

Öffnungen in Sandwichbauteilen

K. Berner, U. Pfaff

Zusammenfassung

Neben Standard-Ausführungen mit entsprechenden Auswechslungen im Bereich von Wandöffnungen soll eine Möglichkeit aufgezeigt werden, den durch die Öffnung geschwächten Querschnitt durch eine Rahmenkonstruktion zu verstärken. Dabei wird der Einsatz von speziellen thermisch getrennten Aluminiumprofilen mit Kunststoffstegen als Längsträger im Bereich der Öffnungen vorgeschlagen. Bei orientierenden Tests wurden gute Tragfähigkeiten in der Größenordnung der ungeschwächten Elementtragfähigkeit erreicht.

Abstract

Openings in sandwich panels generally require additional girders in the supporting frame. Besides these common solutions this report introduces a supporting frame which can reinforce openings in sandwich structures. The use of aluminium profiles with a lengthwise thermal brake is discussed and initial test series are presented. First results indicate that with the help of such additional structures it is possible to achieve the same load bearing capacities as with a full panel.

1. Stand der Technik

Sandwichbauteile mit ebenen oder quasiebenen Deckschichten werden häufig als „tragende“ Wandbauteile verwendet. „Tragend“ bezieht sich hierbei auf die Aufnahme und Weiterleitung von Windbelastungen und Temperaturbeanspruchungen. Sand-

wich-Wandbauteile werden meistens für Industriegebäude, aber z. B. auch für Bürogebäude und Hallen mit besonderer Nutzung (wie z. B. Ausstellung- und Verkaufshallen) verwendet.

Es liegt auf der Hand, dass bei vielen Gebäuden bei den Wänden auch „Öffnungen“, z. B. für Fenster und Türen, erforderlich sind.

Der „offizielle“ Stand der Technik bezüglich der Öffnungen bei Wandkonstruktionen mit tragenden Sandwichbauteilen ist stets eine „Auswechslung“, d. h. eine zusätzliche Unterstützung der Wandbauteile im Bereich der Öffnungen. Die auf Fenster und Türen anfallenden Lasten werden dabei durch Längs- und Querträger (z. B. aus Stahlprofilen) bis zur primären Tragkonstruktion (z. B. Hallenrahmen) weitergeleitet (siehe Abb. 1). Dies bedeutet aber, dass eine Auswechslung, z. B. von einer Fensteröffnung, stets ein erheblicher konstruktiver Aufwand bedeutet, vor allem aber auch hinsichtlich der Nutzung und der optischen Wirkung häufig unerwünscht ist.

Eine Auswechslung ist zur Zeit jedoch die einzige „offizielle“ Lösung für Öffnungen bei Sandwichbauteilen, da es bis jetzt keine anerkannten Nachweisverfahren in bauaufsichtlichen Zulassungen oder in der europäischen Norm prEN 14509 gibt, um Öffnungen in Sandwichbauteilen zu erfassen. Werden Öffnungen ohne Auswechslungen vorgesehen, liegt eine

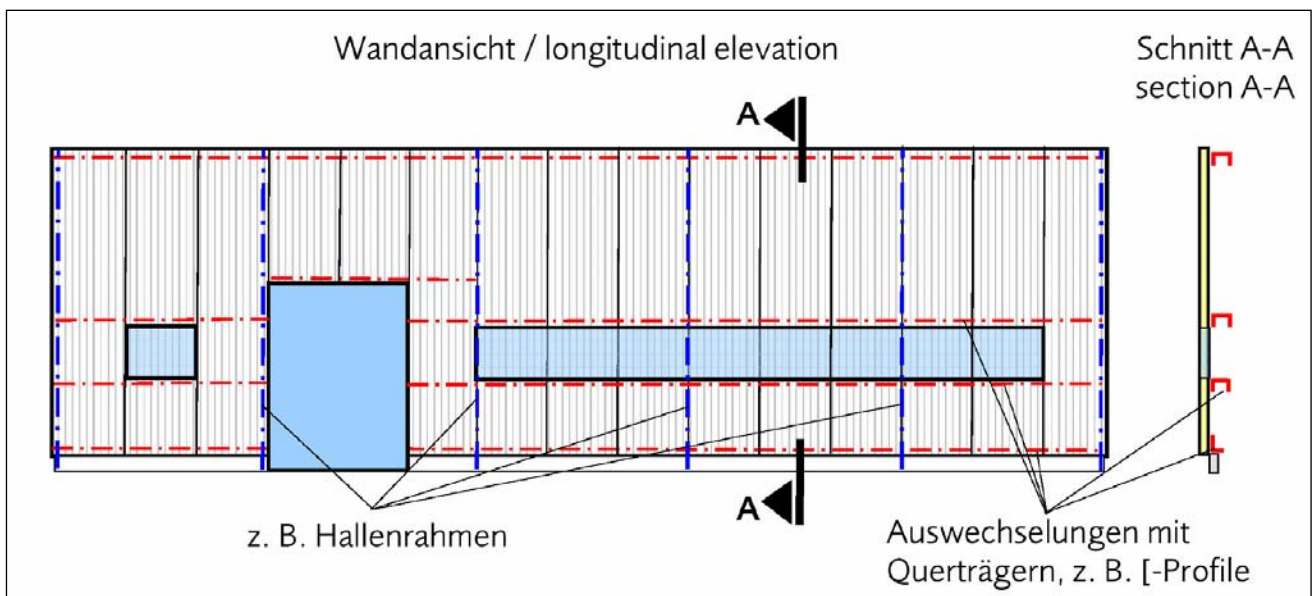


Abb. 1: Auswechslung von Öffnungen
Fig. 1: openings require additional girders

Verwendung der Bauteile außerhalb der anerkannten Regeln vor, was nicht zulässig ist.

Dies gilt insbesondere auch für die Verwendung von zulässigen Stützweiten, die für Paneele ohne Öffnungen bestimmt wurden. Diese Stützweiten können selbstverständlich auf keinen Fall, auch nicht näherungsweise, auf Paneele mit Öffnungen vorgesehen werden.

Nachfolgend sollen neue Möglichkeiten für Öffnungen in Sandwichbauteilen aufgezeigt werden, mit folgender Zielsetzung:

- Keine zusätzlichen Auswechslungen
- Möglichst ähnliche Tragfähigkeit (zulässige Stützweiten) der Paneele mit Öffnungen im Vergleich zu ungestörten Paneelen
- Eindeutige Erfassung der Beanspruchungen im Bereich der Öffnungen durch nachvollziehbare Nachweisverfahren in statisch-konstruktiver Hinsicht, um auch eine Erweiterung offizieller Unterlagen, wie z. B. bauaufsichtlicher Zulassungen, für Paneele mit Öffnungen zu ermöglichen.

2. Prinzipielle Darstellung der Varianten von Öffnungen

Abhängig von der Nutzung der vorgesehenen Öffnungen (z. B. als Fenster oder Türen) gibt es eine Reihe denkbarer Varianten von Öffnungen (bei Wänden aus Sandwichbauteilen), die sich prinzipiell nach folgenden Kriterien unterscheiden können (siehe Abb. 2).

