

# Theoretische und experimentelle Grundlagen für die Berechnung von Wand-Sandwich-elementen mit Öffnungen

J. Lange, M. Böttcher

**Zusammenfassung** Sandwichelemente mit ebenen Deckschichten werden als Fassadenelemente eingesetzt. Für die statische Analyse von Elementen mit Öffnungen werden im vorliegenden Aufsatz zwei Betrachtungsweisen vorgestellt: Untersuchungen am einzelnen Element und am Elementverband. Für beide Fälle werden theoretische Ansätze zur Ermittlung von Spannungen und Verformungen hergeleitet und mit experimentellen Untersuchungen verifiziert. Die Versagensformen der Elemente mit Öffnungen werden erläutert.

## Theoretical and Experimental Analysis of Wall Sandwich Panels with Openings

**Abstract** Sandwich panels with flat facings are used for façades. Elements with openings may be analysed using two methods which are introduced in this paper. The first one takes a look at a single element only. The second one accounts for load transfer into neighbouring panels. For both cases formulae are derived to calculate stresses and deflections. These are verified using experiments. Furthermore the collapse mechanisms for elements with openings are discussed.

### 1 Einleitung

Wand-Sandwichelemente bilden als Fassadenelemente die Außenhülle eines Gebäudes. Sie werden in großem Umfang bei den unterschiedlichsten Bauwerken als lastabtragende Wandelemente eingesetzt (Bild 1). Sie bestehen aus zwei dünnen, dehnsteifen Deckschichten, die einen schubweichen Kern umschließen (Bild 2). Die Deckschichten werden meist aus bandverzinkten Stahlblechen hergestellt, die Dicken zwischen 0,40 und 0,75 mm besitzen. Die beiden gängigsten Kernmaterialien sind PUR-Hartschaum und Mineralwolle mit Dicken zwischen 40 und 240 mm. Die Elemente sind zwischen 600 und 1200 mm breit und können bis zu einer Länge von 24 m geliefert werden, da sie in einem kontinuierlichen Prozess hergestellt werden. Die Berechnung von Verformungen und Spannungen in Sandwichelementen ist hinreichend erforscht (s. [1] bis [4]), die Werkstoffkennwerte und die Nachweisverfahren zur Bemessung werden in bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt.

Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange

Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik  
TU Darmstadt  
Petersenstraße 12, 64287 Darmstadt

Dr.-Ing. Marc Böttcher

Geschäftsführer der Ing.-Gbr für Statik und  
Konstruktion, INGENIEURBÜRO BÖTTCHER  
e-mail: Ingenieur@BueroBoettcher.de



Bild 1. Fassade mit Wand-Sandwichelementen (Pflaum & Söhne Bausysteme)  
Fig. 1. Facade using wall sandwich panels (Pflaum & Söhne Bausysteme)

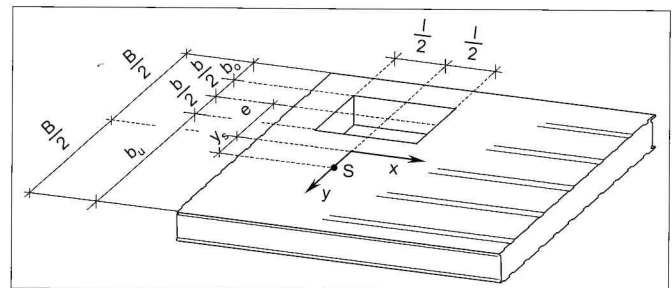


Bild 2. Wand-Sandwichelement mit rechteckiger Öffnung  
Fig. 2. Wall sandwich panel with rectangular opening

Um ein Gebäude nutzbar zu machen ist es jedoch oft notwendig, Öffnungen in seine Außenhülle einzubringen. Dies können sein: Fenster- und Türöffnungen, Öffnungen für Be- und Entlüftung und für Versorgungsleitungen oder Konstruktionsdurchdringungen.

Die in den bauaufsichtlichen Zulassungen angegebenen Nachweisverfahren beziehen sich nur auf Sandwichelemente ohne Öffnungen. In [5] wurden daher Methoden entwickelt, mit denen Sandwichelemente mit kreisrunden und rechteckigen Öffnungen sowohl im Einfeldträger als auch im Durchlaufträgersystem, bemessen werden können. Es wurden nur Wand-Sandwichelemente mit quasi-ebenen Deckschichten untersucht und es wurden nur Öffnungen behandelt, die in einem Element liegen (Bild 2).

Die Ergebnisse aus [5] wurden in [6] für den praktisch tätigen Ingenieur aufbereitet und erweitert. Im vorliegenden Beitrag werden die experimentellen und theoretischen Grundlagen vorgestellt.

## 2 Das Einzelement

### 2.1 Verformungen

In Bild 3 wird ein Ausschnitt eines Sandwichbalkens dargestellt. Er besitzt die Gesamthöhe  $H$  und die Länge  $dx$ . Er teilt sich auf in eine obere Deckschicht, einen Kern und eine untere Deckschicht. Die Deckschichten besitzen die Breite

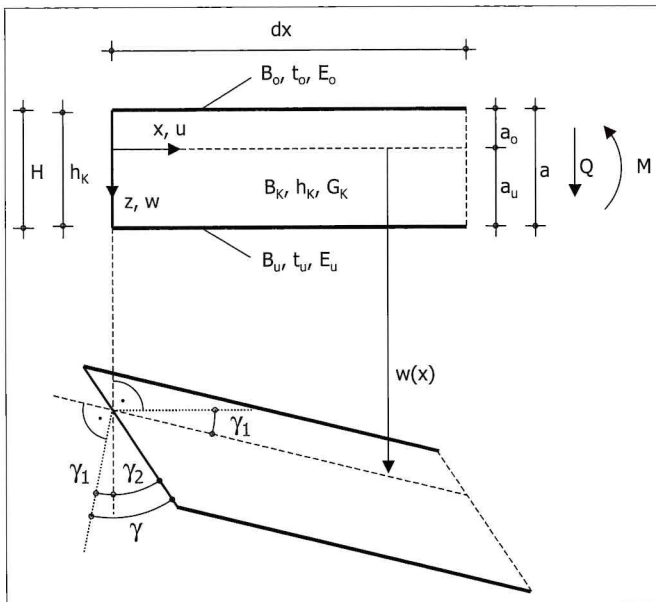


Bild 3. Bezeichnungen am verformten Sandwichbalken  
Fig. 3. Symbols and abbreviations shown at a deformed panel

