In folgender Tabelle sind die prozentualen Anteile der eingeleiteten Last auf den oberen bzw. unteren Bolzen bei den 3 Abständen angegeben. Hier wird nur Bezug auf die Einzelscheibe genommen, da die Ergebnisse für die periodische Scheibe nur geringe Unterschiede aufweisen.

Einzelscheibe (b/d=5)

Layup	Loch	Lochabstand		
		1*d RF %	2*d RF %	3*d RF %
isotrop	oben	37,8	33,49	30,7
	unten	62,2	66,51	69,3
$[0^\circ/90^\circ]_s$	oben	45,2	38,9	36,0
	unten	54,8	61,1	63,9
$[+/- 45^\circ]_s$	oben	32,12	28,85	25,6
	unten	67,87	71,15	74,3
$[0^\circ/90^\circ/+/- 45^\circ]_s$	oben	37,87	33,6	30,8
	unten	62,13	66,4	69,1
$[0^\circ/+/- 45^\circ/90^\circ]_s (%)$	oben	41,55	36,6	34,3
	unten	58,45	63,4	65,7

Layup	Loch	Lochabstand		
		1*d RF %	2*d RF %	3*d RF %
isotrop	oben	20,2	16,1	13,9
	unten	79,8	83,9	86,1
$[0^\circ/90^\circ]_s$	oben	36,8	28,4	24,2
	unten	63,2	71,6	75,8
$[+/- 45^\circ]_s$	oben	20,4	14,7	12,3
	unten	80,8	85,3	87,7
$[0^\circ/90^\circ/+/- 45^\circ]_s$	oben	20,4	16,3	14,1
	unten	79,6	83,7	85,9
$[0^\circ/+/- 45^\circ/90^\circ]_s (%)$	oben	29,7	22,9	20,0
	unten	70,3	77,1	80,0

Zunächst ist festzuhalten, dass die Verteilung der Angriffslast auf oberen und unteren Bolzen vom Laminatlayup abhängt. Bei beiden b/d -Verhältnissen fällt auf, dass der untere Bolzen mit größer werdendem Lochabstand immer mehr Last zu tragen hat. Dies ist auf die höheren Dehnungen am unteren Bolzen zurückzuführen, da dieser sich näher am Ort der Krafteinleitung befindet. Vergleicht man noch die beiden b/d -Verhältnisse, so stellt man fest, dass bei konstantem Lochabstand der untere Bolzen bei $b/d = 2$ mehr Last tragen muss als bei $b/d = 5$.

Nach der Beschreibung der Lastverteilung, wird sich nun der Scheibenbeanspruchung in Form des Spannungskonzentrationsfaktors der Umfangsspannung zugewendet. Wie zuvor bei der Lastverteilung werden nur die Werte der Einzelscheibe angegeben.

Einzelscheibe (b/d=5)

Layup	Loch	Lochabstand		
		1*d SKF	2*d SKF	3*d SKF
isotrop	oben	2,2	2,0	1,9
	unten	5,4	5,3	5,4
$[0^\circ/90^\circ]_s$	oben	5,5	4,6	4,2
	unten	11,3	10,6	10,2
$[+/- 45^\circ]_s$	oben	4,4	3,9	3,5
	unten	9,3	9,2	9,4
$[0^\circ/90^\circ/+/- 45^\circ]_s$	oben	2,2	2,0	2,0
	unten	5,4	5,3	5,4
$[0^\circ/+/- 45^\circ/90^\circ]_s (%)$	oben	2,6	2,6	2,8
	unten	7,8	7,4	7,3

Layup	Loch	Lochabstand		
		1*d SKF	2*d SKF	3*d SKF
isotrop	oben	0,9	0,7	0,6
	unten	4,4	4,4	4,4
$[0^\circ/90^\circ]_s$	oben	2,1	1,6	1,6
	unten	7,3	7,3	7,3
$[+/- 45^\circ]_s$	oben	1,7	1,1	0,8
	unten	5,7	5,7	5,8
$[0^\circ/90^\circ/+/- 45^\circ]_s$	oben	0,9	0,7	0,6
	unten	4,4	4,4	4,4
$[0^\circ/+/- 45^\circ/90^\circ]_s (%)$	oben	1,3	1,2	1,1
	unten	5,7	5,7	5,7

