

Bausysteme im Stahlleichtbau Trapezprofile und Sandwichelemente

Dr.-Ing. Marc Böttcher ¹

ZUSAMMENFASSUNG

Unter den Bauelementen aus Stahlblech nehmen Trapezprofile und Sandwichelemente einen großen Raum ein. Die Bemessung dieser Bauelemente erfolgt meist über Stützweitentabellen, die von den Herstellern zur Verfügung gestellt werden. Die Hintergründe der Bemessung, gerade bei den Sandwichelementen gehen dabei meist verloren und es treten Fehler auf, sobald die Anwendungsgrenzen der Bemessungshilfen verlassen werden. Im vorliegenden Beitrag werden das Tragverhalten und die Grundlagen der Bemessung dieser Elemente erläutert. Mit dem Wissen um das Tragverhalten können auch Sonderfälle der Bemessung bewertet werden. Zur weiteren Vertiefung in das Thema stehen am Ende umfangreiche Literaturangaben zur Verfügung.

1 EINLEITUNG

Der Leichtbau lässt sich in drei unterschiedliche Bereiche gliedern: Das Bauen in filigranen, dem Kraftfluss angepassten Systemen, dem Bauen mit leichten Materialien und dem Bauen mit multifunktionalen Materialverbunden.



Abb. 1: Bauwerksfassade aus Wand-Sandwichelementen

Wenn wir über Bausysteme im Stahlleichtbau reden, werden wir auf Elemente treffen, die den Werkstoff Stahl im Sinne des Leichtbaus verwenden. Der hoch zugfeste Werkstoff Stahl kann in dünnen und damit leichten Querschnitten eingesetzt werden. Das hier vorgestellte Trapezprofil steht stellvertretend für die reinen Stahlprofilelemente. Die Fähigkeit, im Verbund leistungsfähiger zu sein als in der Summe der Einzelbauteile ist die Spezialität des Sandwichelementes. Die Deckschichten sind integraler Bestandteil

der Lastabtragung, sie sind Träger von Form und Farbe und bilden den Nässeschutz. Die Kernschicht dient gleichzeitig der Wärmedämmung und der Tragfähigkeit des Bauteils. Es werden Sandwichelemente mit quasi-ebenen Deckschichten und profilierten Deckschichten vorgestellt.

Bausysteme im Stahlleichtbau kommen in den unterschiedlichsten Bereichen des Bauwesens zum Einsatz. Neben der Verwendung als Profiltafel im Verbundbau ist der wohl bekannteste Einsatzort die Verwendung als lastabtragende Fassadenbekleidung (Abb. 1).

Der Leichtbau und damit auch die Bausysteme im Stahlleichtbau besitzen spezielle Anforderungen an die Bauphysik (Wärme, Feuchte, Schall und Brand) und an die Konstruktionsdetails. Thema dieses Aufsatzes ist jedoch die Tragfähigkeit der Leichtbauelemente. Während die vereinfachte Bemessung über Tafelwerke weit verbreitet ist, bleibt das Tragverhalten oft unverstanden. Gerade in den Sonderfällen der Bemessung ist dieses Verständnis jedoch wichtig, um statisch fehlerfrei zu konstruieren.

2 TRAPEZPROFILE

2.1 Elementaufbau

Trapezprofile, als auch Kassetten-, Schwalbenschwanz-, Stehfalz- und Wellprofile (Abb. 2) werden aus bandverzinktem und beschichtetem Stahl-Feinblech hergestellt.

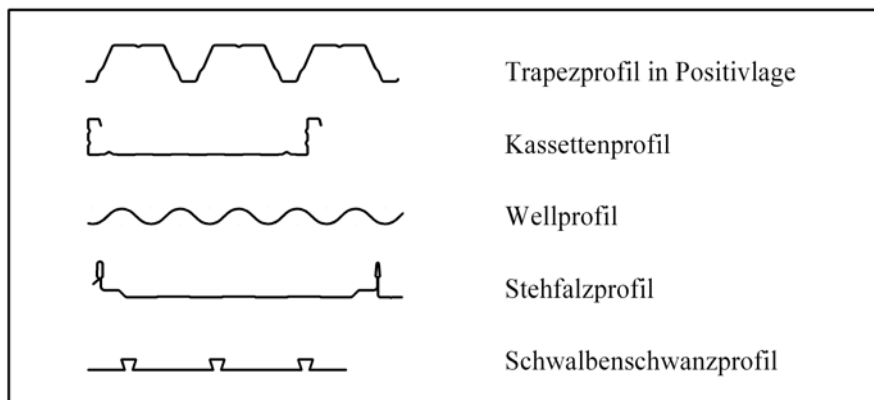


Abb. 2: Profilverformen der reinen Stahlquerschnitte

Die überwiegend verwendete Stahlgüte ist St E 320 mit einer Streckgrenze $f_{y,k} = 320 \text{ N/mm}^2$ und Dicken zwischen 0,63 und 1,50 mm. Die Flachbänder werden fertig beschichtet auf Coils aufgewickelt angeliefert und in einem Rollumformer profiliert. Die Beschichtung ist geeignet, diese Umformung schadlos zu überstehen.

2.2 Tragverhalten

Durch die hohe Zugfestigkeit des Stahls können unter Zugspannungen dünne und damit leichte Querschnitte eingesetzt werden. Der Materialverbrauch ist gering und das Bauteil daher wirtschaftlich. Durch die Profilierung werden Flächen weit weg vom gemeinsamen Schwerpunkt angeordnet und so eine hohe Biegesteifigkeit erzeugt. Das Querschnittsverhalten ähnelt damit einem I-Profil. Die horizontalen Quer-

schnittsteile übernehmen maßgeblich die Biegung über Zug- und Druckkräfte, Normalkräfte werden vom gesamten Profilquerschnitt aufgenommen und die annähernd senkrechten Querschnittsteile übernehmen die Querkraft. Je höher ein Profil gewählt wird, um so steifer ist das Element. Gleichzeitig reduzieren sich mit größerer Höhe der Profilierung die Spannungen in den Querschnitten. Für große Stützweiten sind daher hohe Profilierungen zu verwenden. Die Profilierung der Trapezprofile (Abb. 2) ist oft so ausgeprägt, dass Obergurte und Untergurte unterschiedliche Breiten besitzen. Je nach Verlegerichtung lassen sich Positiv- und Negativlage unterscheiden. Trapezprofile in Positivlage besitzen breite Obergurte und schmale Untergurte (vgl. Abb. 2). Durch diese Profilierung müssen unterschiedliche Tragfähigkeitswerte für positive und negative Belastungen ermittelt werden.