- Größe der Öffnungen (Abb. 2 a)
- Lage der Öffnungen (Abb. 2 b)
- Varianten bezüglich der Spannrichtung der Paneele (Abb. 2 c und 2d)

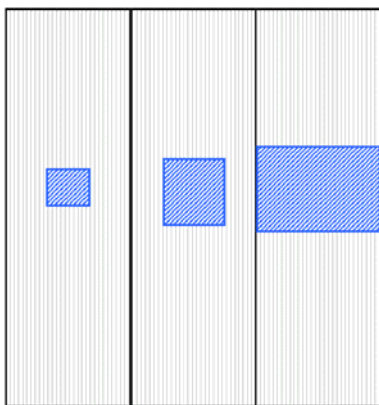


Abb. 2a: Größe der Öffnungen
Fig. 2a: size of the openings

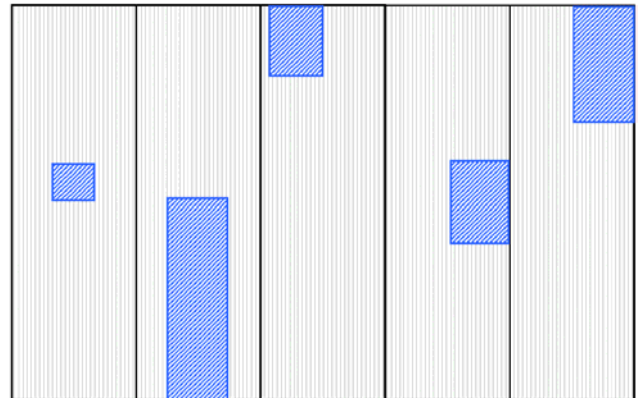


Abb. 2b: Lage der Öffnungen
Fig. 2b: location of openings

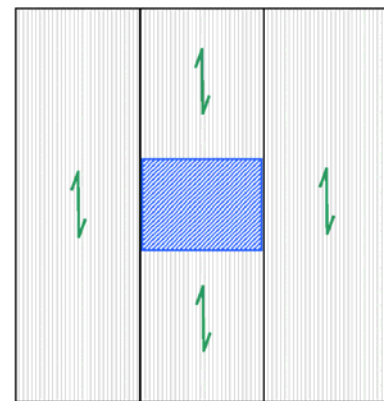


Abb. 2c: Vertikale Spannrichtung
Fig. 2c: vertical alignment

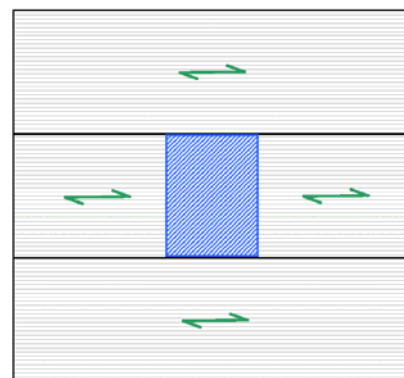


Abb. 2d: Horizontale Spannrichtung
Fig. 2d: horizontal alignment

Anhand dieser Kriterien ist es offensichtlich, dass es eine Reihe von Möglichkeiten hinsichtlich der konstruktiven Ausführungen geben muss, um Öffnungen in Sandwichbauteilen vorzusehen. Nachfolgend werden drei Möglichkeiten und deren Realisierbarkeit prinzipiell dargestellt.

3. Möglichkeiten zur Erfassung der Beanspruchungen im Bereich der Öffnungen in statisch-konstruktiver Hinsicht

3.1 Nachweis mit dem verbleibenden Restquerschnitt bei Paneelen mit Öffnungen

Es liegt auf der Hand, dass bei Öffnungen in einem Wandbauteil zunächst versucht werden kann, die Lastabtragung mit dem verbleibenden Restquerschnitt zu gewährleisten und nachzuweisen (siehe Abb. 3 und 4). Der Restquerschnitt ist dann durch die Breite des Panels abzüglich der Breite der Öffnung bestimmt. Die anfallenden Lasten (auch auf die Öffnung, z. B. auf das Fenster) sind dann von dem durch die Öffnung geschwächten Panel abzutragen (Abb. 3).

Es ist zu beachten, dass ein einfacher Nachweis mit dem geometrisch bestimmten Restquerschnitt auf der unsicheren Seite liegt, da erhebliche Spannungsspitzen (Kerbspannungen) in den Ecken der Öffnungen auftreten können. Damit ist ein realistisches Erfassen der Beanspruchungen durch einfachen Ansatz des Restquerschnitts im Prinzip nicht möglich.

Eine direkte rechnerische Erfassung dieser Spannungsspitzen ist nur mit FE-Berechnungen (oder mit verfeinerten Stabwerkmodellen) in Zusammenhang mit entsprechenden Versuchen möglich, was natürlich nur durch einen relativ hohen rechnerischen Aufwand durchführbar und direkt für einzelne praxisgerechte Nachweise nicht denkbar ist.

Die Ergebnisse solcher Berechnungen können jedoch für die Praxis sehr wichtig sein, da durch entsprechende Erkenntnisse einfache Nachweisverfahren für eine praxisgerechte Anwendung entwickelt werden können. Ein erster Ansatz zur rechnerischen Erfas-

sung der Spannungsspitzen im Bereich der Öffnungen wurde bereits 1998 vorgelegt. Zur Zeit gibt es aber eine Reihe von Forschungstätigkeiten an der Technischen Universität Darmstadt, deren Ergebnisse in naher Zukunft zur Verfügung stehen werden und die neue fundierte Erkenntnisse zu dieser Problematik bringen werden.

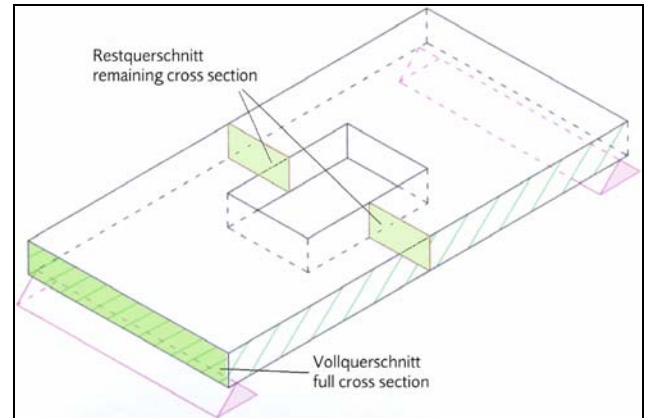


Abb. 3: Restquerschnitt im Bereich von Öffnungen
Fig. 3: remaining cross section at openings

Um aber eine Vorstellung über die erhebliche Reduzierung der Beanspruchbarkeit von Paneelen mit Öffnungen darzustellen, wurden Berechnungen mit praxisgerechten Beanspruchungen unter Ansatz des verbleibenden Restquerschnitts mit Berücksichtigung der Spannungsspitzen nach dem Vorschlag von W. M. G. Courage und A. W. Thoma, TNO Building and Construction Research, Delft, Niederlande durchgeführt und beispielhaft in Abb. 5 dargestellt.

