

Materialparameter für Sandwichkonstruktionen

E. Nast

Die Kenntnis effektiver elastischer Moduln von hexagonalen Honeycomb-Kernstrukturen, wie sie bei Sandwichschalen und -platten verwendet werden, ist von grundlegender Bedeutung für die Auslegung derartiger Flächentragwerke. Sogenannte 'verschmierte' Kernparameter werden besonders benötigt, um das Materialverhalten der Sandwichkonstruktion bestimmen zu können. Im Beitrag werden analytische Methoden und Modelle vorgeschlagen, die eine theoretische Vorhersage 'verschmierter' Kernparameter gestatten. Diese theoretischen Werte werden mit experimentellen Daten verglichen, die über Grundversuche der Werkstofftechnik ermittelt wurden. Im allgemeinen wird eine gute Übereinstimmung zwischen experimentellen Daten und theoretischer Vorhersage erreicht.

1 Einleitung

Sandwichplatten und -schalen haben vielfältige technische Anwendungen. Besonders in der Luft- und Raumfahrt (z.B. Satellitenstrukturen, Leitwerke, Rotorblätter und Küchenkomplexe) können sie als state-of-art Material betrachtet werden. Doch auch im Schiffbau (z.B.: Bootsrümpfe, Sportyachten, Decksaufbauten) und im Bauwesen (z.B.: Wandbautafeln, Deckenkonstruktionen) sind Sandwichstrukturen weit verbreitet. Gegenwärtig vollzieht sich im Automobil- und Fahrzeugbau sowie in einigen Bereichen des Werkzeugmaschinenbaus ein Wandel bei den Konstruktionswerkstoffen und damit bei den Produktions- und Berechnungsmethoden.

Folglich gewinnen Fragen der Modellierung und Berechnung des Materialverhaltens von Sandwichkonstruktionen mit der zunehmenden Verwendung von Leichtbaustrukturen an Bedeutung. Deren Auslegung erfolgt in der Regel über Finite Elemente Programme, wobei die übergroße Mehrzahl aller FE-Programme Sandwichtragwerke als Spezialfall der mehrschichtigen Lamine betrachtet. Dabei muß der Wabenkern als eine Einzelschicht eines Paketes bzw. Verbundes behandelt werden.

Allerdings berücksichtigt keines dieser Programme, daß die Bestimmung elastischer Konstanten in Schichtkoordinatensystemen (je drei Elastizitäts- und Schubmoduln sowie Querkontraktionen), die als Programmeingabedaten erforderlich und für echte Lamine (z.B.: UD-Verbunde) relativ eindeutig sind, bei Honeycomb-Kernstrukturen durchaus Schwierigkeiten bereiten kann.

Diese elastischen Konstanten, die als 'verschmiert' über die gesamte Kernschicht betrachtet werden, sind Funktionen einer Vielzahl geometrischer Größen, des Wabenwandmaterials, des verwendeten Klebers usw.

Betrachtet man die Literatur zu diesem Fragenkomplex, so finden sich einige Veröffentlichungen (z.B. Vinson, 1986 [1], Zhang und Ashby, 1992 [2] sowie Grediac, 1993 [3]), die sich allerdings mehrheitlich mit der theoretischen Vorhersage von Schubmoduln befassen. Leider stimmen derartige Vorhersagen teilweise nicht mit experimentellen Vergleichsdaten überein.

In diesem Beitrag werden nun einige Materialmodelle aus der Literatur verglichen, über Grundexperimente verifiziert und Empfehlungen hinsichtlich der Anwendbarkeit der theoretischen Gleichungen gegeben.

2 Grundannahmen

Die im Beitrag vorgestellten Untersuchungen und Berechnungen beschränken sich auf Sandwichplatten mit glasfaserverstärkten Deckschichten und einem Wabenkern aus hexagonalen, regelmäßigen Zellstrukturen.

Aus fertigungsbedingten Gründen weisen die Wabenwände der realen Wabe (Bild 1) eine leichte S-Form auf, weichen also vom idealen Hexagon ab. Dennoch ist keine Arbeit bekannt, die diese Abweichungen

berücksichtigt. Daher wird auch im vorliegenden Beitrag das Problem auf die idealisierte Zelle nach Bild 2 reduziert.