Werden dünne Querschnitte auf Druck beansprucht, so neigen diese zum Stabilitätsversagen. Vor dem Erreichen der Streckgrenze f_y versagt das Profil durch ein Ausweichen senkrecht zur Belastungsebene. Diese Problematik tritt nicht nur unter Normalspannungen und Biegedruckspannungen in Richtung der Profilierung auf, sondern auch senkrecht zur Profilierung durch Auflagerkräfte, die den Steg des Profils unter Druck setzen (Stegkrüppeln).

Im Vergleich zum ebenen Blech wirkt sich die Trapezprofilierung positiv auf das Stabilitätsverhalten aus. Die Ränder einzelner Profilbereiche werden ausgesteift, die Wellenlänge der Ausbeulung wird verkürzt und die Traglast kann gesteigert werden. Die Profiltafel versagt nicht über ihre ganze Länge, sondern in einzelnen Feldern zwischen den Profilstegen (Abb. 3). Man nennt das Versagen dieses mehrachsigt gelagerten Profilfeldes Beulen. Durch eine verfeinerte Profilierung in Form von Sicken in den Gurten und Stegen lässt sich das Beulfeld weiter verkleinern und die Tragfähigkeit steigern.

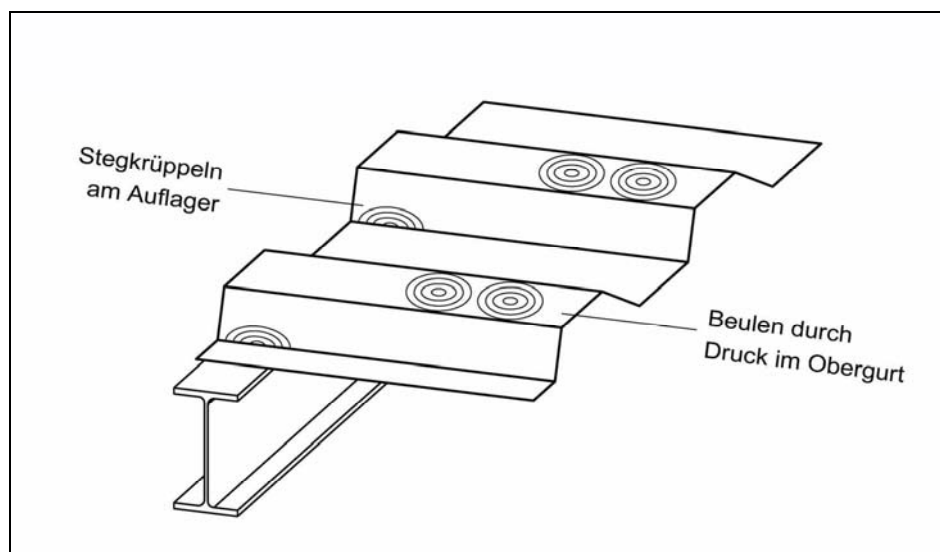


Abb. 3: Stegkrüppeln und Gurtbeulen

Wird das Trapezprofil belastet, zeigen sich unterhalb der Versagenslast bereits Ausbeulungen. Ausgesteifte Profilmittel sind jedoch weiterhin tragfähig und die Belastung kann weiter gesteigert werden, bis es zu einem Gesamtversagen kommt. Zur Berechnung der Grenzschnittgrößen werden daher nur die nicht ausgebeulten Flächen herangezogen, die bis zur Streckgrenze belastet werden können. DIN 18807 stellt Formeln zur Berechnung dieser nicht ausgebeulten Flächen für unterschiedliche Profilierungen bereit. Diese Formeln gehen auf Untersuchungen von *G. Winter* zurück, der das Modell der wirksamen Breite

von *von Karman* erweiterte. Der Einfluss der Sicken wurde maßgeblich von *Baehre* untersucht und in der europäischen Arbeitsgruppe TC 7 fortgeführt.

Die Biegesteifigkeit eines Trapezprofils lässt sich aus dem Elastizitätsmodul E und dem Flächenträgheitsmoment I_y berechnen. Zur Berechnung der Schwerachse und von I_y wird der nicht reduzierte Querschnitt angesetzt.

2.3 Nachweisverfahren

Um Nachweise führen zu können, werden einwirkende Schnittgrößen den aufnehmbaren Schnittgrößen gegenübergestellt. Die einwirkenden Schnittgrößen sind mit γ -fachen Lasten zu ermitteln und die aufnehmbaren Tragfähigkeitswerte werden in Form von Bemessungswerten angegeben. Sie können entweder den Typenblättern der Herstellern entnommen oder nach DIN 18807 berechnet werden.

Werden Trapezprofile durch äußere Druckkräfte beansprucht, ist zum einen das globale Ausknicken des nicht ausgebeulten Querschnitts zu betrachten. Die Knicklänge ist durch die Auflagersituation vorgegeben und das Trägheitsmoment wird mit den nicht reduzierten Querschnittswerten bestimmt. Ebenfalls ist zu untersuchen, ob eine geringere aufnehmbare Druckkraft entsteht, wenn der Querschnitt lokal durch Beulen versagt. Hier werden die reduzierten Querschnittswerte erforderlich.

Trapezprofile, die im Einfeldsystem gestützt und mit Flächenlasten belastet werden, sind im Grenzzustand der Tragfähigkeit nur für das maximale Feldmoment und für die Endauflagerkraft zu untersuchen. Werden sie als Decken- oder Dachbauteile verwendet, müssen wegen der zu gewährleistenden Betretbarkeit Grenzstützweiten L_{GR} eingehalten werden.

Über die Biegesteifigkeit (ermittelt mit den nicht reduzierten Querschnittswerten) lassen sich Verformungsnachweise im Zustand der Gebrauchstauglichkeit führen.