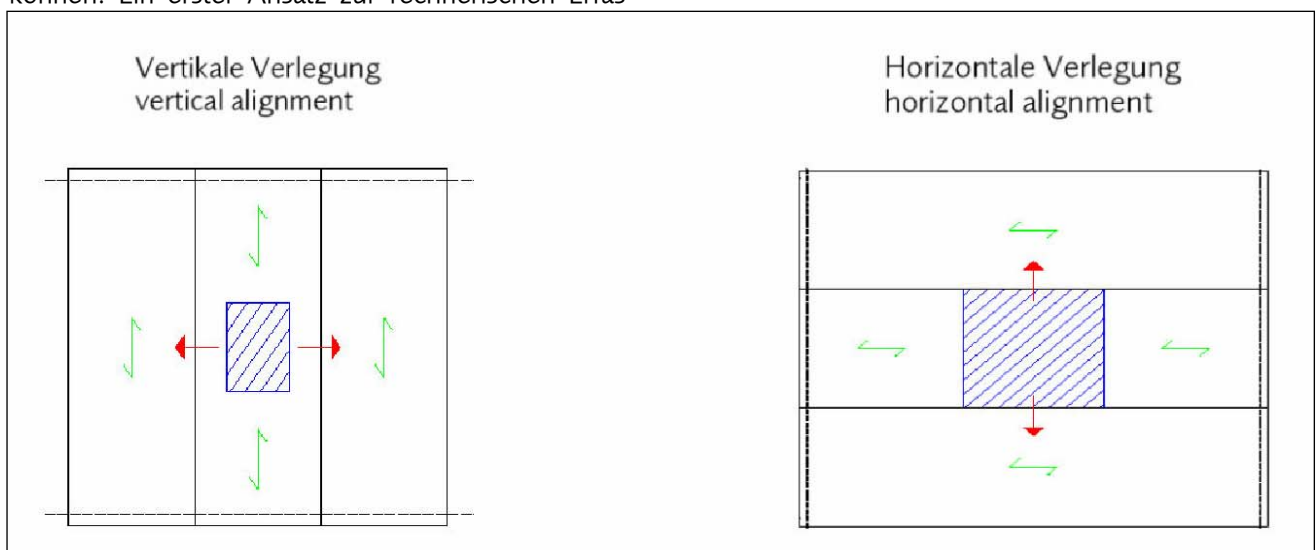


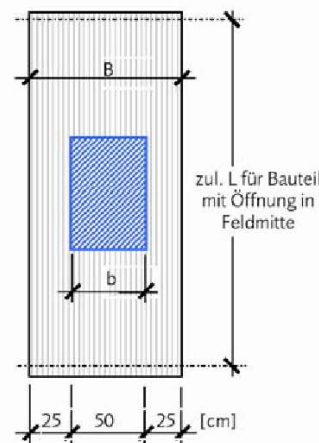
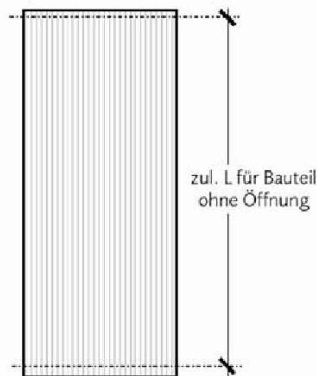
Abb. 4: Aktivierung der mittragenden Wirkung benachbarter ungestörter Paneele
Fig. 4: activation of support reserves from neighbouring, undisturbed panels

Paneeltyp: Wanelement mit beidseitigen linierten Deckschichten (wie Versuch Nr. V5)

Elementdicke: 100 mm
 Kernblechstärken: $t_{ka} = 0,45$ mm, $t_{ki} = 0,52$ mm
 Fläche der äußeren Deckschicht: $A = 4,5$ cm²/m
 Schwerlinienabstand: $h'_D = 97,5$ mm

gemäß Zulassung Z-10.4-233:
 Knitterspannung: $\sigma_K = 141$ N/mm²
 Abminderungsfaktor für den Tragfähigkeitsnachweis: 0,88
 Abminderungsfaktor bei erhöhter Temperatur: 0,81

Statisches System: Einfeldträger mit Stützweite L und gleichmäßiger Belastung $q = 0,50$ kN/m²



Nachweis für Paneel ohne Öffnung:

$$\sigma = 1,85 \cdot \frac{M}{h'_D \cdot A} \leq k_{\text{Tragfähigkeit}} \cdot k_{\text{Temp.}} \cdot \sigma_K$$

$$\frac{q \cdot L^2}{8}$$

$$\sigma = 1,85 \cdot \frac{8}{h'_D \cdot A} \leq k_{\text{Tragfähigkeit}} \cdot k_{\text{Temp.}} \cdot \sigma_K$$

$$\frac{0,50 \cdot L^2}{97,5 \cdot 4,5}$$

$$\sigma = 1,85 \cdot \frac{8}{97,5 \cdot 4,5} \leq 0,88 \cdot 0,81 \cdot 141 \text{ N/mm}^2$$

$$\Rightarrow \text{zul } L = 6,18 \text{ m}$$

Nachweis für Paneel mit Öffnung:

Vorwerte: gemäß TNO-Bericht

$$\beta = \frac{b}{B} = 0,5$$

$$\alpha_W = 2,49 - 0,62 \cdot \beta - 0,21 \cdot \beta^2 = 2,13$$

$$K_T = \frac{2,27 + 4,35 \cdot \beta - 5,48 \cdot \beta^2}{1 - \beta} = 6,15$$

$$\sigma_N = \frac{\alpha_W}{K_T} \cdot \sigma_K = \frac{2,13}{6,15} \cdot 141 = 48,8 \text{ N/mm}^2$$

Nachweis:

$$\sigma = 1,85 \cdot \frac{M}{h'_D \cdot A} \leq k_{\text{Tragfähigkeit}} \cdot k_{\text{Temp.}} \cdot \sigma_N$$

$$\frac{q \cdot L^2}{8}$$

$$\sigma = 1,85 \cdot \frac{8}{h'_D \cdot A} \leq k_{\text{Tragfähigkeit}} \cdot k_{\text{Temp.}} \cdot \sigma_N$$

$$\frac{0,50 \cdot L^2}{97,5 \cdot 4,5}$$

$$\sigma = 1,85 \cdot \frac{8}{97,5 \cdot 4,5} \leq 0,88 \cdot 0,81 \cdot 48,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\Rightarrow \text{zul } L = 3,63 \text{ m}$$

Abb. 5: Stützweitenvergleich bei Ansatz des Restquerschnittes

Fig. 5: comparison of allowable spans applying remaining cross section

Aufgrund dieser Ergebnisse ist aber deutlich zu erkennen, dass bei realistischen (Wind-) Beanspruchungen sich für Fenster und Türen zulässige Öffnungen ergeben, die für die Praxis außerhalb einer sinnvollen Anwendung sind.

Eine Lösung durch einen statischen Nachweis nur mit dem verbleibenden Restquerschnitt erscheint deshalb nur für kleine Öffnungen sinnvoll. Für Paneele mit realistischen Stützweiten und Beanspruchungen und praxiserichtete Öffnungen für Fenster und Türen ist dies für eine wirtschaftliche Lösung nicht möglich.

