



Wolfgang Radner, BSc

Öffnungen im Glas-Sandwich-Paneel (GSP)

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas-Peter Fries
Institut für Baustatik

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters
Engelsmann Peters GmbH Beratende Ingenieure

Dr.-Ing. Martien Teich
iconic skin GmbH

Graz, November 2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit zum Thema Öffnungen bei Glas-Sandwich-Paneelen bildet den Abschluss meines Masterstudiums Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau an der Technischen Universität Graz. Die Arbeit wurde in Kooperation mit iconic skin, einer Tochtergesellschaft der seele Unternehmensgruppe, in Gersthofen und dem Ingenieurbüro Engelsmann Peters in Graz durchgeführt. Die Betreuung an der Technischen Universität Graz erfolgte durch das Institut für Baustatik.

Ich möchte dem Unternehmen iconic skin für diese großartige Chance meinen Dank aussprechen. Besonders bei Dr.-Ing. Martien Teich will ich mich für seine hervorragende Betreuung bedanken. Daneben gilt mein Dank Jürgen Paule vom Versuchslabor, sowie den Kollegen aus dem technischen Büro, für die großartige Unterstützung und Zusammenarbeit.

Auch Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters möchte ich für seine tolle Betreuung und die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes beim Ingenieurbüro Engelsmann Peters meine Dankbarkeit ausdrücken. Ebenso den Kollegen von Engelsmann Peters für Ihre Unterstützung und das herzliche Arbeitsklima. Mein großer Dank gebührt nicht weniger Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas-Peter Fries vom Institut für Baustatik für seine Betreuung seitens der Technischen Universität Graz.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Partnerin, meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung während dieser Masterarbeit, vor allem aber während meiner gesamten Studienzeit, herzlichst bedanken.

Kurzfassung

Im Fokus dieser Masterarbeit stehen Öffnungen in Glas-Sandwich-Paneelen, die keiner zusätzlichen Unterkonstruktion bedürfen. Beim Glas-Sandwich-Paneel (abgekürzt GSP) handelt es sich um ein Komposit aus einem Industriepaneel mit dünnen, metallischen Deckschichten und weichem Kern, sowie einer darauf verklebten, opaken Glasscheibe. Das Wandpaneel wurde vom Unternehmen *iconic skin* für Fassaden entwickelt. Obwohl Öffnungen für Türen und Fenster in Gebäudehüllen aus Sandwichpaneelen für die Nutzung meist erforderlich sind, wird deren Bemessung normativ nicht geregelt. Meist werden Öffnungen deshalb durch aufwendige und sichtbare Unterkonstruktionen verstärkt, die Lasten direkt in das Primärtragwerk abtragen.

Unter Vernachlässigung der statisch kaum wirksamen Glasscheibe, zeigt diese Arbeit zwei Öffnungsvarianten, die ohne Unterkonstruktion auskommen. Nach der Einführung in die Sandwich-Technologie werden so genannte Öffnungselemente betrachtet, bei denen paneelbreite Fensterrahmen in vertikal verlegte Paneele integriert werden. Im Fokus stehen Entwicklung und experimentelle Untersuchung des biegesteifen Anschlusses zwischen Sandwichpaneel und Fensterrahmen. Durch Einsatz von torsionssteifen Verbindungsbauteilen können ähnliche hohe Traglasten wie bei vollen Paneelen erreicht werden, wenn auch bei deutlich geringerer Biegesteifigkeit. Um eine statische Bemessung zu ermöglichen, werden zudem ein Stabwerkmodell, sowie ein detailliertes 3D-Modell entwickelt. Die Modelle werden anhand der Verformungsmessungen bei den Traglastversuchen kalibriert.