B, die Dicke t und den Elastizitätsmodul E. Die Deckschichtwerte können oben (Index o) und unten (Index u) unterschiedlich sein. Der Abstand der Deckschichtschwerachsen wird mit a bezeichnet. Der Kern ist schubweich und besitzt den Schubmodul  $G_K$ , die Breite  $B_K$  und die Höhe  $h_K$ . Für Sandwichelemente mit ebenen und leicht profilierten Deckschichten wird folgende Annahme getroffen: Der schubweiche Kern trägt die gesamte Querkraft ab. Schubspannungen aus der Querkraft treten nur im Kern auf. Die dehnsteifen Deckschichten tragen als Zweipunktquerschnitt das Biegemoment ab. Normalspannungen aus dem Biegemoment treten nur in den Deckschichten auf. Die Integration der Schubspannungen über die Kernfläche liefert die Querkraft.

$$Q = AS \cdot \gamma \quad (1)$$

Hierin bezeichnet AS die Schubsteifigkeit des Sandwichquerschnitts

$$AS = G_K \cdot B_K \cdot h_K \quad (2)$$

Die Integration der mit den Hebelarmen multiplizierten Normalspannungen über die Deckschichtfläche liefert das Biegemoment.

$$M = BS \cdot \gamma'_2 \quad (3)$$

Hierin bezeichnet BS die Biegesteifigkeit des Sandwichquerschnitts

$$BS = \frac{E_u \cdot B_u \cdot t_u \cdot E_o \cdot B_o \cdot t_o}{E_u \cdot B_u \cdot t_u + E_o \cdot B_o \cdot t_o} \cdot a^2 \quad (4)$$

Für statisch bestimmte Systeme lässt sich der Ansatz der Partialdurchsenkung verfolgen. Die Verformung  $w$  lässt sich aufspalten in einen Schubanteil  $w_Q$  und in einen Biegeanteil  $w_M$ .

$$w = w_Q + w_M \quad (5)$$

Mit (1) und  $\gamma_1 = \frac{dw}{dx} = w'$  (6)

und gemäß Bild 3  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$  (7)

folgt die Schub-Verdrehungs-Beziehung des Sandwichquerschnitts:

$$w'_Q = \frac{Q(x)}{AS} - \gamma_2 \quad (8)$$

Mit (5) und  $w'_M = -\gamma_2$  (9)

folgt die Momenten-Krümmungs-Beziehung des Sandwichquerschnitts:

$$w''_M = -\frac{M(x)}{BS} \quad (10)$$

Die hier behandelten Öffnungen liegen immer vollständig in einem Element. Werden sie in ein Sandwichelement eingebracht, entstehen zwei Restquerschnittsflächen links und rechts der Öffnung. Die Fläche im Bereich der positiven y-Achse (Bild 2) wird positiver Restquerschnitt genannt. Der Öffnungsbereich besitzt daher gegenüber dem Vollquerschnitt immer reduzierte Querschnittswerte.

Für die Berechnung der Verformung von Sandwichelementen mit Öffnungen müssen unterschiedliche Querschnitte (Vollquerschnitt und Restquerschnitt) in einem Element berücksichtigt werden. Die Verformungsberechnung erfolgt daher durch abschnittsweise Integration und die Formulierung von Rand- und Übergangsbedingungen. Da die Schubsteifigkeit des Sandwichelements gering ist, darf die Schubverformung nicht vernachlässigt werden.

In [5] wurde in Beispielberechnungen gezeigt, dass die Verformungsberechnung ebenso mit einem Fachwerkmodell oder mit einem Stabwerksprogramm mit schubweichen Stäben möglich ist. Für einfache Fälle stehen in [7] Handformeln zur Verfügung.

### 2.2 Kerbspannungsverteilung unter Randeinfluss

Erfährt ein Wand-Sandwichelement im Einfeld-System eine Belastung durch Winddruck, werden im Deckblech der Außenseite Druckspannungen geweckt. Ist das Deckblech ungestört, stellt sich eine konstante Spannungsverteilung über die Querschnittsbreite B ein. Die Ordinate wird Bruttospannung  $\sigma_0$  genannt. Wird nun eine Öffnung der Breite b in ein Element eingebracht, entstehen im positiven und negativen Restquerschnitt Spannungsverläufe, die sich durch eine hohe Ordinate am Öffnungsrand auszeichnen und nichtlinear zum Bauteilrand hin abfallen. Dieses Spannungsbild wird als Kerbspannungsverteilung  $\sigma_x(y)$ , die

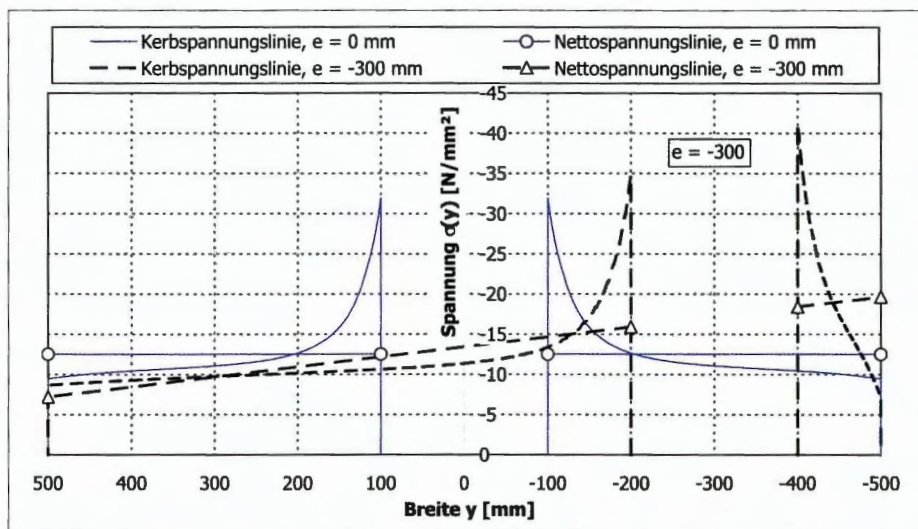


Bild 4. Einfluss der Exzentrizität auf die Spannungsverteilung  $\sigma_x(y)$  in  $x = 0$   
 Fig. 4. Influence of an eccentricity on the distribution of normal stresses at  $x = 0$