3.2 Aktivierung von mittragenden Bereichen von benachbarten Paneelen

Paneele mit Öffnungen mit einem verbleibenden Restquerschnitt haben im Bereich der Öffnungen, und damit insgesamt, eine geringere Biegesteifigkeit. Werden Paneele mit Öffnungen (ohne Verstärkungen) zusammen mit Paneelen ohne Öffnungen durch Zusammenfügen in den Längsfugen in einer Wand vorgesehen, kann davon ausgegangen werden, dass durch die kraftschlüssige Verbindung infolge der „Nut und Feder-Ausbildung“ in den Längsfugen gleiches Verformungsverhalten erzwungen wird. Das Paneel mit Öffnung und damit geringerer Biegesteifigkeit stützt sich auf das Paneel ohne Öffnung mit größerer Biegesteifigkeit über die Längsfugen ab. Dadurch treten natürlich Beanspruchungen in den Längsfugen auf und die ungestörten benachbarten Paneele werden zusätzlich beansprucht (siehe Abb. 4). Diese Lösung erscheint sinnvoll. Es müssen dabei aber zwei wesentliche Voraussetzungen vorhanden sein:

- Benachbarte Elemente dürfen keine Öffnungen haben.
- Die Einleitung der Beanspruchungen in die mittragenden ungestörten Elemente muss über die Längsfugen gewährleistet werden.

Aus diesen Voraussetzungen sind folgende Auswirkungen auf das Tragverhalten der Paneele unbedingt zu beachten:

- Die mittragenden Paneele ohne Öffnungen werden in jedem Fall zusätzlich beansprucht. Die Beanspruchung wirkt ungünstig, da sie einseitig, mehr oder weniger als Linien- oder Einzellasten, im Bereich der Längsfuge auftritt. Die Größe und die Art der Beanspruchung hängen jeweils von den Abmessungen und der Lage der Öffnungen ab. Ein allgemein gültiges Nachweisverfahren zur Berücksichtigung der mittragenden Wirkung benachbarter ungestörter Paneele liegt für eine pra-

xisgerechte Anwendung nicht vor. Aber auch in dieser Hinsicht wird an der Universität Darmstadt geforscht. Eindeutig ist aber, dass die zulässigen Stützweiten der ungestörten Paneele mit zusätzlichen Beanspruchungen aus den Paneelen mit Öffnungen natürlich geringer sind als bei „normaler“ Beanspruchung.

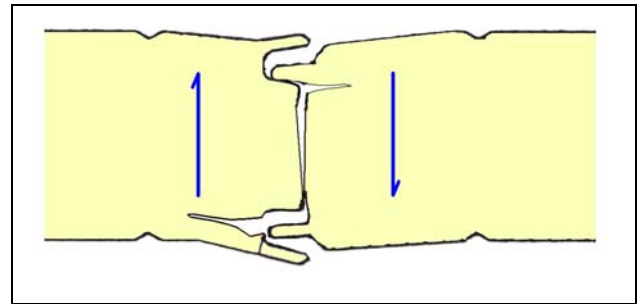


Abb. 6: Querkraftübertragung in den Längsfugen

Fig. 6: Shear force transmission in longitudinal joints

- Zur Aktivierung einer mittragenden Wirkung von ungestörten Paneelen im Bereich von Paneelen mit Öffnungen ist auf jeden Fall eine Querkraftübertragung in den Längsfugen erforderlich (Abb. 6). Für einen Nachweis dieser Querkrafttragfähigkeit sind zulässige Rechenwerte festzulegen, die nur durch experimentelle Untersuchungen festgelegt werden können. Für eine statistische Auswertung und in Anbetracht der großen Anzahl der Varianten von möglichen Öffnungen sind wahrscheinlich aufwendige Versuchsserien erforderlich. Es ist klar, dass die Querkrafttragfähigkeit der Längsfugen stark von der „Nut- und Feder-Ausbildung“ abhängt und bei einigen Längsfugenausbildungen, z. B. bei Mineralwollelementen, sehr gering sein dürfte.

3.3 Verstärkungen im Bereich der Öffnungen durch speziell konzipierte Rahmen

Nachfolgend sollen prinzipielle Möglichkeiten für Verstärkungen im Bereich der Öffnungen aufgezeigt werden, mit folgender Zielsetzung:

- Durch die konstruktiven Maßnahmen sollen alle Öffnungen, unabhängig von Größe und Lage, verstärkt werden können. Die konstruktiven Verstärkungen sollen nicht zusätzlich, sondern im Zusammenhang mit den Fenster- und Türrahmen vorgesehen werden.
- Durch die Verstärkungen sollen, auch bei großen Öffnungen (bis etwa gesamte Paneelbreite), brauchbare zulässige Stützweiten erreicht wer-

den, die etwa den Stützweiten der ungestörten Paneele entsprechen.

- Die Längsfugen und damit benachbarte Elemente sollen nicht zusätzlich beansprucht werden.
- Die zugehörigen statischen Nachweise sollen einfach nachvollziehbar sein, so dass die Verstärkungen mit einem entsprechenden Nachweisverfahren auch direkt, ohne aufwendige Versuchserien, in offizielle Unterlagen erfasst werden können.

Zur Erläuterung der Beanspruchungen im Bereich der Öffnungen werden nachfolgend zunächst die Möglichkeiten einer sinnvollen Verstärkung für eine Öffnung mit der maximalen Breite (Extremfall), die der gesamten Paneelbreite entspricht, dargestellt (siehe Abb. 7):

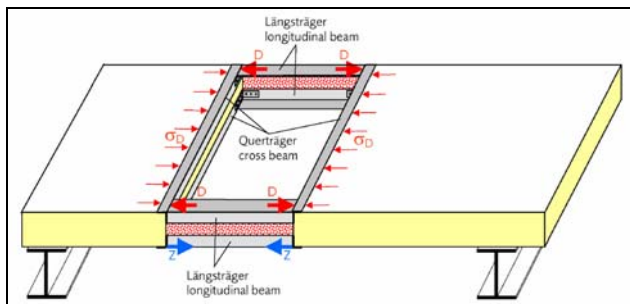


Abb. 7: Ausbildung von Rahmen im Bereich von Öffnungen mit speziellen Alu-Profilen und Kunststoff-Stegen (APK-Profilen)

Fig. 7: Frame-construction within the range of openings with special aluminium profiles and plastic bars (APK profiles)

Die Verstärkung besteht prinzipiell aus einem Rahmen, der aus vier (jeweils zwei oben und unten) Querträgern im Bereich der Deckbleche am Querrand der Öffnungen und zwei speziellen Längsträgern am Längsrand der Öffnungen besteht. Der Rahmen soll im dargestellten Beispiel die Beanspruchung alleine (ohne Restquerschnitt des Paneels) übernehmen.

Durch die Biegebeanspruchung infolge der äußeren Lasten entstehen Druckbeanspruchungen (σ_d) im oberen und Zugbeanspruchungen (σ_z) im unteren Deckblech des Paneels, die jeweils in die Querträger eingeleitet werden müssen. Dies kann prinzipiell durch mechanische Verbindungsmittel oder durch Verklebung erfolgen.

Die Querträger leiten die Beanspruchungen (im Prinzip als horizontale Auflagerkräfte des jeweiligen Querbalkens) in den Obergurt (D) bzw. den Unter-

gurt (Z) der Längsträger ein. Dabei muss außerdem gewährleistet werden, dass in den Ecken des Rahmens die vertikalen Querkräfte (Q) in die Längsträger übertragen werden können.

