Ulrike Kuhlmann (Hrsg.)

Stahlbau-Kalender 2020

Schwerpunkte: Neue Normung im Hochbau, Leichtbau

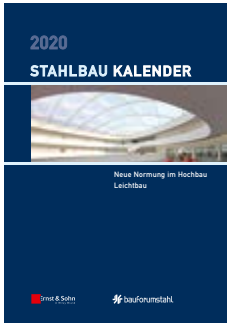
- **EC-Kommentierung aus erster Hand, mit Ausblick auf die neue Eurocode-Generation**
- **Leichtbau ist der einzigartige Vorteil der Stahlbauweise gegenüber den anderen Bauweisen**
- **Aktuelle Erläuterungen über Korrosionsschutz**

Die Vorteile des Leichtbaus kommen im Stahlhochbau zum Tragen: große Steifigkeit bei geringem Gewicht, architektonische Gestaltungsmöglichkeiten, schnelle Montage, Wärmedämmung. Das Buch gibt Erläuterungen zu den spezifischen Konstruktions- und Bemessungsregeln sowie zur Normung.

BESTELLEN
+49 (0)30 470 31–236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3290

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.

Ernst & Sohn
A Wiley Brand



4 / 2020 · 900 Seiten · 675 Abbildungen · 250 Tabellen

Hardcover
ISBN 978-3-433-03290-9 **€ 149***

Fortsetzungspreis **€ 129***

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

ÜBER DAS BUCH

Seit der Ausgabe 2011 werden systematisch alle Teile von Eurocode 3 mit ihren Nationalen Anhängen kommentiert. In dieser Ausgabe werden neben der Aktualisierung von Teil 1-1 „Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau“ auch Erläuterungen für die neuen Regeln der zukünftigen Eurocode-Generation präsentiert. Außerdem wird für den Metallleichtbau auf die sich abzeichnenden Änderungen und Ergänzungen in Eurocode 3 Teil 1-3 für kaltgeformte Bauteile und Bleche und in Eurocode 9 Teil 1-4 eingegangen.

Der Stahlbau ist in grundlegender Weise mit dem Leichtbau und der Anwendung von faserverstärkten Kunststoffen verbunden. Die funktionalen und wirtschaftlichen Vorteile, wie z. B. geringes Eigengewicht und hohe mechanische Festigkeit, einfache Montage, werden für Sandwichelemente, im Membranbau, für temporäre und für fliegende Bauten bis hin zu Leichtbaubrücken genutzt. Das Buch enthält Beiträge über die ingenieurmäßige Auslegung von Bauteilen mit Erläuterungen zu den Konstruktionsregeln. Bei Leichtbau-Konstruktionen gilt es, ein besonderes Augenmerk auf das Schwingungsverhalten zu legen. Dieses wird in zwei Beiträgen, neben der Erdbebenbemessung, besonders vertieft.

Ein weiteres grundlegendes Thema des Stahlbaus - der Korrosionsschutz - wird in zwei ausführlichen Beiträgen mit allen Aspekten und Möglichkeiten umfassend und aktuell behandelt.

BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03290-9	Stahlbau-Kalender 2020	€ 149*

☐ Privat ◯ Geschäftlich

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:
Tel. +49 (0)30 47031-236
Fax +49 (0)30 47031-240
marketing@ernst-und-sohn.de

Firma, Abteilung _____ UST-ID Nr. _____

Name, Vorname _____ Telefon _____ Fax _____

Straße, Nr. _____

PLZ / Ort / Land _____ E-Mail _____

Datum / Unterschrift _____

www.ernst-und-sohn.de/3290

Irrtum und Änderungen vorbehalten. Stand: 3/2020

Vorwort

Der Stahlbau-Kalender 2020 befasst sich in diesem Jahr mit den beiden Schwerpunkten **Neue Normung im Hochbau** und **Leichtbau**. Da ist zum einen die Überarbeitung der einzelnen Normenteile des Eurocode 3 im Zuge der Entwicklung der 2. Generation der Eurocodes zu nennen. Für den wichtigen Grundlagenteil EN 1993 1-1 werden die wesentlichen Änderungen vorgestellt. Zum anderen gibt es im Korrosionsschutz eine neue Normenausgabe DIN EN ISO 12944. Für die Erdbebenbemessung steht die Einführung von Eurocode 8 und des dazu fertiggestellten Nationalen Anhangs kurz bevor. Und für den Metallleichtbau wurden mit DIN EN 1090-4 und -5 eigene Teile zur Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken eingeführt. Neben dem Metallleichtbau fasst der Stahlbau-Kalender 2020 den Schwerpunkt **Leichtbau** als Thema sehr weit auf und behandelt sowohl leichte Materialien wie Membranstoffe und Faserverbundwerkstoffe als auch leichte Strukturen unterschiedlichster Herkunft und Anwendung wie Gerüste oder Fliegende Bauten.

Der Abdruck der zurzeit gültigen Grundnorm **DIN EN 1993-1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau** mit Nationalem Anhang sowie ergänzenden, an den jeweiligen Stellen eingearbeiteten Kommentaren und Erläuterungen von Prof. Dr.-Ing. *Ulrike Kuhlmann* und *Fabian Jörg,* M.Sc., Universität Stuttgart, ermöglicht in der täglichen Arbeitspraxis den unmittelbaren Zugriff auf die aktuellste Fassung der Norm und ihre Auslegungen, wie sie sich zum Teil auch durch aktuelle Anfragen und Entwicklungen ergeben haben. In diesem Jahr ist die jüngste Änderung des Normenteils DIN EN 1993-1-1/A1:2014-07 und der aktualisierte Nationale Anhang DIN EN 1993-1-1/NA:2018-12 an den jeweiligen Stellen im Normentext eingearbeitet. Gleichzeitig erlaubt der vollständige Original-Normentext auch einen direkten Vergleich mit den Änderungen in der zukünftigen EN 1993-1-1, wie sie in einem weiteren Beitrag dieses Stahlbau-Kalenders erläutert sind.

Dr.-Ing. *Karsten Kathage* und Dipl.-Ing. *Christoph Ortmann*, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin stellen in ihrem Beitrag **Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB), Normen und Bescheide im Stahlbau** die Umwandlung der bisherigen Regelungen der MusterListe der Technischen Baubestimmungen (MLTB), der Teile II und III der Liste der Technischen Baubestimmungen sowie der Bauregellisten in die MusterVerwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) vor. In dieser Ausgabe des Stahlbau-Kalenders wird die aktuelle Version MVV TB 2017/1 aus dem Blickwinkel des Stahlbaus erläutert. Die Veröffentlichung einer überarbeiteten Version MVV TB 2020/1 der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen ist für Anfang 2020 vorgesehen. Zusätzlich werden die aktuellen Normen und Richtlinien für den Stahlbau aufgelistet und eine Zusammenstellung der für den Stahl- und Verbundbau relevanten Bescheide des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt (Stand: September 2019) gegeben. DIN EN 1090-4 gibt erstmals europaweit einheitliche Ausführungsregeln für das Bauen mit kaltgeformten Profiltafeln und Profilen aus Stahl vor, in Deutschland als Ersatz für DIN 18807-3. DIN EN 1090-5 regelt als Ersatz für DIN 18807-9 die Ausführung von tragenden Konstruktionen mit kaltgeformten Profiltafeln aus Aluminium. Im Beitrag **Neue europäische Normen für den Metallleichtbau: Bemessung, Konstruktion und Ausführung von Dach und Wand** haben die Autoren Dr.-Ing. *Thomas Misiek*, Breinlinger Ingenieure, und Dr.-Ing. *Ralf Podleschny, IFBS,* diese Änderungen für den Metallleichtbau zum Anlass genommen, den Beitrag aus dem Stahlbau-Kalender 2014 grundlegend zu überarbeiten. Dabei werden auch die neuen Nationalen Anhänge zu DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1999-1-4 vorgestellt. In gewissem Umfang wird auf sich abzeichnende Änderungen und Ergänzungen in den zukünftigen Eurocode-Teilen EN 1993-1-3 und EN 1999-1-4 eingegangen, wie zum Beispiel zu den Themen Schubfelder und Schubsteifigkeit sowie Drehbettung.

Die neue Normenreihe DIN EN ISO 12944 „Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme“ besteht aus neun Teilen, die 2018/2019 aus einer grundlegenden Revision der bisherigen Norm entstanden sind. Neben vielen redaktionellen Änderungen und Anpassungen an den derzeit gültigen Stand der Technik wurde der neue Teil 9 für Bauwerke im Offshore-Bereich hinzugefügt, der einer Überarbeitung der früheren DIN EN ISO 20340 entspricht. Mit dem Beitrag **Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme** geben die Autoren Dr. *Frank Bayer*, GEHOLIT+WIEMER Lack- und Kunststoff-Chemie GmbH, Dipl.-Kfm. *Guido Gormanns*, Dr. *Andreas Schütz,* Bundesverband Korrosionsschutz e. V., Dipl.-Ing. *Joachim Pflugfelder*, Sika Deutschland GmbH, und Dipl.-Ing. (FH) *Philipp Suppan*, Franz Dietrich GmbH, einen Überblick über den Korrosionsschutz von Stahlbauten. Der Beitrag bietet dabei für die Praxis eine Hilfe und einen Leitfaden zu den Grundlagen des Korrosionsschutzes von Stahl, zur Oberflächenbehandlung, zu den verschiedenen Beschichtungssystemen, zur Ausführung und Überwachung sowie zur Prüfung.

Ergänzend zum allgemeinen Korrosionsschutzbeitrag greift Dipl.-Ing. *Mark Huckshold*, Industrieverband Feuerverzinken e. V., in seinem Beitrag **Korrosionsschutz durch Duplex-Systeme: Feuerverzinken plus Beschichten** das Thema noch einmal auf. Der Beitrag beschreibt Duplex-Systeme zum schweren Korrosionsschutz von Stahlbauteilen, die aus einer Feuerverzinkung mit nachträglich aufgebrachten organischen Beschichtungssystemen bestehen. Dazu wird in Nass- und Pulverbeschichtungssysteme unterschieden, wobei auf Basis der aktuellen technischen Normung der Stand der

Technik erläutert wird. Die Dokumentation von ausgeführten Referenzen mit mehreren Jahrzehnten Schutzdauer zeigt die Eignung und die baupraktische Bedeutung dieser Systeme auf.

Als Hintergrund zu schwingungsempfindlichen Systemen des Leichtbaus oder auch im Zusammenhang mit dynamischen Beanspruchungen wie beim Erdbeben sind Grundlagenkenntnisse zum Schwingungsverhalten erforderlich. In ihrem Beitrag **Schwingungsverhalten ausgewählter Baukonstruktionen** behandeln die Verfasser Dr.-Ing. *Roland Friedl*, bulicek+ingenieure gmbh, und Prof. Dr.-Ing. *Ingbert Mangerig*, Universität der Bundeswehr München, die Vermittlung grundlegender Zusammenhänge zur Quantifizierung der Schwingungsreaktion, zur Modellbildung und Idealisierung von Baukonstruktionen und zum Messen von Bewegungsgrößen. Für ausgewählte Schwingungsphänomene zum Beispiel infolge Windanregung werden, auch anhand konkreter Beispiele, Hilfestellungen zur Beurteilung und zum Vorgehen gegeben.

In den Themenbereich Leichtbau kann der Beitrag **Materialprüfung und Bemessung im Zelt- und Membranbau** der Autoren Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. *Natalie Stranghöner*, Dr.-Ing. *Jörg Uhlemann*, Universität Duisburg-Essen, Dr. rer. nat. *Carl Maywald*, Vector Foiltec GmbH, und Dipl.-Ing. *Bernd Stimpfle*, formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh, eingeordnet werden. Gespannte Membrankonstruktionen haben einzigartige Eigenschaften, wie geringes Eigengewicht, hohe Flexibilität, Transluzenz und die Fähigkeit, architektonisch ausdrucksstarke Formen zu bilden. Wurden Membranstrukturen vor Jahrzehnten noch überwiegend als stark gekrümmte Dächer gebaut, weil sie große Distanzen (z. B. Sportanlagen) wirtschaftlich und attraktiv überbrücken können, ist heute eine Entwicklung zu einem viel breiteren Anwendungsspektrum zu beobachten. Im Beitrag werden sehr umfassend Informationen zu Material, Entwurf und Bemessung, auch anhand der einschlägigen Normen, bis zur Konstruktion, zur Ausführung und zu Fragen des Brandschutzes und der Bauphysik gegeben, vielfach auch mit Beispielen illustriert.

Im Rahmen der Entwicklung der zweiten Generation der Eurocodes hat Eurocode 3 Teil 1-1 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau“ als erster Teil von Eurocode 3 eine konsolidierte Fassung erreicht, die jetzt zur formalen Abstimmung in Europa vorbereitet wird. Der Beitrag **Neue Entwicklungen in prEN 1993-1-1:2020** der Autoren Prof. Dr.-Ing. *Ulrike Kuhlmann*, *Fabian Jörg*, M. Sc., Universität Stuttgart, Prof. Dr. sc. techn. habil. *Markus Knobloch*, *Anna-Lena Bours*, M. Sc., Ruhr-Universität Bochum, Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. *Joachim Lindner*, Berlin, und Prof. Dr. techn. *Andreas Taras*, ETH Zürich, macht den Anwender frühzeitig mit den wesentlichen strukturellen und technischen Änderungen gegenüber der zurzeit gültigen Norm vertraut. Eingeleitet werden die verschiedenen Themen durch eine deutsche Übersetzung des englischen Originaltextes durch die Autoren. Neben dem jeweiligen Normentext und den Erläuterungen dazu findet man als Hilfestellung auch noch Bemessungsbeispiele. Ziel der Überarbeitung war, die Anwenderfreundlichkeit der Norm zu verbessern, die Regelungen sowohl innerhalb des Eurocodes 3 als auch mit den verwandten Normen zu harmonisieren und neue Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung zu integrieren

Der Beitrag **Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen** von Prof. Dr.-Ing. *Jan Knippers*, *Valentin Koslowski*, M. Sc., Universität Stuttgart, und Dr.-Ing. *Matthias Oppe*, Knippers Helbig GmbH, gibt einen Einstieg in die Anwendung der faserverstärkten Kunststoffe im Bauwesen. Im Hochbau ermöglichen die niedrige thermische Leitfähigkeit und die vielfältigen Form- und Farbgebungsmöglichkeiten neue konstruktive und architektonische Ansätze für Fassaden- und Hüllkonstruktionen, im Brückenbau führen günstige Gewichts- und Ermüdungseigenschaften zu neuen Pilotanwendungen. Der Beitrag gibt in diesem bauaufsichtlich bisher wenig geregelten Bereich Hinweise zu Material, Verbundwerkstoffen, Berechnung und Nachweisführung bzw. experimentellen Untersuchungen ebenso wie zur Ausführung und Überwachung. Er enthält damit Anregungen, auch im Bauwesen neue Anwendungen für diese interessante Materialgruppe zu erschließen.

Mit dem Beitrag **Besondere Aspekte der Planung, Bemessung und Ausführung von Gerüsten** geben die Autoren Dr.-Ing. *Tobias Schmidt*, PERI GmbH, Dipl.-Ing. Rolf Brückel, SIGMA KARLSRUHE GmbH, und Prof. Dr.-Ing. *Georg Geldmacher*, Hochschule Rhein-Main, einen Überblick über baurechtliche Grundlagen einerseits und konkrete Hinweise zur Planung und Bemessung andererseits. Anhand der Themenschwerpunkte Verankerung und Systemimperfektionen von Arbeits- und Schutzgerüsten sowie Überbrückungskonstruktionen wird auf die individuellen Besonderheiten dieser häufig aus Systembauteilen zusammengesetzten Konstruktionen eingegangen. Praktische Lösungsansätze und Hilfestellungen für die Bemessung werden auch für „Rüstbinder“ bereitgestellt. Dabei werden vor allem die Besonderheiten der räumlichen Aussteifung von Rüstbindersystemen durch entsprechend angeordnete Horizontal- und Querverbände behandelt.

Das vergangene Jahrzehnt wurde durch zahlreiche extreme Erdbebenereignisse geprägt, die zeigen, in welchem Maße selbst hochentwickelte Länder von den Konsequenzen eines Erdbebens getroffen werden können. Da die Gefährdung nicht vom Menschen beeinflusst werden kann, sollten Maßnahmen ergriffen werden, die die Verwundbarkeit von Bauwerken und anderen Infrastrukturen reduzieren. Zurzeit steht als Ersatz für DIN 4149 die verbindliche Einführung von DIN EN 1998-1 mit dem zugehörigen Nationalen Anhang bevor, in dem die Einwirkungen an die wissenschaftlichen Erkenntnisse der letzten Dekade angepasst wurden. Die Erdbebenkarte in DIN EN 1998-1/NA beruht auf einer grundlegenden Überarbeitung der alten Erdbebenkarten. Das Ergebnis zeigt für Deutschland eine

teilweise erheblich höhere Erdbebengefährdung und auch eine regionale Verschiebung der Grenze der Erdbebengefährdung. Der Nationale Anhang, der Ende 2018 der Öffentlichkeit zur Prüfung vorgelegt wurde, ist neben der aktuellen Version des Eurocode 8 Grundlage für den Beitrag **Tragverhalten, Auslegung und Nachweise von Stahlbauten in Erdbebengebieten** der Autoren Dr.-Ing. *Max Gündel*, Wölfel Engineering GmbH + Co. KG, Prof. Dr.-Ing. *Benno Hoffmeister*, RWTH Aachen, Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. *Ioannis Vayas*, NTU Athen, Dr.-Ing. *Klaus Wittemann*, SLP Ingenieurbüro für Tragwerksplanung, gewesen.