Bei der zweiten Öffnungsvariante werden paneelgroße Fensterbänder bei Fassaden aus horizontal verlegten Glas-Sandwich-Paneelen numerisch untersucht. Erst wird die Tragwirkung quer zur Fassadenebene, unter Berücksichtigung von Kopplungseffekten beider Bauteile in der Längsfuge, betrachtet. Für die Ermittlung auftretender Lastumlagerungen wird eine Berechnungsformel entwickelt und mit dem Stabwerkmodell des Elementverbandes verifiziert. Damit können Sandwichpaneele einfach zum Lastabtrag von Fensterbandlasten herangezogen und die Fensterbänder mit schlanken Profilen ohne zusätzliche Unterkonstruktion ausgeführt werden. Auch ein Abtrag der Fensterband-Eigenlasten, durch ein darunter positioniertes Paneel, wird analysiert. Für die kritischen Details, wie Lasteinleitung und Befestigung am Primärtragwerk, werden Bemessungsgrundlagen anhand aktueller Forschungsergebnisse aufbereitet. Zum Abschluss wird ein 3D-Modell entwickelt, das eine gemeinsame Schnittgrößenermittlung bei Belastung quer- und parallel zur Fassadenebene erlaubt.

Abstract

This Master's thesis is focused on openings in glass sandwich panels without an additional substructure. A glass sandwich panel is a composite product consisting of an opaque glass ply bonded to a conventional sandwich panel with flat metal faces and a soft core layer. The system was developed by the company iconic skin for wall panel applications. Although panel openings for windows or entrances are usually required within a building, their design in sandwich panels is not regulated in manuals or technical approvals at all. That's why most openings are reinforced by an expensive and visible substructure which transfers loads directly to the main bearing structure.

The thesis identifies two possibilities for openings without an additional substructure. For simplification, the glass ply is neglected, since it has a low influence on the load bearing capacity. First, so-called opening panels with integrated, panel-wide window frames are examined. The development and experimental testing of rigid joints between the sandwich panel and the window frame are examined first. By using torsionally-stiff members, a load bearing capacity is achieved which is similar to full panels, although the bending stiffness is significantly lower. Furthermore, a simple truss model and a three-dimensional model are developed to enable static design. The models are being calibrated using the results of the deflection measurements during the bearing capacity tests.

The second application of openings which are examined in this thesis are window bands in full panel scale. Full panel window bands are implemented in facades consisting of horizontally arranged glass sandwich panels. First, the load bearing characteristic for loads perpendicular to the façade plane is examined, and the interaction of the sandwich panel and the window band in their common longitudinal joint is considered. To determine the load transfer in the joint, a formula is developed and verified by a common truss model. The formula gives structural engineers a simple approach to activate the bearing capacity of sandwich panels for additional loads from window bands. So the simple formula makes it easy to design slender window bands without additional substructure. Additionally, the in-plane load transfer of the window band dead load to the underlying sandwich panel is being analyzed, and approaches to design the critical details are shown. Finally, a static three-dimensional model is developed to allow a collective determination of internal forces caused by in-plane and perpendicular loads.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Einführung in die Sandwichbauweise	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Materialkennwerte	5
2.3	Tragverhalten und theoretische Grundlagen der Sandwichbauweise	6
2.3.1	Tragverhalten bei quasi-ebenen Deckschichten	6
2.3.2	Tragverhalten bei profilierten Deckschichten	8
2.3.3	Versagensformen	9
2.4	Beanspruchungen	12
2.4.1	Tempaturunterschiede der inneren und äußeren Deckschicht	12
2.4.2	Kriechen des Kernwerkstoffes	12
2.5	Baupraktische Bemessung	13
2.5.1	Ermittlung der Beanspruchungseinwirkung	13
2.5.2	Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)	14
2.5.3	Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)	14
2.5.4	Nachweis der Befestigung	15
3	Öffnungen in Sandwichelementen	17
3.1	Kleine Öffnungen mit Nachweis des Restquerschnitts	18
3.2	Große Öffnungen mit Lastumlagerungen auf benachbarte Paneele	19
3.2.1	Spannungsverteilung bei exzentrischer Belastung	23
3.2.2	Tragfähigkeit und Steifigkeit der Längsfuge	24
3.3	Verstärkungen des Paneels im Öffnungsbereich	24
4	Quersteifigkeit von Sandwichpaneelen mit mikro-profilieren Deckschichten	28
4.1	Allgemein	28
4.2	Ermittlung des Ersatz-E-Moduls für die Querrichtung	29
4.3	Einfluss der Materialkennwerte auf die Querdehnsteifigkeit der Deckbleche	30
4.4	Ermittlung der Quersteifigkeitsparameter für das Brucha FP-P Paneel	31
5	Öffnungselemente mit integriertem Fensterrahmen	33
5.1	Beschreibung des Öffnungselementes	33
5.1.1	Glas-Sandwich-Paneel (GSP)	34
5.1.2	Tragender Fensterrahmen	35
5.1.3	Einschubling	37
5.1.4	Einschublings-Typen	38
5.2	Traglastversuche am Öffnungselement (GSP-Rahmentest)	44
5.2.1	Probekörper	44
5.2.2	Versuchsaufbau	46
5.2.3	Ergebnisse und Auswertung	49