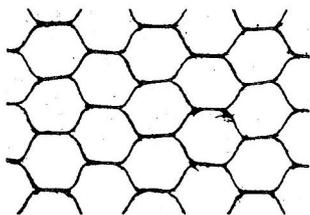


Bild 1: Realer Wabenkern

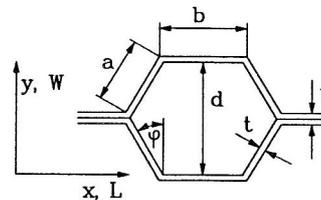


Bild 2: Idealisierter Wabenkern

Die Testkörper bestanden aus glasfaserverstärkten Deckschichten mit je zwei unterschiedlichen Lagen Gewebe (siehe Tabelle 2) sowie einem hexagonalen Wabenkern mit annähernd isotropen und homogenen Materialeigenschaften des Zellgrundmaterials. Alle geometrischen Parameter, die den Sandwichkern charakterisieren, sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Parameter	Größe	Bezeichnung
$a = b$	1.85 mm	Wabenwandlänge
d	3.2 mm	Wabenweite
t	0.09 mm	Wabenwandstärke
t'	0.18	Doppelte Wabenwandstärke
h	19.0 mm	Kernhöhe
φ	30°	Wabenwinkel

Tabelle 1: Geometrieparameter

Parameter		G_{XZ}	E_X [MPa]	E_Y	ν_{XY}	Dicke [mm]
Innere Lage	[17]	3775	23100	24600	0.08	0.19
Äußere Lage	[17]	3610	19500	20100	0.12	0.09
Kunstharzzwischenschicht	[16]	1231	3200	3200	0.3	0.4
Wabenwandmaterial (Index f)	[18]	423	1100	1100	0.3	0.09

Tabelle 2: Materialparameter

3 Materialtests

Für die Bestimmung der neun orthotropen Materialkonstanten des Kernes wurden Schubversuche in der Ebene des Tragwerkes und transversal zur Mittelebene, Zug- und Druckversuche sowie die Ermittlung der Poissonkonstanten durchgeführt. Dazu standen eine rechnergesteuerte Universalprüfmaschine TIRAtest 2410 der TIRA Maschinenbau GmbH mit 10 kN und 1 kN Kraftaufnehmer sowie ein Ansetzdehnungsaufnehmer DSA 25/10 ($\pm 10\%$ Dehnung) und ein Laserabstandsmeßsystem auf Triangulationsbasis zur Verfügung. Die Experimente wurden auf den linear-elastischen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurven beschränkt.

3.1 Elastizitätsmoduln

Für die Ermittlung der Elastizitätsmoduln in den drei orthogonalen Schichtkoordinatenrichtungen sind unterschiedliche Verfahren notwendig.

Der Elastizitätsmodul E_Z , senkrecht zur Sandwichmittelfläche, kann recht einfach nach DIN 53 291 [11] bestimmt werden. Dabei befinden sich die Probekörper, wie in Bild 4 angedeutet, zwischen zwei steifen Drucktellern. Als Probengröße wurde ein Quadrat der Kantenlänge 50 mm gewählt. Prinzipiell können sowohl stabilisierte (Proben mit Deckschicht) als auch nicht stabilisierte (ohne Deckschicht) Probekörper verwendet werden. Eine entsprechende Stabilisierung erhöht den Druckelastizitätsmodul um ca. 5 %. Beide Konfigurationen wurden für diesen Beitrag getestet, wobei die stabilisierten Proben auf einen Wert von $E_Z = 82.1$ MPa und die nicht stabilisierten auf $E_Z = 78.5$ MPa führten.

Für die Bestimmung der Elastizitätsmoduln in L-Richtung E_X und in W-Richtung E_Y (Bild 2) des Wabenkerns wurden gleichfalls stabilisierte und nicht stabilisierte Probekörper verwendet. Die Überlegungen hinsichtlich der stabilisierten Proben beruhen auf dem rheologischen Modell aus Bild 3. Hierbei wird von einer Parallelschaltung von drei Hookeschen Körpern, also einer gleitfreien Verbindung von faserverstärkten Deckschichten und Kunstharzübergang zum Kern (zusammengefaßt als Deckschicht) mit der Kernstruktur, ausgegangen. Bei bekannten Elastizitätsmoduln der Deckschichten und des Kunstharzes kann somit auf den Modul der 'verschmierten' Wabenstruktur geschlossen werden.