Der Beitrag **Fliegende Bauten und Freizeitparkanlagen** der Autoren Dr.-Ing. *Antonio Zizza*, und Dipl.-Ing. (FH) *Frank-Michael Wagner*, TÜV Rheinland Industrie Service GmbH,, Dipl.-Ing. Stefan Kasper, TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Dipl.-Ing. Christian Stelzl, *Svetislav Popovic,* M. Sc., und Dr.-Ing. *Roland Zander*, Ingenieurbüro Stengel GmbH, Dr.-Ing. *Andreas Simonis*, Gerstlauer Amusement Rides GmbH, Prof. Dr.-Ing. *Matthias Rohde*, Frankfurt University of Applied Sciences, konzentriert sich aufgrund der Komplexität und Vielfalt von Fliegenden Bauten und Freizeitparkanlagen auf die Fahrgeschäfte, wie z. B. Achterbahnen, Rundfahrgeschäfte, Karusselle, Hochfahrgeschäfte und Riesenräder. Zu den Fahrgeschäften wird ein Überblick über die rechtliche Situation und den Genehmigungsweg vor allem in Deutschland gegeben. Es werden die wesentlichen bautechnischen Bemessungsregeln mit Fokus auf den Stahlbau dargestellt und hier auch Besonderheiten wie die Wirkung von Beschleunigungen und die Risikobeurteilung behandelt. Am Beispiel der Stahlachterbahn werden konkrete Hinweise zur Anwendung der Normen und zu ausgewählten Konstruktionsdetails gegeben.

Zum Themengebiet des Leichtbaus gehören Sandwichelemente, bei denen die Deckbleche aus dünnem Stahlblech durch einen schubsteifen Kern miteinander verbunden sind. Diese Elemente entwickeln, gepaart mit geringem Gewicht, eine große Steifigkeit und Tragfähigkeit. Neben der raumabschließenden und lastabtragenden Funktion erfüllen diese meist als Dacheindeckungen und Wandverkleidungen eingesetzten Bauteile auch bauphysikalische Aufgaben, wie z. B. Wärmedämmung. In ihrem gegenüber 2010 überarbeiteten Beitrag **Sandwichelemente im Hochbau** erläutern Prof. Dr.-Ing. *Jörg Lange*, TU Darmstadt, und Prof. Dr.-Ing. *Klaus Berner*, iS-engineering GmbH, das Tragverhalten hinsichtlich der verschiedenen möglichen Versagensarten und stellen detailliert aktuelle Entwicklungen und Lösungsansätze auf dem Gebiet der Bemessung, Konstruktion und bauphysikalischen Bewertung von Sandwichelementen vor. Für die Nutzung in der Praxis sind sowohl die bauaufsichtlich formalen Grundlagen als auch die Bemessung anhand von ausgeführten Beispielen ausführlich dargestellt.

Zum Schluss möchte ich mich auch im Namen des Verlags Ernst & Sohn bei allen Autoren und den Mitarbeitern des Verlags bzw. im Institut ganz herzlich für ihre Leistung und ihren großen Einsatz bedanken. Eine besondere Herausforderung ist immer auch die zeitliche Verzögerung einzelner Beiträge und der nicht immer rechtzeitig vollständig fertiggestellte Text. Trotzdem ist es gelungen, dass der Kalender wieder pünktlich erscheinen kann und einen hervorragenden Überblick zu den Schwerpunktthemen gibt, die für die Anwendung zurzeit, aber auch für die zukünftige Nutzung viele Anregungen enthalten.

Am **Freitag, 19. Juni 2020** wird der diesjährige Stahlbau-Kalender-Tag in Stuttgart stattfinden, zu dem wir alle Interessierten herzlich einladen möchten. Dabei werden die Autoren dieser Ausgabe zu ihren Themen vortragen und für Diskussionen zur Verfügung stehen.

Stuttgart, Januar 2020
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Inhaltsübersicht

1 Stahlbaunormen – DIN EN 1993-1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau 1
Ulrike Kuhlmann, Fabian Jörg

2 Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB), Normen und Bescheide im Stahlbau 87
Karsten Kathage, Christoph Ortmann

3 Neue europäische Normen für den Metallleichtbau: Bemessung, Konstruktion und Ausführung von Dach und Wand 195
Thomas Misiek, Ralf Podleschny

4 Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme 307
Frank Bayer, Guido Gormanns, Joachim Pflugfelder, Andreas Schütz, Philipp Suppan

5 Korrosionsschutz durch Duplex-Systeme: Feuerverzinken plus Beschichten 371
Mark Huckshold

6 Schwingungsverhalten ausgewählter Baukonstruktionen 385
Roland Friedl, Ingbert Mangerig

7 Materialprüfung und Bemessung im Zelt- und Membranbau 455
Natalie Stranghöner, Jörg Uhlemann, Carl Maywald, Bernd Stimpfle

8 Neue Entwicklungen in prEN 1993-1-1:2020 511
Ulrike Kuhlmann, Markus Knobloch, Joachim Lindner, Andreas Taras, Fabian Jörg, Anna-Lena Bours

9 Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen 611
Jan Knippers, Valentin Koslowski, Matthias Oppe

10 Besondere Aspekte der Planung, Bemessung und Ausführung von Gerüsten 671
Tobias Schmidt, Rolf Brückel, Georg Geldmacher

11 Tragverhalten, Auslegung und Nachweise von Stahlbauten in Erdbebengebieten 731
Max Gündel, Benno Hoffmeister, Ioannis Vayas, Klaus Wittemann

12 Fliegende Bauten und Freizeitparkanlagen 843
Antonio Zizza, Frank-Michael Wagner, Stefan Kasper, Christian Stelzl, Svetislav Popovic, Roland Zander, Andreas Simonis, Matthias Rohde

13 Sandwichelemente im Hochbau 905
Jörg Lange, Klaus Berner

Stichwortverzeichnis 973

7.2.1.7 Gebrauchstauglichkeit

DIN EN 1990 sieht allgemein vor, dass für die Nachweise gegen umkehrbare Grenzzustände – damit sind vom Grundsatz her auch Verformungsnachweise gemeint – die häufige Einwirkungskombination herangezogen wird. Dies führt zu einer sehr geringen Gewichtung der in aller Regel als Leiteinwirkung maßgebenden Lasten aus Schnee ($\psi_1 = 0{,}2$). Demgegenüber sind die Durchbiegungen für Dächer nach DIN EN 1090-4 und DIN EN 1090-5 unter „Volllast" zu ermitteln, was als charakteristische Einwirkung interpretiert werden kann. Die Vorgaben entsprechen damit DIN 18807-3 (DIN 18807-8 enthielt keine vergleichbaren Vorgaben), jedoch ist die charakteristische Einwirkungskombination nach DIN EN 1990 für Nachweise gegen unumkehrbare Grenzzustände – z. B. für den Nachweis des elastischen Bauteilverhaltens im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei Ansatz einer Momentenumlagerung im Grenzzustand der Tragfähigkeit – gedacht. Sinnvoll wäre eine zwischen diesen beiden Extremen liegende Einwirkungskombination. DIN EN 14509 geht diesen Weg, indem es eigene Kombinationen und Kombinationsbeiwerte definiert.

Als Kompromiss ist der Nachweis mit der häufigen Kombination und erhöhter Wichtung der Leiteinwirkung denkbar:

$$E_d = \sum_{j=1} E_{Gk,j} + \psi \cdot E_{Qk,1} + \sum_{i>2} \psi_{2,i} \cdot E_{Qk,i} \qquad (39)$$

mit

$E_{Qk,j}$	ständige Einwirkungen
$E_{Qk,1}$	veränderliche Einwirkung als Leiteinwirkung
$E_{Qk,i}$	veränderliche Einwirkungen als Begleiteinwirkungen
ψ	zu vereinbarender Kombinationsbeiwert ($\psi_{0,i} \leq \psi \leq 1$)
$\psi_{2,i}$	Kombinationsbeiwert nach DIN EN 1990 zur Ermittlung des quasi-ständigen Werts einer veränderlichen Einwirkung
$\psi_{0,i}$	Kombinationsbeiwert nach DIN EN 1990 einer veränderlichen Einwirkung

Die Wichtung wäre mit dem Bauherrn abzustimmen. In Anlehnung an die bisherige Regelung wird $0{,}5 \leq \psi \leq 1{,}0$ empfohlen.

Das wirksame Flächenmoment 2. Grades darf (!) mit der in DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1999-1-4 angegebenen Gleichung ermittelt werden, es muss aber nicht. Üblicherweise wird bei Profiltafeln vereinfachend $I_{fic} = I_{eff} = I(f_{yb}/1{,}5)$ angesetzt und dann als über die Stützweite konstant angenommen. Auch den typengeprüften statischen Berechnungen („Typenprüfungen") der Hersteller liegt – soweit es sich um ein rechnerisch ermitteltes Flächenmoment 2. Grades handelt – dieser Ansatz zugrunde, die daher weiterhin verwendet werden können. Handelt es sich um ein Flächenmoment 2. Grades, das auf Grundlage von Versuchen ermittelt wurden, gilt dies selbstverständlich ebenfalls.

DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1999-1-4 fordern, dass der Schlupf in Verbindungen bei der Ermittlung der Durchbiegung zu berücksichtigen ist. Bei biegesteifen Stößen von Profiltafeln, bei denen die Verbindung entsprechend Bild 28 (statisch wirksame Überdeckung, vgl. auch Abschnitt 7.2.2.4) mit Bohrschrauben, Fließbohrschrauben oder gewindefurchenden Schrauben im Steg erfolgt, kann Schlupf in der Verbindung in der Regel vernachlässigt werden.

DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1999-1-4 enthalten – wie auch z. B. DIN EN 1993-1-1 und DIN EN 1999-1-1 – keine Grenzwerte für die Durchbiegung da unterstellt wird, dass diese nicht von Bedeutung für die Sicherheit sind. Grenzwerte sind daher projektspezifisch zu vereinbaren. Für Profiltafeln können diese für Stahl- und Aluminiumtrapezprofile auf Grundlage von DIN EN 1090-4, Anhang B und DIN EN 1090-5, Anhang B festgelegt werden. Diese Werte entsprechen den Angaben in 18807-3, Abschnitt 3.3.4.2 für Stahl- und Aluminiumtrapezprofile.

Bei Dächern unter andrückender Belastung:

- mit oberseitiger Dachabdichtung (Dachaufbau geklebt) $f_{max.} \leq l/300$
- mit oberseitiger Dachabdichtung mit mechanischer Verbindung $f_{max.} \leq l/200$
- mit oberseitiger Dachdeckung (zweischaliges Dach, hier Tragschale) $f_{max.} \leq l/150$

Bei Wänden:

- Wandbekleidung, unter Windeinwirkungen $f_{max.} \leq l/150$

Bei Geschossdecken ohne Verbundwirkung mit Spannweiten > 3000 mm, unter angewendeten Lasten:

- im untersuchten Feld (alle übrigen Felder sind unbelastet) $f_{max.} \leq l/500$

Bei Dächern mit oberseitiger Dachabdichtung (insbesondere bei einem geklebten Dachaufbau) sollten diese auch aus Gründen der Dichtheit eingehalten werden.

Bezüglich der bei Ansatz einer Momentenumlagerung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu führenden Nachweise wird auf Abschnitt 7.2.1.5 verwiesen.

7.2.2 Doppellagen, Überlappungen und Überlappungsstöße

7.2.2.1 Allgemeines

Biegesteife Stöße, Überlappungen und Doppellagen (d. h. die Doppelverlegung von Trapezprofilen) dienen jeweils der Tragfähigkeitssteigerung, sei es, indem im Bereich der größten Momentbeanspruchung oder größten Verformungen ein zweites Trapezprofil verlegt wird, oder aber, indem mittels Überlappung im Stoßbereich ein Mehrfeldsystem konstruiert wird. Die damit verbundenen Anforderungen an die Bemessung und insbesondere an die Konstruktion sind jeweils vergleichbar, sie werden deswegen nachfolgend zusammen behandelt.

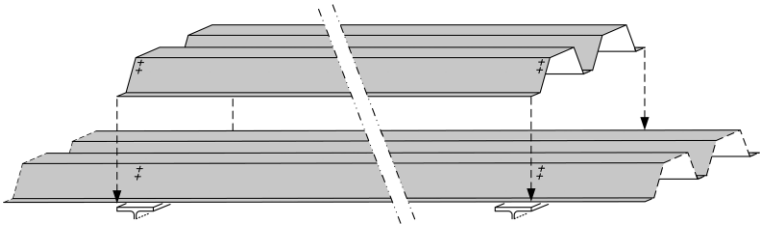


Bild 18. Doppellage im Feld

7.2.2.2 Doppellagen

Doppellagen als Verstärkungslagen können im Feld (von Auflager zu Auflager) oder am Zwischenauflager ausgeführt werden. Bei Überlappungsstößen (sowie Befestigungen mit Setzbolzen) sind Doppellagen jedoch nicht zulässig.

Damit die Doppellage sich am Lastabtrag beteiligt, muss eine Lasteinleitung über Verbindungen (Kontakt oder mechanische Verbindungen) erfolgen. Die Lage und Anzahl der Verbindungen sowie etwaiger mechanischer Verbindungen ist bei der Ermittlung der Schnittgrößen am Gesamtsystem zu berücksichtigen. Ein Schubverbund darf nicht angesetzt werden.

Bei Verlegung im Feld (Bild 18) kann die Lasteinleitung durch Einlegen von Distanzstreifen in den Untergurt der unteren Lage erfolgen. Die Distanzstreifen (Bild 19) sind über dem Auflager sowie mindestens einmal im Feld anzuordnen und in ihrer Lage zu sichern (z. B. durch Einkleben). Bei Verlegung über dem Auflager (Bild 20) muss ggf. die Nachgiebigkeit der (dann zugbeanspruchten, daher ausschließlich mechanischen) Verbindungen berücksichtigt werden. Bei Ausführung in Anlehnung an die Regelungen für biegesteife Stöße kann die Nachgiebigkeit vernachlässigt werden. Wird die Doppellage hingegen unter dem durchlaufenden Trapezprofil verlegt (Bild 21), erfolgt die Übertragung der Kräfte wiederum über Kontakt, d. h. ohne Nachgiebigkeit in der Verbindung. Diese Variante bringt allerdings deutliche Probleme bei der Verlegung mit sich.

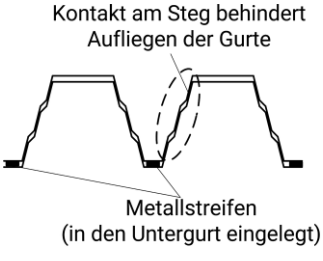


Bild 19. Lasteinleitung durch Kontakt

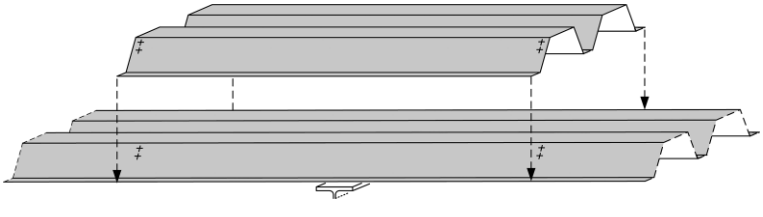


Bild 20. Doppellage über dem Auflager (aufgelegt)

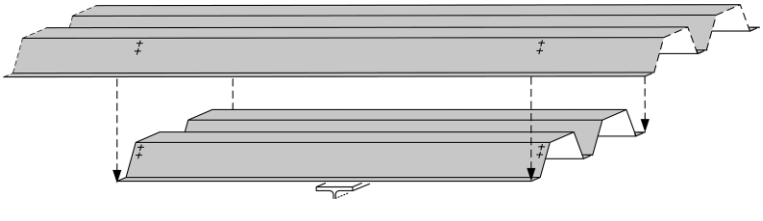


Bild 21. Doppellage über dem Auflager (untergelegt)

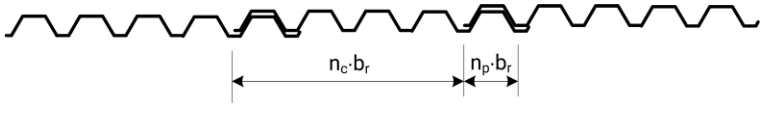


Bild 22. Unvollständige Doppellage

Die Querschnitts- und Bemessungswerte jeder Lage dürfen voll angesetzt werden. Die Verbindungen (Kontakt oder mechanische Verbindungen) sind zu bemessen. Die Länge des Distanzstreifens ist beim Nachweis als Auflagerbreite der oberen Lage anzusetzen.
Die Längsstöße der unteren Lage sind miteinander zu verbinden (Abschnitt 11.3.5). Für die obere Lage darf die Längsstoßverbindung entfallen.