Werden statisch unbestimmte Systeme (Durchlaufträger) untersucht, müssen neben den Nachweisen im Einfeldsystem die Zwischenauflegerkraft und das Stützmoment nachgewiesen werden. Für das Stützmoment kann entweder das maximal aufnehmbare Stützmoment des Querschnittes oder das mit der Interaktion zwischen Querkraft und Biegemoment reduzierte Stützmoment maßgebend werden. Das kleinere aufnehmbare Stützmoment ist maßgebend.

Ist die Tragfähigkeit des Elementes über der Mittelstütze nicht ausreichend und kann es nicht elastisch nachgewiesen werden, darf der Traglastzustand genutzt werden. Im Zustand der Tragfähigkeit darf ein Biegeversagen über der Innenstütze erfolgen. An dieser Stelle stellt sich ein konstantes Reststützmoment ein. Die Last kann nun weiter gesteigert werden, bis das Feldmoment oder das Endauflager versagt.

Wird der Traglastzustand genutzt, müssen im Zustand der Gebrauchstauglichkeit neben den Verformungsnachweisen auch Nachweise zum Stützmoment und zur Zwischenauflegerkraft geführt werden. Im Zustand der Gebrauchstauglichkeit darf der Bereich über der Innenstütze nicht versagen. Der Vorteil der Bemessung liegt in den geringeren Sicherheiten, die im Gebrauchstauglichkeitszustand angesetzt werden dürfen.

3 SANDWICHELEMENTE

3.1 Elementaufbau

Die im Bauwesen verwendeten Sandwichelemente sind Dreischicht-Verbundelemente mit einer konstanten Gesamtdicke (Abb. 4). Sie bestehen aus zwei dünnen, dehnsteifen Deckschichten, die einen schubsteifen Kern umschließen. Die Deckschichten besitzen Dicken zwischen 0,40 und 0,75 mm und können an der Außenseite und an der Innenseite des Elementes unterschiedlich sein.

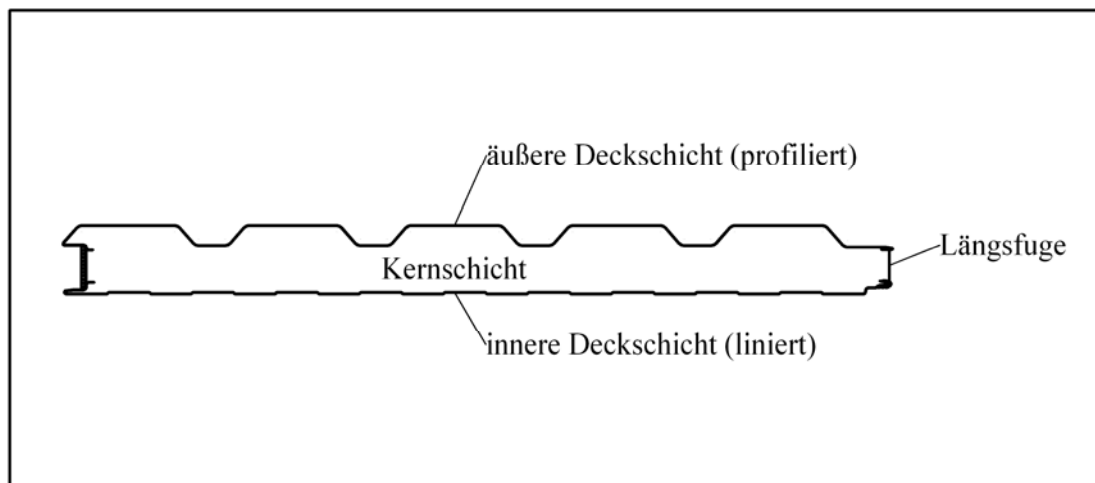


Abb. 4: Sandwichelement mit profilierter, äußerer und quasi-ebenen inneren Deckschicht

Die Profilierung dieser Deckschichten lässt sich in drei Gruppen einteilen. Während ebene Deckschichten keine Profilierungen aufweisen, besitzen quasi-ebene Deckschichten nur geringe Profiltiefen $t_p \leq 5$ mm. Die quasi-ebenen Profilierungen unterscheiden sich in Linien, Mikrolinien, Wellen und Sicken (Abb. 5). Profilierte Deckschichten besitzen Profiltiefen $t_p > 5$ mm und können gewellt oder trapezprofiliert, mit und ohne Sicken ausgeführt werden.

Die beiden gängigsten Kernmaterialien sind Polyurethan-Hartschaum (PUR-Hartschaum) und Mineralwolle. Seltener kommen Phenolharz, Polystyrol, Schaumglas oder Aluminiumwaben zum Einsatz. Die Dicke der Elemente und damit auch des Kernwerkstoffs reicht von 40 bis zu 240 mm. Während Mineralwolle nicht brennbar ist, besitzt PUR-Hartschaum ein besseres Dämmvermögen. Die Dichte der verwendeten PUR-Hartschäume beträgt ca. 40 kg/m^3 und die der verwendeten Mineralwolle ca. 100 kg/m^3 . Die Verbindung zwischen der Deckschicht und dem Kern wird für Mineralwollkerne durch eine separate Verklebung erreicht und erfolgt durch das Aufschäumen der PUR-Hartschaumes selbsttätig.

Wie auch Trapezprofile werden Sandwichelemente in einem kontinuierlichen Verfahren hergestellt. Die bandverzinkten und beschichteten Deckschichten werden in Rollumformern profiliert und zur Weiterverarbeitung übereinander parallel geführt. Die Deckschicht der Elementaußenseite liegt dabei unten.

Wird PUR-Hartschaum als Kernmaterial verwendet, wird auf die unten liegende Deckschicht ein Gemisch aus Polyol und Isocyanat aufgesprüht. Es erfolgt eine Reaktion zu Polyurethan, das sich mit den Deckschichten verklebt. Mit Panzerbändern werden die Deckschichten auf Abstand gehalten und dem Schäumungsdruck entgegengewirkt. Ist der Kern ausreichend ausgehärtet, werden die Elemente mit ei-

ner fliegenden Säge abgelängt. Nach dem Abkühlen in einem Kühligel werden die Elemente gestapelt und verpackt.