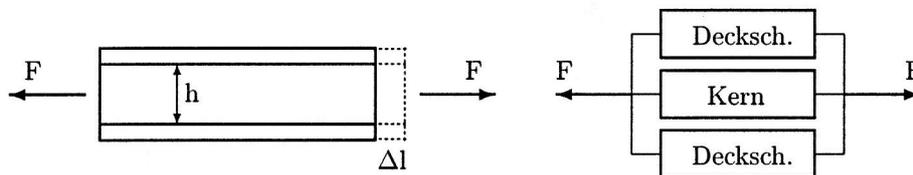


Bild 3: Sandwichstruktur unter Zugbelastung

Für diesen Versuch nach Bild 5 wurde das Kernmaterial einer 300 mm langen und 50 mm breiten Probe an jedem Ende 50 mm tief entfernt und durch einen Stahlblock ersetzt, um die Einspannung in der Prüfmaschine realisieren zu können.

Eine Mittelwertbildung aus Tangenten- und Sekantenmodul liefert nach Einsatz in das rheologische Modell die Elastizitätsmoduln $E_X = 171.8$ MPa und $E_Y = 137.8$ MPa.

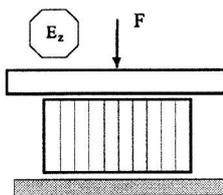


Bild 4: Druckversuch

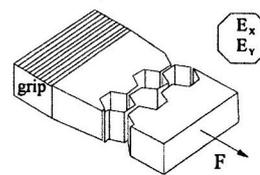


Bild 5: Zugversuch

Diese Parameter sind allerdings deutlich höher als jene, die an reinem Wabenmaterial ermittelt werden konnten.

Gleichfalls 300 mm lange und 50 mm breite Proben wurden an ihren Enden auf ca. 50 mm mit einem Gemisch aus Kunstharz und Tixotropiermittel ausgegossen, da das reine Wabenmaterial unter dem Druck des Spannzeuges ausknicken würde.

Hier erreichten die Elastizitätsmoduln lediglich Werte von $E_X = 0.494$ MPa und $E_Y = 0.354$ MPa.

Offensichtlich sind weitere Untersuchungen hinsichtlich der Berücksichtigung von Kunstharz, das während des Herstellungsprozesses von den Glasfaserprepregs an die Zellwände der Wabe gelangt, notwendig. Auf der anderen Seite entspricht das Verhalten der nicht stabilisierten Wabe im Zugversuch sicherlich nur bedingt dem des Kernes im realen Verbund.

3.2 Schubmoduln

Schubversuche wurden in allen drei Ebenen der Materialsymmetrie durchgeführt. Hierbei ist zunächst auffällig, daß zur Bestimmung der Schubmoduln in der $x-z$ und in der $y-z$ Ebene, also in Ebenen senkrecht zur Sandwichmittelfläche, sehr zahlreiche Testmethoden vorgeschlagen werden. Am weitesten verbreitet sind dabei die amerikanische Norm ASTM C 273 [14] und die DIN 53 294 [12]. Letztere wurde für diese Untersuchungen herangezogen. Dazu wurden, wie in Bild 6 schematisch dargestellt, steife Stahlplatten auf 200 mm lange und 50 mm breite Proben aufgeklebt. Zu beachten ist, daß die Kraftwirkungslinie durch die Spitzen der Stahlplatten und die Ecken des Probekörpers verläuft.