5.3	Statische Modellierung des Öffnungselementes	59
5.3.1	Stabwerkmodell des Öffnungselementes	59
5.3.2	3D-Modell des Öffnungselementes	65
5.4	Vorschlag Bemessungskonzept	77
5.4.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)	77
5.4.2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)	78
5.5	Öffnungselement - Erkenntnisse und Ausblick	80
6	Horizontal verlegte Glas-Sandwich-Paneele mit Fensterbändern	82
6.1	Systembeschreibung	82
6.2	Statische Modellierung	84
6.3	Lastabtragung quer zur Fassadenebene	85
6.3.1	Berechnungsformel für die Momentenumlagerung	86
6.3.2	Stabwerkmodell des Elementverbandes	89
6.4	Lastabtragung parallel zur Fassadenebene	92
6.4.1	Lasteinleitung in das Sandwichpaneel	93
6.4.2	Lastabtrag im Sandwichpaneel	96
6.4.3	Lasteinleitung vom Sandwichpaneel in die Unterkonstruktion	98
6.5	3D-Modell des Systems GSP mit Fensterband	101
6.5.1	Modellbeschreibung	101
6.5.2	Lastaufbringung im 3D-Modell GSP mit Fensterband	105
6.6	Vergleich der Berechnungsmodelle	106
6.7	Vorschlag Bemessungskonzept	106
6.7.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit	107
6.7.2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	108
6.8	GSP mit Fensterbändern - Erkenntnisse und Ausblick	109
	Anhang	114

Abbildungsverzeichnis

1.1	GSP-Fassade eines Lebensmittelhändlers in Kufstein ©iconic skin	1
1.2	Integrierter Fensterrahmen bei GSP-Wandelementen ©iconic skin	2
1.3	Fensterbänder bei horizontal verlegten GSP ©iconic skin	2
2.1	Wandpaneel Roma Typ M [13]	3
2.2	Nut-Feder-Längsfuge mit verdeckter Befestigung beim Brucha FP-P Wandpaneel [12]	4
2.3	1. Platz beim Architekturpreis 2014 des SP-Herstellers Romakowski [9] . . .	4
2.4	Vergleich Tragfähigkeit ohne und mit Verbund [27]	6
2.5	Starrer Verbund (links) und elastischer Verbund (rechts) [15]	7
2.6	Spannungsverteilung bei ebenen oder leicht profilierten Deckschichten [5] . .	8
2.7	Dachpaneel Roma Typ D mit profilierten Deckschichten [4]	9
2.8	Versagensarten von Sandwichelementen [27]	9
2.9	Knitterfalte beim 6-Punkt-Biegeversuch	10
2.10	Knickstabähnliches Beulen des elastisch gebetteten Balkens	10
2.11	Definition Elementquerschnitt für ebene, leicht profilierte oder mikroprofiliertere Deckschichten [5]	13
2.12	Direkte Befestigung (links) und indirekte Befestigung (rechts)[10, 11] . . .	15
3.1	Öffnungsvarianten [17]	17
3.2	Erforderliche Unterkonstruktion für Öffnungen [17]	18
3.3	Sandwichelement mit kleiner Öffnung [17]	18
3.4	Lastumlagerung als Linienlast in der Längsfuge [17]	20
3.5	Isometrische Darstellung des Elementverbandes von Böttcher [17]	20
3.6	Sandwichpaneel mit integriertem, tragendem Rahmen [17]	25
3.7	Verstärkung der Längsfuge [17]	26
3.8	Querschnitt eines Adapterprofils von Thyssen Krupp Steel Europe [29] . . .	26
4.1	Mikro-Profilierung beim Brucha FP-P 100 Paneel (Profil 1 gemäß [1]) . . .	28
4.2	Deckblech in Querrichtung [16]	29
4.3	Einfluss der Querdehnzahl und des Schubmoduls auf den Ersatz-E-Modul in Querrichtung	31
4.4	Modellierung Deckblech in Querrichtung beim FP-P 100	32
5.1	Integrierte, tragende Fensterrahmen beim vertikal verlegten GSP	33
5.2	Öffnungselement in der Explosionsdarstellung (oben) und zusammengebaut (unten)	34
5.3	Querschnitt des Glas-Sandwich-Paneels	34
5.4	Fensterrahmen beim Öffnungselement	36
5.5	Profilquerschnitte des Fensterrahmens: Pfostenprofil 1 (links), Pfostenprofil 2 (mittig), Riegel (rechts)	36
5.6	Einschublingstypen	37
5.7	Einschubling-Seitenteil (links) und Anschluss am Fensterrahmen (rechts) . .	37