Bei der Verwendung von Mineralwolle als Kernwerkstoff wird eine separate Kleberschicht auf das untere Deckblech aufgesprüht und der Mineralwollkern aufgesetzt. Eine weitere Kleberschicht wird auf den Mineralwollkern gesprüht und die obere Deckschicht schließt das Element ab. Um zu vermeiden, dass durchgängige Querstöße im Mineralwollkern entstehen, können Mineralwollplatten mit profilierter und / oder verklebter Fuge verwendet werden. Werden Mineralwolllamellen eingesetzt, sind diese in Längsrichtung versetzt anzuordnen. Die Fasern der Mineralwolle müssen immer senkrecht zu den Deckschichten angeordnet sein.

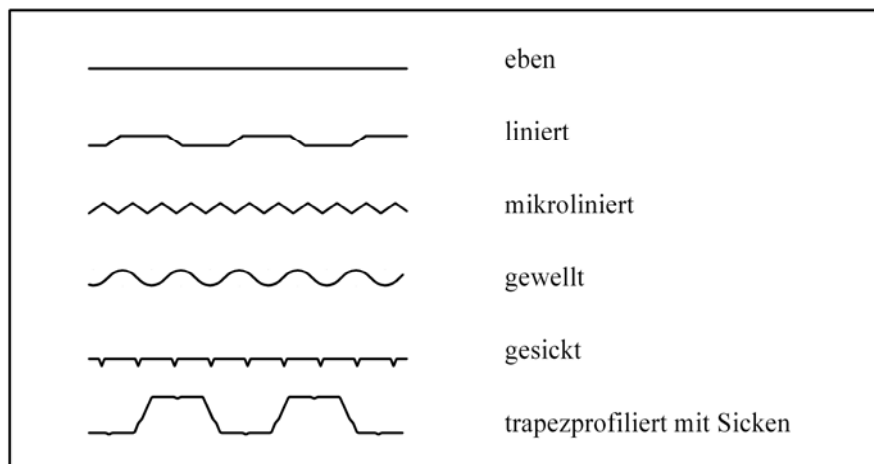


Abb. 5: Profilgeometrien der Deckschichten im Sandwichelement

Sandwichelemente besitzen gegenüber Trapezprofilen entscheidende Vorteile: Durch die verwendeten Kernmaterialien besitzt das Element eine sehr gute Wärmedämmung, die es zu einem idealen Fassadenelement macht. Die Elemente erlauben eine große gestalterische Freiheit durch eine Vielzahl von Variationen in Form und Farbe auf der Außen- und Innenseite. Die Dichtigkeit gegen Wasserdampf und Regen wird über eine optimierte Ausbildung der Längsfuge gewährleistet. Ihre Tragfähigkeit erhalten die Elemente über die schubelastische Verbindung beider Deckschichten durch den Kern. Durch die Integration aller notwendigen Eigenschaften eines Fassadenbauteils in einem Element und die witterungsunabhängige Vorfertigung kann die Bauzeit verkürzt und gleichzeitig die Qualität gesteigert werden.

3.2 Tragverhalten

Die Biegesteifigkeit eines Sandwichbauteils wird ebenso wie beim Trapezprofil über den Abstand der dehnsteifen Deckschichten erreicht. Besitzt das Element quasi-ebene Deckschichten, lässt sich die Biegesteifigkeit über einen Zweipunktquerschnitt ermitteln (Abb. 6). Die Verbindung der Deckschichten über den schubweichen Kern macht jedoch zusätzlich die Berücksichtigung der Schubsteifigkeit des Sandwichelementes erforderlich. Während in statisch bestimmten Systemen die Schubsteifigkeit nur Einfluss auf die Verformungen nimmt, treten in statisch unbestimmten Systemen auch Auswirkungen auf die Schnittgrößen auf.

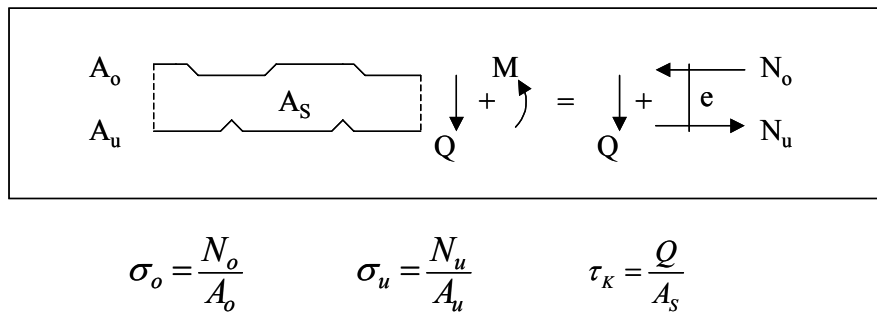


Abb. 6: Spannungen im Sandwichelement mit quasi-ebenen Deckschichten

Wird ein Sandwichelement mit ebenen oder quasi-ebenen Profilierungen im Einfeldsystem gestützt und vertikal belastet, entstehen in den Deckschichten Membranspannungen. In der oberen Deckschicht werden Druckspannungen, in der unteren Deckschicht Zugspannungen geweckt. Die Zugspannungen können so weit gesteigert werden, bis sie die Streckgrenze des verwendeten Stahls erreicht haben. Aufgrund der geringen Dicke versagt die obere, durch Druckspannungen beanspruchte Deckschicht unterhalb der Streckgrenze. Die elastisch auf dem Kern gebettete Deckschicht reagiert auf die Druckspannung durch ein senkrecht zur Belastungsrichtung gerichtetes Ausweichen (Abb.7). Der Vorgang entspricht einem Beulen mit kurzer Wellenlänge und wird Knittern genannt. Die Spannung, unter der Knittern in der Deckschicht auftritt, heißt Knitterspannung und ist abhängig von der Profilierung der Deckschicht, von der Schub- und Dehnsteifigkeit des Kernmaterials und von der Dehnsteifigkeit der Deckschicht. Die Knitterspannung wird üblicherweise in Versuchen bestimmt. Aufgrund der unterschiedlichen Profilierungen und Dicken der Deckschichten sind -wie auch für Trapezprofile- positive und negative Belastungen zu betrachten. Die Schubspannungen werden maßgeblich vom Kern abgetragen.