Die Längsträger des Aussteifungsrahmens übernehmen dann im Bereich der Öffnung die Biegemomenten- und Querkraft-Beanspruchung. Die Ausbildung der Längsträger als homogener Querschnitt, z. B. als Stahl- oder Aluminium-Vollprofil, ist jedoch wegen der dann vorhandenen Wärmebrücken zwischen Außen- und Innenseite nicht möglich.

Bei den Längsträgern müssen deshalb die Ober- und Untergurte thermisch getrennt werden. Gleichzeitig müssen sie aber schubfest miteinander verbunden werden (Verbundprofil), um eine ausreichende Biege- und Schubtragfähigkeit zu erhalten. Dabei muss im Wesentlichen die Tragfähigkeit des ungestörten Paneels erreicht werden, falls vergleichbare Stützweiten erreicht werden sollen.

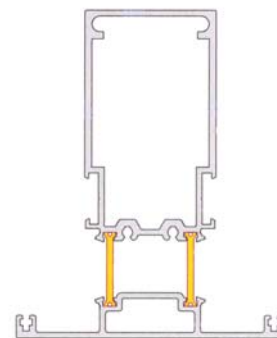


Abb. 8: Beispiel APK-Profil

Fig. 8: Example APK-profile

Um diese Forderung zu erfüllen, wurde, als ausschlaggebende Grundidee, die Anwendung von speziellen Aluminium-Profilen mit Kunststoffstegen, nachfolgend APK-Profilen genannt, für die Längsträger konzipiert (Abb. 8). APK-Profile werden z. B. als tragende Profile beim Wintergartenbau verwendet, wobei die Profile die gesamten Lasten aus Eigengewicht, Gewicht der Glaseindeckung und Schnee bei Stützweiten von ca. 3,0 m abtragen. Die Profile sind mit allen erforderlichen Kennwerten für die statischen Nachweise (die interessanterweise nach der Sandwich-Theorie durchzuführen sind!) in bauaufsichtlichen Zulassungen erfasst.

Dabei wurde insbesondere die Übertragung der Schubtragfähigkeit durch die Kunststoffstege aus glasfaserverstärktem Kunststoff, die in Aluminiumkerben eingewalzt werden, experimentell unter Kurz- und Langzeitbelastung bei unterschiedlichen Tempe-

aturen (bis +90 °C) untersucht. Die statistisch ausgewerteten Rechenwerte sind mit einem zugehörigen Nachweisverfahren offiziell in den bauaufsichtlichen Zulassungen erfasst, so dass der statische Nachweis für solche Profile ohne weiteres möglich ist.

Dabei können im Prinzip die Aluminium-Ober- und Untergute frei gewählt werden. Somit könnten auch spezielle Randprofile konzipiert werden, die z. B. mit den „Nut- und Feder-Ausbildungen“ der benachbarten Sandwichpaneel korrespondieren.

Die **Querträger** des Aussteifungsrahmens, jeweils zwei an den Außen- und Innenseiten, können von vorn herein getrennt vorgesehen werden, da sie nur für die Lastweiterleitung der Beanspruchungen aus den Deckblechen in die Längsträger erforderlich sind.

Auf der Basis oben genannter Überlegungen wurden am Institut für Sandwichtechnik erste Pilot-Versuche durchgeführt. Zur Untersuchung der prinzipiellen Machbarkeit wurden dabei Paneele mit Öffnungen in der Mitte der Spannweite untersucht. Bezüglich der Abmessungen wurde der Extremfall mit einer Öffnungsbreite, die etwa der Paneelbreite (1160 mm) entsprach, gewählt, so dass kein oder nur ein geringer mitwirkender Restquerschnitt im Bereich der Öffnungen vorhanden war.

Insgesamt wurden 5 Versuche durchgeführt, die in der Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt sind.

Die Versuche 1 bis 4 wurden zur Untersuchung des prinzipiellen Tragverhaltens der aussteifenden Verstärkung durchgeführt. Der Versuch 5 wurde als erste Näherung einer realistischen Ausführung einer Verstärkung durch einen Fensterrahmen in Verbindung mit einem Längsträger mit thermischer Trennung bei gleichzeitiger schubfester Verbindung der Querschnittsteile (APK-Profile).

Hinsichtlich der Versuchsergebnisse ist anzumerken, dass alle Teile des Rahmens zur Verstärkung im Bereich der Öffnungen handwerklich hergestellt wurden, wobei natürlich nachträglich aufgrund der Versuchsergebnisse deutliche Verbesserungsmöglichkeiten erkennbar wurden. So wurden die Längsträger im Prinzip selbst zusammengefügt, wobei nur der Kunststoffstegbereich von APK-Profilen entnommen und diese mit passenden Vierkantrohren in der Art verschraubt wurden, dass ein symmetrischer und bezüglich der Paneeldicke stimmiger Querschnitt entstand.

Aufgrund der Versuchsergebnisse sind folgende wesentliche Erkenntnisse zu bemerken:

1. Die Tragfähigkeiten der APK-Profile, insbesondere die Schubtragfähigkeit der Kunststoff-Stege, sind ausreichend hoch. Bei keinem Versuch versagte das Bauteil im Bereich der Längsträger.
2. Die Lasteinleitung der Beanspruchungen (σ_D) in die Querträger ist mit mechanischem Verbindungsmittel schwer realisierbar (siehe Versuch 1 und 2, Abb. 9 bis 12), da eine Vielzahl von Blechschrauben erforderlich wären und die Beanspruchung nicht gleichmäßig, sondern konzentriert (Spannungsspitzen) im Bereich der Längsträger auftreten.

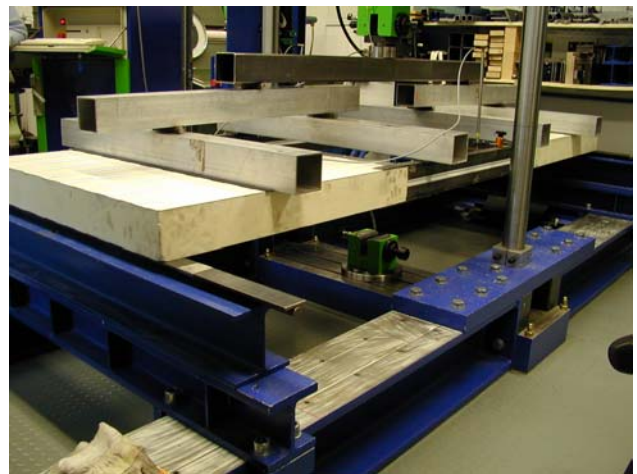


Abb. 9/Fig. 9



Abb. 10/Fig. 10

3. Eine Verklebung der Querträger mit den Deckschichten erscheint ausreichend tragfähig zu sein, da im Versuch Nr. 4 im Bereich der Einleitung der Beanspruchungen der Deckbleche in die Querträger kein Versagen festgestellt werden konnte.