Bei Betrachtung der Tabelle fällt auf, dass der maximale Spannungskonzentrationsfaktor für das untere Loch stets größer als für das obere Loch ausfällt. Beim b/d -Verhältnis von 2 sind die Faktoren für beide Löcher zum Teil deutlich niedriger als bei einem Verhältnis von 5. Auf eine Darstellung der Verläufe wird verzichtet, da kaum ein Unterschied zu den Verläufen bei der Scheibe mit einem Loch besteht. Vergleicht man noch die Spannungskonzentrationsfaktoren am unteren Loch der Doppelochscheibe mit den Werten bei der Scheibe mit einem Loch, so fällt auf, dass die Faktoren der Einzelscheibe wesentlich größer sind.

Beim Tsai-Wu-Index wird auf eine detaillierte Darstellung verzichtet. Wie zu erwarten, ist das untere Loch versagensmaßgebend, da dort höhere Tsai-Wu-Indizes vorliegen. Analog zum Spannungskonzentrationsfaktor bleibt festzuhalten, dass

bei $b/d = 2$ deutlich niedrigere Werte vorliegen als bei $b/d = 5$ und dass die Tsai-Wu-Indizes bei der Einzellochscheibe wesentlich größer sind.

Abschließend soll sich dem Verformungsverhalten zugewendet werden. Untersucht wird die Verschiebung der Kraftangriffsfläche bei einer Angriffslast von 10 N/mm. Die Scheibenbreite beträgt 100 mm und die Lochdurchmesser 20 mm ($b/d = 5$), außerdem wird in der folgenden Abbildung 16 auch der entsprechende Verlauf für die Einzellochscheibe gezeigt.

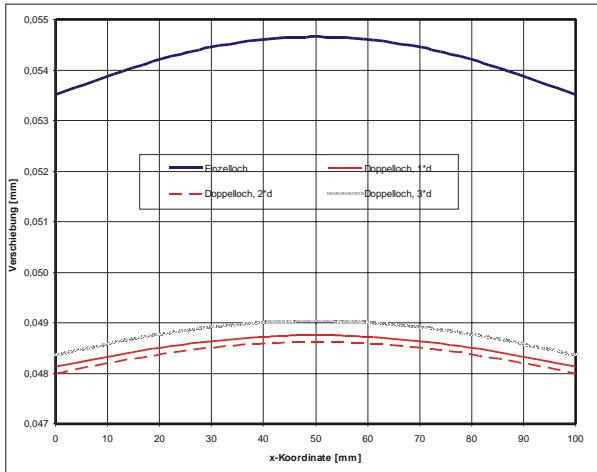


BILD 16. Verschiebung der Kraftangriffsfläche für Doppelbohrungsscheibe und Lochscheibe bei $[+/- 45^\circ]s$ – Laminat- aufbau

Bei Betrachtung der vorstehenden Abbildungen fällt auf, dass die Verschiebungen der Angriffsfläche bei der Scheibe mit nur einem Loch deutlich größer sind. Ein Vergleich mit einem b/d -Verhältnis von 2 wurde ebenfalls angestellt; für $b/d = 2$ fällt der Unterschied zwischen Einzellochscheibe und Doppelbohrungsscheibe etwas geringer aus.

3.3. Deformierbarer Bolzen

Während bisher der Bolzen als starr angenommen wurde, soll nun der Einfluss der Bolzenverformung analysiert werden. Der Bolzen wurde aus isotropem Titan modelliert (E-Modul = 103000 MPa, Querkontraktionszahl = 0,34) und im Zentrum fixiert.

In den Studien zeigte sich, dass zwischen deformierbarem und starrem Bolzen kaum ein Unterschied besteht. Daher werden die Ergebnisse nicht im Detail vorgestellt, sondern es wird auf die vorigen Abschnitte verwiesen.

