

# Untersuchungen zu lokalen Stabilitätseffekten bei offenen Sandwichdeckhäuten unter Druckbeanspruchung

M. Neumeister, H. Rapp  
 Universität der Bundeswehr München, Institut für Leichtbau

## Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Versagensverhalten einer gitterartigen Sandwichdeckhaut unter axialer Druckbeanspruchung untersucht. Vergleiche von theoretischen Vorhersagen mit Versuchsergebnissen haben gezeigt, dass die bisher von vollflächigen Sandwichdeckhäuten abgeleiteten Berechnungsmodelle das reale Versagensverhalten gitterartiger Deckhäute unter Druckbeanspruchung nicht wiedergeben können. Auswertungen des Last-Verformungsverhaltens zeigen, dass sich einzelne Gitterstäbe mit zunehmender Last kontinuierlich verformen. Die Auswertung von Schliiffbildern zeigt weiterhin, dass die lastübertragenden Stäbe im lastfreien Zustand deutliche Vorverformungen aufweisen. Es werden analytische Berechnungsmodelle abgeleitet, die das Verhalten der vorverformten Gitterstäbe unter axialer Drucklast beschreiben. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse dieser Berechnungsmodelle mit experimentell ermittelten Bruchlasten zeigt eine gute Übereinstimmung. In einem weiteren Schritt werden repräsentative Modelle auf Basis der an realen Proben ermittelten geometrischen Kenngrößen erstellt. Mit Hilfe dieser repräsentativen Modelle ist eine realistische Abschätzung des Tragvermögens von Sandwichplatten mit gitterartigen Deckhäuten möglich.

## 1 EINLEITUNG

Die Sandwichbauweise stellt eine klassische Methode des Leichtbaus zur Konstruktion sehr leichter und fester Strukturen mit hohen Biegesteifigkeiten dar. Die Deckhäute bestehen dabei üblicherweise aus dünnen und durchgehend geschlossenen Metall- oder Faserkunststoffverbundschichten. Als Kernwerkstoffe kommen Schäume oder Wabenstrukturen zum Einsatz.

Muss das Gewicht der ohnehin schon sehr leichten Sandwichstrukturen weiter gesenkt werden, so können die geschlossenen Deckhäute durch „offene“ Deckhäute ersetzt werden. In diesem Fall besteht eine Deckhaut nur noch aus einem durch einzelne Faserstränge gebildeten Gitter (BILD 1).



BILD 1. Beispiel einer Sandwichplatte mit gitterartiger Deckhaut

Für die weiteren Untersuchungen werden Sandwichplatten, bestehend aus „offenen“ Deckhäuten und Wabenkernen, betrachtet. Derartige Sandwichplatten kommen z.B. in Solarpanels für Satelliten zum Einsatz [1].

Bei der Auslegung von Sandwichstrukturen sind verschiedene Versagensmodi zu unterscheiden: Während es im Falle einer Zugbeanspruchung zu einem Zugversagen der Deckhäute kommt, tritt bei einer Druck- oder Biegebeanspruchung meist ein Instabilitätsversagen (Deckhautknittern) der druckbelasteten Deckhaut auf. Die damit verbundenen Festigkeiten liegen in der Regel deutlich unter der Druckfestigkeit des Deckhautwerkstoffes.

Im Falle der klassischen Sandwichbauweise mit geschlossenen Deckhäuten und Wabenkernen gilt für das Deckhautknittern [2]:

$$(1) \quad \sigma_{krit} = k \sqrt{\frac{E_d \cdot E_k \cdot t}{h}} \quad \text{mit } k = 0,3 \dots 0,816 .$$

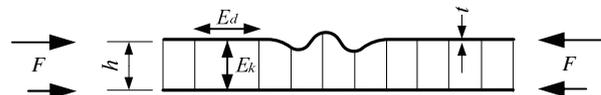


BILD 2. Deckhautknittern bei einer Sandwichstruktur

Der Vergleich mit Experimenten zeigt, dass für Sandwichplatten mit offenen Deckhäuten diese Beziehung das Versagen nicht richtig beschreibt und zusätzliche Überlegungen notwendig sind [3].

## 2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Die experimentellen Untersuchungen werden an Vierpunktbiegeproben durchgeführt. Neben den Bruchlasten werden das Last-Verformungs- sowie das Bruchverhalten ausgewertet. Die für die Berechnungen benötigten Kenngrößen der Stäbe werden aus Schliiffbildern gewonnen.