Bild 5. Versuchsaufbau für die Versuchsserie R80  
 Fig. 5. Test set up for test series R80

$$\text{und } y_S = \frac{b \cdot e}{B - b} = \frac{\beta \cdot e}{1 - \beta} \quad (15)$$

Zur Berechnung der elastischen Kerbspannungsverteilung  $\sigma_x(y)$  wurden zwei lokale FE-Modelle erstellt. Modell K bildet eine kreisförmige und Modell R eine rechteckige Öffnung in einem Sandwichelement ab. Die Modellierung erfolgt im Programm ANSYS mit 8-Knoten-Scheibenelementen Plane 82, die das Deckblech ohne die elastische Bettung des Schaums abbilden. Mit diesen Modellen wurden umfangreiche Parameterstudien durchgeführt. In Bild 4 wird der Einfluss der Exzentrizität  $e$  einer Öffnung auf die Kerbspannungsverteilung  $\sigma_x(y)$  und auf die Nettospannungsverteilung  $\sigma_N(y)$  deutlich. Untersucht wurde hier ein Deckblech der Breite  $B = 1000$  mm unter einer Brutto­spannung  $\sigma_0 = -10$  N/mm<sup>2</sup>. Die Öffnung ist kreisrund und besitzt den Durchmesser  $b = 200$  mm. Die Exzentrizität beträgt  $e = 300$  mm. Die dargestellten Spannungen wurden im minimalen Restquerschnitt ( $x = 0$ ) ermittelt.

maximale Ordinate als Kerbspannung bezeichnet. Wichtig für die weiteren Betrachtungen ist die Nettospannung  $\sigma_N$ . Sie ist für zentrische Öffnungen konstant über den Querschnitt verteilt und berücksichtigt die bezogene Restbreite  $(1 - \beta)$ .

$$\sigma_N = \frac{\sigma_0}{(1 - \beta)} \quad (11)$$

$$\text{mit } \beta = \frac{b}{B} \quad (12)$$

Ist die Öffnung exzentrisch positioniert, zeigt sie sich als Funktion linear zum kleineren Restquerschnitt hin ansteigend (vgl. [8]). Mit den Bezeichnungen nach Bild 2 lässt sich die Verteilung der Nettospannung  $\sigma_N(y)$  berechnen.

$$\sigma_N(y) = \sigma_0 \cdot \left( \frac{1}{(1 - \beta)} + \frac{B}{I_{z,S}} \cdot y_S \cdot (y + y_S) \right) \quad (13)$$

$$\text{mit } I_{z,S} = \frac{b_u^5 + b_o^5}{12} + b_u \cdot \left( \frac{B}{2} - y_S - \frac{b_u}{2} \right)^2 + b_o \cdot \left( \frac{B}{2} + y_S - \frac{b_o}{2} \right)^2 \quad (14)$$

### 2.3 Experimentelle Untersuchungen

Zur Verifizierung des Berechnungsmodells wurden in den Jahren 2003 und 2004 an der TU Darmstadt 23 Versuche an Sandwichelementen mit Öffnungen durchgeführt. Es wurden vier unterschiedliche Elementtypen mit vier unterschiedlichen Dicken verwendet, wovon drei Elemente einen PUR-Kern besaßen und ein Element einen Mineralwollkern. Alle Elemente wurden als Einfeldträger gestützt und besaßen kreisförmige, rechteckige oder quadratische Öffnungen. In allen Versuchen wurden vertikale Verformungen  $w$  gemessen. Zur Verifizierung der Spannungsverteilung wurden in 15 Versuchen Dehnungen im Öffnungsquerschnitt gemessen. Für die Bestimmung der Knitterspannung  $\sigma_k$  wurden im gleichen Versuchsstand für alle Elementtypen Bauteilversuche ohne Öffnung durchgeführt. Die für das Berechnungsmodell verwendeten Werkstoffkennwerte und Geometrien wurden an ausreichend vielen Versuchskörpern der gleichen Charge experimentell bestimmt.

Für die hier vorgestellten Versuche R80 wurden Elemente mit einem Kern aus PUR-Hartschaum und den Abmessungen Länge  $L = 5000$  mm, Nennbreite  $B = 1150$  und Höhe  $H = 80$  mm verwendet (Bild 5). Sie besaßen kreisförmige, zentrische Öffnungen mit der bezogenen Öffnungsweite  $\beta = 0,55$ .

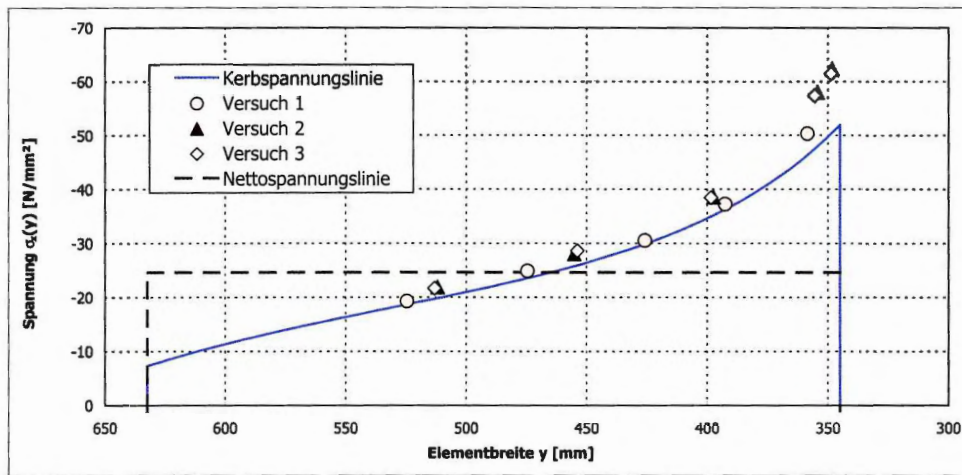


Bild 6. Vergleich von Versuch und Berechnung im Spannungs-Diagramm  
Fig. 6. Comparison of test result and numerical analysis in the stress distribution