Tabelle 1: Zusammenfassende Darstellung von Vorversuchen an Paneelen mit Öffnungen

Table 1: Summary of the test-results on panels with openings

Ver- such Nr.	Paneeltyp Paneel-Dicke (d) Paneel-Breite (b) Deckblech-Dicke (t_k) Stützweite (ℓ)	Öffnungen Abmes- sungen Breite x Länge (mm)	Einleitung der Bean- spruchung in die Quer- träger (σ_D, σ_Z)	Einleitung der Kräfte D, Z in die Längsträger (D,Z)	Gesamt- Versa- genslast in (kN)	Versagensursache
1	Wandelement mit beidseitig linierten Deckschichten d = 120 mm b = 1000 mm $t_{k1} = t_{k2} = 0,56$ mm $\ell = 2940$ mm	1000 x 1000	Schrauben EJOT-JZ 6,3 e = 250 mm	jeweils 2 M10, 8.8 pro Querträger	5,08	Versagen bei den Deckblechen (Last- einleitung in die Querträger)
2	wie bei Versuch 1	wie bei Ver- such 1	Schrauben EJOT-JZ 6,3 e = 50 mm	jeweils 5 M10, 8.8 pro Querträger	9,26	Reißen der Schweiß- naht im Eckbereich des Rahmens (Last- einleitung vom Quer- träger in den Längs- träger), Knittern der Deckschicht (sekun- där)
3	wie bei Versuch 1	wie bei Ver- such 1	wie bei Ver- such 2	wie bei Versuch 2, Verstärkung der Schweißnähte im Rahmeneck	9,74	Knittern der Deck- bleche im Eckbereich der Rahmen (ungleiche Lasteinlei- tung bei den Deckble- chen), Biegeversagen der Quer- träger
4	wie bei Versuch 1	wie bei Ver- such 1	Verklebung der Querträger mit den Deck- blechen	wie bei Versuch 3	12,15	Versagen der Schweißnähte im Eckbereich der Rah- men (Lasteinleitung vom Querträger in den Längsträger)
5	Wandelement mit Beidseitig linierten Deckschichten d = 100 mm b = 1160 mm $t_{k1} = 0,52$ mm $t_{k2} = 0,46$ mm $\ell = 2935$ mm	805 x 805	Verklebung der Alu-Winkel (Querträger) mit den Deck- blechen	durch einen geschlos-senen, vor allem auch in den Ecken ver- schweiß- ten Alu-Rahmen, der mit den Längsträgern ver-schraubt wurde	13,20	Ablösung senkrecht zu den Deckschich- ten im Bereich der Verklebung der Quer-träger mit den Deckschichten infol- ge der Verformun- gen, Knittern der Deckbleche im Be- reich der Querträger (sekundär)



Abb. 11/Fig. 11

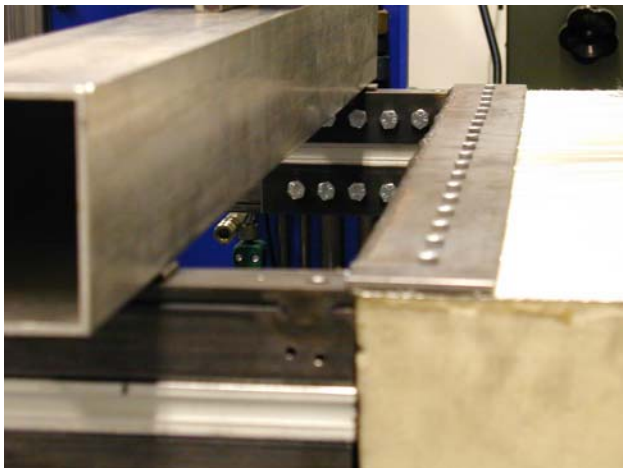


Abb. 12/Fig. 12

4. Eine wesentliche Erkenntnis aus den Versuchen ist die Auswirkung der Steifigkeit von dem Paneel selbst, im Vergleich zu der Steifigkeit von dem Rahmen, und hier insbesondere von den Längsträgern, die sich bei den Versuchskörpern erheblich unterscheiden. Bei den sehr steifen Längsträgern, die bei den Versuchen eher durch willkürliches Zusammenfügen von Querschnittsteilen hergestellt wurden, besteht die Gefahr, dass hinsichtlich des Verformungsverhaltens im Übergangsbereich vom Paneel zu den Längsträgern ein Knick in der Biegelinie entsteht. Dadurch werden Beanspruchungen in der Verklebung der Deckschichten und Querträgerflansch senkrecht zur Paneelebene erzeugt, die frühzeitig zum Ab-

lösen von Teilbereichen der Verklebung und damit auch frühzeitig zum Versagen führen, siehe Versuch 5 (Abb. 13). Bei entsprechender Anpassung der Steifigkeiten kann hier aber wahrscheinlich deutlich optimiert werden.

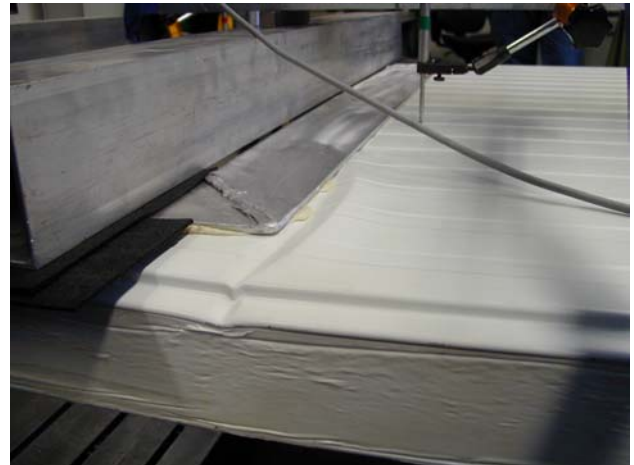


Abb. 13/Fig. 13

Zusammenfassend kann aufgrund der Versuchsergebnisse (insbesondere von Versuch 5) festgestellt werden, dass durchaus eine Möglichkeit besteht, große Öffnungen in Paneele vorzusehen und gleichzeitig im Prinzip eine ausreichende Tragfähigkeit der Paneele zu erhalten, falls im Übergangsbereich der Öffnungen eine sinnvolle Einleitung der Beanspruchung aus den Deckschichten in Querträger (z. B. durch Verklebung) gewährleistet wird und die Biege- und Quertragbeanspruchung durch spezielle Träger mit Kunststoffstegen im direkten Bereich der Öffnungen übernommen wird.

Dabei trägt das Element mit Öffnungen die Lasten „in sich“ ab, so dass keine zusätzlichen Beanspruchungen der benachbarten Elemente und vor allem der Längsfugen auftreten.

3.4 Rechnerische Nachweise der Verstärkungen und Vergleich zu ungestörten Paneelen

Um darzustellen, dass die vorgeschlagenen Verstärkungen und deren konstruktive Ausbildung durchaus rechnerisch nachvollziehbar nachgewiesen und damit auch eventuell direkt in offizielle Unterlagen (z. B. für statische Nachweise auf der Basis von Normen oder bauaufsichtlichen Zulassungen) aufgenommen werden können, werden nachfolgend die Beanspruchungen im Versuch 4 und 5 im Einzelnen zahlenmäßig erfasst und mit den Beanspruchungen mit ungestörten Elementen verglichen.