### 2.1 Probekörper

Die Probekörper wurden von der Firma EADS-Astrium zur Verfügung gestellt (BILD 3). Es handelt sich dabei um 4-Punkt Biegeproben, die in den Lasteinleitungsbereichen mit einem Holzkern und zusätzlichen Dopplern auf den Deckhäuten verstärkt sind.

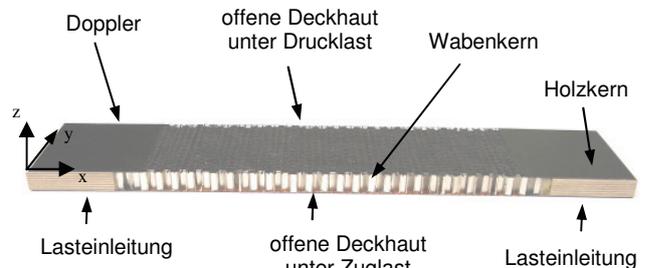


BILD 3. Probekörper für Vierpunktbiegeversuche

Es werden drei Konfigurationen offener Deckhäute untersucht, diese unterscheiden sich im Wesentlichen nur in der Gitterkonstante  $g$  (BILD 4).

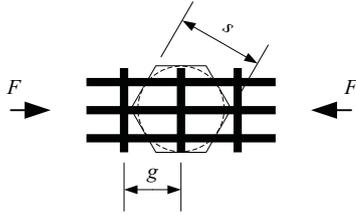


BILD 4. Kenngrößen der untersuchten Sandwichkonfigurationen

Das lokale Verformungsverhalten der Gitterstäbe wird durch deren Einzelbiegesteifigkeit und damit durch deren Querschnittsform wesentlich beeinflusst. Eine Auswertung von Schliffbildern zeigt, dass sich bei den meisten Stäben kein Rechteck-, sondern ein nahezu elliptischer Querschnitt einstellt. Weiterhin verbleibt nach der Verklebung der offenen Deckhaut mit der Wabe an einigen Stabquerschnitten überschüssiger Klebstoff.

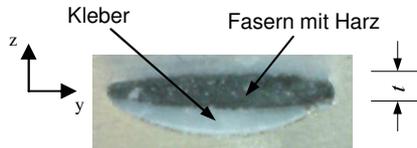


BILD 5. Querschnitt eines lastübertragenden Stabes

Da in den Deckhäuten auch Stäbe ohne solche Klebstoffreste vorkommen, stellen diese die schwächste Querschnittsform dar und sind somit für das Tragvermögen relevant. Bei der Berechnung der Biegesteifigkeiten der Stäbe wird die evtl. vorhandene zusätzliche Klebstoffschicht daher vernachlässigt.

**2.2 Versuchsergebnisse**

Aus den experimentell ermittelten Bruchlasten folgen unter der Annahme einer gleichmäßigen Lastverteilung die gemittelten Lasten für die einzelnen Stäbe (TABELLE 1).

TABELLE 1. Versuchsergebnisse

Probekörper	$g$	Bruchlast	mittlere Stablast
Nr.	[mm]	[N]	[N]
1	6,8	479	32,5
2	4,5	394	39,1
3	3,0	746	55,2

Es zeigt sich, dass mit kleiner werdender freier Länge die Stäbe höhere Lasten ertragen können.

Weiterhin erfolgt eine Auswertung der Kraft-Weg-Verläufe (BILD 6). Da eine Messung der Verformung an der Probe selbst aufgrund des Versuchsaufbaus und der Probekörper nicht möglich ist, wird im Weiteren neben der Kraft der Maschinenweg betrachtet.

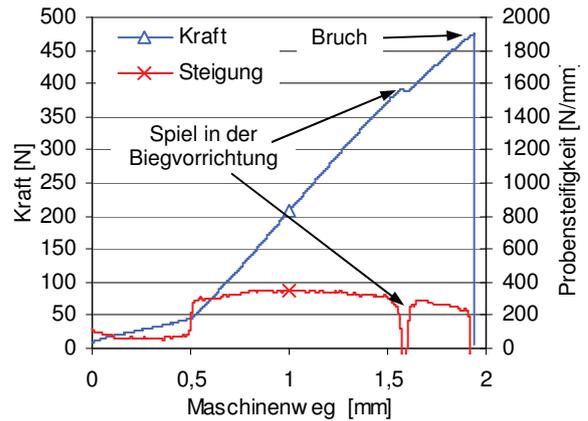


BILD 6. Last-Verformungsverhalten eines Probekörpers

Nach Setzvorgängen nimmt die Last bis zum Bruch bei ca. 470N kontinuierlich zu. Ab einem Maschinenweg von 1mm bzw. einer Last von 200N, zeigt sich dabei eine progressive Verringerung der Probensteifigkeit (in Bild 6 als Steigung der Kraft-Verformungskurve dargestellt). Der Einbruch der Steifigkeit bei 390N ist auf Spiel in der Vorrichtung zurückzuführen.