7.2.2.3 Überlappungen

Überlappungen lassen sich als „unvollständige Doppellagen" interpretieren, da nur einzelne Rippen am Längsstoß übereinander liegen. Bei Überlappungen von Trapezprofilen dürfen der Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit $M_{c,Rk}$ nach Abschnitt 7.2.1.1 und das Flächenmoment 2. Grades nach Abschnitt 7.2.1.7 durch Multiplikation mit

$$\mu_{so} = 1 + 1{,}02 \cdot \frac{n_p}{n_c} - 0{,}02 \cdot \frac{n_c}{n_p} \qquad (40)$$

mit

n_c Anzahl der Rippen zwischen dem Längsrand der Profiltafeln und dem in die gleiche Richtung zeigenden Längsrand der benachbarten Profiltafel

n_p Anzahl der Rippen mit vollständiger Doppellage innerhalb der Breite von n_c-mal der Rippenbreite (d. h. $1 \leq n_c \leq n_p$), mit $n_p \geq n_c/7$

vergrößert werden. Bei unvollständigen Doppellagen ($\mu_{so} < 2$) sollten nur Flächenlasten wirken, die quer zur Spannrichtung konstant sind (d. h. in Spannrichtung jedoch veränderlich sein dürfen). Bei Einzellasten oder quer zur Spannrichtung veränderlichen Flächenlasten sollten vollständige Doppellagen ausgeführt werden.
Die konstruktiven Anforderungen bei Überlappungen entsprechen denen für Doppellagen.
DIN 18807-9 sah bei Überlappungen $n_p \geq 2$ vor, dass bei Einhaltung der nachfolgenden Bedingungen auf Längsstoßverbindungen verzichtet werden darf:

- die Profiltafeln sind Außenschale einer mehrschaligen Konstruktion (Dach- oder Wandkonstruktion),
- es handelt sich nicht um ein Schubfeld,
- Ausnutzung ≤ 80%,
- Durchbiegung ≤ L/200 (sonst ≤ L/150, s. Abschnitt 7.2.1.7),
- $n_c + n_p \geq 5$,
- die Begehung erfolgt nur mit lastverteilenden Maßnahmen (s. Abschnitt 7.2.4),
- die letzte untenliegende Rippe ist vollständig ausgebildet (nur bei Dächern).

Dann sollte jedoch $\mu_{so} = 1{,}0$ gesetzt werden.

7.2.2.4 Überdeckungsstöße

Ergänzend zu den bereits aus DIN 18807-3 bekannten biegesteifen (Überdeckungs-)Stößen wird die nächste Ausgabe der DIN EN 1993-1-3 auch nachgiebige Überdeckungsstöße behandeln. DIN EN 1090-4 enthält nur Regelungen zu Überdeckungsstößen als biegesteife Stöße, die sich eng an DIN 18807-3 orientieren, und greift der Verwendung nachgiebiger Stöße in Form einer eher allgemein gehaltenen „Öffnungsklausel" bereits vor. Die Nachgiebigkeit der Stöße ergibt sich bei den Überdeckungsstößen in Abhängigkeit von der Überdeckungslänge sowie der Lage und Anzahl der Verbindungselemente. Der biegesteife Stoß wird dabei praktisch als Sonderfall mit abgedeckt.
Biegesteife und nachgiebige Stöße sind nur im Auflagerbereich zulässig. Da es sich praktisch um örtliche Doppelverlegungen handelt, sind die entsprechenden Regelungen auch im Bereich der Überdeckung zu beachten. Beispielsweise sind Trapezprofile mit Blechdicken $t_N > 1{,}0$ mm, je nach Profilquerschnitt, im Auflagerbereich in jedem Untergurt zwischen beiden Lagen, mit Flachblechen aufzufüttern, um eine planmäßige Ausleitung der Querkräfte in das Auflager zu ermöglichen.
Die statisch wirksame Überdeckungslänge muss mindestens a = 0,065 L bis 0,11 L betragen, wobei L die größere der beiden angrenzenden Stützweiten ist, diese jedoch nicht mehr als 15% größer sein darf als die kürzere Stützweite. Bei biegesteifen Stößen muss die Überdeckungslänge mindestens a = 0,08 L betragen, DIN 18807-3 hatte hier einen Wert von ca. 0,1 L vorgegeben.
In der Ausbildung der Überdeckung werden die folgenden drei Varianten unterschieden:

- SOL-L (Bild 23, als biegesteife Variante in DIN 18807-3 mit Ausbildung 1 bezeichnet) als vom Auflager aus gesehen einseitige Überdeckung (SOL: single overlap) mit auskragendem unterem Trapezprofil (-L: lower).
- SOL-U (Bild 24, als biegesteife Variante in DIN 18807-3 mit Ausbildung 2 bezeichnet) als vom Auflager aus gesehen einseitige Überdeckung (SOL: single overlap) mit auskragendem oberem Trapezprofil (-U: upper).
- DOL (Bild 25, in DIN 18807-3 nicht erfasst) als vom Auflager aus gesehen doppelseitige Überdeckung (DOL: double overlap) mit beiden Trapezprofilen auskragend.

In jedem Fall sind die Profiltafeln und die Verbindungen für die vorhandenen Schnittgrößen zu bemessen und anzuschließen. Die dafür erforderlichen Regelungen werden nachfolgend vorgestellt.
Die Nachgiebigkeiten sind im statischen System des Trapezprofils mitzuberücksichtigen, die Trapezprofile dann entsprechend der darin wirkenden Schnittgrößen zu bemessen. Die in Bild 26 dargestellten Pendelstäbe stellen druckbeanspruchte Verbindungen dar, an denen die Kräfte über Kontakt übertragen werden können. Sie sind dann unendlich steif. Die noch in DIN 18807-3 und DIN EN 1090-4 erhobene Forderung, dass die Übertragung von Kräften durch Kontaktwirkung durch Versuche nachgewiesen werden muss, entfällt damit. Es gelten jedoch die allgemeinen Regelungen der DIN EN 1090-4 hinsichtlich Doppelverlegung. Die in Bild 26 dargestellten Federn stellen zugbeanspruchte Verbindungen dar. Die Steifigkeit ergibt sich in Abhängigkeit von der Positionierung der Verbindungsele-

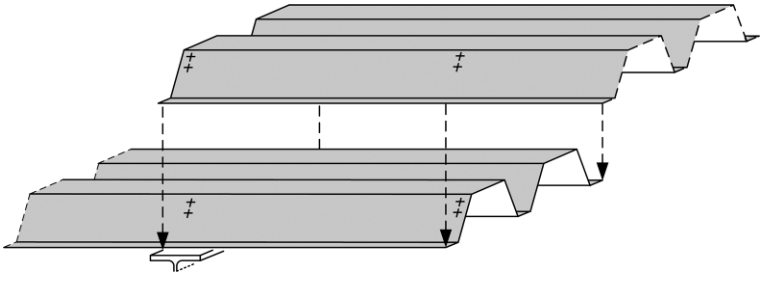


Bild 23. Überdeckung – SOL-L

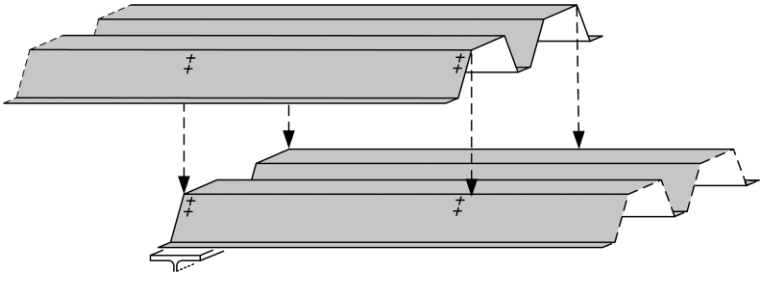


Bild 24. Überdeckung – SOL-U

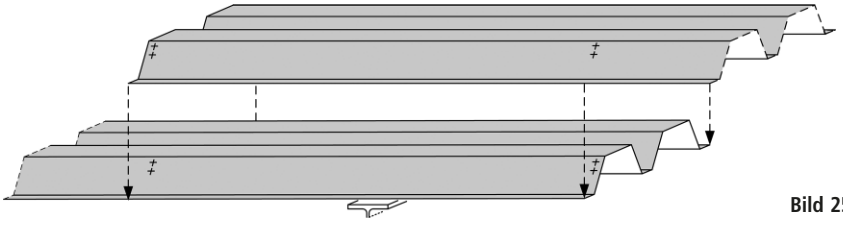


Bild 25. Überdeckung – DOL

mente. Bei einer Verbindung der Gurte ergibt sich aus der Gurtverformung eine Nachgiebigkeit.

$$K_f = 0,5 \cdot k \cdot E \cdot \sqrt{\frac{t^3 \cdot d_w}{h \cdot b_p}} \qquad (41)$$

k Faktor, k = 0,07 bei zwei Verbindungselementen, k = 0,13 bei vier Verbindungselementen (s. Bild 27)
E Elastizitätsmodul
t Blechdicke
d_w Scheibendurchmesser
h Profilhöhe
b_P Gurt oder (bei Gurten mit Sicken) Breite der ebenen Teilfläche

Können sich beide miteinander verbunden Gurte verformen, reduziert sich die Federsteifigkeit auf die Hälfte.

$$K_f = 0,25 \cdot k \cdot E \cdot \sqrt{\frac{t^3 \cdot d_w}{h \cdot b_p}} \qquad (42)$$

Für die Verbindungselemente sind folgende Rand- und Lochabstände einzuhalten (Bild 27):
– Randabstand e_1: $\geq b_p$
– Lochabstand p_1: ≥ 40 mm

Erfolgt die Verbindung im Steg (jedoch keinesfalls im Bereich einer Stegperforation), darf

$$K_f \rightarrow \infty \qquad (43)$$

angenommen werden. Der biegesteife Stoß nach DIN 18807-3 sah nur diese Position der Verbindungselemente vor. Für die Verbindungselemente sind folgende Rand- und Lochabstände einzuhalten (Bild 28):
– Randabstand e_1 in Kraftrichtung: ≥ 3 d, ≥ 20 mm
– Randabstand e_2 rechtwinklig zur Kraftrichtung: ≥ 30 mm
– Lochabstand p_1 und p_2: ≥ 4 d, ≥ 40 mm, ≤ 10 d

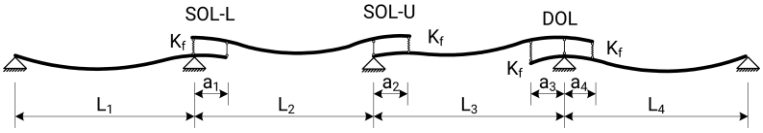


Bild 26. Mechanisches System eines Mehrfeldträgers mit Überdeckungsstößen

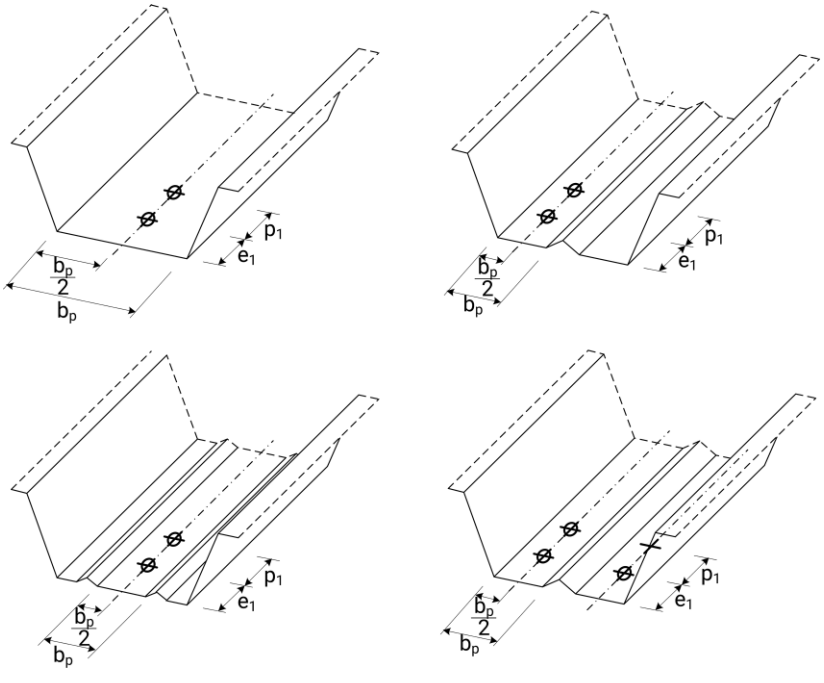


Bild 27. Überdeckung als nachgiebiger Stoß – Rand- und Lochabstände

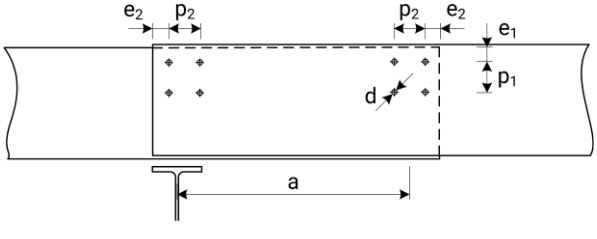


Bild 28. Überdeckung als biegesteifer Stoß – Rand- und Lochabstände

Die Tragfähigkeit der Verbindungen (Kontaktverbindungen oder mechanische Verbindungen) ist für folgende Kräfte nachzuweisen:

– SOL-L

$$F_{Ed} = \frac{|M_{Ed}|}{2 \cdot a \cdot \sin\varphi} \cdot b_R \tag{44}$$

– SOL-U

$$F_{Ed} = \frac{|M_{Ed}| + |V_{Ed}| \cdot a}{2 \cdot a \cdot \sin\varphi} \cdot b_R \tag{45}$$

– DOL

$$F_{Ed} = \frac{|M_{Ed}| + q_{Ed} \cdot a^2}{4 \cdot a \cdot \sin\varphi} \cdot b_R \tag{46}$$

Je Verbindung dürfen in jedem Gurt oder Steg nur 2 Verbindungselemente in Reihe (insgesamt 4 Stück) rechnerisch berücksichtigt werden. An den Stellen der Lasteinleitung durch Kontakt (vgl. die voranstehenden Ausführungen zu den Distanzblechen) ist ein Nachweis gegen Stegkrüppeln zu führen, ggf. unter Berücksichtigung der Interaktion mit Biegung.

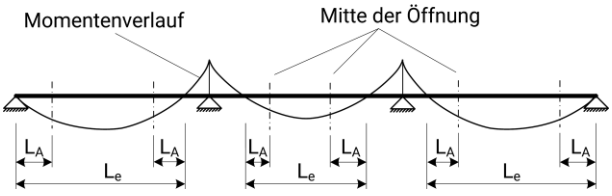


Bild 29. Lage der Öffnung in Bezug auf den Abstand der Momentennullpunkte

7.2.3 Trapezprofile mit Öffnungen

7.2.3.1 Allgemeines

Mit denen der DIN 18807-6 vergleichbare Regelungen zu Öffnungen ohne Auswechslungen werden derzeit in DIN EN 1090-4 behandelt. Eine – um ergänzende Regelungen für sehr kleine Öffnungen erweiterte – Übernahme in die nächste Ausgabe der DIN EN 1993-1-3 ist vorgesehen. Die Änderungen und Ergänzungen gegenüber DIN 18807-3 basieren auf [72] und [73].
Die Regelungen der DIN 18807-9 wurden ohne Änderung in DIN EN 1090-5 übernommen, sodass hier darauf nicht weiter eingegangen wird. Da diese Regelungen nicht mit Anforderungen an die Bemessung verbunden sind, ist die Übernahme in DIN EN 1999-1-4 noch offen.
Generell ist die Ausführung von Öffnungen ohne von Auflager zu Auflager spannende Auswechslungen auf den Bereich der Feldmomente und einen maximalen Durchmesser (oder eine maximale Kantenlänge) von 300 mm begrenzt. Die Anforderung an Konstruktion und ggf. Bemessung variieren in Abhängigkeit vom Abstand zum Momentennullpunkt (einschließlich Endauflager, s. Bild 29) und der Größe der Öffnung. Es wird jedoch immer unterstellt, dass nur Flächenlasten wirken.

7.2.3.2 Stahltrapezprofile mit Öffnungen bis 125 mm

Öffnungen im Obergurt mit einem Durchmesser bis 125 mm dürfen bis zu einem Abstand $L_A/L_e \leq 0{,}1$ ohne weitere Anforderung an Konstruktion und Bemessung ausgeführt werden. In diesem Bereich ist die Beanspruchung des Trapezprofils verhältnismäßig gering. Bei größeren Abständen vom Momentennullpunkt ist in Zukunft ein auf [72] basierender rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit für die geschwächte Rippe des Trapezprofils vorgesehen, der jedoch die rechnerische Ermittlung der (Rest-)Querschnittstragfähigkeit erfordert. Dabei gilt, dass neben der Öffnung jeweils mindestens 20% der Gurtbreite erhalten bleiben müssen (Bild 30). Der minimale Abstand der Öffnungen in Spannrichtung dient der Stabilisierung dieser verbleibenden Gurtbreiten.