5.8	Schnittkräfte im Anschlussbereich Einschubling zu Fensterrahmen	38
5.9	Anschluss Einschubling - Deckblech beim Typ 1 (Schnitt im Bereich der Laschen - schematisch)	39
5.10	Isometrische Darstellung von Einschubling Typ 1	39
5.11	Konstruktionszeichnung von Einschubling Typ 1	39
5.12	Isometrische Darstellung von Einschubling Typ 2	40
5.13	Konstruktionszeichnung von Einschubling Typ 2	40
5.14	Anschluss Einschubling - Deckblech beim Typ 2 (Schnitt - schematisch) . .	41
5.15	Isometrische Darstellung von Einschubling Typ 3	41
5.16	Konstruktionszeichnung von Einschubling Typ 3	42
5.17	Isometrische Darstellung von Einschubling Typ 4	42
5.18	Konstruktionszeichnung von Einschubling Typ 4	43
5.19	GSP-Rahmentest	44
5.20	Herstellen der Einschubling-Negativformen im Paneel bei Typ 1 (links) bzw. vollendete Negativformen bei Typ 2-4 (rechts)	45
5.21	Zusammenbau von Sandwichpaneel und Fensterrahmen bei Probekörper 4000-13 (Einschubling Typ 4)	46
5.22	Lasteinleitung und Schnittkraftverteilung beim 6-Punkt-Biegeversuch . . .	46
5.23	Übersicht Versuchsaufbau beim GSP-Rahmentest	47
5.24	Lastverteiler-Konstruktion beim GSP-Rahmentest	47
5.25	Lastverteilerplatte im Auflagerbereich beim GSP-Rahmentest	48
5.26	Übersicht der Wegaufnehmer (links) und Nahaufnahme von Wegaufnehmer WA-3 (rechts) beim GSP-Rahmentest	48
5.27	Übersicht der Dehnmessstreifen (links) und Nahaufnahme von DMS-5 beim Probekörper 4000-21 (Einschubling Typ 3)	49
5.28	Lokales Versagen des Probekörpers 4000-2 (Einschubling Typ 1)	50
5.29	Globales Versagen des Probekörpers 4000-2 (Einschubling Typ 1) mit Sprengwerkbildung (schematisch)	51
5.30	Versagensbild bei den Probekörpern 4000-11 mit Einschubling Typ 2 (links) und 4000-12 mit Einschubling Typ 3 (rechts)	51
5.31	Querschnitt bei Probekörper 4000-12 (Einschubling Typ 3)	52
5.32	Versagensbild beim Probekörper 4000-13 (Einschubling Typ 4) an der Oberseite (links) und Unterseite (rechts)	52
5.34	Last-Verformungskurven für Wegaufnehmer WA-1 (Öffnungsrand)	54
5.35	Last-Verformungskurven für Wegaufnehmer WA-2 (Feldmitte)	54
5.36	Durchsenkungen bei Pfostenprofil 1 für $F = 600$ kg	55
5.37	Spannungs-Last-Kurven für σ_X in Bauteillängsrichtung(Probekörper 4021, Einschubling Typ 3)	56
5.38	Position der ausgewerteten Dehnmessstreifen beim GSP-Rahmentest	56
5.39	Spannungs-Last-Kurven für σ_Y in Bauteilquerrichtung (Probekörper 4021, Einschubling Typ 3)	57
5.40	Hauptdruckspannungen σ_2 für $F = 400$ bis 1600 kg (PK 4000-21, Einschubling Typ 3)	58
5.41	Stabwerkmodell des Öffnungselementes	59
5.42	Verformungsfigur des Öffnungselementes gesamt (links) und durch die Drehfeder alleine (rechts)	60
5.43	Schnittkraftverteilung beim GSP-Rahmentest	62
5.44	Verlauf der Einschubling-Drehfedersteifigkeit bei veränderlicher Belastung .	64