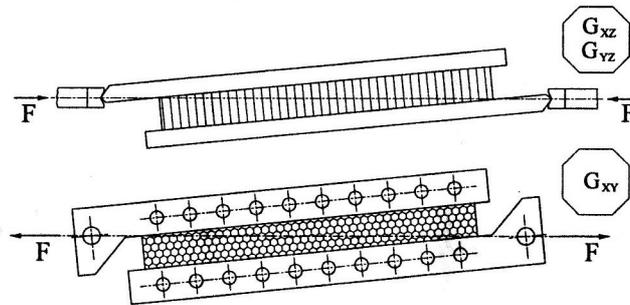


Bild 6: Sandwichstruktur im Schubversuch

Da bei diesem Versuch Schubverformungen fast ausschließlich im hexagonalen Wabenkern auftreten, sind nur geringfügige Unterschiede zwischen den Schubmoduln von stabilisierten und nicht stabilisierten Proben feststellbar. Die stabilisierten Probekörper führten im Mittelwert aus Tangenten- und Sekantenmodul auf $G_{XZ} = 29.5$ MPa und $G_{YZ} = 24$ MPa .

Erstaunlich ist, daß trotz der zunehmenden Verbreitung von Sandwichwerkstoffen mit Wabenkernen keine Norm oder Empfehlung zur Ermittlung des Schubmoduls G_{XY} in der Sandwichebene zu existieren scheint. Daher wird hier eine neue Testkonfiguration vorgeschlagen. Sie stellt eine Weiterentwicklung der amerikanischen Norm ASTM D 4255-83 Method-A (two-rail shear test) [13] dar, die der Schubmodulbestimmung von faserverstärkten Laminaten dient. Allerdings ist es, bedingt durch hohe Kompressibilität des Kernwerkstoffes, sehr schwierig, das Sandwich an den Seiten zu spannen. Als Ausweg bietet sich hier an, die Probe und die seitlichen Stahlschienen (Bild 6) durch Bolzen mit entsprechender Passung zu verbinden. Mit dieser Versuchseinrichtung ergab sich ein Schubmodul von 0.08 MPa für nicht stabilisierte und von 20.9 MPa für stabilisierte Probekörper.

3.3 Poissonkonstanten

Die Poissonkonstanten des hexagonalen Wabenkerns können aus der Versuchsanordnung für die Elastizitätsmoduln E_X und E_Y , also dem Zugversuch und unter Verwendung nachfolgender Beziehung bestimmt werden:

$$\frac{E_i}{\nu_{ij}} = \frac{E_j}{\nu_{ji}} \quad (1)$$

Dazu ist es erforderlich, die Dehnung in Längsrichtung der Probe über den Ansetzdehnungsaufnehmer und gleichzeitig die Dehnung über Breite und Dicke des Probekörpers mit Hilfe eines Laserabstandsmeßsystems aufzunehmen. Die aus derartigen Untersuchungen gewonnenen Querkontraktionen können Tabelle 3 entnommen werden.

4 Theoretische Modelle

Ein wesentliches Ziel dieses Beitrages besteht darin, einige Hinweise und Empfehlungen zur effektiven Modellierung des wabenartigen Zellkerns sowie der Bestimmung von effektiven bzw. 'verschmierten' Moduln zu geben. Bei einer entsprechenden Literaturrecherche konnte jedoch kein Paper und kein Buch

gefunden werden, das sich mit der theoretischen Vorhersage aller neun unabhängigen Materialkonstanten des orthotropen Wabenkerns beschäftigt. Dies ist besonders bedenklich, da derartige Moduln in der Regel als Eingabedaten für numerische Analysen (z. B. mit Finite Elemente Programmen) notwendig sind. Dabei werden 'verschmierte' Materialeigenschaften des Kerns in einer mehrschichtigen Berechnung verwendet.

Die übergroße Mehrzahl aller analysierten Beiträge und wissenschaftlichen Publikationen befaßt sich mit einer Vorhersage von Materialparametern transversal zur Sandwichmittelfläche. Vinson (1986 [1]), Zhang und Ashby (1992 [2]) und Kobelev u. a. (1984 [8]) geben beispielsweise sehr ähnliche Ausdrücke für den Druckelastizitätsmodul E_Z an. Im Beitrag von Vinson (1986) wird er wie folgt berechnet:

$$E_Z = \frac{8}{3} \frac{t}{d} E_f \quad , \quad (2)$$

was auf $E_Z = 82.5$ MPa führt.