7.2.3.3 Stahltrapezprofile mit Öffnungen bis 300 mm

Werden die im voranstehenden Abschnitt genannten Anforderungen an den Durchmesser oder die Tragfähigkeit der geschwächten, aber unverstärkten Einzelrippe nicht erfüllt, kann mit Abdeckblechen gearbeitet werden. Die Mindestabmessungen der Abdeckbleche betragen 600 mm × 600 mm. Die Abdeckbleche sind so auszuführen, dass auf jeder Seite der Öffnung mindestens zwei durchgehende Stege überdeckt werden. Die hierzu in DIN EN 1090-4 genannten vereinfachten Regelungen bei Öffnungen mit Durchmesser ≤ 125 mm greifen aufgrund der Mindestabmessungen praktisch nicht. Die Dicke der Abdeckbleche muss mindestens das 1,5-Fache der Dicke der Trapezprofile betragen, sie darf jedoch nicht kleiner als t_N = 1,13 mm sein. Die Anforderungen an die Verbindungen mit dem Trapezprofil sind in Bild 31 dargestellt. Für die Befestigung von Profiltafellängsrändern neben einer Öffnung beträgt der Mindestdurchmesser von Schrauben 4,2 mm,

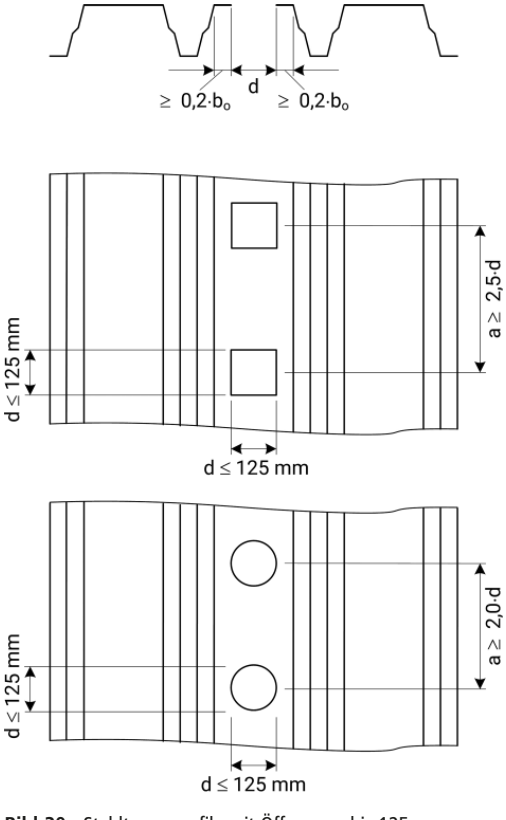


Bild 30. Stahltrapezprofile mit Öffnungen bis 125 mm

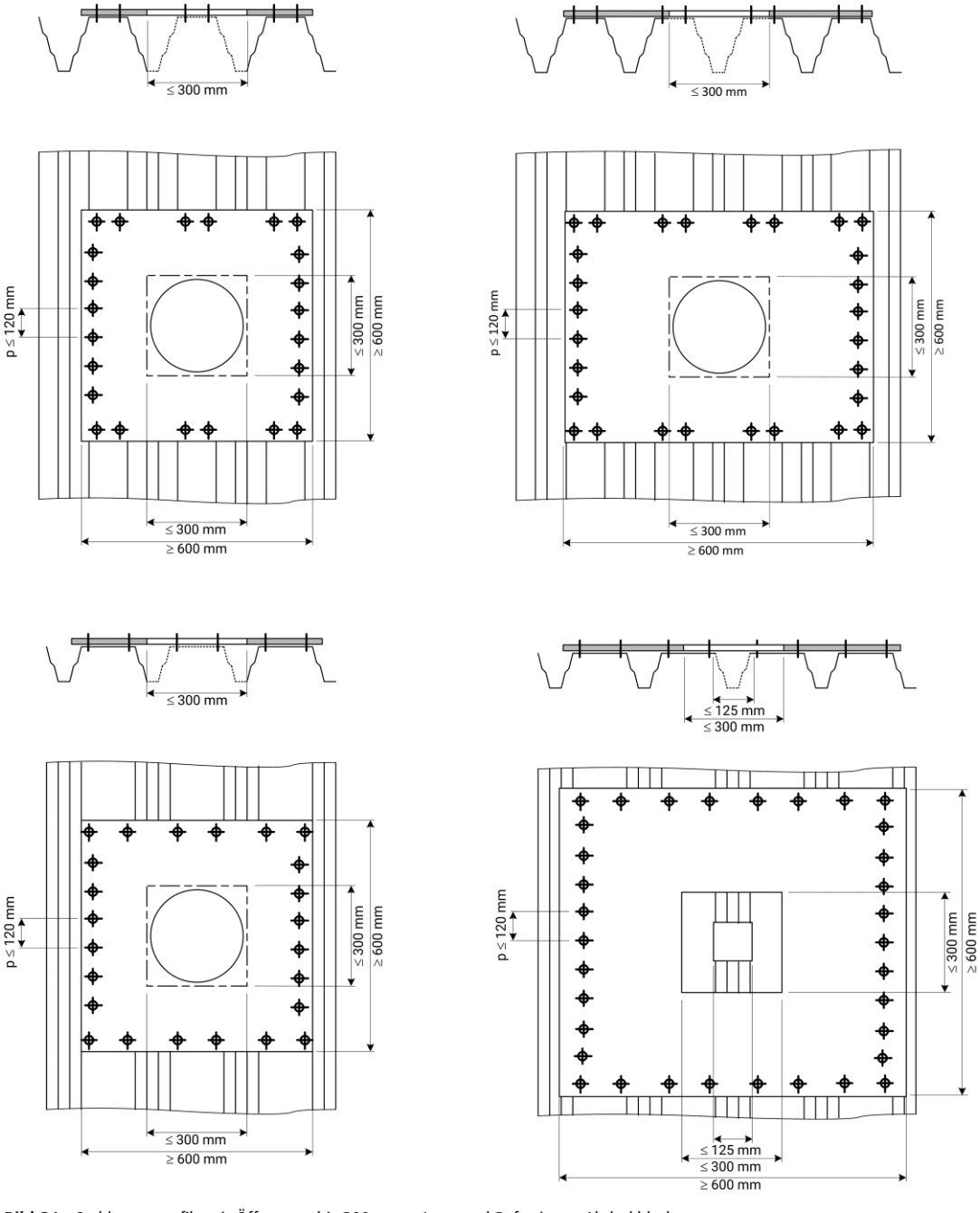


Bild 31. Stahltrapezprofile mit Öffnungen bis 300 mm – Lage und Befestigung Abdeckblech

sonst an Profillängsstößen 4,8 mm. Für Blindniete gilt ein Mindestdurchmesser von 4 mm.

Die Lage der Öffnungen quer zur Spannrichtung muss sich an der Lage der Rippen orientieren, d. h., die Mitte der Öffnung sollte in der Mitte eines Obergurts oder eines Untergurts liegen. Rechtwinklig zur Spannrichtung der Profiltafeln ist nur eine Öffnung je Meter zulässig, da die Beanspruchung der nicht mittragenden Rippe(n) in die benachbarten Rippen umgelagert werden muss. Diese sind dann für entsprechend höhere

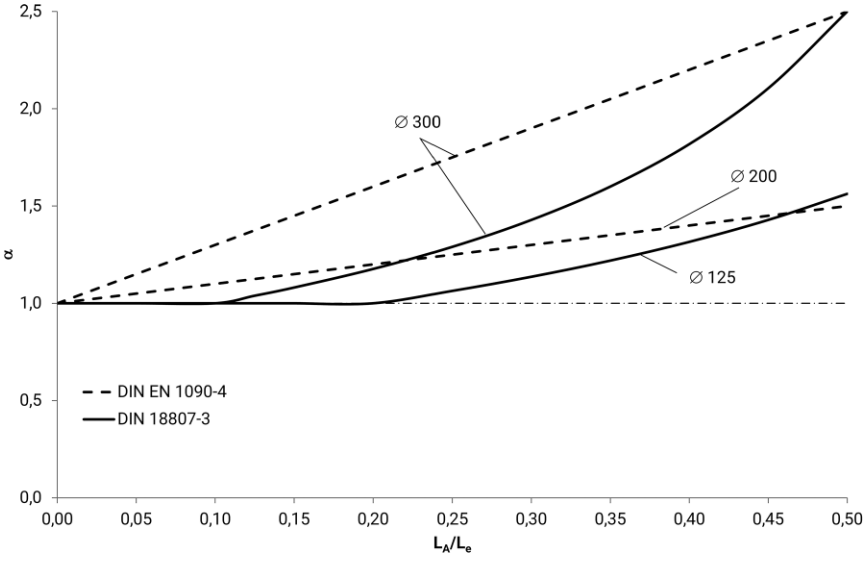


Bild 32. Faktor α

Beanspruchungen zu bemessen. DIN EN 1090-4 fordert wie bereits DIN 18807-3 einen Nachweis der Tragfähigkeit mit α-fachen Einwirkungen. Der Faktor α hängt vom bezogenen Abstand der Öffnung vom Momentennullpunkt (einschließlich Endauflager) und vom Durchmesser der Öffnung ab. Maßgebend ist immer der größere Durchmesser aus Öffnung im Trapezprofil und Öffnung im Abdeckblech. DIN 18807-3 sah bei ansonsten gleichen konstruktiven Anforderungen für Durchmesser ≤ 125 mm den Faktor

$$\alpha = \frac{1}{1{,}24 - 1{,}2 \cdot \frac{L_A}{L_e}} \tag{47}$$

mit

L_e Abstand der Momentennullpunkte
L_A Abstand zwischen Mitte Öffnung und Momentennullpunkt

und für Durchmesser ≤ 300 mm dem Faktor

$$\alpha = \frac{1}{1{,}15 - 1{,}5 \cdot \frac{L_A}{L_e}} \tag{48}$$

vor. In DIN EN 1090-4 wurden diese basierend auf [73] für Durchmesser ≤ 200 mm in

$$\alpha = 1 + \frac{L_A}{L_e} \tag{49}$$

und für Durchmesser ≤ 300 mm in

$$\alpha = 1 + 3 \cdot \frac{L_A}{L_e} \tag{50}$$

geändert. In Bild 32 werden die Gleichungen gegenübergestellt. Das zugrunde liegende Prinzip der Bemessung wurde ursprünglich für eine Bemessung auf Grundlage von zulässigen Flächenlasten entwickelt, wie man es heutzutage noch bei der Vorbemessung über Stützweitentabellen verwendet. Die Funktionen beschreiben näherungsweise den abnehmenden Einfluss der Öffnung auf die Gesamttragfähigkeit bei zunehmendem Abstand der Öffnung vom maßgebenden Querschnitt. Sinnvoller erscheint es, den Nachweis an der Stelle der Öffnung in der Form

$$\frac{\alpha \cdot M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1{,}0 \tag{51}$$

mit α für L_A/L_e = 0,5 zu führen. Damit werden die tatsächlich nur lokal wirksamen Effekte ausreichend erfasst: Bei einer Öffnung mit Durchmesser ≤ 200 mm, bei der nur eine Rippe nicht mitträgt, ergibt sich lokal eine um jeweils 50% vergrößerte Beanspruchung der beiden benachbarten Rippen und damit ein Faktor α = 1,5. Bei Öffnungen mit einem Durchmesser ≤ 300 mm, bei denen (näherungsweise) zwei Rippen nicht mittragen, ergibt sich ein Faktor α = 2,5 (also etwas mehr als der theoretische Faktor 2,0). Hieraus resultieren auch die Anforderungen an den Abstand der Öffnungen quer zur Spannrichtung.

7.2.4 Begehbarkeit

7.2.4.1 Allgemeines

DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1999-1-4 enthalten keine Angaben zur Begehbarkeit während oder nach der Montage, wie dies in DIN 18807-2 und DIN 18807-7 der Fall war. Regelungen zur Begehbarkeit von Profiltafeln, die sich stark an den bekannten deutschen

Regeln zur Begehbarkeit orientieren, sind in DIN EN 1090-4 und DIN EN 1090-4 zu finden. Auch der Begehbarkeitsversuch nach DIN 18807-2, 7.7 ist dort aufgenommen worden und soll auch in der nächsten Ausgabe der DIN EN 1993-1-3 in deren Anhang A aufgenommen werden. Die im Versuch damit ermittelten Grenzstützweiten können den Tabellen entnommen werden. Werden die Anforderungen an die Grenzstützweite erfüllt, darf der Ansatz einer Einzellast nach DIN EN 1991-1-1, 6.3.4 entfallen. Nach der Montage dürfen die Profiltafeln nur noch zu Wartungs- und Reinigungszwecken ihrer selbst durch Einzelpersonen begangen werden. Für planmäßig zu wartende oder zu betreibende Einrichtungen (z. B. Lichtbänder, Schornsteine, Heizzentralen) sind Laufstege anzuordnen.
Unbedingt zu beachten ist, dass die nach DIN EN 14782 als Widerstand gegen Punktlasten zu deklarierenden Stützweiten keine Grenzstützweiten der Begehbarkeit darstellen (s. a. Abschnitt 4.2.3).

7.2.4.2 Begehbarkeit während der Montage

Während der Montage dürfen die Profiltafeln nur zum Zwecke der Montage des Dachs begangen werden.
Die Profiltafeln dürfen nur unter Anwendung lastverteilender Maßnahmen begangen werden (z. B. Holzbohlen der Festigkeitsklasse C24 mit einem Querschnitt 4 cm × 24 cm und einer Länge > 3,0 m). Falls bei Stahlprofiltafeln die vorhandene Stützweite die in Versuchen nach Anhang B.4.3 von DIN EN 1090-4 ermittelten Grenzwerte L_{lim} nicht überschreitet, darf auf die lastverteilenden Maßnahmen verzichtet werden. Aluminiumprofiltafeln sind – anders als DIN EN 1090-5 suggeriert – während der Montage nicht ohne lastverteilende Maßnahmen begehbar.

7.2.4.3 Begehbarkeit nach der Montage

Nach der Montage dürfen die Profiltafeln nur noch zu Wartungs- und Reinigungszwecken ihrer selbst begangen werden.
Die Profiltafeln dürfen nur unter Anwendung lastverteilender Maßnahmen begangen werden (z. B. Holzbohlen der Festigkeitsklasse C24 mit einem Querschnitt 4 cm × 24 cm und einer Länge > 3,0 m). Falls die vorhandene Stützweite die in Versuchen nach Anhang B.7.3 von DIN EN 1090-4 ermittelten Grenzwerte L_{lim} nicht überschreitet, darf auf die lastverteilenden Maßnahmen verzichtet werden. Bei Profiltafeln, die als Mehrfeldträger verlegt sind, darf die vorhandene Stützweite – auch ohne lastverteilende Maßnahmen – bis zu 25% größer sein als die in den Versuchen ermittelten Grenzwerte.
Für planmäßig zu wartende oder zu betreibende Einrichtungen (z. B. Lichtbänder, Schornsteine, Heizzentralen, Photovoltaikanlagen) sind Laufstege anzuordnen.

7.2.5 Längsbeanspruchung

7.2.5.1 Zugbeanspruchbarkeit

Der Bemessungswert der Grenzzugkraft ergibt sich bei Stahltrapezprofilen zu

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_{ya}}{\gamma_{M0}} \tag{52}$$

und bei Aluminiumtrapezprofilen zu

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_0}{\gamma_{M1}} \tag{53}$$

Der Nachweis wird also über die Streckgrenze bzw. Dehngrenze und in beiden Fällen mit dem Teilsicherheitsbeiwert 1,1 geführt. Die Bruttoquerschnittsfläche (Gesamtquerschnittsfläche) A_g ist in den Tabellen angegeben. Bei Stahltrapezprofilen darf die infolge Kaltumformens erhöhte Streckgrenze f_{ya} angesetzt werden. Diese ist aus den Tabellen nicht bekannt, ließe sich aber einfach nach DIN EN 1993-1-3 ermitteln. Praktisch wird der Nachweis aber immer mit f_{yb} geführt werden.