**2.3 Bruchbild**

Das Versagen der Biegeproben tritt in der druckbeanspruchten Deckhaut in Form von gebrochenen lastübertragenden Stäben auf. Eine Auswertung von Videoaufnahmen der Probekörper während des Versuches zeigt, dass die Biegeverformungen der Stäbe auf die Bereiche zwischen zwei Querstäben, beziehungsweise auf die Größe einer Wabenzelle mit dem Innenkreisdurchmesser  $s$ , begrenzt sind (BILD 7). Ein Ablösen der Deckhäute von den Wabekernen wurde bei den untersuchten Proben nicht beobachtet. Dies zeigt, dass die Klebung zwischen der Deckhaut und der Wabe fehlerfrei ist.

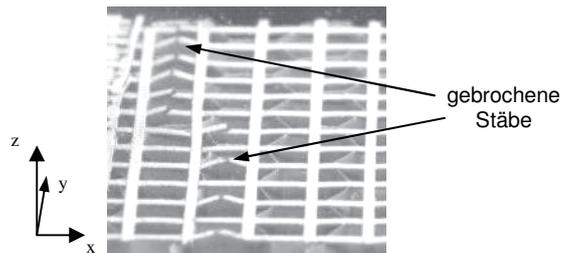


BILD 7. Bruch der lastübertragenden Stäbe zwischen zwei Querstäben

Eine genaue Auswertung der Verformung der einzelnen Gitterstäbe anhand von Videoaufnahmen zeigt eine mit zunehmender Druckbelastung kontinuierlich zunehmende Biegeverformung senkrecht zur Deckhautfläche. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass es sich beim Versagen nicht um ein Stabilitätsproblem, sondern um ein Spannungsproblem handelt. Ursache für diese Biegeverformung infolge einer axialen Druckbeanspruchung können Imperfektionen der Gitterstäbe sein.

## 2.4 Vorverformungen

Die Auswertung von Schlißbildern der gitterartigen Deckhäute zeigt, dass die Stäbe im lastfreien Zustand tatsächlich nicht ideal gerade sind, sondern eine Vorverformung aufweisen (BILD 8).

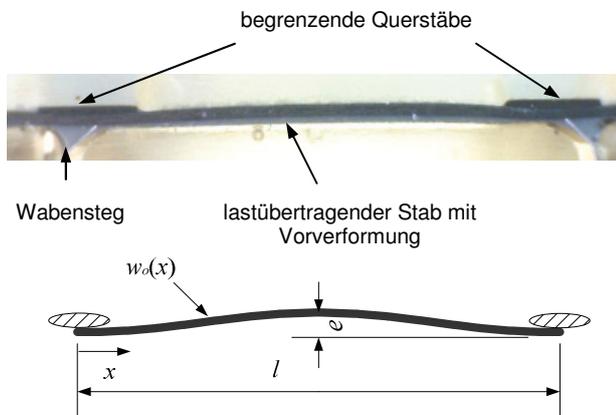


BILD 8. Vorverformung zwischen zwei Querstäben

Für die untersuchten Proben gilt, dass die Größe der maximalen Vorverformung  $e$  in etwa der Dicke eines Querstabes entspricht und sich der Verlauf der Vorverformung recht gut durch eine Kosinusfunktion annähern lässt. Aus diesem Grund wird für die weitere theoretische Betrachtung als Form der Vorverformungen für alle Imperfektionen ein kosinusförmiger Verlauf mit der maximalen Größe  $e$  angenommen:

$$(2) \quad w_0(x) = \frac{e}{2} \left( 1 - \cos \left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{l} \right) \right).$$

## 3 THEORETISCHE BETRACHTUNGEN

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass es in der druckbeanspruchten Deckhaut zu lokalen Biegeeffekten der lastübertragenden Gitterstäbe zwischen zwei Querstäben bzw. innerhalb einer Wabenzelle kommt. Das Verhalten dieser druckbelasteten Stäbe lässt sich hinsichtlich des Stabilitäts- und Spannungsproblems analytisch beschreiben [4].