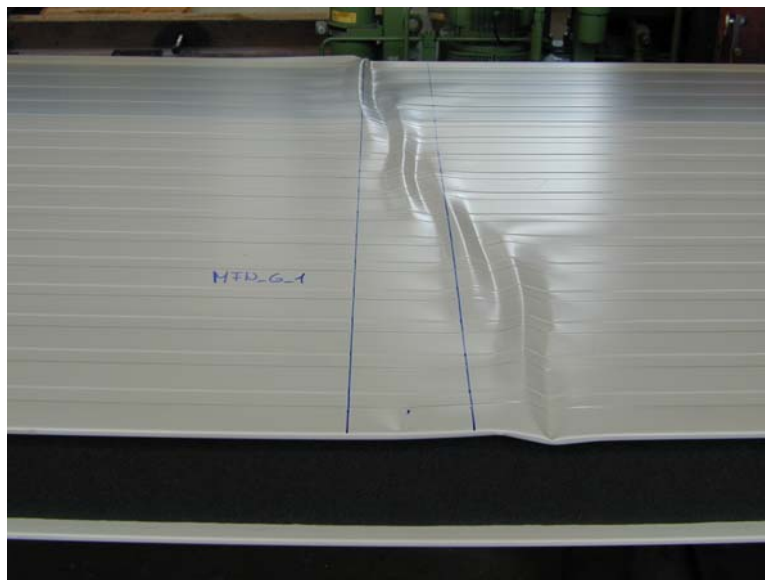
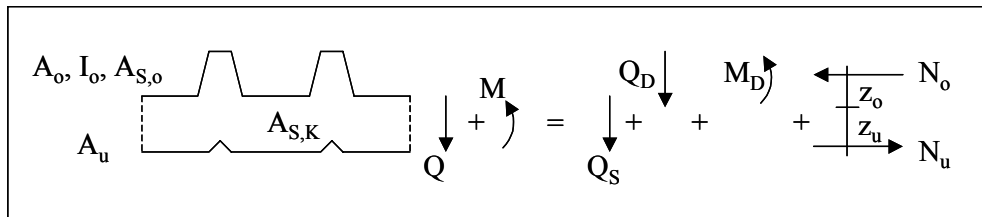


Abb. 7: Versagenszustand Knittern in der druckbeanspruchten Deckschicht

Werden Sandwichelemente mit profilierten Deckschichten verwendet, überlagert sich die Eigenbiegesteifigkeit mit den oben genannten Membranspannungszuständen (Abb. 8). Die profilierte Deckschicht erhält nun eigene Teilschnittkräfte und die Berechnung wird aufwendiger. Durch eine geschickte Profilierung und der damit verbundenen Eigenbiegesteifigkeit der Deckschicht kann die Knitterspannung die

Streckgrenze erreichen. Die Schubspannungen werden jetzt nicht nur von der Kernschicht sondern auch von den Profilstege der profilierten Deckschicht übertragen.



$$\sigma_o = \frac{N_o}{A_o} + \frac{M_D}{I_o} \cdot z_o \quad \sigma_u = \frac{N_u}{A_u} \quad \tau_K = \frac{Q}{A_{S,K}} \quad \tau_D = \frac{Q_D}{A_{S,o}}$$

Abb. 8: Spannungen im Sandwichelement mit profilierten Deckschichten

Für Sandwichelemente ist der Lastfall Temperatur von besonderer Bedeutung. Durch die guten Wärme-dämmeigenschaften des Kernwerkstoffes ergeben sich große Temperaturunterschiede zwischen der Innen- und der Außenseite des Bauteils. Im Einfeldträger führt dies zu großen Verdrehungen des Elementes an den Auflagern und zu großen Verformungen in Feldmitte.

Werden Sandwichelemente über lange Zeit in Dickenrichtung belastet, zeigt sich eine progressive Zunahme der Verformung. Dieses als Kriechen bekannte Phänomen wird durch das Kernmaterial ausgelöst. In Versuchen lässt sich für PUR-Hartschaum kein Endkriechmaß nachweisen, so dass selbst unter Eigengewicht das Kriechen nicht zum Stillstand kommt. Dachelemente, die durch Schnee und Eigengewicht belastet werden, müssen daher immer eine profilierte Deckschicht besitzen. Durch die innere statische Unbestimmtheit kriechen die Schubspannungen aus dem Kern in die Stege der Trapezprofile und das Kriechen des Gesamtelementes kommt zum Stillstand.



Abb. 9: Versagenszustand Knitern unter der Interaktion Biegung und Querkraft, Lasteinleitung durch die Schraubenköpfe zur Simulation des Lastfalls Windsog

Statisch unbestimmte Systeme (Durchlaufträger) beinhalten weitere Phänomene. Wie auch beim Trapezprofil lässt sich eine Interaktion zwischen Biegung und Querkraft am Mittelaufleger feststellen. Unter dem Lastfall Winddruck entstehen positive Auflagerkräfte am Mittelaufleger. Gleichzeitig wird über der Stütze die innere Deckschicht auf Druck beansprucht. Durch die entstehenden Vorverformungen durch Lagereindrückung geht das Stabilitätsproblem Knittern in ein Problem nach Theorie II. Ordnung über. Die Traglasten sind daher über dem Mittelaufleger geringer als im Feld.

Unter dem Lastfall Windsog entstehen abhebende Auflagerkräfte am Mittelaufleger, die nur durch die Dichtscheiben der Verbindungsmittel aufgenommen werden. Gleichzeitig wird über der Stütze die äußere Deckschicht auf Druck beansprucht. Die durch die Schraubenköpfe hervorgerufenen großen Vorverformungen reduzieren die Traglasten nun noch einmal gegenüber der Beanspruchung unter Winddruck. Je mehr Schrauben am Mittelaufleger eingesetzt werden, desto geringer fällt die zulässige Knitterspannung aus. In der Grenzbetrachtung handelt es sich um ein Linienlager mit geringer Breite und daher großen Lagereindrückungen. Gleichzeitig reduziert sich durch die Bohrungen das zur Verfügung stehende Material und die einwirkende Spannung steigt (Abb. 9).