7.2.5.2 Druckbeanspruchbarkeit

Der Bemessungswert der Grenzdruckkraft für Querschnitte mit einer wirksamen Querschnittsfläche A_{eff}, die infolge örtlichen Beulens kleiner als die Bruttoquerschnittsfläche A_g ist, ergibt sich bei Stahltrapezprofilen zu

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}} \tag{54}$$

und bei Aluminiumtrapezprofilen zu

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} \tag{55}$$

Die Gleichungen sind für diesen Fall identisch, die unterschiedlichen Indizes beim Teilsicherheitsbeiwert spiegeln nur einen Unterschied vor, in beiden Fällen beträgt der Wert 1,1. Ist hingegen $A_{eff} = A_g$ (Querschnitt voll wirksam), darf bei Stahltrapezprofilen mit

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g}{\gamma_{M0}} \cdot \left(f_{yb} + \left(f_{ya} - f_{yb} \right) \cdot 4 \cdot \left(1 - \left(\frac{\bar{\lambda}_e}{\bar{\lambda}_{e0}} \right)_{max} \right) \right) \leq \frac{A_g \cdot f_{ya}}{\gamma_{M0}} \tag{56}$$

die Verfestigung infolge Kaltumformens mit in Ansatz gebracht werden. Als Interpolationsparameter zwischen der infolge Kaltumformens erhöhten Streckgrenze f_{ya} und der Basisstreckgrenze f_{yb} des Grundwerkstoffs vor dem Kaltumformen wird das größte Verhältnis der Schlankheit λ_e der ebenen (ggf. ausgesteiften) Teilflächen zur Grenzschlankheit λ_{e0} (Ende des Plateaus der Beul- oder Knickkurve) herangezogen. Praktisch ist aber weder λ_e noch f_{ya} aus den Tabellen bekannt, sodass mit

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}} \tag{57}$$

gearbeitet werden wird, d. h., der Übergang zu Gl. (54) ist fließend. Da bei Aluminiumtrapezprofilen die Erhöhung der Streckgrenze infolge Kaltumformens nicht mit berücksichtigt wird, gilt dort bei $A_{eff} = A_g$ automatisch

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g \cdot f_0}{\gamma_{M1}} \tag{58}$$

Für den Knicknachweis ergibt sich die Beanspruchbarkeit zu

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_y \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \tag{59}$$

mit

χ_y Abminderungsfaktor
A_{eff} wirksame Querschnittsfläche
f_y Streck- oder Dehngrenze, bei Aluminiumtrapezprofilen f_0
γ_{M1} Teilsicherheitsbeiwert

Die Schlankheit wird mit der elastischen kritischen Beulspannung des Bruttoquerschnitts ermittelt, die als Bezugswert verwendete Querschnittstragfähigkeit wird bei Stahltrapezprofilen mit der wirksamen Querschnittsfläche A_{eff} berechnet:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{c,Rk}}{N_{cr,g}}} = \frac{L_{cr}}{\pi \cdot i_g} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff}}{A_g}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \tag{60}$$

mit

L_{cr} Knicklänge
i_g tabellierter Trägheitsradius des Bruttoquerschnitts
A_{ef} tabellierte Fläche des wirksamen Querschnitts
A_g tabellierte Bruttoquerschnittsfläche
f_y Streck- oder Dehngrenze
E Elastizitätsmodul

Bei Aluminiumtrapezprofilen wird die als Bezugswert verwendete Querschnittstragfähigkeit mit der Bruttoquerschnittsfläche A_g berechnet:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{c,Rk}}{N_{cr,g}}} = \frac{L_{cr}}{\pi \cdot i_g} \cdot \sqrt{\frac{f_0}{E}} \tag{61}$$

mit

L_{cr} Knicklänge
i_g tabellierter Trägheitsradius des Bruttoquerschnitts
f_y Dehngrenze
E Elastizitätsmodul

Dieses Vorgehen weicht somit vom sonst üblichen Vorgehen ab, selbst in DIN EN 1999-1-1 wird beim Stabilitätsnachweis druckbeanspruchter Bauteile (Knicknachweis) der wirksame Querschnitt angesetzt. Der Abminderungsfaktor ergibt sich wie bei warmgewalzten Profilen zu

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1{,}0 \tag{62}$$

mit

$$\phi = 0{,}5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right) \tag{63}$$

Der Imperfektionsfaktor α ist für Aluminiumtrapezprofile und Stahltrapezprofile unterschiedlich. Für Aluminiumtrapezprofile gilt die Knickspannungslinie a_0 mit $\alpha = 0{,}13$, für Stahltrapezprofile mit $A_{eff} \leq A_g$ mit $f_y = f_{yb}$, d. h. ohne Ansatz der Verfestigung durch das Kaltumformen, hingegen die Knickspannungslinie b mit $\alpha = 0{,}34$. Für Stahltrapezprofile mit $A_{eff} = A_g$ und $f_y = f_{ya}$, d. h. mit Ansatz der Verfestigung durch das Kaltumformen, gilt Knickspannungslinie c mit $\alpha = 0{,}49$. Aufgrund der oben angesprochenen Probleme bei der Ermittlung der Grenzdrucktragfähigkeit bei einer tabellenbasierten Bemessung wird letztgenannter Fall für die meisten Anwendungen irrelevant sein. Der gegenüber Stahltrapezprofilen deutlich niedrigere Imperfektionsfaktor bei Aluminiumtrapezprofilen mag als Ausgleich für die abweichende Definition der Schlankheit dienen.

DIN 18807-1 und DIN 18807-8 arbeiteten ebenfalls mit einer Knickspannungslinie, die jedoch mit

$$\chi_y = \begin{cases} 1{,}00 & \bar{\lambda} \leq 0{,}30 \\ 1{,}126 - 0{,}419 \cdot \bar{\lambda} & \text{für } 0{,}30 \leq \bar{\lambda} \leq 1{,}85 \\ 1{,}2/\bar{\lambda}^2 & \bar{\lambda} \geq 1{,}85 \end{cases} \tag{64}$$

in der Formulierung von der sonst üblichen Ayrton-Perry-Formulierung deutlich abwich und darüber hinaus auf der elastischen kritischen Knickspannung

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{b,Rk}}{N_{cr,eff}}} = \frac{L_{cr}}{\pi \cdot i_{eff}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \tag{65}$$

des wirksamen Querschnitts basiert. Bild 33 zeigt die Knickspannungslinien im Vergleich, wobei der Unterschied in der Definition der Schlankheit vernachlässigt wurde (Dies entspricht der Annahme $A_{eff} = A_g$). Im Bereich mittlerer bis hoher Schlankheiten sind die Knickspannungslinien nach DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1999-1-4 deutlich konservativer.

Ergänzend war der Nachweis

$$N_{b,Rd} = 0{,}8 \cdot \frac{A_g \cdot \sigma_{cr,g}}{\gamma_{M1}} \tag{66}$$

mit der Spannung

$$\sigma_{cr,g} = \frac{\pi^2 \cdot i_g^2 \cdot E}{L_{cr}^2} \tag{67}$$

und

i_g tabellierter Trägheitsradius des Bruttoquerschnitts
E Elastizitätsmodul
L_{cr} Knicklänge

d. h. mit 80 % der elastischen kritischen Knickspannung des Bruttoquerschnitts zu führen. Dies ist auch der Grund, warum in den Tabellen immer der Trägheitsradius i_g des Bruttoquerschnitts und i_{eff} des wirksamen Querschnitts aufgeführt wurden. Bei Stahltrapezprofilen ist der Trägheitsradius i_{eff} des wirksamen Querschnitts nicht mehr erforderlich, bei Aluminiumtrapezprofilen hingegen der Trägheitsradius i_{eff} des wirksamen Querschnitts. In den Tabellen wird darüber hinaus auch

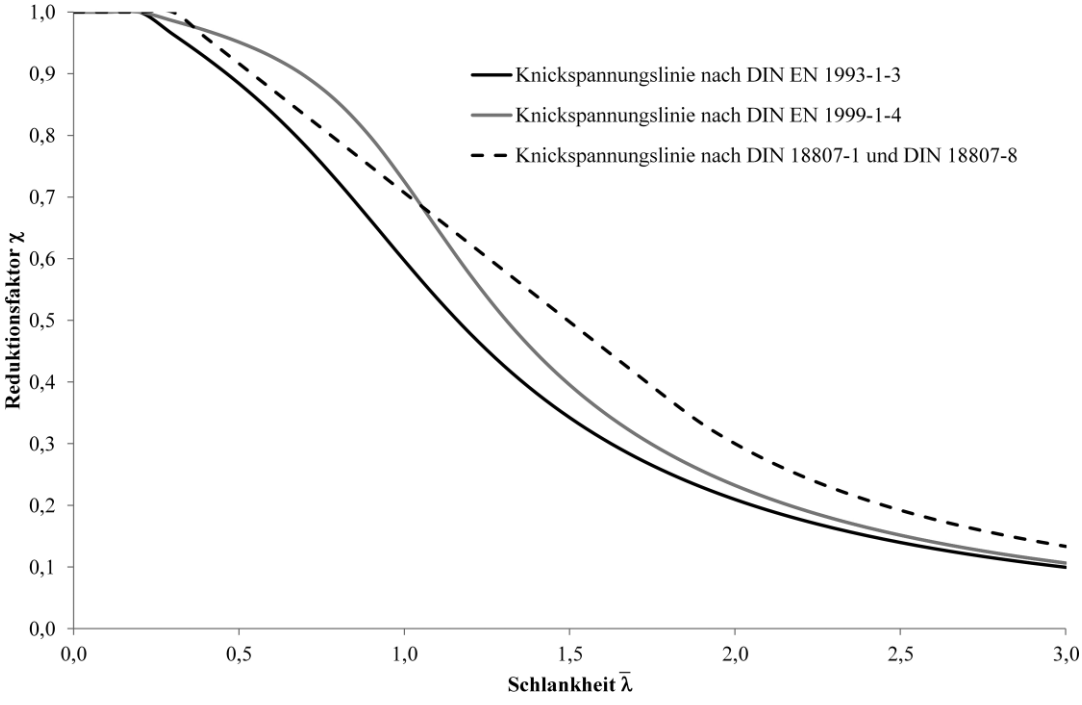


Bild 33. Knickspannungslinien

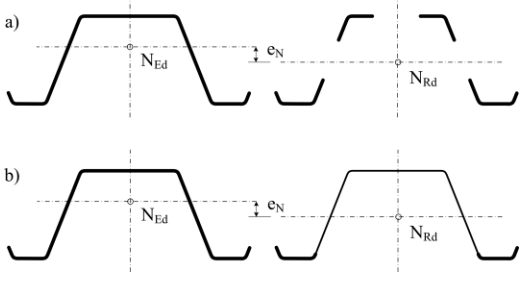


Bild 34. Versatzmoment

die Lage der Nulllinie z_g des Bruttoquerschnitts und z_{eff} des wirksamen Querschnitts angegeben. Diese Angaben sind erforderlich, da die Schnittgrößen im Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts wirken, die Widerstände im Schwerpunkt des wirksamen Querschnitts. Aus diesem Versatz ergibt sich ein zusätzliches Biegemoment

$$\Delta M_{Ed} = N_{Ed} \cdot e_N \tag{68}$$

das beim Nachweis berücksichtigt werden muss (Bild 34).

7.2.5.3 Interaktion

Die Regelungen der DIN EN 1993-1-3 und DIN 1999-1-9 unterstellen, dass die Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung sowohl für den Biegezugrand als auch den Biegedruckrand bekannt sind. Dementsprechend sind je nach Vorzeichen der Längskraftbeanspruchung unterschiedliche Nachweise vorgesehen bzw. werden maßgebend. Bei einem auf den genannten Tabellen basierten Nachweis ist jedoch nur eine Biegebeanspruchbarkeit bekannt. Damit ergibt sich die Interaktionsbeziehung bei gleichzeitiger Wirkung von Längskraft und Biegemoment abhängig vom Vorzeichen der Längskraft für nicht stabilitätsgefährdende Druckkraft und Biegung zu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \tag{69}$$

mit

ΔM_{Ed} Versatzmoment aus dem Abstand der Schwerachsen des wirksamen Querschnitts und des Bruttoquerschnitts nach Gl. (68)

und für Zugkraft und Biegung zu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \tag{70}$$

Da bei zugbeanspruchten Bauteilen keine Reduzierung des Querschnitts auf einen wirksamen Querschnitt erfolgt, gibt es kein Versatzmoment ΔM_{Ed}.

Die Angaben in DIN EN 1993-1-3 für den Nachweis stabilitätsgefährdeter Bauteile bei gleichzeitiger Wirkung von Druck und Biegung müssen anders als die in DIN EN 1999-1-4 sowohl für Trapezprofile als auch für Kaltprofile anwendbar sein. Die Angaben in DIN EN

1993-1-3 sind daher etwas allgemeiner gehalten. Grundsätzlich ermöglicht es DIN EN 1993-1-3, den Interaktionsnachweis auf Grundlage einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung zu führen. Alternativ wird eine Interaktionsgleichung angegeben, die sowohl das (Drill-)Knicken eines druckbeanspruchten Bauteils als auch das Biegedrillknicken eines biegebeanspruchten Bauteils erfasst. Da bei den hier betrachteten Trapezprofilen Biegedrillknicken keine Rolle spielt, damit $M_{b,Rd} = M_{c,Rd}$ gilt (aber $N_{b,Rd} \neq N_{c,Rd}$, da die Tragfähigkeit des knickgefährdeten Bauteils nicht der Querschnittstragfähigkeit entspricht), kann der Nachweis in der Form

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,Rd}}\right)^{0,8} \leq 1,0 \qquad (71)$$

mit

N_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Druckkraft
$N_{c,Rd}$	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit nach Gl. (54) oder Gl. (57)
χ_y	Reduktionsfaktor nach Gln. (62) und (63)
M_{Ed}	Bemessungswert des einwirkenden Moments im betrachteten Querschnitt
ΔM_{Ed}	das sich aus der Verschiebung der Schwerachsen ergebende Versatzmoment
$M_{c,Rd}$	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit nach Gl. (2)

geführt werden. Für Aluminiumtrapezprofile gilt hingegen die lineare Interaktionsbeziehung

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \varpi_x \cdot N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \qquad (72)$$

mit

N_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Druckkraft
$N_{c,Rd}$	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit nach Gl. (55) oder Gl. (58)
χ_y	Reduktionsfaktor nach Gln. (62) und (63)
ϖ_x	Faktor nach Gl. (73)
M_{Ed}	Bemessungswert des einwirkenden Moments im betrachteten Querschnitt
ΔM_{Ed}	das sich aus der Verschiebung der Schwerachsen ergebende Zusatzmoment
$M_{c,Rd}$	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit nach Gl. (3)

Über den Faktor

$$\varpi_x = \frac{1}{\chi_y + \left(1 - \chi_y\right) \cdot \sin\frac{\pi \cdot x_s}{l_c}} \geq 1,0 \qquad (73)$$

wird die im jeweils betrachteten Nachweisquerschnitt geringere Größe der Imperfektion erfasst. Das Verhältnis x_s/l_c beschreibt dabei den relativen Abstand des Nachweisquerschnitts zum Wendepunkt der Knickfigur oder zum Auflager. Vereinfachend kann $\varpi_x = 1,0$ gesetzt werden.

Während die Interaktionsbedingung für nicht stabilitätsgefährdete Bauteile nach DIN EN 1993-1-3, DIN EN 1999-1-4, DIN 18807-3 und DIN 18807-8 identisch ist, unterscheidet sich die Interaktionsbedingung bei Druck und Biegung bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen: DIN 18807-3 und DIN 18807-6 verwendeten in diesem Fall die Interaktionsbedingung

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \cdot \left[1 + 0,5 \cdot \bar{\lambda} \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)\right] + \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \qquad (74)$$

mit $\bar{\lambda}$ nach Gl. (65).

7.3 Wellprofile

Betrachtet man die in DIN EN 1993-1-3 beispielhaft dargestellten Profiltafeln, muss man vermuten, dass DIN EN 1993-1-3 (und DIN 1999-1-4) nicht für Wellprofile gelten. Richtig ist, dass beide Normen keine Angaben zur rechnerischen Ermittlung der Tragfähigkeit bei Quer- und Längsbeanspruchung machen, jedoch alle weiteren Regelungen auf Wellprofile angewandt werden können. Dies schließt auch die Ermittlung der Tragfähigkeit durch Versuche nach Anhang A ein. Gegenüber dem Regelungsstand der DIN 18807 ergibt sich keine Änderung, die Situation ist die Gleiche geblieben. Daher wird an dieser Stelle auf Wellprofile nicht weiter eingegangen und auf den Abschnitt 7.2 zu den Trapezprofilen verwiesen.

7.4 Kassettenprofile

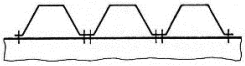
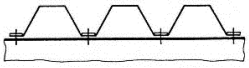
7.4.1 Querbeanspruchung

DIN EN 1993-1-3 gibt Verfahren zur rechnerischen Ermittlung der Tragfähigkeit von Kassettenprofilen an. Das Verfahren zur Ermittlung der Bemessungswerte der Biegebeanspruchbarkeit basiert auf [74] bis [76]. Für die rechnerische Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit und der Tragfähigkeit bei örtlicher Lasteinleitung gelten die Regelungen für Pfetten. Die in der Regel vorhandene Längsaussteifung der Stege kann mit erfasst werden.

Auch für Kassettenprofile gilt jedoch, dass die Bemessung in aller Regel auf tabellierten Werten basiert (s. Tabelle 9), sodass auf das Berechnungsverfahren nicht weiter eingegangen und – da die Nachweisführung vergleichbar ist – auf den Abschnitt 7.2 zu den Trapezprofilen verwiesen wird. Verglichen mit diesen auf Versuchen basierenden Werten sind auch die rechnerisch ermittelten Werte der Biegebeanspruchbarkeit deutlich geringer, was in diesem Fall auch an den in DIN EN 1993-1-3 gegenüber [74] bis [76] zusätzlich eingeführten konstanten Vorfaktoren liegt.