3.4.1. Versuch Nr. V4 (siehe Abb. 14 und 15)

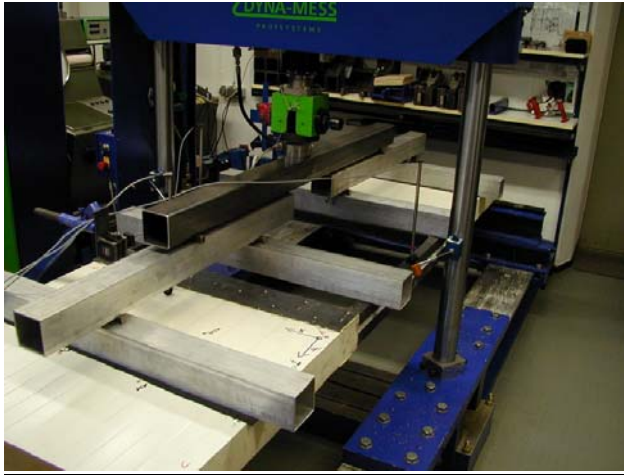


Abb. 14/ Fig. 14



Abb. 15/ Fig. 15

Paneel (allgemein):

Bezeichnung: Wanelement mit beidseitig linieren Deckschichten

Elementdicke: $d = 120 \text{ mm}$

Kernblechstärke: $t_{ka} = t_{ki} = 0,56 \text{ mm}$

Paneel mit Öffnung im Versuch 4:

Genauer Nachweis mit einem Stabwerkmodell:
stat. System: siehe EDV-Ausdruck (Abb. 16)

ermittelte Querkraft- und Momentenlinie: siehe EDV -Ausdruck Abb. 17 und 18

Größe der Öffnung: $1000 \times 1000 \text{ mm}$

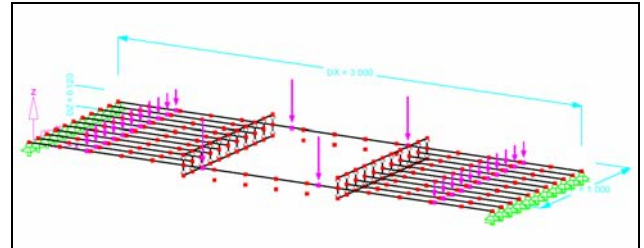


Abb. 16: Statisches System
Fig. 16: Static system

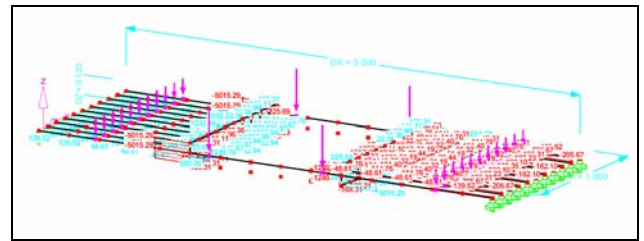


Abb. 17: Querkräfte
Fig. 17: Internal forces - Shear forces

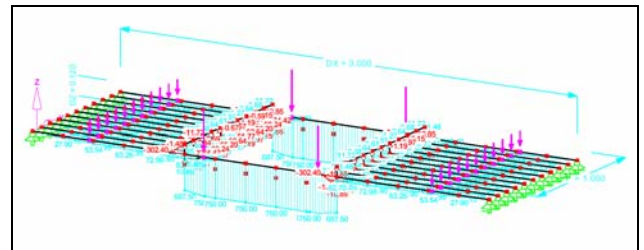


Abb. 18: Momentenfläche
Fig. 18: Internal forces - Bending moment

Versagenslast: aufgebrachte Last: 10,65 kN
Eigengew. der Lastbrücke: 0,53 kN
Eigengew. des Paneels: 0,97 kN
Gesamtversagenslast F_u : 12,15 kN

max. Schubspannung in der Kunststoffverbundzone:

$$\tau = \frac{F_u}{F_{\text{Einheitslast}}} \cdot Q_{\text{Einheitslast}} \cdot \frac{1}{h'_D \cdot n \cdot t}$$

F_u Gesamtversagenslast
 $F_{\text{Einheitslast}}$ Einheitsbelastung
 $Q_{\text{Einheitslast}}$ Querkraft bei Einheitsbelastung
 h'_D Schwerlinienabstand der Aluminiumprofile
 n Anzahl der Verbundstege (Verbundzone)
 t Stegdicke der Verbundzone

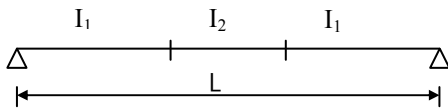
$$\tau = \frac{12,15}{4} \cdot 500 \cdot \frac{1}{78,3 \cdot 2 \cdot 1,8} = 5,4 \text{ N/mm}^2$$

$< 11,2 \text{ N/mm}^2$
 (Schubfestigkeit der Verbundzone)

Die Spannungsnachweise der Aluminiumprofile, der Sandwichelemente sowie die Durchbiegungsnachweise werden bei diesem Versuch nicht maßgebend.

Näherungsweise Nachweis durch ein vereinfachtes Modell:

System:



- L Stützweite
 I_1 Trägheitsmoment des Sandwichelementes
 I_2 Trägheitsmoment der Aluminium-Verbundträger

Hinweise:

- Die Schubweichheit der Sandwichelemente und der Verbundzone der Verbundträger ist bei der Ermittlung der Schnittgrößen und Spannungen zu berücksichtigen.
- Der Rechenwert der Knitterspannungen der Sandwichelemente ist mit dem genauen Modell und mit Kontrollversuchen zu kalibrieren.

Nachweise:

- Spannungsnachweise der Aluminiumverbundträger, einschließlich der Verbundzone (entsprechend DIN 4113 und den allg. bauaufsichtlichen Zulassungen der Verbundzone)
- Spannungsnachweise der Sandwichelemente
- Durchbiegungs- und Befestigungsnachweise

Paneel ohne Öffnung

Breite des Paneels: $B = 1000 \text{ mm}$
 stat. System: wie Paneel mit Öffnung
 max. Moment in Feldmitte: $M = F_u \times 36,7 \text{ (kNm)}$
 max. Spannung in den Deckschichten: $\sigma = \frac{M}{h'_D \cdot B \cdot t_k}$

mit $\sigma = 112 \text{ N/mm}^2$ (extrapolierte Knitterspannung aus der maßgebenden Zulassung für das Bauteil)

⇒ Gesamtversagenslast

$$F_u = \frac{11,2 \cdot 11,8 \cdot 100 \cdot 0,056}{36,7} = 20,2 \text{ kN}$$

3.4.2 Versuch Nr. V5 (siehe Abb. 19)

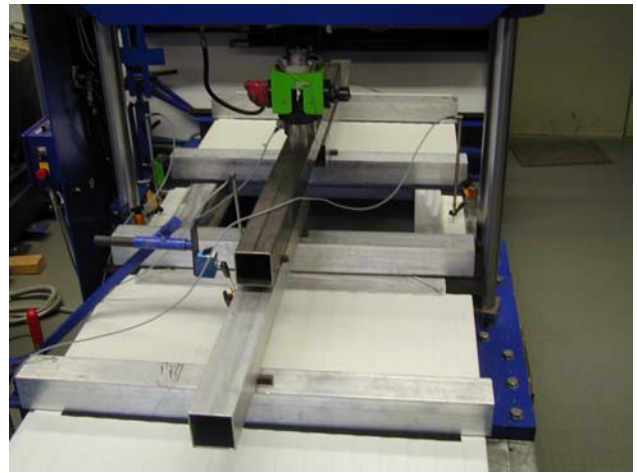


Abb. 19/Fig. 19

Paneel (allgemein):