### 3.1 Stabilitäts- und Spannungsprobleme

Bei einer Druckbeanspruchung eines Stabes muss neben dem reinen Druckversagen durch Überschreiten der Materialfestigkeit auch ein eventuelles Stabilitätsversagen berücksichtigt werden. Weiterhin ist neben dem reinen Stabilitätsproblem bei exzentrischer Lasteinleitung oder geometrischer Imperfektion auch das daraus folgende Spannungsproblem zu untersuchen (Druckbiegung, BILD 9).

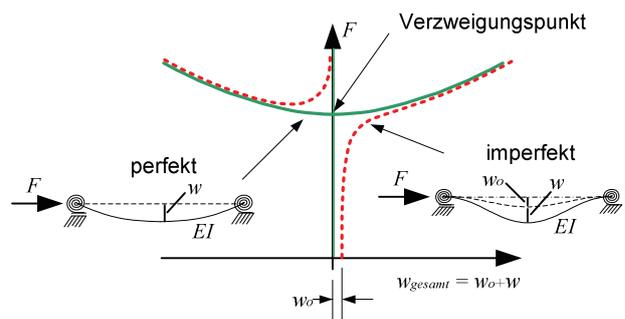


BILD 9. Stabilitäts- und Spannungsproblem beim Balken

Im Falle eines perfekt geraden Stabes treten beim Erreichen der Verzweigungslast schlagartig sehr große Verformungen auf, welche im Normalfall ein Materialversagen zur Folge haben. Die Verzweigungslast stellt, ungeachtet der Belastungsgrenze durch den Werkstoff, die maximale Belastbarkeit des Stabes dar.

Bei imperfekten Stäben hingegen kommt es infolge einer Vorverformung  $w_0$  zu einer mit der Last kontinuierlich zunehmenden Auslenkung. Die Biegespannungen in der Randfaser des Stabes mit der Dicke  $t$  folgen aus

$$(3) \quad \sigma(x) = \frac{F}{A} \pm \frac{M(x)}{I} \cdot \frac{t}{2}.$$

### 3.2 Analytische Berechnungsmodelle

Unter gewissen Voraussetzungen kann das Last-Verformungsverhalten imperfekter Stäbe unter Druckbelastung analytisch beschrieben werden. Durch die Verklebung der Gitterstäbe mit den Stegen des Wabenkerns wird an diesen Stellen eine Verschiebung der Stäbe in  $z$ -Richtung verhindert, damit können sie als an diesen Stellen gelagert betrachtet werden. Die Imperfektionen bilden sich dazwischen aus. Die benötigten Informationen über die Größe der Imperfektionen sowie den genauen Lagerungsbedingungen werden, wie oben beschrieben, aus Schlißbildern bestimmt. Mit dem daraus folgenden analytischen Rechenmodell lassen sich die aus der axialen Drucklast wirkenden Biegespannungen und damit die Bruchlasten ermitteln. Werden die lastübertragenden Stäbe innerhalb der Wabenzelle von Querstäben gekreuzt, so behindern diese Querstäbe die Biegeverformung der lastübertragenden Stäbe. Diese Verformungsbehinderung lässt sich durch eine elastische Lagerung an diesen Stellen berücksichtigen. Die Steifigkeit der elastischen Lagerung folgt aus den Steifigkeiten der Querstäbe.

#### 3.2.1 Lagerbedingungen

Um die Lagerung der lastübertragenden Stäbe möglichst genau wiederzugeben reichen die klassischen Lagerbedingungen „gelenkige Lagerung“ und „feste Einspannung“ nicht aus. An den Lagerstellen der Stäbe befinden sich häufig quer verlaufende Stäbe. Unter der Annahme einer perfekten Klebung wirken die quer verlaufenden Stäbe als Torsionsfedern mit der Steifigkeit  $c_T$  (BILD 10) [5].

$$(4) \quad \varphi = \frac{M_T \cdot a}{GI_T} \rightarrow c_T = \frac{M_T}{\varphi} = \frac{GI_T}{a}$$