Die Biegebeanspruchbarkeit von Stahlkassettenprofiltafeln mit druckbeanspruchten schmalen Gurten ist durch deren Knicktragfähigkeit begrenzt. Diese Gurte werden durch die Verbindung mit der Außenschale gegen seitliches Ausweichen gehalten. Der Abstand s_1 der Verbindungselemente definiert die Knicklänge des

Tabelle 9. Anhang einer typengeprüften statischen Berechnung

Beiblatt 2/2	**Erläuterungen zu den Querschnitts- und Bemessungswerten (EN 1993-1-3)**
Schubfelder nach Schardt/Strehl	
13)	Bei Schubfeldlängen $L_S <$ min L_S müssen die Schubflüsse $T_{i,Rk}$ reduziert werden: $T'_{i,Rk} = T_{i,Rk} \cdot (L_S / \min L_S)$
14)	Bei Schubfeldlängen $L_S > L_g$ ist $T_{3,Rk}$ nicht maßgebend.
15)	Der Grenzwert der Beanspruchbarkeit zur Einhaltung des maximalen Gleitwinkels 1/750 ergibt sich aus: $T_{3,Rk} = \frac{1}{750} \cdot G_S$ mit G_S = ideeller Schubmodul in kN/m.
16)	Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist nachzuweisen: $T_{Ed} \leq \frac{T_{2,Rk}}{\gamma_{M,ser}}$ Der Nachweis von $T_{2,Rk}$ ist nur bei bituminös verklebten Dachaufbauten erforderlich. $T_{Ed} \leq \frac{T_{3,Rk}}{\gamma_{M,ser}}$
17)	Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist nachzuweisen: $T_{Ed} \leq \frac{T_{1,Rk}}{\gamma_{M1}}$ Die Bemessungswerte der Quer- und Auflagerkräfte sind um $F_{Ed,S} = K_3 \cdot T_{Ed}$ zu vergrößern.
18)	Sonderausführungsarten der Befestigung: Eine Sonderausführung der Befestigung ist gegeben, wenn jede Rippe mit je einem Befestigungselement unmittelbar neben jedem Steg des Trapezprofils (siehe Bild 1) befestigt wird. Alternativ darf eine runde oder rechteckige Unterlegscheibe (siehe Bild 2), die unter das mittig eingebrachte Befestigungselement anzuordnen ist, verwendet werden. Die Unterlegscheibe muss den Untergurt in seiner gesamten ebenen Breite überdecken. Für die Scheibendicke gilt: $d \geq 2{,}7 \cdot t_{cor} \cdot \sqrt[3]{\frac{l}{c_u}} \geq 2{,}0\,\text{mm}$ mit l = Untergurtbreite des Trapezprofils; c_u = Breite der Unterlegscheibe in Trapezprofillängsrichtung oder Durchmesser der Unterlegscheibe  Bild 1  Bild 2
19)	Einzellasten $F_{t,Rk}$ in kN je Rippe für die Einleitung in Trapezprofile in Spannrichtung ohne Lasteinleitungsträger. Nachweis $F_{t,Ed} \leq \frac{F_{t,Rk}}{\gamma_{M1}}$

Erläuterung zu den Schubfeld-Beiwerten

Wert		**Einheit**
L_S	Schubfeldlänge in Spannrichtung der Trapezprofile	m
K_1	Konstante zur Steifigkeitsberechnung	m/kN
K_2	Konstante zur Steifigkeitsberechnung	m^2/kN
K_3	Faktor für die Quer- und Auflagerkraft	-
$T_{1,Rk}$	char. Widerstandswert aus dem Spannungsnachweis	kN/m
$T_{2,Rk}$	Grenzschubfluss für die Relativverformung h/20, h = Profilhöhe	kN/m
$T_{3,Rk}$	Grenzschubfluss zur Einhaltung des Gleitwinkels 1/750	kN/m

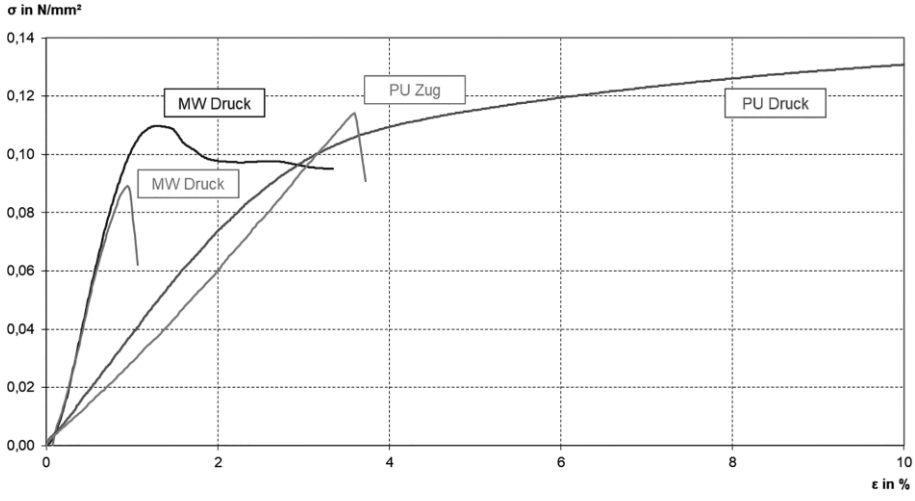


Bild 17. Gegenüberstellung von Druck- und Zugverhalten bei Mineralwolle und PUR-Hartschaum

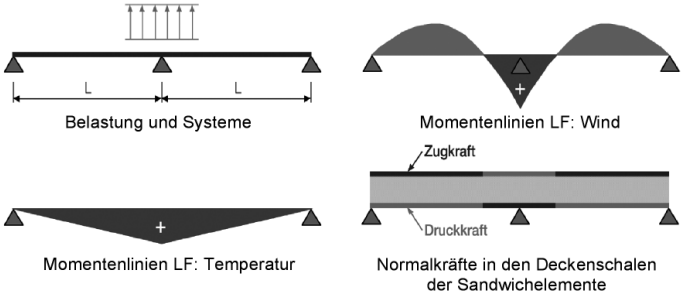


Bild 18. Lastfall Temperatur

Lastfall „Temperatur im Sommer“ am Zweifeld-System resultieren Zugkräfte in den Schrauben am Mittelauflager und es werden Druckspannungen im äußeren Deckblech erzeugt (Bild 18).
Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Festigkeitswerte des Kernmaterials bei hohen Temperaturen verschlechtern. Insbesondere Elastizitäts- und Gleitmodul werden um bis zu 35% kleiner, was zu einer entsprechenden Reduzierung der Knitterspannung führt.

3.5 Axialbelastung

Die Belastung von Sandwichelementen in ihrer Ebene, z. B. durch Verwendung der Paneele als Wandscheibe, kann derzeit nicht als Stand der Technik, sondern als Gegenstand der Forschung gesehen werden [4, 24]. Zwar zeigen Beispiele aus dem bauaufsichtlich nicht relevanten Bereich (z. B. Kühlräume), dass die axiale Tragfähigkeit sehr gut ist und die Lasteinleitung zufriedenstellend ausgeführt werden kann, es fehlen jedoch z. B. Erfahrungen hinsichtlich des Einflusses von Imperfektionen und Kriecherscheinungen.

4 Befestigung

4.1 Einleitung

Im Befestigungsbereich kommt es zu großen örtlichen Spannungen und Verformungen im Deckblech und im Kernmaterial, die zu einem Versagen der Verbindungsmittel oder des Sandwichs führen können. Die Analyse von Befestigungsmitteln für Sandwichelemente kann nur experimentell erfolgen [62]. Da die Deckbleche sehr dünn sind und das Kernmaterial weich ist, können die Erkenntnisse aus dem Bereich der Trapezprofile, für die eine ähnliche Befestigungstechnik verwendet wird, nicht übertragen werden. Dazu kommt infolge der guten Wärmedämmung ein großes Temperaturgefälle innerhalb der Elemente, woraus eine Krümmung und damit zusätzliche Verformungen folgen (Ermüdung infolge Temperaturwechsel), für die die Verbindungsmittel ausgelegt werden müssen. Dies führt dazu, dass in den Zulassungen nicht nur Traglasten für die unterschiedlichen Versagensarten, sondern auch Grenzverformungen angegeben sind (s. a. Bild 19 rechts und [71]).

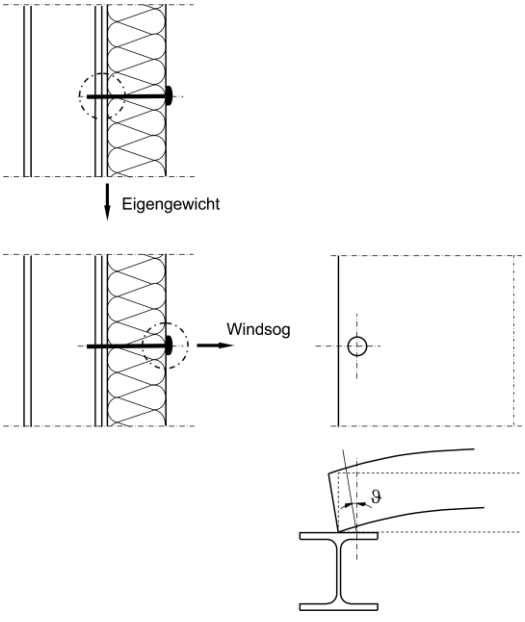


Bild 19. Beanspruchung von Verbindungsmitteln

4.2 Direkte Befestigung

Sandwichelemente müssen mit der Unterkonstruktion kraftschlüssig verbunden werden. Hierzu werden Schrauben als Verbindungsmittel genutzt. Bei der direkten Befestigung wird von außen durch beide Deckschichten und das Kernmaterial in die Unterkonstruktion ein Loch vorgebohrt und die Befestigung mit einer gewindefurchenden Schraube vollzogen. Sind die Schrauben mit einer Bohrspitze versehen, lässt sich die Befestigung in einem Arbeitsgang durchführen. Der Nachteil der direkten Befestigung liegt in der Sichtbarkeit der Schraubenköpfe in der Fassade.

Abhebende Kräfte wie Windsog werden auf der Elementaußenseite übertragen. Daraus folgt die am meisten auftretende Versagensart, das Durchknöpfen des Schraubenkopfes durch das Deckblech (Bild 20). Diese Befestigung kann auch für die Biegetragfähigkeit nachteilig sein, wie im Abschnitt 3.3.4 zur Tragfähigkeit am Innenauflager angesprochen wurde. Schon bei relativ geringen Windsoglasten treten im Umfeld des Schraubenkopfes trichterförmige Verformungen auf, die die Druckkräfte des Deckblechs umleiten, d. h., das gedrückte Blech wird nicht nur durch die Löcher in seiner Fläche reduziert, sondern durch die Verformungen im Bereich der Löcher entstehen Umlenkkräfte, welche die Tragspannung herabsetzen.

Die Tragfähigkeit der Schraube wird aufseiten des Sandwichelements von drei Parametern bestimmt (s. a. [31]):

- Deckblechdicke,
- Steifigkeit des Kernwerkstoffs,
- Durchmesser der Unterlegscheibe.

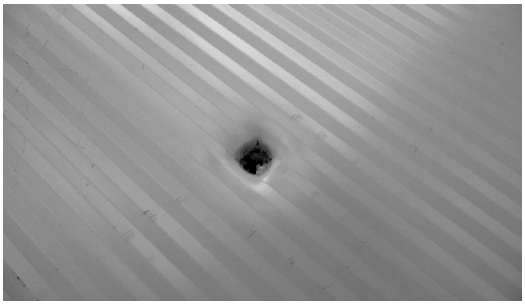


Bild 20. Deckblechversagen beim Durchknöpfen einer Schraube

Bild 21. Typische Schrauben zur Befestigung von Sandwichpaneelen, links mit Stützgewinde

Das Deckblech verteilt die Schraubenkraft über Biegung, wobei die Steifigkeit des Kernwerkstoffs zu einer Bettung und damit direkten Lastaufnahme führt, d. h., je steifer der Kernwerkstoff ist, umso mehr Last wird direkt in den Kern geleitet. Hierbei hilft auch die Unterlegscheibe, wobei jedoch bei wachsendem Scheibendurchmesser eine Grenze erreicht wird, ab der die Scheibe selbst versagt (s. Bild 19 unten links).

Querkräfte innerhalb der Elementebene (z. B. infolge von Eigengewicht oder Dachschub) überträgt die Innenseite. Dort ist das Blech sehr dünn und nicht durch einen Schraubenkopf, sondern nur durch den Kernwerkstoff ausgesteift (Bild 19 oben).

Treten Querkraft und abhebende Kraft gleichzeitig auf, so ist deren Interaktion nur zu berücksichtigen, wenn es sich um eine zyklische Beanspruchung handelt, wie sie z. B. bei einer Gebäudeaussteifung auftritt. Diese Anwendung ist jedoch durch die aktuelle Norm nicht geregelt (s. hierzu auch [20]).

Schrauben für die direkte Befestigung sind lang (Bild 21), da sie durch die komplette Elementdicke hindurchgehen. Gern verwendet man Schrauben mit zwei Gewinden, einem an der Spitze zur Verbindung mit der Unterkonstruktion und einem sogenannten Stützgewinde unter dem Schraubenkopf, das sicherstellt, dass das Deckblech gut am Schraubenkopf anliegt. Andernfalls ist die Dichtigkeit gefährdet. Zur Verbesserung der Dichtung wird üblicherweise eine EPDM-Lage auf die Unterlegscheibe vulkanisiert.
Die Tragfähigkeit von Verbindungsmitteln zur direkten Montage ist in einer bauaufsichtlichen Zulassung geregelt [71]. Es ist zu beachten, dass es außer den hier beschriebenen, vom Sandwichelement beeinflussten Versagensarten, drei weitere Versagensarten gibt, die nur von Schraube und Unterkonstruktion abhängen, und die immer untersucht werden müssen: 1. Schraubenauszug, 2. Abscheren der Schraube, 3. Lochleibung in der Unterkonstruktion.

4.3 Indirekte Befestigung

Da die Ansicht der Schraubenköpfe mitunter als störend empfunden wird, hat man indirekte Befestigungen entwickelt, die auch verdeckte Befestigungen genannt werden. Sie liegen im Bereich der Fuge. Die Verbindung erfolgt durch direkte Verschraubung eines Elements mit der Unterkonstruktion und formschlüssige Verbindung des Nachbarpaneels mit diesem Element (Bild 22). Hierbei ist die Fuge des indirekt angeschlossenen Bauteils so ausgebildet, dass sie den Schraubenkopf verdeckt. Durch den Einbau eines speziell auf die Fugengeometrie abgestimmten Formteils (Lastverteiler) kann der Lasteinleitungsbereich verstärkt werden. Die indirekte Befestigung hat den Nachteil, dass im Lastfall Windsog nicht mehr die gesamte Paneelbreite gefasst wird, sondern nur noch eine Punktlagerung am Rand des Elements stattfindet. Dadurch ist die indirekte Lagerung prinzipiell eher bemessungsbestimmend als die direkte, da bei großen Lasten die Tragfähigkeit des Verbindungsbereichs nicht durch Anordnung zusätzlicher Schrauben erhöht werden kann.
Unter Windsog nutzt die indirekte Befestigung die Schubfestigkeit des Kernmaterials (Bild 23) und die Geometrie der Fuge.