Bezeichnung: Wanelement mit beidseitig linier-ten Deckschichten Typ L „Colorwand 1160“
 Elementdicke: 100 mm
 Kernblechstärke: $t_{ka} = 0,45 \text{ mm}$, $t_{ki} = 0,52 \text{ mm}$

Paneel mit Öffnung im Versuch V5:

stat. System: siehe EDV (Abb. 20)

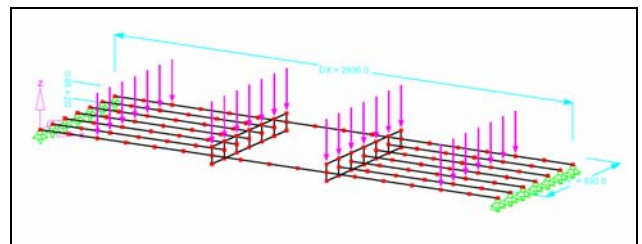


Abb. 20: Statisches System

Fig. 20: Static system

ermittelte Querkraft- und Momentenlinie: siehe EDV –Ausdruck Abb. 21 und 22

Größe der Öffnung: 805 x 805 mm
 Versagenslast: aufgebrauchte Last 12,07 kN
 Eigengew. der Lastbrücke 0,53 kN
 Eigengew. des Paneels 0,60 kN
 Gesamtversagenslast F_u 13,20 kN

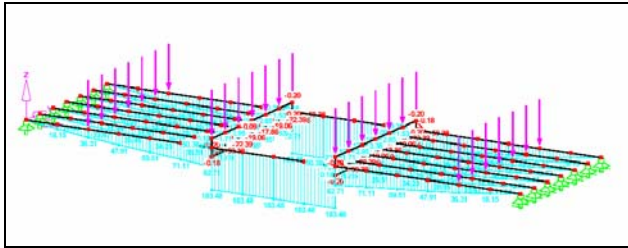


Abb. 21: Querkräfte
Fig. 21: Internal forces - Shear forces

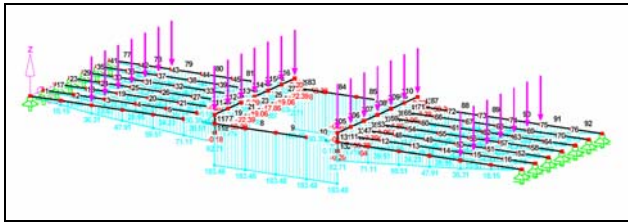


Abb. 22: Momentenfläche
Fig. 22: Internal forces - Bending moment

max. Versagensspannung im Deckblech (Knittern):

$$\sigma = \frac{82,71 \cdot 1000 \cdot 13,2}{97,5 \cdot 0,45 \cdot 201,7} = 123,4 \text{ N/mm}^2$$

≈ 0,9 x 141 N/mm² (Rechenwert der Knitterspannung gem. Zulassung Nr. Z-10.4-233)

Durchbiegungen bei 1 kN Gesamtlast

Versuch	rechnerisch
1,36 mm	1,39 mm (siehe Abb. 23)

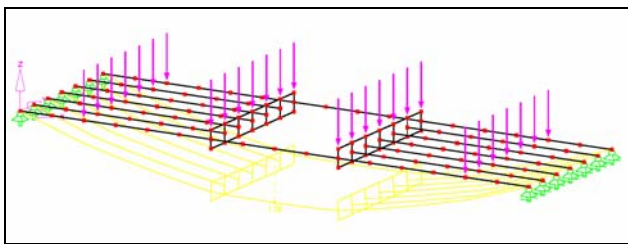


Abb. 23: Durchbiegungen
Fig. 23: Deflection

Paneel ohne Öffnung

Breite des Paneels: B = 1160 mm
stat. System: wie Paneel mit Öffnung
max. Moment in Feldmitte: M = F_u x 36,7 (kNcm)

max. Spannung in den Deckschichten: $\sigma = \frac{M}{h'_D \cdot B \cdot t_k}$

mit $\sigma = 141 \text{ N/mm}^2$ (Knitterspannung gem. Zulassung Nr. Z-10.4-233)

⇒ Gesamtversagenslast:

$$F_u = \frac{14,1 \cdot 9,75 \cdot 116 \cdot 0,045}{36,7} = 19,6 \text{ kN}$$

Gegenüberstellungen

Versagenslasten

Vers.-Nr.	Paneel mit Öffnung (im Versuch erreichte Traglast)	Paneel ohne Öffnung
V4	12,15 kN	20,2 kN
V5	13,20 kN	19,6 kN

Zul. Stützweiten (q = 0,50 kN/m²) zu Versuch Nr. V5

Paneel mit Öffnung		Paneel ohne Öffnung
ohne Verstärkung	mit Verstärkung (APK-Profile)	
zul. l = 2,57 m	zul. l = 5,13 m	zul. l = 6,18 m

4. Zusammenfassung

Aufgrund oben angegebenen Anmerkungen und ersten orientierenden Vorversuchen sollte gezeigt werden, dass durch sinnvolle Verstärkungen bei Sandwichbauteilen mit großen Öffnungen (Breite der Öffnungen maximal gleich der Breite der Paneele) ausreichende Tragfähigkeit (Stützweiten) erreicht werden können. Dabei wurde der Einsatz von speziellen thermisch getrennten Aluminiumprofilen mit Kunststoffstegen als Längsträger im Bereich der Öffnungen vorgeschlagen.

Die Tragfähigkeit der Sandwichelemente soll dabei ohne Mitwirkung von benachbarten Elementen und einer damit verbundenen Beanspruchung der Längsfugen zwischen den Elementen gewährleistet werden.

Die konstruktive Ausbildung ist ingenieurmäßig aufgrund von statischen Berechnungen auf der Basis von Rechenwerten für die speziellen Längsträger, die in bauaufsichtlichen Zulassungen angegeben sind, nachvollziehbar nachweisbar, so dass im Prinzip alle denkbaren Varianten von Öffnungen konzipiert und für offizielle Unterlagen vorbereitet werden könnten. Für einen endgültigen praxismgerechten Einsatz sind jedoch noch weitere Untersuchungen, vor allem für spezielle produktbezogene Ausführungen der Verstärkungsrahmen, erforderlich.

5. Autoren

Berner, Klaus, Prof. Dr.-Ing.: Professor an der FH Mainz für Stahlbau, Holzbau und Statik, Leiter des iS-mainz, Stellvertretender Leiter der Amtlichen Prüfstelle für Baustoffe, Holzstraße 36, 55116 Mainz, Partner des Ingenieurbüros Berner & Gruber GmbH, Elisabethenstraße 62, 64283 Darmstadt

Pfaff, Ute, Dipl.-Ing. (FH): Mitarbeiterin im Ingenieurbüro Berner & Gruber GmbH, Elisabethenstraße 62, 64283 Darmstadt und freie Mitarbeiterin im iS-mainz