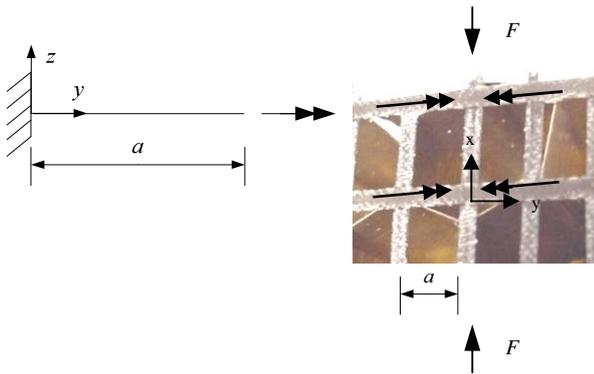


BILD 10. Angrenzende Querstäbe als drehelastische Lagerung

Zusätzlich zur Torsionsfedersteifigkeit ist in Abhängigkeit des weiter verlaufenden Stabes evtl. auch ein Anteil aus dessen Biegeverformung zu berücksichtigen. In Abhängigkeit von der Konfiguration des Gitters kann sich die Federsteifigkeit somit bis hin zu einer nahezu festen Einspannung erhöhen.

Im Fall einer elastischen Lagerung durch Querstäbe kann diese durch eine Linearfeder mit der Federsteifigkeit  $c$  (BILD 11) beschrieben werden [5].

$$(5) \quad f = \frac{Q \cdot a^3 b^3}{3EI_y(a+b)^3} \rightarrow c = \frac{Q}{f} = \frac{3EI_y(a+b)^3}{a^3 b^3}$$

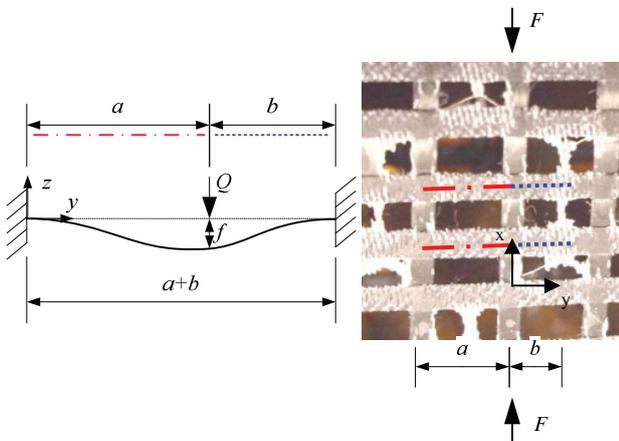


BILD 11. Elastische Lagerung durch Linearfedern aus angrenzenden Stäben

Im Beispiel aus BILD 11 wird die Federkonstante an einem Biegebalken mit einer festen Einspannung an beiden Enden ermittelt. Je nach Gitterkonfiguration können auch Bettungen mit zusätzlicher drehelastischer Lagerung berücksichtigt werden.

Die hier dargestellten Beispiele stellen eine Auswahl der möglichen elastischen Lagerungen und Bettungen dar. Auf ähnliche Weise lassen sich weitere unterschiedliche Formen von Lagern berücksichtigen.

### 3.2.2 Balken mit Vorverformung

In Kap 2.4 wurde bereits auf die Vorverformung der druckbelasteten Stäbe hingewiesen. Für Stäbe mit Vorverformung unter axialer Drucklast gilt folgende Differentialgleichung [6]:

$$(6) \quad EIw''''(x) + Fw''(x) = -Fw_0''(x)$$

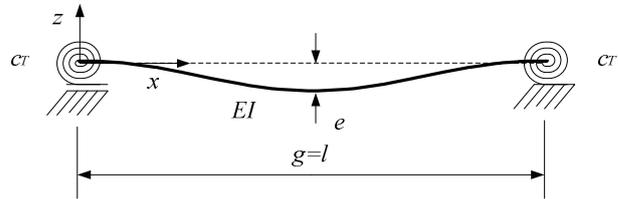


BILD 12. Vorverformter Balken mit drehelastischen Lagern

Die Lösung  $w(x)$  von (6) lautet [4] [7]:

$$(7) \quad w(x) = \underbrace{K_1 + K_2 \cdot \left(\frac{x}{l}\right) + K_3 \cdot \cos\left(\bar{\mu} \frac{x}{l}\right) + K_4 \cdot \sin\left(\bar{\mu} \frac{x}{l}\right)}_{\text{homogene Lösung}} + \underbrace{\frac{e}{2} \frac{\bar{\mu}^2}{\bar{\mu}^2 - 4\pi^2} \cdot \cos\left(2\pi \frac{x}{l}\right)}_{\text{partikuläre Lösung}} \quad \text{mit } \bar{\mu} = \sqrt{\frac{Fl^2}{EI}}$$