Lediglich bei der Verschiebung der Kraftangriffsflächen liegen die Werte bei deformierbarem Bolzen geringfügig über denen der Scheibe mit starrem Bolzen, was auf die nun tatsächlich vorhandene BolzenNachgiebigkeit zurückzuführen ist. Jedoch bleibt festzuhalten, dass die Scheibeneffekte einen wesentlich größeren Einfluss auf die Verschiebung der unteren Kante besitzen als die Beschaffenheit des Bolzens.

Die Betrachtung des deformierbaren Bolzens in einem ebenen Modell erfasst allerdings nicht die vollständige Realität, da die

Bolzendeformation, die bei realen ein- und zweischnittigen Verbindungen etwa durch Scheren des Bolzens infolge Schubspannungen auftreten, nicht abgebildet werden können. Hier sollen weiterführende Untersuchungen mit einer wirklichen 3D-Modellierung weitere Aufschlüsse bringen.

4. FAZIT

Gleichungen zur Bestimmung der Nietnachgiebigkeit, die in der Luftfahrtindustrie zur Anwendung gelangen, weisen zumeist bei halbempirischer Natur eindimensionalen Charakter auf. Sie berücksichtigen dadurch *nicht* die räumliche Ausbreitung der Verbindung und die daraus resultierenden mechanischen Effekte. Größere Probleme entstehen zudem im Hinblick auf eine Einbindung der Anisotropie der heute eingesetzten Hochleistungsverbundwerkstoffe in diese Gleichungen.

Um die Kraftflussverteilung und Lastübertragung an ein- und zweischnittigen Niet- und Bolzenverbindungen zwischen CFK-Laminaten zu ermitteln, wurden geeignete ebene Modelle erstellt und mit Hilfe der FEM untersucht.

Als zentrale Erkenntnis ist festzuhalten, dass die erhöhte effektive Nachgiebigkeit, die bisher irrtümlich dem Bolzen zugeschrieben wurde, im Wesentlichen auf die Scheiben-deformation zurückzuführen ist. Ferner fielen in den numerischen Simulationen besonders hohe Spannungskonzentrationsfaktoren im Lochgrund auf, die aus Sicht des konstruierenden Ingenieurs besonderes Augenmerk verdienen. Die hohe Layup- und Geometrieabhängigkeit der Ergebnisse, genauer des Spannungs- und Verformungsverhaltens, lässt auf ein großes Optimierungspotential schließen.

Um zu weiterführenden Erkenntnissen zu gelangen, muss nun eine Modellierung und Analyse als dreidimensionale Struktur erfolgen.

LITERATUR

- [1] Huth, H.: Zum Einfluss der Nietnachgiebigkeit mehrreihiger Nietverbindungen auf die Lastübertragungs- und Lebensdauervorhersage. Bericht Nr. FB-172 (1984) des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit, Darmstadt.
- [2] The Composite Materials Handbook MIL 17, Volume 3: Polymer Matrix Composites: Materials, Usage, Design and Analysis. ASTM International, West Conshohocken, 2002.
- [3] Luftfahrttechnisches Handbuch 2004. LTH-Koordinierungsstelle IABG-VG.
- [4] Doelfs, Krause: Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit von CFK-Laminaten bei zweischnittigen Bolzenverbindungen. Beitrag FL 33 100-03 im Luftfahrttechnischen Handbuch 2004. LTH Koordinierungsstelle IABG-VG.
- [5] Kuhlmann, F., Wilmes, H.: Phänomenologische Untersuchung an ein- und zweischnittigen Bolzenverbindungen aus orthotropen Materialien mittels der Methode der Finiten Elemente. Interner Bericht IB 131-2000 / 08 des Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V.,

Institut für Strukturmechanik, Faserverbundtechnologie (2000).

- [6] Zerres, P.: Ermittlung der Kraftflussverteilung und der Lastübertragung an zweischnittigen Niet- und Bolzenverbindungen zwischen CFK-Laminaten. Diplomarbeit, TU Darmstadt, Institut für Mechanik, September 2005.
- [7] Jones, R. M.: Mechanics of Composite Materials. Tokyo: McGraw-Hill, 1975.
- [8] Becker, W.: Beiträge zur analytischen Behandlung ebener Laminate, Habilitationsschrift, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1993.
- [9] Becker, W.; Gross, D.: Mechanik elastischer Körper und Strukturen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2002.