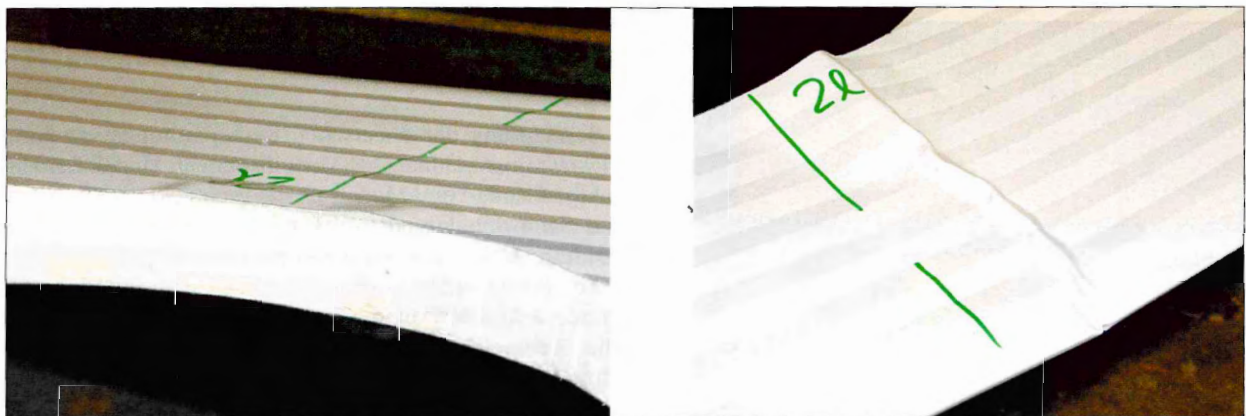


Bild 7. Lokales Ausbeulen, Knitterversagen  
Fig. 7. local buckling, wrinkling

Wird das Element belastet, reagiert es mit Verformungen und es entstehen Normalspannungen in den Deckschichten. In Bild 6 sind die berechneten Spannungsverläufe im positiven Restquerschnitt für den Druckbereich unter 25 % der Versagenslast aufgetragen. Die Punkte im Diagramm zeigen die in Spannungen umgerechneten gemessenen Dehnungen. Es zeigen sich sowohl für die Verformung, als auch für die Spannungsverteilung nur geringe Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung.

Wesentlich ist die große Traglastreduktion. Die Traglast des Elementes mit einer Öffnung  $\beta = 0,55$  beträgt nur 30 % gegenüber dem Element ohne Öffnung. Die hohen Spannungen am Öffnungsrand bringen das ungestützte Deckblech schon in geringen Laststufen zum lokalen Ausbeulen (Bild 7). Wird die Belastung weiter gesteigert, erfolgt das für Sandwichelemente typische Biegeversagen: ein kurzweiliges Beulen (Knittern) der elastisch auf dem Kern gebetteten Deckschicht.

Aus den Versuchsergebnissen aller durchgeführten Versuchsserien lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem bezogenen Restquerschnitt  $(1 - \beta)$  und der auf die Knitterspannung  $\sigma_k$  bezogenen Tragspannung im Nettoquerschnitt  $\sigma_{U,N}$  ermitteln (Bild 8). Es wird eine einfache Abschätzung in Form einer Grenzlinie getroffen, die auf der sicheren Seite liegt. Die folgenden Bemessungsformeln gelten sowohl für kreisrunde, als auch für rechteckige Öffnungen.

$$\text{für } 0 < \beta < 0,4 \text{ gilt: } \sigma_N \leq (1 - \beta) \cdot \sigma_k \quad (16)$$

$$\text{für } 0,4 < \beta < 0,8 \text{ gilt: } \sigma_N \leq 0,6 \cdot \sigma_k \quad (17)$$

Für die Schubspannung  $\tau$  zeigt sich in weiteren Versuchsreihen keine Abminderung der Traglast.

### 3 Der Elementverband

#### 3.1 Das Modell und seine Steifigkeiten

Wand-Sandwichelemente bilden die Fassade eines Gebäudes. Um die Dichtigkeit zu gewährleisten werden sie in ihrer Längsfuge miteinander verbunden. Diese Nut-Feder-Verbindung ist so tragfähig, dass Lasten von einem Element in das nächste übertragen werden können. Besitzen in einem System aus drei miteinander verbundenen Einzelementen alle Elemente die gleiche Steifigkeit und werden alle Elemente gleich belastet, verhält sich dieser Elementverband wie ein Einzelement. Wird jedoch das mittlere Element durch eine Öffnung geschwächt oder höher als die Randelemente belastet, werden Lastanteile des mittleren Elementes durch die Fuge in die Randelemente übertragen. Ursache dafür ist die Differenzverformung des Mittelelementes gegenüber den Randelementen. Im Mittelelement stellt sich nun ein mehraxiales Tragverhalten ein