Zur Bestimmung der Konstanten  $K_i$  müssen vier der Konfiguration entsprechende Randbedingungen erfüllt werden. Dies führt zu einem linearen Gleichungssystem zur Ermittlung des Konstantenvektors  $K$ :

$$(8) \quad [B] \cdot \{K\} = \{p\}$$

Unter der Annahme eines perfekten Stabes ohne Vorverformung wird zunächst die Knicklast, welche unter Berücksichtigung der zulässigen Druckspannung des Materials eine obere Grenze des Spannungsproblems darstellt, bestimmt. Mit  $e = 0$  wird der partikuläre Anteil des Lösungsansatzes zu Null. Damit folgt aus (7) das für Stabilitätsprobleme charakteristische homogene Gleichungssystem:

$$(9) \quad [B] \cdot \{K\} = \{0\}$$

Eine Auswertung der Nullstellen der Koeffizientendeterminante  $Det[B]$  liefert als nichttriviale Lösung die Knicklast des betrachteten Stabes [4].

Zur Spannungsberechnung im vorverformten Stab, wobei  $e$  und damit  $p$  ungleich Null sind, wird aus (8) durch Ermittlung des Konstantenvektors  $K$  die Biegelinie bestimmt. Daraus folgt das Biegemoment zu

$$(10) \quad M(x) = -EIw''(x)$$

Mit Hilfe von (3) können damit die aus der axialen Drucklast resultierenden Biegespannungen und zusammen mit einer für den Stab gültigen Versagensspannung die erwartete Bruchlast ermittelt werden.

### 3.2.3 Elastische Bettung

Im Fall zusätzlicher elastischer Lagerungen durch Querstäbe zwischen den beiden Stabenden, sind diese als Einzelfedern mit den Abständen  $g$  untereinander zu berücksichtigen (BILD 13). Dazu ist der betrachtete kraftübertragende Stab in einzelne Abschnitte zu

unterteilen, innerhalb dieser Bereiche ist (6) einzeln zu lösen [8]. Für die Verschiebung (7) sind an den Schnittstellen die gültigen Rand- und Übergangsbedingungen zu berücksichtigen.

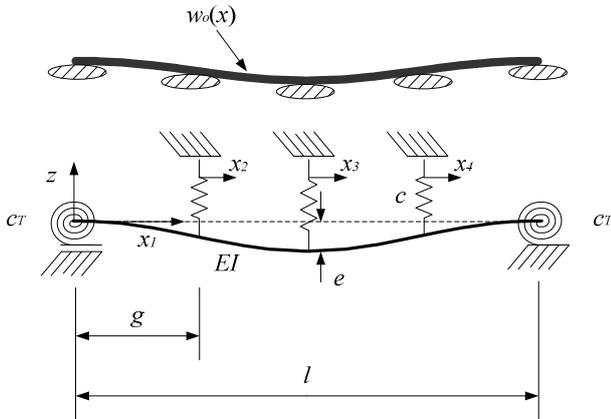


BILD 13. Balken mit Einzelfedern

Wenn die Abstände der Querstäbe untereinander sehr klein werden, kann auf eine kontinuierliche Bettung übergangen werden (BILD 14). Dafür gilt die Differentialgleichung [4]

$$(11) \quad EIw''''(x) + Fw''(x) + \beta w(x) = -Fw_0''(x) \quad \text{mit} \quad \beta = \frac{c}{g}$$

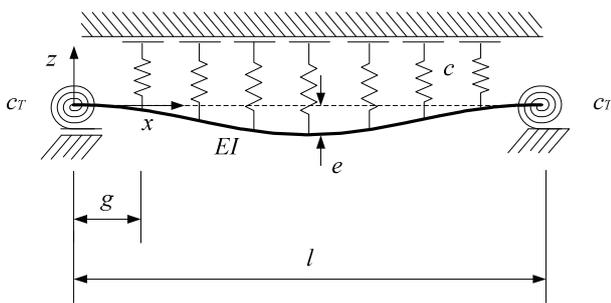


BILD 14. Balken auf einer kontinuierlichen Bettung

Unter Verwendung eines geeigneten Lösungsansatzes kann die Differentialgleichung (11) nach dem bereits beschriebenen Vorgehen gelöst werden [7].

#### 4 VERGLEICH MIT EXPERIMENTEN

Aus den experimentell ermittelten Bruchlasten können mit den in Kap 3 vorgestellten analytischen Beziehungen die beim Bruch wirkenden Biegespannungen bestimmt werden. Andererseits können diese Beziehungen auch genutzt werden, um bei Kenntnis von Vorverformung und Bruchspannung des verwendeten Werkstoffes das Tragvermögen der Sandwichhaut abzuschätzen.