Die vorgeschlagenen Formeln zur Ermittlung der bei Sandwichkonstruktionen extrem bedeutsamen transversalen Schubmoduln sehen bei Kobelev u. a. (1984 [8]) und bei Alexandrov u. a. (1960 [7]) sehr ähnlich aus und differieren lediglich um den Faktor 1.2 in ihren G_{YZ} -Werten:

$$G_{YZ} = [1.2] \frac{G_f t}{\sqrt{3} a} \quad ; \quad (3)$$

$$G_{XZ} = 0.879 \frac{G_f t}{a} \quad (4)$$

Beide Autoren geben weiterhin Empfehlungen bezüglich der Elastizitätsmoduln in der Sandwichebene, wobei sehr große Differenzen zu den Werten nach Klintworth und Stronge (1988 [9]) bzw. nach Gibson u. a. (1982 [21]) auftreten. In der letzten Arbeit wird gleichfalls eine Berechnungsmöglichkeit für den Schubmodul in der Sandwichebene G_{XY} vorgeschlagen:

$$E_X = 2.309 \frac{E_f t^3}{a^3} \quad ; \quad (5)$$

$$E_Y = 2.309 \frac{E_f t^3}{a^3} \quad ; \quad (6)$$

$$G_{XY} = 0.582 \frac{E_f t^3}{a^3} \quad (7)$$

Poissonkonstanten werden besonders selten in der Literatur beschrieben. Zhang und Ashby (1992) geben allerdings Empfehlungen für die Querkontraktionen in transversaler Koordinatenrichtung an:

$$\nu_{ZX} = \nu_{ZY} = \nu_f \quad ; \quad (8)$$

$$\nu_{XZ} = \frac{E_X}{E_Z} \nu_f \approx 0 \quad ; \quad (9)$$

$$\nu_{YZ} = \frac{E_Y}{E_Z} \nu_f \approx 0 \quad (10)$$

In der Sandwichmittelebene gehen sowohl Caddock (1991) als auch Gibson (1982) von

$$\nu_{XY} \approx \nu_{YX} \approx 1.0 \quad (11)$$

aus.

5 Experimentelle und Theoretische Werte im Vergleich

In Tabelle 3 wurden theoretisch bestimmte 'verschmierte' Materialparameter des hexagonalen Wabenkerns mit den Versuchsergebnissen verglichen. Dabei wird nach stabilisierten und nicht stabilisierten Proben unterschieden. Angaben zu stabilisierten Proben für die Elastizitätsmoduln E_X und E_Y beziehen sich auf das rheologische Modell.

Freie Einträge im Bereich der theoretischen Modellierung verdeutlichen nochmals, wie wenig Autoren sich mit dem Problemkreis der Materialparameter in der Sandwichebene auseinandersetzen.

Modell / Experiment	Parameter [MPa]						ν_{XY}	ν_{XZ}	ν_{YZ}
	G_{XZ}	G_{YZ}	G_{XY}	E_X	E_Y	E_Z			
Vinson [1]	19.8	11.8	—	—	—	82.5	—	—	—
Zhang [2]	17.8 ... 19.7	11.8	—	—	—	82.4	—	0	0
Grediac [3]	17.8 ... 19.7	11.8	—	—	—	—	—	—	—
Stamm [4]	19.8	11.8	—	—	—	—	—	—	—
Wiedemann [5]	19.8	11.8	—	—	—	—	—	—	—
Penzien [6]	17.8	11.8	—	—	—	—	—	—	—
Alexandrov [7]	18.1	11.8	—	16.9	16.9	—	0.5	—	—
Kobelev [8]	18.1	14.1	15.5	16.9	16.9	82.4	0.5	—	—
Klintworth [9]	—	—	0.22	0.29	0.29	—	1	—	—
Caddock [10]	—	—	—	0.29	0.29	—	1	—	—
Nagao [19]	17.8 ... 19.7	11.8	—	—	—	—	—	—	—
Akasaka [20]	17.8 ... 19.7	11.8	—	—	—	—	—	—	—
Gibson [21]	—	—	0.07	0.29	0.29	—	1	—	—
Kelsey [22]	17.8 ... 19.7	11.8	—	—	—	—	—	—	—
Shi [23]	17.8	11.8	—	—	—	—	—	—	—
Ueng [24]	10	10	—	—	—	—	—	—	—
Abd El-Sayed [25]	—	—	—	0.29	0.1	—	0.99	—	—
Stabilisiert:	29.5	24	20.9	172	138	82.1	0.12	0.52	0.58
Nicht Stabilisiert:	27	21.7	0.08	0.49	0.36	78.5	1.18	0.001	0.001