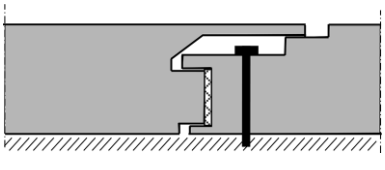
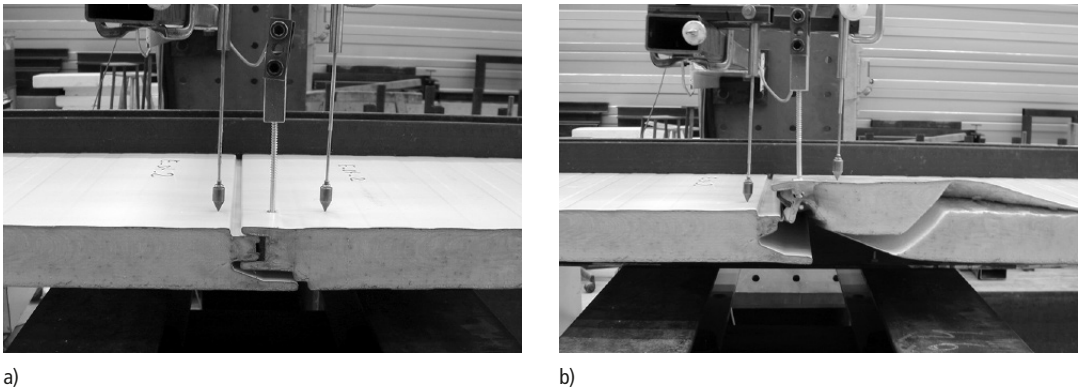


Bild 22. Prinzipskizze zur indirekten Befestigung

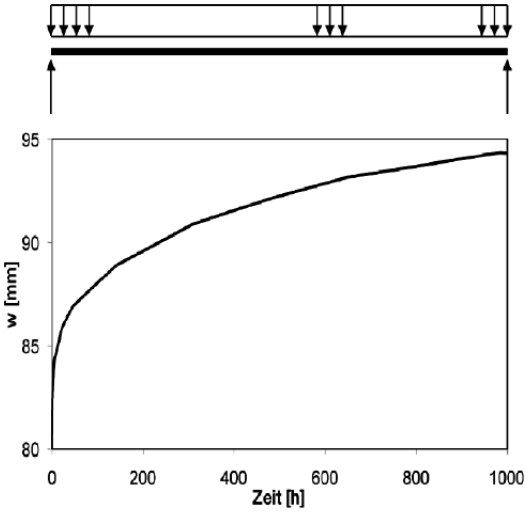
5 Langzeitverhalten – Kriechen

Die mechanischen Eigenschaften von Polyurethan und Polystyrol sind von der Belastungsdauer abhängig. Nach einer anfänglichen elastischen Verformung des Schaums kommt es zu Kriechvorgängen in den Zellwänden, für die es kein Endkriechmaß gibt (Bild 24). Für Wandelemente stellt dies kein Problem dar, da sie nur kurzzeitig durch Wind beansprucht werden. Diese Last wirkt zu kurz, um den Kriechprozess zu initiieren. Dachelemente hingegen tragen andauernd ihr Eigengewicht und darüber hinaus im Winter zusätzlich die Schneelast.
Daher werden Dachelemente mit einer starken Profilierung, ähnlich der eines Trapezprofils, hergestellt. Diese Profilierung ist so dimensioniert, dass sie das Eigengewicht des Elements allein, d. h. durch ihre Eigensteifigkeit übernehmen kann und die Sandwichwirkung nur für kurzzeitig wirkende Lasten (Wind und Schnee) aktiviert wird. Insbesondere unter der Schneelast führt das Kriechen des Kernwerkstoffs zu bleibenden Verformungen. Ein Teil dieser Verformungen wird im Sommer durch die Rückfederung des profilierten Deckblechs kompensiert. Es verbleibt im Jahreszyklus eine



a) b)

Bild 23. Mitwirkung des Kernwerkstoffs im Verbindungsbereich bei Windsog, a) vor und b) nach dem Versagen



Durchbiegung in Feldmitte bei konstanter Gleichbelastung in Abhängigkeit von der Zeit

Bild 24. Kriechkurve für PUR-Hartschaum

kleine Restdurchbiegung, die die Gebrauchstauglichkeit jedoch nicht reduziert.

6 Konstruktives

6.1 Fugen

Einer gute Konstruktion und Ausführung der Fugen kommt bei Sandwichelementen große Bedeutung zu. So steht in der Energieeinsparverordnung [68] zum Thema Verringerung der Energieverluste: „Zu errichtende Gebäude sind so auszuführen, dass die wärmeübertragende Umfassungsfläche einschließlich der Fugen dauerhaft luftundurchlässig entsprechend den anerkannten Regeln der Technik abgedichtet ist.“ Neben den energetischen Gesichtspunkten ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Vermeidung von Tauwasser in der Baukonstruktion zu nennen. Auch die Sicherstellung von akzeptablen Schalldämmmaßen sowie das einwandfreie Betreiben von Lüftungsanlagen setzen luftdichte Außenbauteile voraus. Sandwichelemente sind im Bereich der metallischen Deckschicht absolut luftdicht. Aufgrund der Vorfertigung der einzelnen Elemente im Werk und der daran anschließenden Montage auf der Baustelle entstehen im Vergleich zu anderen Bauweisen vergleichsweise viele Fugen und Anschlussbereiche.

Man kann zwischen symmetrischen Fugen (Typ 1), Fugen mit Befestigungsclips (Typ 2), Fugen für eine verdeckte Befestigung ohne Clips (Typ 3) sowie Dachelementfugen unterscheiden (Typ 4, jeweils Bild 25). Die Anforderungen an die Luftdichtigkeit sind bei entsprechender Planung und Ausführung mit jeder dieser Fugengeometrien zu erreichen. Als gängigstes Mittel hat sich das Abdichten mit komprimierbaren Fugenbändern bewährt. Eine Ausführung ohne Dichtband (Bild 26) führt in der Regel zu schlechten Luftdichtigkeitswerten und entspricht nicht dem aktuellen Stand der Technik. Der Industrieverband für Bausysteme im Metallleichtbau (IFBS, heute „Internationaler Verband für den Metallleichtbau“) veröffentlichte im November 2016 die Schrift „Bauphysik – Luftdichtheit im Metallleichtbau“ [69]. Diese enthält neben allgemeinen Informationen eine Vielzahl von Konstruktionsdetails, mit deren Hilfe Bauteilanschlüsse luftdicht (Der Begriff „luftdicht“ meint im Folgenden immer luftundurchlässig entsprechend den anerkannten Regeln der Technik bzw. den Vorgaben nach Norm) ausführbar sind.

Bei den Anforderungen an die Luftdichtheit muss grundsätzlich zwischen allgemeinen Anforderungen an das Gesamtgebäude und lokalen Anforderungen an einzelne Bauteile unterschieden werden. In der EnEV wird diese Forderung konkretisiert. Bei einer Überprüfung der Luftdichtheit nach DIN EN ISO 9972 [54] darf der gemessene Volumenstrom, bezogen auf das beheizte Luftvolumen, bei einer Druckdifferenz von 50 Pa bei Gebäuden ohne raumlufttechnische Anlagen den Wert 3,0 h^{-1} nicht überschreiten. Bei Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen ist der Wert auf 1,5 h^{-1} begrenzt. Für außen liegende Fenster, Fenstertüren und Dachflächenfenster werden in Abhängigkeit von der

Tabelle 1. Klassifizierung gemäß DIN EN 12207

Zeile	Anzahl der Vollgeschosse des Gebäudes	Klasse der Fugendurchlässigkeit nach DIN EN 12207-1:2000-06
1	bis zu 2	2
2	mehr als 2	3

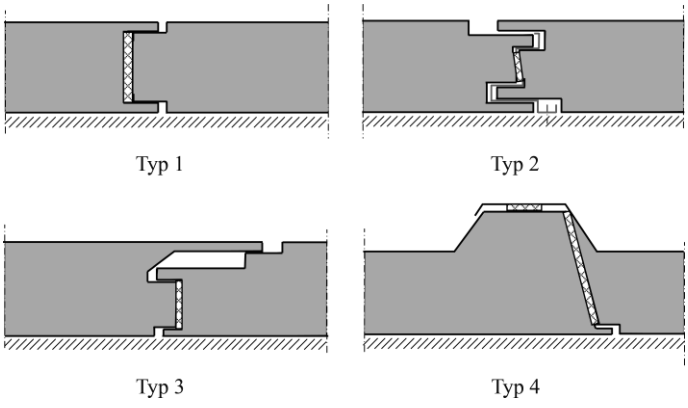


Bild 25. Fugentypen

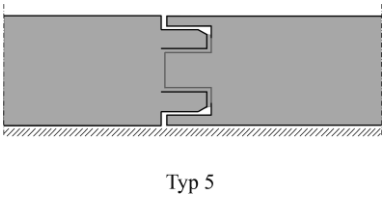


Bild 26. Symmetrische Fuge ohne Dichtband

Bild 27. Dichtigkeitsprüfstand

Gebäudegröße unterschiedliche Anforderungen an die Fugendurchlässigkeit gestellt. Es wird dabei auf die Klassen nach DIN EN 12207 [49] „Fenster und Türen – Luftdurchlässigkeit – Klassifizierung“ verwiesen (Tabelle 1).

An einzelne Bauteilfugen werden in der Energieeinsparverordnung keinerlei Anforderungen gestellt.

Auch DIN EN 14509 [55] stellt keine direkten Anforderungen an die Luftdichtigkeit von Sandwichelementfugen. Dort heißt es lediglich „Falls erforderlich, ist die Luftdichtheit einer Einheit von Sandwichelementen … nach EN 12114 zu prüfen.“ Grenzwerte für die Luftdichtheit von Fugen beschreibt jedoch die DIN 4108-2 [46]. Dort heißt es in Kapitel 7: „Die Luftdichtheit von Bauteilen kann nach DIN EN 12114 … bestimmt werden. Der aus Messergebnissen abgeleitete Fugendurchlasskoeffizient von Bauteilanschlussfugen muss kleiner als 0,1 $m^3/(m \cdot h \cdot daPa^2/^3)$ sein.“

Die gängigste Methode, die Fugendichtheit von einzelnen Bauteilen zu beschreiben, liegt in der Angabe des Fugendurchlasskoeffizienten a. Der a-Wert stellt die Menge an Luft in m^3 dar, die bei einer Druckdifferenz von 10 Pa innerhalb einer Stunde durch einen 1 m langen Fugenabschnitt strömt. DIN EN 12114 [50] beschreibt ein Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Bauteilen. Die Sandwichelemente werden zu diesem Zweck in einem möglichst luftdichten Prüfstand (s. Bild 27 und [36]) eingebaut. Die wichtigsten Bestandteile des Prüfstands bilden eine luftdichte Prüfkammer, an die der Prüfkörper angebracht werden kann, eine Einrichtung zum Aufbau verschiedener Druckdifferenzen sowie ein Gerät zur Messung des Luftvolumenstroms.

Nach einem in DIN 12114 [50] vorgegebenen Ablauf werden nun bei unterschiedlichen Druckdifferenzstufen Luftvolumenströme durch den Prüfstand gemessen. Mit dem Wissen, dass Sandwichelemente im Bereich der metallischen Deckschichten gänzlich luftdicht sind, kann man so direkt den Luftstrom durch die Fuge bestimmen. Ergebnis dieser Messungen sind von der Höhe der Druckdifferenz abhängige Luftvolumenströme, die grafisch dargestellt werden können (s. Bild 28). Ein anschließendes Regressionsverfahren ermöglicht die Angabe des Fugendurchlasskoeffizienten a. Bei den momentan auf dem europäischen Markt angebotenen Sandwichelementen ergeben sich sehr unterschiedliche Fugendurchlasskoeffizienten. Haupteinflussparameter sind die Fugengeometrie, die Art des Dichtbands sowie der Fugenabstand bzw. die Toleranz bei der Montage.

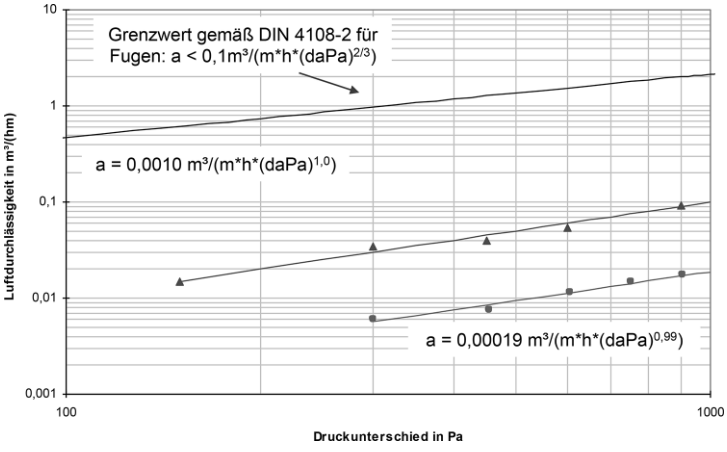


Bild 28. Ergebnisse der Dichtigkeitsprüfung gemäß DIN EN 12114 [50]

6.2 Öffnungen

Kleine Öffnungen, die nur ein Element betreffen und dies in seinem Querschnitt schwächen (z. B. durch Lüftungsöffnungen oder kleine Fenster), oder große Öffnungen, die entstehen, indem ein Sandwichelement z. B. durch ein Fenster über seine gesamte Breite ersetzt wird, werden regelmäßig in Bauwerken mit Sandwichelementen ausgeführt. Neben der Frage der Dichtheit (s. Abschnitt 6.1) spielt in diesem Zusammenhang auch die Frage der Tragfähigkeit eine bedeutende Rolle. Eine zusätzliche Unterkonstruktion kann den Tragfähigkeitsverlust ausgleichen, was den derzeitigen Stand der Technik bei elementbreiten Fenstern darstellt. Im Folgenden soll auf die Berechnungsverfahren und deren konstruktive Voraussetzungen eingegangen werden, mit deren Hilfe man bei kleinen Öffnungen Hilfsträger vermeiden kann.

Wichtigster konstruktiver Teil hierbei ist die Fuge, die Lasten vom geschwächten Element in die benachbarten Elemente übertragen muss. Ist sie dafür geeignet, so kann man durch Lastumlagerung für eine Entlastung des Paneels mit der Öffnung sorgen. Hierfür kann z. B. das Stabwerksmodell von *Böttcher* [8, 23] verwendet werden (Bild 29). Es 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 (s. hierzu auch [13]) des Sandwichquerschnitts. Das Mittelelement besitzt eine Öffnung, die Randelemente sind ungestört. Im Bereich der Öffnung wird der Längsträger über einen biege-, schub- und torsionsstarren Lastverteilerstab (Pos. 4) in zwei Randlängsträger (Pos. 2 und Pos. 3) aufgeteilt. Sie besitzen die Steifigkeiten des jeweiligen Restquerschnitts. Die Schub- und Biegesteifigkeit in Elementquerrichtung 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 nur experimentell ermittelbare Fugensteifigkeit der Längsfuge k_F ab und werden als Pendelstäbe ausgeführt. Mit diesem Modell lassen sich die Kräfte im Elementverband ermitteln und den ertragbaren Kräften gegenüberstellen.

Zu beachten ist hierbei noch, dass es bei eckigen Ausschnitten (z. B. für Fenster) zu Spannungskonzentrationen in den Ecken, sogenannten Kerbspannungen, kommt, welche die Tragfähigkeit stärker reduzieren, als es eine näherungsweise Nettoquerschnittsbetrachtung vermuten lässt (s. hierzu auch [23]). Geeignet eingebaute Fensterrahmen können diese Spannungsspitzen abbauen [27].

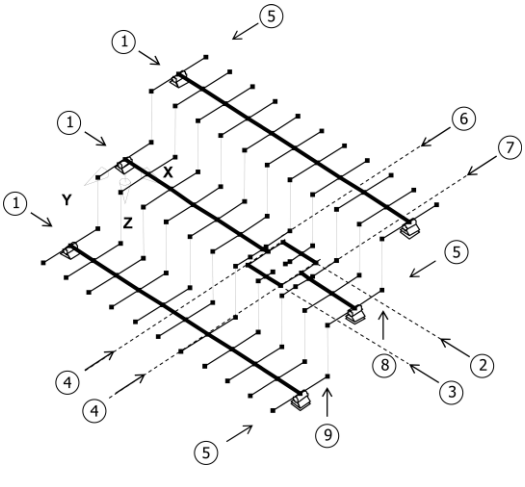


Bild 29. Stabwerkmodell zur Analyse eines Sandwichelementverbands

Bild 30. Sandwichpaneel mit eingebautem Fenster

Fenster mit sehr tragfähigen Rahmen, die den ausfallenden Querschnitt ersetzen, wurden bereits mit Erfolg eingesetzt (Bild 30). Für ihre Anwendung ist jedoch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall notwendig.

6.3 Punkt- und Linienlasten

6.3.1 Punktlasten und wiederholte Belastungen bei Betreten der Elemente

Nach DIN EN 14509 [55], Kap. A.9.1 sind die erforderlichen Versuche festgelegt, die zur Bestimmung der Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Dach- oder (Unter-)Deckenelementen dienen, z. B. im Hinblick auf das *Betreten der Elemente durch eine einzelne Person bei gelegentlichem Begehen* sowohl während der Montage als auch danach. Bei den Versuchen handelt es sich um Bauteilversuche mit einer Einzellast von 1,2 kN an ungünstigster Stelle.
Nimmt das Element die Last zwar auf, zeigt jedoch dauerhafte Schäden, sind Maßnahmen einzuleiten, um Beschädigungen während der Montage zu vermeiden (z. B. durch Verwendung von Laufbohlen). Darüber hinaus dürfen keine Vorrichtungen zum Betreten des Dachs nach Abschluss der Montagearbeiten vorhanden sein. Hält das Element der Last nicht stand, so darf es nur für Dächer- oder (Unter-)Decken verwendet werden, die nicht betreten werden können/dürfen. Diese Einschränkung muss deutlich sichtbar auf dem Element (oder an einer anderen Stelle) angebracht sein.
Nach DIN EN 14509 [55], Kap. A.9.2 sind die erforderlichen Versuche festgelegt, die zur Bestimmung der Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Dach- oder (Unter-)Deckenelementen dienen, z. B. in Hinblick auf das *Betreten der Elemente durch eine einzelne Person bei wiederholtem Begehen* sowohl während der Montage als auch danach. Bei den Versuchen handelt es sich um sehr aufwendige Versuche, bei denen genau festgelegte Versuchskörper durch häufiges Begehen beansprucht werden. Die Elemente sind nur dann ohne zusätzlichen Schutz als geeignet für das Betreten für Zugangs- oder Wartungszwecke anzusehen, wenn die geforderten Bedingungen (nur geringer Abfall der Querzugfestigkeit nach dem Begehen) eingehalten werden.
Erläuterung:
Sandwichpaneele können im Rahmen der Montage betreten werden, sind jedoch üblicherweise nicht für eine regelmäßige Begehung (wiederholte Belastungen) geeignet. Die dünnen Deckschichten sind häufig nicht in der Lage, für eine ausreichende Querverteilung von Punktlasten zu sorgen. Dadurch wird das Kernmaterial direkt belastet. Da es sehr weich ist, gibt es nach und das Deckblech wird stark, u. U. sogar plastisch verformt, wodurch bleibende Beulen entstehen. Diese können die Tragfähigkeit negativ beeinflussen (s. hierzu auch Bild 13).
Besteht der Kern aus Mineralwolle, so können deren Fasern im Lasteinleitungsbereich zerbrechen. Infolgedessen wird der Verbund zwischen Deckschicht und Kern und damit die Sandwichwirkung zerstört. Daher muss insbesondere bei Elementen mit Mineralwolle die Oberfläche während der Montage in dem Bereich, in dem sie begangen wird, durch lastverteilende Elemente geschützt werden.