##### 4.1 Auswertung der Biegespannungen

Für jede der untersuchten Probekörperkonfiguration werden aus den Bruchlasten die Biegespannungen in einzelnen Stäben bestimmt. Hierfür werden von jeder Deckhautkonfiguration mehrere Schlißbilder angefertigt. Diese dienen zum einen der Ermittlung der geometrischen Kenngrößen der Stäbe sowie des Gitters und zum anderen der Bestimmung der Größe und der Form der

Imperfektionen. Die Federkonstanten der elastischen Bettung bzw. der Lagerungen werden jeweils auf Basis der beteiligten Stäbe ermittelt. TABELLE 2 zeigt die so ermittelten höchsten Biegespannungen für die drei betrachteten Probekörperkonfigurationen.

TABELLE 2. Auswertung der Biegespannungen für die drei betrachteten Probekörperkonfigurationen

Probe Nr.	1	2	3
$F_{krit}$ [N]	67	97	160
$F_{Versuch}$ [N]	32,5	39,1	55,2
$g$ [mm]	6,8	4,5	3,0
$\sigma_{B \max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	-1248	-660	-910

Ein Vergleich der experimentell ermittelten Bruchlasten  $F_{Versuch}$  mit den theoretischen Knicklasten  $F_{krit}$  zeigt, dass letztere deutlich über den Bruchlasten liegen und daher reines Stabilitätsversagen als Versagensform kaum in Frage kommt.

Die Auswertung der Spannungen in den Stäben bei der Bruchlast ergibt insbesondere für die Konfiguration 1 und 3 relativ hohe Biegespannungen. Die Bruchspannung des in den Proben verwendeten Werkstoffes ist nicht bekannt, daher kann hier kein direkter Vergleich durchgeführt werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass diese in der Größenordnung 1000 N/mm<sup>2</sup> bis 1200 N/mm<sup>2</sup> liegen wird.

Für die Konfiguration 2 wurde eine um den Faktor zwei niedrigere Spannung für den Bruchfall als für Konfiguration 1 ermittelt. Die Ursachen hierfür liegen in der Vielzahl der möglichen Imperfektionen über der gesamten Fläche des Prüflings. Mit Hilfe von Schlißbildern kann nur eine sehr geringe Anzahl an Imperfektionen untersucht werden. Die Wahrscheinlichkeit die schwächste Stelle im Gitter zu finden ist daher relativ gering.

##### 4.2 Abschätzung des Tragvermögens

Eine Abschätzung des Tragvermögens von Sandwichplatten mit gitterartigen Deckhäuten ist mit den vorgestellten analytischen Beziehungen möglich, wenn die Imperfektionen sowie die Bettungssteifigkeiten der einzelnen Stäbe untereinander bekannt sind. Für die in Kap. 2 experimentell untersuchten Deckhautkonfigurationen werden anhand dieser Daten repräsentative Modelle erstellt. Sie basieren auf den gemittelten Querschnittskenngrößen (Biegesteifigkeit) und Längen der Stäbe, sowie der gefundenen maximalen Vorverformung. Aus den sich daraus ergebenden Stabanordnungen können weiterhin die Federkonstanten der elastischen Lager bestimmt werden. Mit Hilfe dieser repräsentativen Modelle werden, unter Berücksichtigung einer vorhandenen Bruchspannung, die Stabbruchlasten ermittelt (BILD 15).

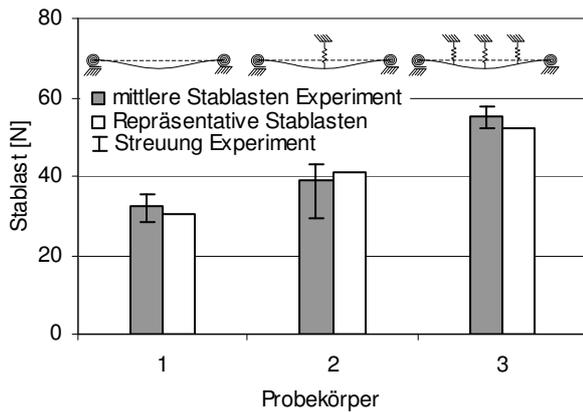


BILD 15. Repräsentative Modelle

Unter Berücksichtigung der in den Experimenten vorhandenen Streuungen stimmen die theoretisch ermittelten mit den experimentell ermittelten Lasten recht gut überein. Damit lassen sich auf diese Weise die Bruchlasten von Sandwichplatten mit gitterartigen Deckhäuten gut abschätzen.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Gewicht von Sandwichplatten kann vermindert werden, wenn anstelle von geschlossenen Deckhäuten sogenannte offene Deckhäute verwendet werden. Diese offenen Deckhäute bestehen nur noch aus einzelnen gitterartig angeordneten Fasersträngen, die mit dem Sandwichkern verklebt werden. Derartige Strukturen werden vor allem als Tragstruktur für Solargeneratoren von Satelliten genutzt.