Tabelle 3: Vergleich von Experiment und Theorie

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden theoretische Vorhersagen für effektive elastische Moduln von hexagonalen Wabenkernen, die auf Überlegungen bezüglich der Zellstruktur beruhen, untersucht. Diese theoretisch bestimmten Parameter werden mit den Ergebnissen von Materialtests an regelmäßigen hexagonalen Kernen sowie an Sandwichverbunden verglichen. Dabei können nachfolgende abschließende Einschätzungen getroffen werden:

- Generell können effektive bzw. 'verschmierte' Moduln für hexagonale Wabenkerne aus theoretischen Überlegungen gewonnen werden. Dadurch werden zeit- und kostenintensive Versuche ersetzbar.
- Sandwichkonstruktionen sind im Betrieb vielfach Schubbelastungen ausgesetzt. Daher werden Schubmoduln in transversalen Ebenen (G_{XZ} , G_{YZ}) in der Literatur besonders häufig untersucht und entsprechende Modelle vorgeschlagen. Allerdings liefert die Mehrzahl dieser Modelle um etwa 40% zu kleine Parameter. Diese Aussage, die auf den eigenen Messungen basiert, wird auch durch das Werkstoffleistungsblatt WL 5.3650 [15], in welchem Mindestwerte der Schubmoduln festgelegt sind, bestätigt. Im Experiment traten keine signifikanten Differenzen zwischen reinem Wabenmaterial und dem Verbund auf.
- Vinson (1986), Zhang und Ashby (1992) und Kobelev u. a. (1984) stellen Formeln für den Druckelastizitätsmodul E_Z auf, die sehr einfach sind und in hervorragender Weise mit dem Experiment übereinstimmen. Unterschiede zwischen stabilisierten und nicht stabilisierten Proben liegen bei ca. 5%.
- Elastizitätsmoduln in Sandwichebene E_X und E_Y sind besonders schwer zu bestimmen. Weder Versuche an reinen Waben, die sehr gut mit den Vorhersagen von Gibson (1982) übereinstimmen, noch Tests an stabilisierten Proben unter Berücksichtigung des hier vorgeschlagenen rheologischen Modells werden exakt das Verhalten des Kernmaterials widerspiegeln. Im Verbund gelangt während der Herstellung des Sandwichmaterials versteifendes Kunstharz an die Wabenwände. Dieser versteifende Harzeinfluss ist bisher noch unzureichend betrachtet.
- Eine neuartige Vorrichtung zur experimentellen Analyse des Schubmoduls in Sandwichebene (G_{XY}) wurde entwickelt und im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt. Mit ihr ist es relativ einfach, unter hoher

Genauigkeit den Schubmodul zu bestimmen. Auf der theoretischen Seite wird nur von Gibson (1982) ein Modell vorgeschlagen, das mit dem Experiment korreliert.

- Experimentelle Untersuchungen zu den Poissonkonstanten sind besonders schwierig und zeitaufwendig. Auf Grund der teilweise sehr geringen Querdehnungen konnten nur durch Einsatz eines Laserabstandsmeßsystems und bei relativ großer Streubreite die Querkontraktionen ermittelt werden.