5.45	Einfluss der Drehfedersteifigkeit auf die Gesamtdurchsenkung in Feldmitte beim Öffnungselement	64
5.46	Übersicht 3D-Modell Öffnungselement mit Einschubling Typ 3	65
5.47	Modellierung Sandwich-Paneel beim 3D-Modell Öffnungselement	66
5.48	Modellierung Rahmen beim 3D-Modell Öffnungselement	67
5.49	Modellierung Einschubling Typ 2 beim 3D-Modell Öffnungselement	68
5.50	Modellierung Nietverbindung (links) und Kontaktpressung (rechts) beim 3D-Modell Öffnungselement	68
5.51	Modellierung Schraubverbindung Rahmen-Einschubling beim 3D-Modell Öffnungselement	69
5.52	Auflagerungsbedingungen Öffnungselemente beim 3D-Modell Öffnungselement	70
5.53	FE-Netz im Anschlussbereich beim 3D-Modell Öffnungselement	71
5.54	Belastung gemäß 6-Punkt-Biegeversuch beim 3D-Modell Öffnungselement .	71
5.55	Lastaufbringung bei Winddruck beim 3D-Modell Öffnungselement	72
5.56	Lastaufbringung bei Temperaturbeanspruchung beim 3D-Modell Öffnungselement	72
5.57	Lasteinleitung in die Nietverbindung [interner Versuch: iconic skin GmbH] .	73
5.58	Durchsenkungen in Abhängigkeit der Federsteifigkeit von Nieten (k_N) und Schrauben (k_S) - Einschubling Typ 3	74
5.59	Durchsenkungen in Abhängigkeit der Federsteifigkeit von Nieten (k_N) und Schrauben (k_S) - Einschubling Typ 4	74
5.60	Vergleich von σ_2 im 3D-Modell und beim GSP-Rahmentest für $F = 300$ bis 1200 kg	76
5.61	Alternative Senkkopfschraube (Flankenwinkel 60°)	81
6.1	Ansicht und Schnitt einer GSP-Fassade mit Fensterbändern ©iconic skin .	82
6.2	Ansicht Fensterband mit Adapterprofilen	83
6.3	Schnitt 1-1: Anschlussbereich von GSP und Fensterband	83
6.4	Statisches System Sandwichpaneel-Adapterprofil mit Belastung	84
6.5	Statisches System Sandwichpaneel-Adapterprofil mit Belastung quer zur Fassadenebene	86
6.6	Nomogramm zur Bestimmung des Lasterhöhungsfaktors k_σ (für Kernschicht-Schubmodul $G_C = 3 \text{ N/mm}^2$) [17]	87
6.7	Elementverband für das System Sandwichpaneel-Adapterprofil	89
6.8	Umlagerungsmoment in Feldmitte beim System Sandwichpaneel-Adapterprofil in Abhängigkeit der Adapterprofil-Steifigkeit; Vergleich Elementverband und analytische Lösung für Paneeltyp FP-P 140 ($D = 140 \text{ mm}$), Spannweite $L = 4.5 \text{ m}$, Belastung $q = 1.0 \text{ kN/m}^2$	92
6.9	Statisches System Sandwichpaneel-Adapterprofil bei Belastung in Fassadenebene	93
6.10	Lasteinleitung der Fensterband-Eigenlasten in das Sandwichpaneel	94
6.11	Versagen im Lasteinleitungsbereich durch Knicken des freien Deckblechendes [19]	94
6.12	Sandwichpaneel bei Belastung in Fassadenebene mit statischem Ersatzsystem	97
6.13	Verdeckte, direkte Befestigung beim GSP mit Fensterband	98
6.14	Mechanisches Modell für direkte Befestigung [19]	99
6.15	Übersicht 3D-Modell des Systems GSP-Fensterband	101
6.16	Modellierung Sandwich-Paneel beim 3D-Modell GSP-Fensterband	102
6.17	Modellierung Adapterprofil beim 3D-Modell GSP-Fensterband	103