Durch die oben schon angesprochene große Temperaturdifferenz kommt es nun im statisch unbestimmten System zu Schnittgrößen aus Zwangsbeanspruchungen. Gerade bei dunklen Deckschichtfarben können die Schnittgrößen aus Temperaturdifferenz mehr als doppelt so groß sein als aus der Einwirkung durch Wind. Der Lastfall Temperatur im Sommer ist mit dem Lastfall Windsog und der Lastfall Temperatur im Winter mit dem Lastfall Winddruck zu kombinieren.

Werden Dachelemente betrachtet, besitzt das Schubkriechen des Kernmaterials ebenfalls Einfluss auf die Schnittgrößen. Die Elemente werden schubweicher und es lagern sich Stützmomente ins Feld um.

3.3 Nachweisverfahren

Für Sandwichbauteile besteht anders als für Trapezprofile zur Zeit noch keine normative Regelung. Die europäische Vornorm prEN 14509 steht jedoch kurz vor der Einführung. Die Verwendbarkeit wird über das Ü-Zeichen in Verbindung mit einer bauaufsichtlichen Zulassung geregelt. Um Sandwichelemente nachzuweisen, werden anders als bei den Nachweisen der Trapezprofile, nicht Schnittgrößen, sondern Spannungen verglichen. Die Spannungen sind aus den unterschiedlichen Einwirkungen in den betreffenden Querschnittsteilen zu ermitteln. Die zulässigen Spannungen werden für jedes Produkt separat aus Versuchen gewonnen und in den bauaufsichtlichen Zulassungen niedergelegt. Die Anlage A dieser Zulassung regelt das Nachweisformat und die erforderlichen Sicherheiten.

Für Sandwichelemente im Einfeldsystem mit ebenen oder quasi-ebenen Deckschichten muss das Knittern der Deckschichten im Feld nachgewiesen werden. Da die Knitterspannungen von den Deckschichten abhängen, müssen positive und negative Belastungen untersucht werden. Die maßgeblich vom Kern abgetragenen Schubspannungen dürfen die zulässigen Schubspannungen β_{τ} nicht überschreiten. Über dem Endauflager kommt es zu Druckspannungen senkrecht zur Deckschicht, die vom Kern aufzunehmen sind. Dieser Nachweis wird oft über einzuhaltende Mindestauflagerbreiten geführt. Während Mineralwollelemente unter Druckbeanspruchungen senkrecht zu den Deckschichten brechen (Abb.10), zeigen Kerne aus PUR-Hartschaum nach einem annähernd linearen Anstieg ein ausgeprägtes Fließverhalten. Es werden daher für PUR-Hartschaum Druckfestigkeiten $\beta_{d,10\%}$ verwendet, die sich unter 10% Stauchung einstellen. Das Verbindungsmittel am Endauflager muss ausreichend bemessen sein, um die Dauerschwingbelastung aus dem täglichen Temperaturwechsel abtragen zu können.



Abb. 10: Versagen des Mineralwollkerns unter einer Druckbeanspruchung am Auflager

Werden Sandwichelemente mit profilierten Deckschichten betrachtet, muss zusätzlich die Schubspannung in den dünnen Trapezprofilstegen (für Dachelemente sogar unter Langzeiteinfluss) nachgewiesen werden.

Im Nachweis der Gebrauchstauglichkeit für Sandwichelemente im Einfeldsystem müssen nur die Verformungen betrachtet werden. Für Wand-Sandwichelemente sind nur die Verformungen aus Wind und Temperaturdifferenz nachzuweisen. Windlasten treten nur kurzzeitig auf und stellen daher keine Langzeitbelastung dar. Für Dachelemente führen Eigengewicht, Schnee und die Langzeitwirkung zu Verformungen.

Werden Sandwichelemente in statisch unbestimmten Systemen (Durchlaufträger) gelagert, beinhaltet der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit immer das Traglastverfahren. Ein Reststützmoment darf jedoch nach dem Knittern über der Stütze nicht in Rechnung gestellt werden. Es wird ein Gelenk angenommen und der Nachweis der Tragfähigkeit wird wie im Einfeldsystem geführt.

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit stellt -wie auch beim Trapezblech- die Vermeidung eines Knittergelenkes über der Stütze sicher. Es werden jetzt geringere Sicherheiten als im Grenzzustand der Tragfähigkeit erforderlich. Zusätzlich zu den oben aufgeführten Nachweisen ist die Knitterspannung beider Deckschichten über der Innenstütze und die Zwischenauflegerkraft zu untersuchen. Durch die Interaktion von Biegung und Querkraft über dem Zwischenaufleger werden die zulässigen Knitterspannungen stark reduziert. Gleichzeitig steigt dort die Beanspruchung durch den Lastfall Temperaturdifferenz stark an und führt zu einem frühzeitigen Versagen. Die zulässige Stützweite eines Sandwichelementes ist daher im statisch unbestimmten System wesentlich geringer als im Einfeldsystem.

4 ANWENDUNGEN

Wenn das Tragverhalten eines Elementes bekannt ist, lassen sich auch für Sonderfälle Berechnungsmodelle finden, die ohne vorgefasste, normative Nachweisformate eine Bemessen erlauben.

Werden Trapezprofile zur Aussteifung genutzt und als Schubfelder ausgebildet, so sind die Bemessungskonzepte in DIN 18807 normativ geregelt. Für Sandwichelemente fehlen diese Regelungen. Vom Tragverhalten her lassen sich jedoch Modelle finden, die auch das Sandwichelement nachweisbar machen.

Für Wand- und Dachelemente werden fast immer quasi-ebene Deckschichten für die Profilierung der Innenseite verwendet. Wird das Sandwichelement durch Schubkräfte in seiner Ebene belastet, wird die Belastung über die untere Deckschicht geleitet, ohne den Kern zu beanspruchen. Die Deckschichtscheibe lässt sich daher als Schubfeld ausbilden und für die auftretenden Schubflüsse bemessen. Die Scheibe muss, um als Schubfeld wirken zu können, umlaufend an die Unterkonstruktion angeschlossen werden. Wird die Verbindung mit Sandwichschrauben ausgeführt, lässt sie sich als Querkraftverbindung bemessen. Werden mehrere Elemente zu einem Schubfeld zusammengefasst, müssen die Längsstöße untereinander verschraubt werden.