Literatur

- [1] Vinson, J.R.: Optimum design of composite sandwich panels subjected to uniaxial compression, AIAA-J., Vol. 10, No. 24, (1986), 1690 – 1696.
- [2] Zhang, J.; Ashby, M.F.: The out-of-plane properties of honeycombs, Int. J. Mech. Sci., Vol. 34, No. 6, (1992), 475 – 489.
- [3] Grediac, M.: A finite element study of the transverse shear in honeycomb cores, Int. J. Solids Structures, Vol. 30, No. 13, (1993), 1777 – 1788.
- [4] Stamm, K.; Witte, H.: Sandwichkonstruktionen, Berechnung, Fertigung, Ausführung, Springer-Verlag, Wien, New York, (1974).
- [5] Wiedemann, J.: Leichtbau Band 1: Elemente, Springer-Verlag, Berlin u.a., (1986).
- [6] Penzien, J., Didriksson, T.: Effective shear modulus of honeycomb cellular structure, AIAA-J., Vol. 2, No. 3, (1964), 531 – 535.
- [7] Александров, А.Я. и др.: Расчет трехслойных панелей, Москва, Оборонгиз, (1960).
- [8] Кобелев, В.Н., Коварский, Л.М., Тимофеев, С.И.: Расчет трехслойных конструкций, Москва, Машиностроение, (1984).
- [9] Klintworth, J.W.; Stronge, W.J.: Elasto-plastic yield limits and deformation laws for transversely crushed honeycombs, Int J. Mech. Sci., Vol. 30, No. 3/4, (1988), 273 – 292.
- [10] Caddock, B.D.; Evans, K.E.; Masters, I.G.: Honeycomb cores with a negative Poisson's ratio for use in composite sandwich panels, Composites - Design, Manufacture and Application, Proc. of the 8th ICCM, Vol. 1, 1991, 3.E.1 – 3.E.10.
- [11] DIN 53 291 – Prüfung von Kernverbunden – Druckversuch senkrecht zur Deckschichtebene.
- [12] DIN 53 294 – Prüfung von Kernverbunden – Schubversuch.
- [13] D 4255-83, Standard guide for testing in-plane shear properties of composite laminates, ASTM Standards and literature references for composite materials, 2nd ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1990).
- [14] C 273-61, Standard guide for testing in-plane shear properties of composite laminates, ASTM Standards and literature references for composite materials, 2nd ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1990).
- [15] Werstoffleistungsblatt WL 5.3650, Luft- und Raumfahrt – Waben hexagonal aus Polyamidpapier phenolharzgebunden gehärtet, Beuth Verlag, Köln
- [16] Werstoffleistungsblatt WL 5.3600, Luft- und Raumfahrt – Phenol Preßharz nach Kunststoffhandbuch, Beuth Verlag, Köln.
- [17] Meder, J.; Prüß, M.: Experimentelle Ermittlung einiger Festigkeits- und Steifigkeitswerte von Sandwichplatten aus Glasfaser-Phenolharzprepreg, Diplomarbeit, Fachhochschule Berliner Tor Hamburg, (1993).

- [18] Albracht, F.: Bestimmung von Materialparametern bei Sandwichbauteilen, Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, (1995).
- [19] Nagao, H.: The shear modulus of honeycomb cores, Proc. 9th Japan. Nat. Congress Appl. Mech., (1959), 97 – 100
- [20] Akasaka, T.; Takagishi, T.: The shear modulus of foil honeycomb sandwich structures, Trans. Japan. Soc. Aero Space Sci., Vol. 2, No. 3, (1959), 83 – 90
- [21] Gibson, L.J.; Ashby, M.F.; Schajer, G.S.; Roberson, C.I.: The mechanics of two-dimensional cellular materials, Proc. R. Soc. London. Vol. 382, (1982), 25 – 42
- [22] Kelsey, S.; Gellatly, R.A.; Clark, B.W.: The shear modulus of foil honeycomb cores, Aircraft Engineering, (1959), 294 – 302
- [23] Shi, G.; Tong, P.: Local Buckling of Honeycomb Sandwich Plates Under Action of Transverse Shear Forces, AIAA Journal, Vol. 32, No. 7, (1994), 1520 – 1524
- [24] Ueng, C.E.S.; Kim, T.D.: Shear Modulus of Core Materials with Arbitrary Polygonal Shape, Computers Structures, Vol. 16, No. 1-4, (1983), 21 – 25
- [25] Abd El-Sayed, F.K.; Jones, R.; Burgess, I.W.: A theoretical approach to the deformation of honeycomb based composite materials, Composites, (Oct. 1979), 209 – 214

Anschrift: Eckart Nast, M.Sc.; Universität der Bundeswehr Hamburg, FB ET / Technische Mechanik, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, (eckart.nast@asme.org)