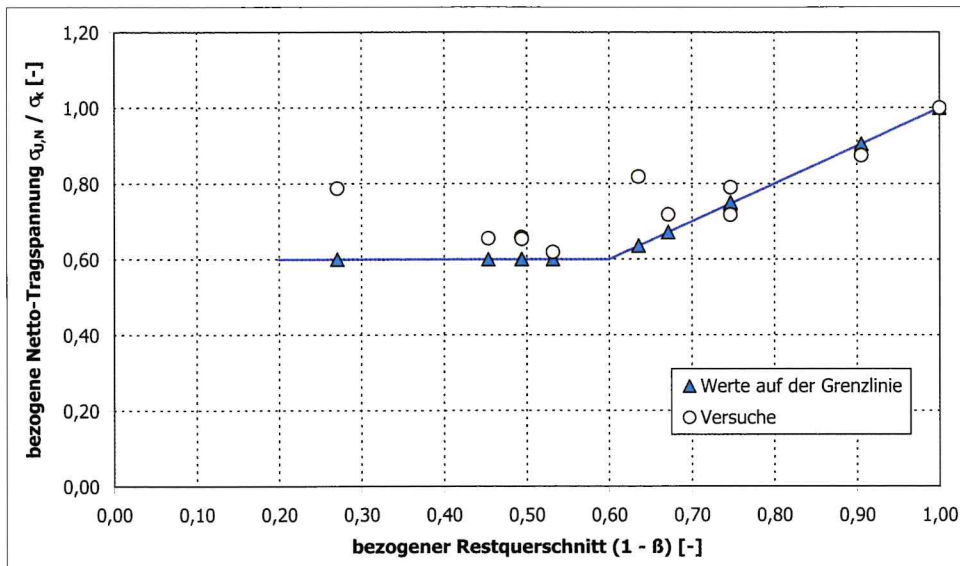


Bild 8. Nettotragspannung, Versuche und Grenzlinie  
Fig. 8. Stress in the remaining section, test result and design rule

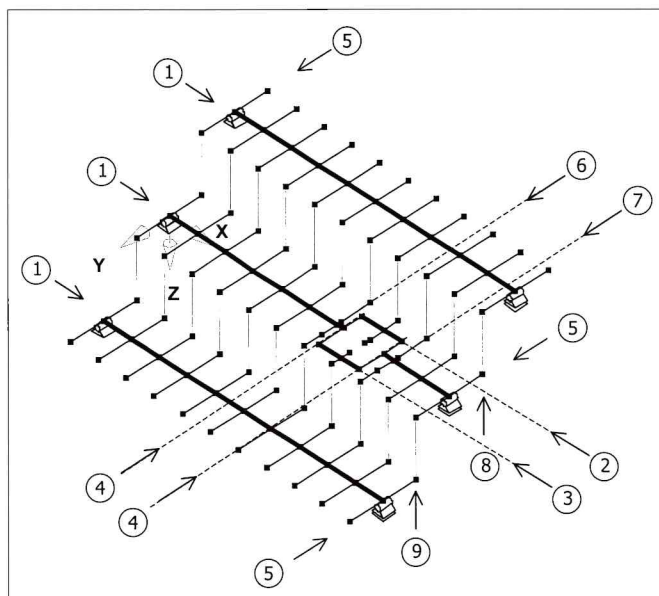


Bild 9. Modell des Elementverbandes – Isometrie  
Fig. 9. Model of a 3-panel-system

und die exzentrisch belasteten Randelemente werden zusätzlich durch Torsionsspannungen beansprucht. Das Modell des Elementverbandes (Bild 9) besteht aus einem räumlichen Stabwerk mit schubsteifen Biegeträgern und dehnsteifen Pendelstäben. Die Sandwichelemente werden in ihrer Längsrichtung durch drei an den Enden gelagerte Stabzüge (Pos. 1) abgebildet. Sie werden im folgenden Längsträger genannt und sind Träger der Biegesteifigkeit  $BS$ , der Schubsteifigkeit  $AS$  und der Torsionssteifigkeit  $GI_T$  des Sandwichquerschnittes. Das Mittelelement besitzt eine Öffnung, die Randelemente sind ungestört. Im Bereich der Öffnung wird der Längsträger über einen biege-, schub- und torsionsstarken Lastverteilerstab (Pos. 4) in zwei Rand-Längsträger (Pos. 2 und Pos. 3) aufgeteilt. Sie besitzen die Steifigkeiten des negativen und positiven Restquerschnittes. Die Schub- und Biegesteifigkeit in Element-Querrichtung  $AS_Q$  und  $BS_Q$  wird über Querträger (Pos. 5) abgebildet. Die Querträger vor und hinter der Öffnung (Pos. 6 und Pos. 7) besitzen aufgrund der geringeren Einflussbreite eine geringere Steifigkeit als die

restlichen Querträger (Pos. 5). Die Vertikalstäbe (Pos. 8 und Pos. 9) bilden die Fugensteifigkeit der Längsfuge  $k_F$  ab und werden als Pendelstäbe ausgeführt.

Die Steifigkeiten in Element-Längsrichtung  $AS$  und  $BS$  sind bereits bekannt und können durch (2) und (4) bestimmt werden. Die Torsionssteifigkeit  $GI_T$  des Sandwichelementes wurde in [2] behandelt und in [1] ausführlich dargestellt. Alle weiteren Steifigkeiten  $BS_Q$ ,  $AS_Q$  und  $k_F$  wurden in [5] hergeleitet oder experimentell bestimmt.

Die Ermittlung der Schubsteifigkeit in Querrichtung  $AS_Q$  zeigte die ausgesprochene Orthotropie des PUR-Hartschaums. Neben den Elastizitätsmodul  $E_K$  und den Querdehnungen  $\nu_K$  in allen drei Ebenen wurden auch die Schubmoduln  $G_K$  in der  $xy$ - und in der  $xz$ -Ebene experimentell ermittelt. Sie konnten für drei unterschiedliche PUR-Elemente zu folgendem Wert bestimmt werden:

$$G_{yz} \cong 0,60 \cdot G_{xz} \tag{18}$$

Der Grund für die Reduktion des Schubmoduls in Querrichtung  $G_{yz}$  liegt in der Schaumstruktur. Die Schaumzellen sind in Produktionsrichtung gelängt und es stehen daher mehr Stege zum Schubabtrag in der  $y$ - $z$ -Ebene zur Verfügung als in der  $x$ - $z$ -Ebene. Die Schubsteifigkeit in Querrichtung  $AS_Q$  des Elements kann jetzt mit Hilfe von (18) nach (2) ermittelt werden.

Durch die Biegemomente in Querrichtung wird die leicht profilierte Deckschicht senkrecht zur Profilierungsrichtung beansprucht. Um die Steifigkeit zu ermitteln, wurde die Deckschicht als elastisch auf dem Kern gebetteter, biegesteifer Stabzug abgebildet. Da die Belastungen im Elementverband klein waren, wurden die Verformungen nach Theorie I. Ordnung bestimmt. Aus der Verformung in Belastungsrichtung ließ sich für drei unterschiedliche Deckschichten ein Vergleichs-E-Modul  $E_V$  zurückrechnen, der zwischen 60% und 70% kleiner war als der E-Modul des Werkstoffs selber. Die Biegesteifigkeit in Querrichtung  $BS_Q$  kann jetzt nach (4) ermittelt werden.