Die Steifigkeit des Trapezprofils ist gegenüber der quasi-ebenen Deckschichtscheibe des Sandwichelementes wesentlich geringer. Die Ermittlung der Steifigkeit des Schubfeldes ist beim Sandwichelement maßgeblich von der Steifigkeit der Verbindungsmittel abhängig, während beim Trapezprofil maßgeblich die Profilverformung zu betrachten ist.

Trapezprofile können zur Stabilisierung der Pfetten gegen Biegedrillknicken herangezogen werden. Die Ansätze sind in DIN 18800, T. 2 normativ geregelt. Für Sandwichelemente hingegen existieren keine Regelungen. Aus den Ausführungen zum Tragverhalten lässt sich auch hier eine Aussage zum Lastabtrag finden. Wird die Pfette belastet, reagiert sie im Stabilitätsfall mit einem Ausweichen durch Verdrehung und seitlicher Verformung. Soll das Sandwichelement die Verdrehung behindern, muss sich der Flansch in das Sandwichelement eindrücken und Zugkräfte im Verbindungsmittel aktivieren. Sowohl die Eindrückung des Auflagers, wie auch die Eindrückung der Schraube in den Schaumkern erzeugen Imperfektionen, die die Knitterspannung am Mittelaufleger herabsetzen. Da die Verdrehung ständig wirkt, wird die Imperfektion durch das Langzeitverhalten des Kernquerschnittes weiter zunehmen. Ein Versagen des Elementes ist zu erwarten.

Ist das Tragverhalten bekannt, lassen sich auch in nicht geregelten Bereichen schlüssige Aussagen treffen. Ein Sandwichelement ist daher mit den bekannten Nachweisverfahren sehr wohl als Schubfeld auszubilden. Der Nachweis als Drehbettung kann aber ohne weitere Forschung nicht gelingen.

5 LITERATUR

5.1 Trapezprofile

Baehre Baehre R., „Zur Schubfeldwirkung und -bemessung von Kassettenkonstruktionen“, Stahlbau 56, S. 197 - 202, Ernst & Sohn, 1987

- Baehre/
Bucà/1986 Baehre R., Bucà J. „Die wirksame Breite des Zuggurtes von biegebeanspruchten Kassetten“, Stahlbau 55, S. 276 - 285, Ernst & Sohn, 1986
- Baehre/
Bucà/1989 Baehre R., Bucà J. „Ein Berechnungsverfahren zur Beurteilung der Begehrbarkeit von Trapezprofilen“, Stahlbau 58, S. 17 - 21, Ernst & Sohn, 1989
- Baehre/
Bucà/1993 Baehre R., Bucà J. „Der Einfluss der Schubsteifigkeit der Außenschale auf das Tragverhalten von zweischaligen Dünublech-Fassadenkonstruktionen“, Bauingenieur 68, S. 27 - 34, Springer Verlag, 1993
- Baehre/
Wolfram Baehre R., Wolfram R. „Zur Schubfeldberechnung von Trapezprofilen“, Stahlbau 55, S. 175 - 179, Ernst & Sohn, 1986
- Baehre/Huck Baehre R., Huck G. „Zur Berechnung der aufnehmbaren Normalkraft von Stahltrapezprofilen nach DIN 18 807 Teil 1 bis 3“, Stahlbau 59, S. 225 - 232, Ernst & Sohn, 1990
- DIN 18 807 DIN 18 807, „Trapezprofile im Hochbau“
- IFBS 5.04 „Öffnungen in Dächern aus Stahltrapezprofilen“, IFBS- Fachinformation 5.04 Statik, Herausgeber: IFBS e.V., Düsseldorf 2005.
- Lindner/1987-I Lindner J., „Stabilisierung von Trägern durch Trapezbleche“, Stahlbau 56, S. 9 - 15, Ernst & Sohn, 1987
- Lindner/1987-II Lindner J., „Stabilisierung von Trägern durch Trapezbleche - eine Klarstellung“, Stahlbau 56, S. 365 - 373, Ernst & Sohn, 1987
- Lindner/Gregul Lindner J., Gregul T, „Drehbettungswerte für Dachdeckungen mit untergelegter Wärmedämmung“, Stahlbau 58, S. 173 - 179, Ernst & Sohn, 1989
- Maaß & Al. Maaß G., Hünersen G., Fritzsche E., „Stahltrapezprofile - Berechnung und Konstruktion nach DIN 18800 und DIN 18807, Werner Verlag, 2000
- Schardt Schardt R., „Berechnungsgrundlagen für dünnwandige Bauteile“, Stahlbauhandbuch Band 1, S. 715 - 738, Stahlbau-Verlag, Köln 1982
- Schardt/Strehl Schardt R., Strehl C., „Theoretische Grundlagen für die Bestimmung der Schubsteifigkeit von Trapezblechscheiben - Vergleich mit anderen Berechnungsansätzen und Versuchsergebnissen“, Stahlbau 45, S. 97 - 108, Ernst & Sohn, 1976
- Schwarze Schwarze K., „Bemessung von Stahltrapezprofilen nach DIN 18 807 unter Beachtung der Anpassungsrichtlinie Stahlbau“, Bauingenieur 73, S. 347 - 356, Springer Verlag, 1998
- Schwarze/
Berner Schwarze K., Berner K., „Temperaturbedingte Zwängungskräfte in Verbindungen bei Konstruktionen mit Stahltrapezprofilen“, Stahlbau 57, S. 103 - 114, Ernst & Sohn, 1988
- Schwarze/Kech/
1990 Schwarze K., Kech J, „Bemessung von Stahltrapezprofilen nach DIN 18 807, Biege- und Normalkraftbeanspruchung“, Stahlbau 59, S. 257 - 267, Ernst & Sohn, 1990
- Schwarze/Kech/
1991 Schwarze K., Kech J, „Bemessung von Stahltrapezprofilen nach DIN 18 807, Schubfeldbeanspruchung“, Stahlbau 60, S. 65 - 76, Ernst & Sohn, 1991

Z-14.4-407 DIBt, „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen Nr.: Z-14.1-4, Zulassungsgegenstand: Verbindungselemente zur Verwendung bei Konstruktionen mit Kaltprofilen aus Stahlblech - insbesondere mit Stahlprofiltafeln“