6.3.2 Linien- und Punktlasten von zusätzlichen äußeren Lasten

Linien- und Punktlasten treten bei Sandwichbauteilen infolge zusätzlicher Nutzung für die Lastabtragung, z. B. bei der Installation von Fotovoltaik- oder Solarkollektoren-Anlagen auf dem Dach (Bilder 31 und 32) oder von vorgehängten Fassaden an der Wand (s. Abschnitt 6.10) auf. Daraus ergeben sich zusätzliche Lasten aus Eigengewicht und anteilige Schnee- und Windlasten, die als Punkt- oder Linienlasten die Sandwichbauteile beanspruchen.
Bei linienförmigen oder punktuellen Lasten ist häufig eine geringere Tragfähigkeit der Sandwichbauteile im Vergleich zu gleichmäßig verteilter Belastung vorhanden, da als tragender Querschnitt nicht die volle Paneelbreite, sondern nur eine effektiv wirkende, mittragende Breite zur Verfügung steht.

Bild 31. Fotovoltaikanlage

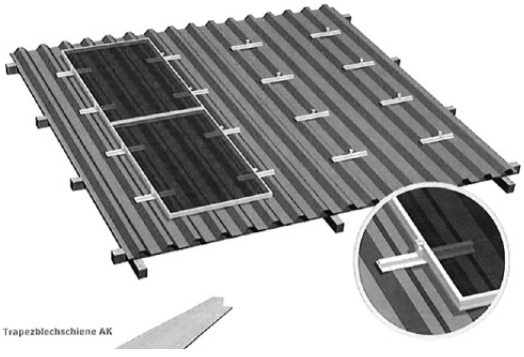


Bild 32. Fotovoltaikanlage

Der Nachweis der Beanspruchbarkeit infolge von Linien- und Punktlasten ist nicht in der DIN EN 14509 erfasst und ist in nationalen Normen oder Zulassungen zu regeln. Weitere Informationen sind in den „European Recommendations for the Design of Sandwich Panels with Point and Line Loads“ [66] enthalten.

6.3.2.1 Linienlasten

Linienlasten **quer** zur Spannrichtung, andrückend
Linienlasten quer zur Spannrichtung der Elemente entstehen bei andrückenden Lasten, die über Lastverteilerbalken quer zur Spannrichtung über die gesamte Paneelbreite, z. B. über Querträger mit aufgeständerten Fotovoltaik-Elementen, eingeleitet werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Lastverteilerbalken zwängungsfrei, insbesondere hinsichtlich der Temperaturdehnungen der Querträger, befestigt werden (s. Bild 33).
Bei Linienlasten quer zur Spannrichtung kann das Tragverhalten für Biegemomenten- und Schub-Beanspruchungen direkt nach der Sandwichtheorie erfasst werden, da die volle Paneelbreite angesetzt werden kann. Dies gilt insbesondere bei Paneelen mit ebenen oder quasi-ebenen Deckschichten. Bei Paneelen mit profilierten Deckschichten und einer Lasteinleitung nur über die Obergurte der Profilierung gilt dies nur, wenn der Abstand der Trapezprofile kleiner ist als die mittragende Breite pro Rippe. Bei größerem Abstand ist eine mittragende Breite analog zu Abschnitt 6.3.2.4 zu definieren.
Die Berechnung der Spannungen und das Nachweisverfahren sind nach Kapitel E der DIN EN 14509 [55] vorzusehen. Die Linienlasten sind dabei am Sandwichbalken als Einzellasten (pro Paneelbreite) anzusetzen.
Zusätzlich zu den Nachweisen für Biegemomenten- und Schubbeanspruchungen ist auch ein lokaler Nachweis der Druckspannungen unter den Lastverteilern zu führen.
Linienlasten **längs** zur Spannrichtung, andrückend
Linienlasten längs zur Spannrichtung der Elemente entstehen bei andrückenden Lasten, die über Lastverteilerschienen parallel zur Spannrichtung, z. B. auf Lastverteilerschienen aufgelagerte Fotovoltaik-Elemente, eingeleitet werden (s. Bild 34). Falls Paneele durch Linienlasten längs zur Spannrichtung belastet werden, die z. B. über zusätzliche, durchgehend aufliegende oder in die Fugen eingebaute Verteilerschienen eingeleitet werden, muss zunächst das generelle Tragverhalten geklärt werden. Dabei ist besonders auf unterschiedliches Temperatur-Verhalten der Verteilerschienen und der Sandwichpaneele zu achten.
Es gibt im Prinzip zwei Möglichkeiten hinsichtlich des Tragverhaltens:
1. integriertes Tragverhalten (Verbundquerschnitt)
In diesem Fall wird die Tragschiene schubfest mit dem Paneel verbunden, sodass ein neues Verbundsystem entsteht. Das Tragverhalten muss experimentell unter-

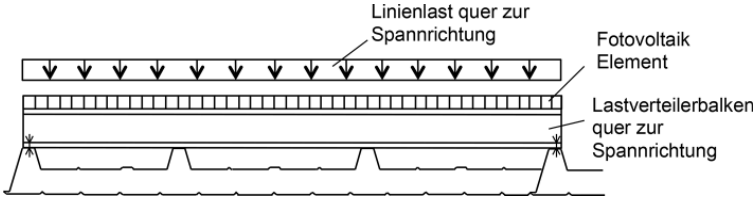


Bild 33. Linienlast quer zur Spannrichtung, andrückend

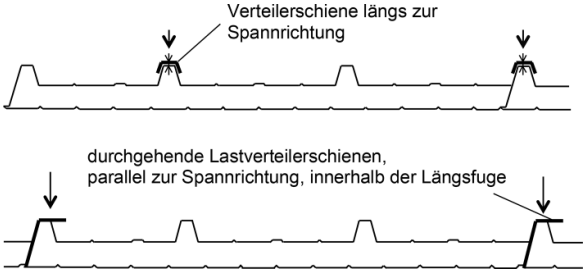


Bild 34. Linienlasten längs zur Spannrichtung, andrückend

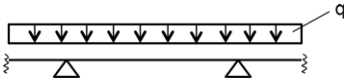


Bild 35. Statisches System

sucht werden, da hier der Einfluss der Steifigkeit der Verteilerschiene im Vergleich zur Steifigkeit des Paneels eine entscheidende Rolle spielt. Insbesondere sind aber die Verbindungen zwischen Verteilerschiene und Paneel zu untersuchen, da diese die anteiligen Schubkräfte aus der Verbundwirkung übertragen müssen.

2. additives Tragverhalten

In diesem Fall darf keine Verbundwirkung zwischen Schiene und Paneel angesetzt werden. Dies kann z. B. durch Langloch-Ausbildungen im Bereich der Befestigungen erreicht werden. Die durchgehende Schiene dient dabei nur für eine Lastverteilung in Längsrichtung. Bei dem additiven Tragverhalten kann zunächst nicht davon ausgegangen werden, dass die volle Paneelbreite wirksam ist. Es sind deshalb Bauteil-Versuche durchzuführen und die Versagenslasten zu bestimmen, die den Versagenslasten der Paneele ohne Schiene und mit gleichmäßig verteilter Last gegenübergestellt werden. Entsprechend können auch mittragende Breiten bestimmt werden (s. Abschnitt 6.3.2.4).

Mit den Ergebnissen aus den Versuchen, d. h. den speziell ermittelten Bemessungswerten oder den definierten mittragenden Breiten, können die Beanspruchungen aus den Linienlasten nach Kap. E der DIN EN 14509 [55] direkt berechnet werden (s. Bild 35).

Darin ist die Berechnungslast q wie folgt zu ermitteln:

$$q = q_L \cdot b/b_w$$

mit

q_L Linienlast

b volle Paneelbreite

b_w mittragende Breite

6.3.2.2 Punktlasten

Punktlasten, andrückend

Andrückende Einzellasten oder Gruppen aus Einzellasten können an beliebiger Stelle direkt auf der äußeren Deckschicht durch punktuelle Lasteinleitung, z. B. aus Eigengewicht von Fotovoltaik-Anlagen, entstehen.

Hierzu gehören auch Linienlasten, die nicht über die gesamte Paneelbreite über Lastverteilerbalken eingeleitet werden

Punktlasten, abhebend

Abhebende Einzellasten oder Gruppen aus Einzellasten können an beliebiger Stelle durch spezielle Befestigungen von Fotovoltaik-Elementen direkt an der äußeren Deckschicht, z. B. mit Schellen oder Montageklammern, entstehen. Hier ist insbesondere auch die Beanspruchung auf „Herausziehen der Befestigung aus der Deckschicht“ bei Windsog zu untersuchen und die dadurch entstehenden Schädigungen an den Deckschichten bei der Tragwirkung der Paneele zu berücksichtigen (s. Bild 36).

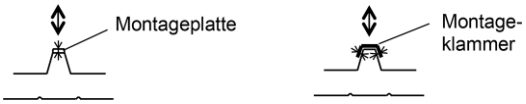


Bild 36. Punktlasten

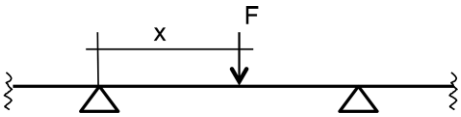


Bild 37. Statisches System

Bemessung bei Punktlasten

Bei Punktlasten kann nicht davon ausgegangen werden, dass die volle Paneelbreite wirksam ist. Es sind deshalb Bauteil-Versuche durchzuführen und die Versagenslasten zu bestimmen, die den Versagenslasten der Paneele mit gleichmäßig verteilter Last gegenübergestellt werden. Entsprechend können auch mittragende Breiten bestimmt werden (s. Abschnitt 6.3.2.4).

Mit den Ergebnissen aus den Versuchen, d. h. den speziell ermittelten Bemessungswerten oder den definierten mittragenden Breiten, können dann die Beanspruchbarkeiten aus Punktlasten nach Kap. E der DIN EN 14509 [55] direkt berechnet werden (s. Bild 37). Das Nachweisverfahren der DIN EN 14509 [55] kann somit direkt angewendet werden.

Hierbei ist die Berechnungslast F wie folgt zu ermitteln:

$$F = F_p \cdot \frac{b}{b_w}$$

mit

F_p Punktlast

b_w mittragende Breite, abhängig von der Laststellung

x Abstand zum Auflager

6.3.2.3 Versuche

Um alle möglichen Beanspruchungen bei Sandwichbauteilen für alle denkbaren Laststellungen versuchstechnisch (design by testing) zu erfassen, wäre ein sehr großer Aufwand erforderlich. Es müssten für jeden Paneeltyp alle statischen Systeme mit allen Laststellungen (z. B. mittig, am Rand, für Einfeldplatten, für Mehrfeldplatten, usw.) erfasst werden. Betrachtet man nur die möglichen Laststellungen bei einem einfeldrig gespannten Paneel, können zunächst vereinfachend folgende relevante Laststellungen (s. Bild 38) festgelegt werden.

Werden für jede Laststellung mindestens 2 Versuche vorgesehen, sind 12 Bauteilversuche durchzuführen.

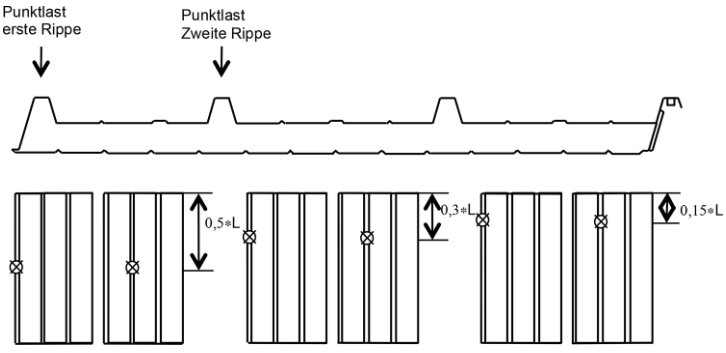


Bild 38. Relevante Laststellungen

Bild 39. Punktlastversuch

Für mehrfeldrig gespannte Sandwichbauteilen wäre der Versuchsaufwand noch deutlich höher, da verschiedene relevante Laststellungen untersucht werden müssten. Aufgrund der Versuche (s. Bild 39) können mittragende Breiten definiert werden, indem jeweils ein Vergleich mit dem Tragverhalten (Traglasten) bei gleichmäßig verteilter Belastung durchgeführt wird.

6.3.2.4 Bestimmung der mittragenden Breiten

Die relevanten mittragenden Breiten können bestimmt werden, indem die erreichten Traglasten bei Bauteilversuchen mit linienförmigen oder punktförmigen Belastungen den erreichten Traglasten bei gleichmäßig verteilter Belastung gegenübergestellt werden. Dadurch kann ein Reduktionsfaktor ermittelt werden, mit dem die Bauteilbreite reduziert und als mittragende Breite für die Bemessung angegeben wird. Falls die mittragenden Breiten jeweils direkt bestimmt werden sollen, ist darauf zu achten, dass alle möglichen Versagensarten, statischen Systeme und Paneelabmessungen untersucht werden müssen.

Um den Versuchsaufwand zu reduzieren, gibt es ein vereinfachtes Verfahren: Es werden nur Bestätigungsversuche (Bestimmung der Knitterspannungen oder Schub-Versagensspannungen) mit Einfeldplatten unter Punktlasten durchgeführt. Die festgestellte mittragenden Breiten werden dann den Werten, die tabellarisch im DAfStb-Heft 240 [39] oder für linienförmige oder punktuelle Belastungen bei ausbetonierten Trapezprofilen angegeben sind (s. Tabelle 2 und 3), gegenübergestellt. Neuere Ansätze, z. B. nach Heft 631, Ausgabe 2019 sind noch bezüglich der Anwendbarkeit für Sandwichbauteile in Diskussion. Sind die im Versuch mit Punktlasten festgestellten Werte für die mittragenden Breiten größer oder gleich gegenüber den Werten aus o. g. Tabellen, kann davon ausgegangen werden, dass auch für andere in den Tabellen angegebene Systeme die mittragenden Breiten, z. B. auch für durchlaufende Platten, für die Nachweise verwendet werden können.

σ_w; f_{Cv}	Knitterspannung, Schubfestigkeit bei gleichmäßig verteilter Belastung
$\sigma_{w,L}$; $f_{Cv,L}$	Knitterspannung, Schubfestigkeit bei linienförmiger oder punktueller Belastung (Versuchsergebnis)
b	volle Paneelbreite
b_w	mittragende Breite:
Falls:	$\sigma_{w,L}$; $f_{Cv,L} \geq \sigma_w$; f_{Cv}; $b_w = b$
Falls:	$\sigma_{w,L}$; $f_{Cv,L} < \sigma_w$; f_{Cv}; $b_w = \frac{\sigma_{w,L}}{\sigma_w} \cdot b$;
	$b_w = \frac{f_{Cv,L}}{f_{Cv}} \cdot b$

6.3.2.5 Problemstellung bei abhebenden Punktlasten

Bei der Beanspruchung von Sandwichbauteilen durch Punktlasten infolge von abhebenden Lasten (z. B. bei Windsog) ist zusätzlich Folgendes zu beachten:

Für den Nachweis auf Herausziehen der Befestigungen aus der oberen Deckschicht sind charakteristische Werte jeweils für die speziellen Befestigungsarten erforderlich, die normalerweise durch Versuche (Bild 40) bestimmt werden müssen, um die lokalen Beanspruchungen zu erfassen.

Bei Beanspruchungen auf Herausziehen der Befestigungen ist nicht auszuschließen, dass in der oberen Deckschicht im Bereich der Befestigungen lokale Störungen oder Beschädigungen, wie z. B. Ablösungen des Blechs vom Kern, Aufwölbungen oder größere Auszugslöcher, bei Erreichen der Traglasten der Befestigun-