Die Fugensteifigkeit  $k_F$  und die Fugentraglast  $q_{F,U}$  wurden in einem Versuchsstand bestimmt, der es ermöglichte gleichzeitig die linke und die rechte Fuge zu testen (Bild 10). Im Versuchsstand links und rechts ist je ein in Produktions-

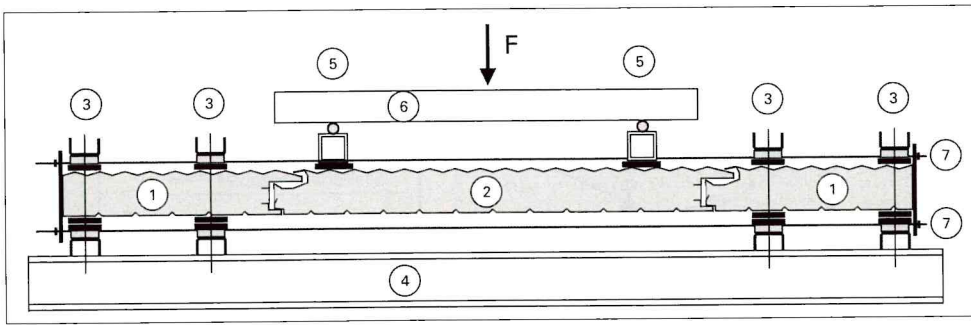


Bild 10. Versuchsstand zur Ermittlung der Fugensteifigkeit und -tragfähigkeit  
Fig. 10. Test set up for the assessment of the joint stiffness and strength

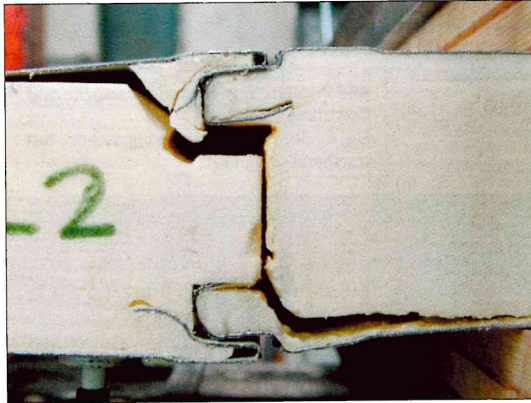


Bild 11. Versagensform einer Längsfuge am rechten Auflager  
Fig. 11. Fracture mode of a joint at the bearing

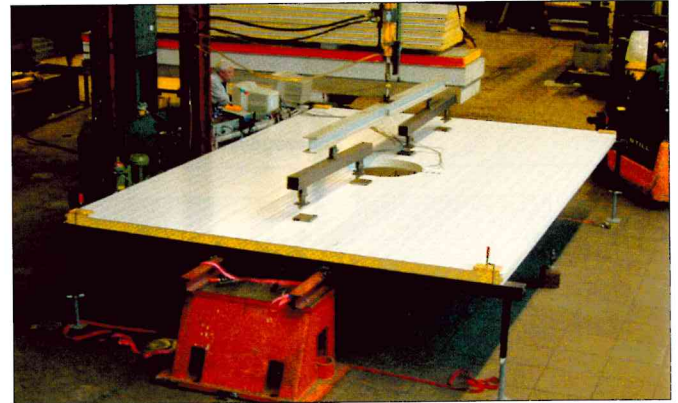


Bild 12. Versuchsaufbau für den Elementverband unter der Belastung B1  
Fig. 12. Test set up for a 3-panel-system under load group B1

Längsrichtung halbiertes Element (Pos. 1) eingespannt. Das Element in der Mitte der Versuchsanordnung (Pos. 2) ist ungestört. Die Einspannung erfolgt über je zwei Lasteinleitungspunkte (Pos. 5), die mit der biegesteifen Unterkonstruktion (Pos. 4) verspannt werden. Die Längsfuge besitzt einen Abstand vom Lasteinleitungsrand, so dass Querkraftanteile nicht direkt über Druck ins Auflager fließen können. Die Lasteinleitung im Mittelelement erfolgt über zwei biegesteife Querträger (Pos. 5), die über eine am Prüfzylinder hängende Traverse (Pos. 6) miteinander verbunden werden. Vier Gewindestäbe (Pos. 7) verbinden alle Elemente miteinander und erzeugen eine konstante Vorspannung in den Fugen. Mit induktiven Wegaufnehmern wurde die vertikale Differenzverformung zwischen dem linken und rechten Schnitrufer der Fuge gemessen.

Die Ergebnisse aus 37 Versuchen an drei unterschiedlichen Fugegeometrien zeigten, dass die Vorspannung bis 1,50 kN/m und die Belastungsgeschwindigkeit bis 20 mm/min keinen nennenswerten Einfluss auf die Steifigkeit der Fuge besitzt. Für die untersuchten Fugenausbildungen lag die Steifigkeit  $k_F$  zwischen 500 kN/m<sup>2</sup> und 1500 kN/m<sup>2</sup>. Dauerstandsversuche zeigten keine wesentlichen Änderungen der Steifigkeit, wohl aber eine Traglastabminderung um ca. 20%. Die Traglasten lagen zwischen 2,3 und 4,3 kN/m. Die Fugen versagen immer auf Schub im lasttragenden Kragarm (Bild 11).

Alle erforderlichen Steifigkeiten sind damit bekannt und mit dem Modell des Elementverbandes können nun Verformungen und Schnittgrößen berechnet werden.

### 3.2 Experimentelle Untersuchungen

Um das Berechnungsmodell zu verifizieren, wurden im Jahr 2004 sieben Versuche an Sandwichelementen im Elementverband durchgeführt. Es wurden dabei zwei unter-

schiedliche Elementtypen mit zwei unterschiedlichen Dicken verwendet. Beide Elemente besaßen einen Kern aus PUR-Hartschaum. Der Versuchsaufbau ist in Bild 12 dargestellt. Er zeigt drei in ihrer Element-Längsfuge verbundene Elemente, die als Einfeldträger gestützt sind. Die Belastung der Elemente erfolgte in zwei unterschiedlichen Verfahren. Für die Belastung I wird mit vier gleichen Einzellasten nur das Mittelelement über Stempel belastet. Belastung II erfolgt im Mittelelement wie in der Belastung I. Die Randelemente werden jetzt jedoch zusätzlich mit Gewichten (Sand-säcken) belastet.