Das Versagensverhalten derartiger Sandwichplatten unterscheidet sich von solchen mit geschlossenen Deckhäuten, daher können die klassischen Dimensionierungsmethoden für Sandwichbauweisen mit offenen Deckhäuten nicht angewandt werden.

Bei Druckbeanspruchung kommt es zu Biegeverformungen der einzelnen Stäbe, deren Ursache in einer Vorverformung der Stäbe im lastfreien Zustand liegt. Aus diesem Grund reichen die üblichen Stabilitätsbetrachtungen für die Deckhäute nicht aus. Auf Grund der imperfekten Druckstäbe geht das Stabilitätsproblem in ein Spannungsproblem über. Mit zunehmender axialer Drucklast kommt es zu einer zunehmenden Auslenkung und einem damit verbundenen Anstieg der Biegespannungen im Stab, die letztlich bei Überschreiten der Bruchspannung zum Versagen des einzelnen Stabes führt.

Dieses nichtlineare Verhalten lässt sich mit Hilfe der Differentialgleichung des vorverformten Balkens, gegebenenfalls unter Berücksichtigung evtl. elastischer Bettungen, beschreiben. Entsprechende analytische Beziehungen werden angegeben.

Für drei unterschiedliche Sandwichkonfigurationen werden 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Neben den Bruchlasten werden auch die charakteristischen Imperfektionen und daraus repräsentative Ersatzmodelle für die einzelnen Gitterstäbe ermittelt.

Ein Vergleich der experimentell bestimmten und der an Hand analytischer Modelle vorhergesagten Bruchlasten zeigt, dass das Versagensverhalten durch die

theoretischen Modelle gut wiedergegeben wird und sie somit für eine Dimensionierung geeignet sind. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die im Sandwich vorhandene Imperfektionen vorhergesagt werden können.

In weiteren Untersuchungen ist zu prüfen, ob sich die Imperfektionen zuverlässig vorhersagen lassen. Die vorliegenden Untersuchungen beziehen sich auf eine einaxiale Beanspruchung, diese sollten auf eine allgemeine zweidimensionale Belastung erweitert werden.

Weiterhin ist zu betrachten, wie sich das Versagen eines einzelnen Stabes auf die Lastverteilung innerhalb der gesamten Deckhaut auswirkt, d.h. die Verteilung der Last auf die einzelnen Stäbe ist von Interesse. Dies gilt vor allem für den Fall, dass einer der Stäbe gebrochen ist, und die restlichen Stäbe diesen Lastanteil übernehmen müssen.

## 6 LITERATUR

- [1] H. Bansemir  
M. Bauer  
O. Haider  
*Großflächige Solargeneratoren in Faserverbundbauweise für Nachrichtensatelliten*, Vortrag, DGLR-Kongress 2001, Hamburg
- [2] R.T. Sullins  
G.W. Smith  
E.E. Spier  
*NASA Report 1457*, Washington D.C., Dezember 1969
- [3] B. Katzer  
*Ermittlung der Knitterfestigkeit von Sandwichplatten mit offenen CFK-Deckschichten und Honigwabenkern*, Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr München, Dezember 2004
- [4] W. Schnell  
G. Czerwenka  
*Einführung in die Rechenmethoden des Leichtbaus II*, Hochschultaschenbücher Verlag, Bibliographisches Institut, Mannheim 1970
- [5] K.-H. Grote  
J. Feldhusen  
*Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*, 22 Auflage, Springer-Verlag, Berlin 2007
- [6] Dietmar Gross  
Werner Hauger  
Peter Wriggers  
*Technische Mechanik, Band 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden*, Springer-Verlag, Berlin 2007
- [7] L. Papula  
*Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 2*, Vieweg & Teubner, Wiesbaden 2009
- [8] H. A. Richard  
M. Sander  
*Technische Mechanik Festigkeitslehre*, 1. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2006