5.2 Sandwichelemente

- Berner/2000 Berner K., „Sandwichbauteile mit optimaler Wirkung von Werkstoffpartnern, – Tragverhalten-, Nationale und Europäische Nachweisverfahren“, Stahlleichtbau-Symposium des IFBS, April 2000
- Berner/2006 Berner K., „Öffnungen in Sandwichbauteilen“, Tagung LeichtBauen, am IfSW der TU Darmstadt, März 2006.
- Berner/Raabe Berner K.; Raabe, O. „Bemessung von Sandwichbauteilen“, IFBS- Fachinformation 5.08 Statik, Herausgeber: IFBS e.V., Düsseldorf 2006.
- Böttcher/2004 Böttcher M., „Sandwich Panels with Openings“, Composite Construction in Steel and Concrete V, South Africa, Juli 2004
- Böttcher/2005 Böttcher M., „Wand-Sandwichelemente mit Öffnungen“, Dissertation an der TU Darmstadt, Heft 73, Veröffentlichung des IfSW, Darmstadt 2005.
- Böttcher/2006 Böttcher M., „Berechnungsverfahren für Wand-Sandwichelemente mit Öffnungen“, IFBS- Fachinformation 5.09 Statik, Herausgeber: IFBS e.V., Düsseldorf 2006.
- Buchholz Buchholz E., „Prüfung bautechnischer Unterlagen von Dacheindeckungen aus Sandwichbauteilen“, „Der Prüfenieur“, April 1999
- Burkhardt Burkhardt, S., „Zeitabhängiges Verhalten von Sandwichelementen mit Metaldeckschichten und Stützkernen aus Polyurethanhartschaumstoffen“, Dissertation TH Karlsruhe, 1988
- Courage/Tomà Courage W. M. G., Tomà A. W., „Structural detailing of openings in sandwich panels“, TNO Building and Construction Research, Official Publication of the European Communities, 1998
- Davies Davies J. M. (Editor), „Lightweight Sandwich Construction“, Blackwell Science Ltd., 2001
- ECCS-Report ECCS TWG 7.9 and CIB W 56, „European recommendations for sandwich panels“, CIB / ECCS Report - Publication 257, Oktober 2000
- Ewert & Al. Ewert E., Banke F., Schulz U., Wolters M., „Untersuchungen zum Knittern von Sandwichelementen mit ebenen und gesickten Deckschichten“, Stahlbau 70, Heft 7, Ernst & Sohn, 2001
- Jungblut/
Berner Jungblut O., Berner K., „Verbund- und Sandwichtragwerke“, Springer-Verlag, 1986
- Kech Kech J., „Druckbeanspruchbarkeit der beigeweichen Deckschicht eines Sandwichelements“, Stahlbau 60, Heft 7, Ernst & Sohn, 1991

- Klein Klein B., „Balken- und Plattenstreifen in Sandwichbauweise“, Stahlbau 55, Heft 7, Ernst & Sohn, 1986
- Koschade Koschade R. „Die Sandwichbauweise“, Ernst & Sohn, 2000
- Ladwein Ladwein T., „Zur Schubfeldwirkung von Sandwichelementen“, Stahlbau 62, Heft 11 und Heft 12, Ernst & Sohn, 1993
- Lange/
Böttcher Lange J., Böttcher M., „Tragverhalten und Bemessung von Sandwichelementen und Trapezprofilen aus Stahl“, Dokumentation 588 Dach- und Fassadenelemente aus Stahl - Erfolgreich Planen und Konstruieren, Herausgeber: SIZ, Düsseldorf 2005
- Langlie Langlie, C., „Berechnung von Sandwichelementen mit ebenen metallischen Deckschichten“, Stahlbau 54, Heft 10, Ernst & Sohn, 1985
- Linke Linke K.-P., „Zum Tragverhalten von Profilsandwichplatten mit Stahldeckschichten und einem Polyurethan-Hartschaum-Kern bei kurz- und langzeitiger Belastung“, Dissertation an der TH Darmstadt, 1978
- Meyer Meyer J., „Die analytische Bestimmung der Knitterspannung einachsiger gespannter Sandwichplatten“, Dissertation an der TU Darmstadt, Shaker Verlag, 1999
- Möller & Al. Möller R., Pöter H., Schwarze K. „Planen und Bauen mit Trapezprofilen und Sandwichelementen, Band 1“. Verlag, Ernst & Sohn, 2004
- PrEN 14509 PrEN 14509:2006, „Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten - Werkmäßig hergestellte Produkte - Spezifikationen, CEN/TC 128, 2006-02
- Rosman Rosman R., „Beitrag zur Berechnung von Verbundbalken und einachsiger gespannten Verbundplatten“, Stahlbau 65, Heft 4, Ernst & Sohn, 1996
- Schulz Schulz U., „Zum Zwischenstützbereich von Sandwichelementen bei Mehrfeldträgersystemen“, Stahlbau 62, Heft 10, Ernst & Sohn, 1993
- Stamm Stamm K., „Sandwichelemente mit metallischen Deckschichten als Wandbauplatten und Dachbautafeln im Bauwesen“, Stahlbau 53, Heft 5 und 8, Ernst & Sohn, 1984
- Stamm/Witte Stamm K., Witte H., „Sandwichkonstruktionen - Berechnung, Fertigung, Ausführung“, Springer-Verlag, 1974
- Wolters & Al. Wolters M., Banke F., Ewert E., Schulz U., „Untersuchungen zum Knittern von imperfekten Sandwichelementen“, Stahlbau 71, Heft 4, Ernst & Sohn, 2002
- Z-10.4-XXX DIBt, „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen Nr.: Z-10.4-XXX, Zulassungsgegenstand: Wand und Dach Sandwichelemente“, Je nach Antragsteller unterschiedliche Nummern XXX und Geltungsdauern.
- Z-14.4-407 DIBt, „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen Nr.: Z-14.4-407, Zulassungsgegenstand: Verbindungselemente zur Verwendung bei Konstruktionen mit Sandwichbauteilen“

Als Fußnote auf die erste Seite:

¹ Dr.-Ing. Marc Böttcher, Geschäftsführer der Ing.-GbR für Statik und Konstruktion,
INGENIEURBÜRO BÖTTCHER, Ingenieur@BueroBoettcher.de