Bild 13 zeigt das Last-Verformungs-Diagramm eines Versuchs unter der Belastung II. Nach dem Auflegen der Gewichte (Laststufe  $F = 1,0$  kN) in den Randelementen (Punkt 1) wird durch die Traverse das Mittelelement bis zu dieser Laststufe belastet (Punkt 2) und darauf hin wieder entlastet. Die Lasten werden in den Randelementen bis zur Laststufe  $F = 2,0$  kN erhöht und die Traversenbelastung erfolgt von neuem. In der Laststufe  $F = 5,0$  kN erfährt der Elementverband ein lokales Knittern im Öffnungsquerschnitt (Punkt 3). Der Elementverband ist jedoch ein redundantes System und die Belastung kann nach dem lokalen Knittern weiter gesteigert werden (Punkt 4). Erst in der Laststufe  $F = 7,0$  kN kommt es zum globalen Versagen durch Knittern der ungeschwächten Randelemente (Punkt 5). Ist die Tragfähigkeit der Element-Längsfuge gering, kann das globale Versagen auch durch das Versagen der Element-Längsfuge eintreten. Sind aus dem Modell des Elementverbandes die Biegemomente  $M_y$  und damit auch die Bruttospannung  $\sigma_0$  bekannt, lässt sich mit dem Modell K (s. Abs. 2.2) die Spannungsverteilung im Minimalquerschnitt ermitteln. Die Spannungsverteilung wurde ebenfalls über Dehnungsmessstreifen in Versuchen gemessen. Der Vergleich der Spannungen im Öffnungsquerschnitt zeigt eine ebenso gute Übereinstim-

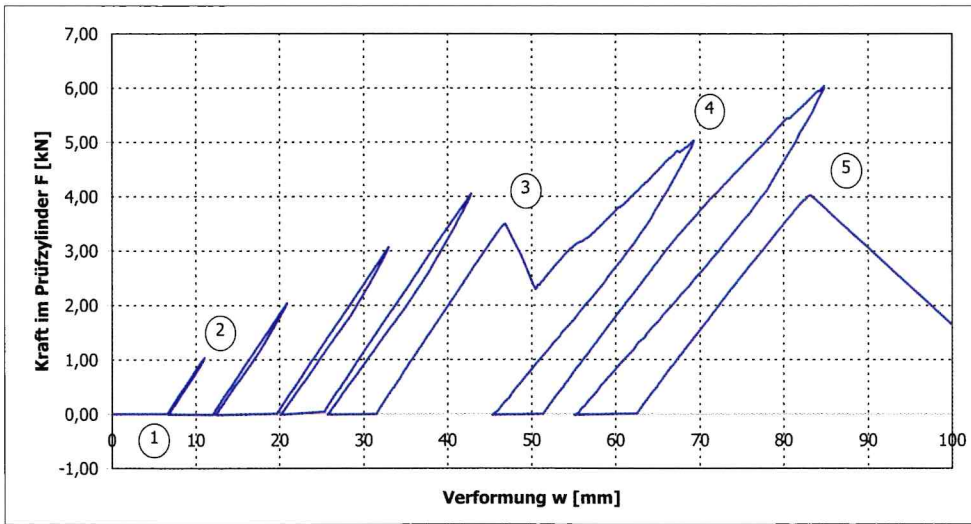


Bild 13. Last-Verformungs-Diagramm unter der Belastung BI  
Fig. 13. Load-deflection curve under load group BI

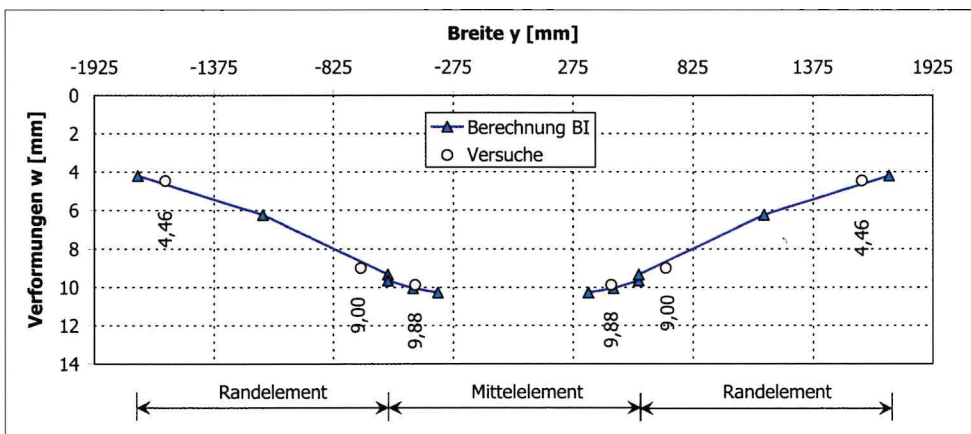


Bild 14. Vergleich von Versuch und Berechnung im Last-Verformungs-Diagramm  
Fig. 14. Comparison of test and numerical analysis in a load-deflection curve

mung zwischen Versuch und Berechnung wie im Einzelement (Bild 6). Die Lasten werden im Modell des Elementverbandes erwartungsgemäß vom Mittlelement in die Randelemente geleitet. Eine weitere Kontrolle besteht im Vergleich der Verformungen. In Bild 14 werden die Verformungen des Versuchs R80\_V6 unter der Belastungsart I im Öffnungsquerschnitt den Berechnungsergebnissen aus dem Elementverband gegenübergestellt. Die Abweichungen zwischen Versuch und Modell sind gering. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Steifigkeiten des Elementverbandes richtig ermittelt wurden.

In Tabelle 1 sind die Traglasten der Versuche im Elementverband und im Einzelement zusammengefasst. Wird die Traglast eines Einzelementes ohne Öffnung zu 100 % gesetzt, zeigt sich im Einzelement mit Öffnungsgrößen  $\beta = 50\%$  und  $\beta = 60\%$  eine Traglastminderung um 70 %. Die Traglast des Elementes mit Öffnung beträgt nur noch 30 % der Traglast des Elementes ohne Öffnung. Bei gleichen Öffnungsgeometrien kann im Elementverband die Traglast, die zum lokalen Knittern des Mittlelementes führt um 50 % gesteigert werden. Das lokale Versagen (Bild 15) erfolgt nun unter 45 % der Traglast eines ungeschwächten Elementes. Damit ist die Tragfähigkeit des Elementverbandes jedoch noch nicht erreicht. Die Belastung kann weiter gesteigert werden, bis ein Fugenversagen eintritt (Element R80) oder bis die Randelemente durch Knittern versagen (Element F60). Das globale Versagen durch Knittern der Randelemente erfolgt immer unter 66 % der Traglast eines ungeschwächten Elementes, da das Mittlelement

nicht mehr tragfähig ist und seine Belastung (66 %) je zur Hälfte (35 %) über die Fuge an die Randelemente abgibt. Das Randelement ist damit zu 100 % belastet. Kann die Elementfuge 50 % der Belastung im Mittlelement nicht übertragen, erfolgt vor dem globalen Knittern der Randelemente ein Fugenversagen.

Werden Sandwichelemente als Durchlaufträger nachgewiesen, wird für den Nachweis der Tragfähigkeit ein Knittergelenk über der Stütze, ohne den Ansatz eines Reststützmomentes, angenommen. Der Nachweis erfolgt daher am günstigeren Einfeldträger. Erst für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit, in dem geringere Sicherheiten erforderlich werden, darf ein Knittern über der Stütze nicht auftreten.

Die gleiche Sicherheitsphilosophie kann im Elementverband angewendet werden. Das lokale Knittern ist ein Gebrauchstauglichkeitskriterium. Für den Nachweis der Tragfähigkeit sind das Versagen der Elementfuge und das globale Knittern der Randelemente nachzuweisen.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Werden Öffnungen in Sandwichkonstruktionen eingebracht, müssen nach dem heutigen Stand der Technik immer Auswechselkonstruktionen in Form von Unterstütkonstruktionen eingebaut werden. Die in diesem Beitrag vorgestellten Modelle erlauben es, unter bestimmten Umständen auf diese Konstruktionen zu verzichten. Zum Lastabtrag wird nur das Material angesetzt, das in der Sandwichwand

Tabelle 1. Vergleich der Traglasten  
Table 1. Comparison of ultimate loads

Versuchsreihe	R80		F60	
	Traglast [kN]	Anteil %	Traglast [kN]	Anteil %
Beschreibung				

## Einzelement

	Traglast [kN]	Anteil %	Traglast [kN]	Anteil %
ohne Öffnung	14,6	100	9,1	100
mit Öffnung (60% / 50%)	4,2	29	3,0	33

## Elementverband

	Traglast [kN]	Anteil %	Traglast [kN]	Anteil %
lokales Knittern	6,6	45	4,5	49
Fugenversagen	8,6	59	-	-
globales Knittern	-	-	6,0	66

448



Bild 15. Knittern im Mittelelement, Fugenversagen, Knittern der Randlelemente

Fig. 15. Buckling in the central panel, failure of joint, buckling of outside elements

vorhanden ist. Lässt man zu, dass weitere Konstruktionen in einem Sandwichelement eingebaut werden, können wie in [9] erläutert, speziell hergestellte Sandwichelemente für den Einsatz im Bereich von Öffnungen entstehen. Diese besitzen thermisch getrennte Randprofile, die eine im Sandwichelement liegende Auswechslung darstellen. In die gleiche Richtung führen Untersuchungen über eine lokale Verstärkung durch Aufkleben zusätzlicher Blechlagen. Werden als Verstärkungsschichten Deckschichtabschnitte aus der laufenden Produktion der Sandwichelemente verwendet, ist ein einheitliches Design in Farbe und Form sichergestellt.

Die hier vorgestellten Modelle beziehen sich nur auf Sandwichelemente mit quasi-ebenen Deckschichten. Das Tragverhalten von Sandwichelementen mit stark profilierten Deckschichten lässt sich mit ihnen nicht beschreiben. Gerade im Dachbereich besteht daher ein weiterer Forschungsbedarf für Sandwichelemente mit Öffnungen.

## Literatur

- [1] Stamm, K.; Witte, H.: Sandwichkonstruktionen – Berechnung, Fertigung, Ausführung, Springer-Verlag, 1974
- [2] Davies, J. M. (Editor): Lightweight Sandwich Construction, Blackwell Science Ltd., 2001
- [3] Koschade, R.: Die Sandwichbauweise, Ernst & Sohn, Berlin, 2000
- [4] Lange, J.; Böttcher, M.: Tragverhalten und Bemessung von Sandwichelementen und Trapezprofilen aus Stahl, Dokumentation 588 Dach- und Fassadenelemente aus Stahl – Erfolgreich Planen und Konstruieren, Herausgeber: SIZ, Düsseldorf 2005
- [5] Böttcher, M.: Wand-Sandwichelemente mit Öffnungen, Dissertation an der TU Darmstadt, Heft 73, Veröffentlichung des IfSW, Darmstadt 2005
- [6] Böttcher, M.: Berechnungsverfahren für Wand-Sandwichelemente mit Öffnungen, IFBS-Fachinformation 5.09 Statik, Herausgeber: IFBS e.V., Düsseldorf 2006
- [7] Courage, W. M. G.; Tomà, A. W.: Structural detailing of openings in sandwich panels, TNO Building and Construction Research, Official Publication of the European Community, 1998
- [8] Amstutz, H.; Seeger, T.: Elastisch-plastische Beanspruchung in Scheiben mit exzentrischen ellipsenförmigen Kerben, IfSW, Fachgebiet Werkstoffmechanik der TH Darmstadt, FD – 11/1981
- [9] Berner, K.: Öffnungen in Sandwichbauteilen, Tagung LeichtBauen, am IfSW der TU Darmstadt, März 2006