6.18 Modellierung Kopplung in z-Richtung (quer zum Paneel, linkes Teilbild) und y-Richtung (parallel zum Paneel, rechtes Teilbild) beim 3D-Modell GSP-Fensterband	103
6.19 Modellierung Lagerung beim 3D-Modell GSP-Fensterband	104
6.20 Lastaufbringung Windlasten beim 3D-Modell GSP-Fensterband	105
6.21 Lastaufbringung Eigenlasten beim 3D-Modell GSP-Fensterband	105

Tabellenverzeichnis

2.1	Typische Materialkennwerte von Sandwichpaneelen[27]	5
2.2	Kennwerte von Brucha PUR- und Pflaum MW-Paneelen [1], [2]	5
4.1	Eingangswerte Parameterstudie Quersteifigkeit	30
4.2	Schubmoduln für Sandwichpaneel beim Brucha FP-P Paneel	32
4.3	Ersatz-E-Moduln beim Brucha FP-P Paneel	32
5.1	Querschnitts- und Materialkennwerte des Brucha FP-P 100 Panels	35
5.2	Querschnittswerte der Rahmen-Pfosten-Profile	36
5.3	Übersicht Probekörper beim GSP-Rahmentest	44
5.4	Übersicht der Ergebnisse des GSP-Rahmentests	50
5.5	Übersicht Hauptspanungen beim GSP-Rahmentest (PK 4021, Einschubling Typ 3)	57
5.6	Steifigkeitswerte des Öffnungselementes beim Stabwerkmodell	63
5.7	Drehfedersteifigkeiten der Probekörper für $F = 6$ kN beim GSP-Rahmentest	63
5.8	Maßgebende Kennwerte FP-P Paneel im 3D-Modell Öffnungselement	66
5.9	Maßgebende Kennwerte Pfostenprofile im 3D-Modell Öffnungselement . . .	67
5.10	Maßgebende Kennwerte Einschubling Typ 2 im 3D-Modell Öffnungselement	68
5.11	Vergleich der Durchsenkungen von GSP-Rahmentest und 3D-Modell ohne Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel ($F = 6$ kN)	72
5.12	Kombinierte Federsteifigkeiten von Niete (k_N) und Schraube (k_S) mit zuge- höriger Verformung am 3D-Modell	75
6.1	Material- und Querschnittswerte für Parameterstudie am Elementverband .	91
6.2	Maßgebende Kennwerte Brucha FP-P 140 Paneel für Knickspannung im Lasteinleitungsbereich	96
6.3	Querschnittswerte für Parameterstudie Schraubverbindungs-Steifigkeit . . .	100
6.4	Material- und Querschnittswerte beim 3D-Modell GSP-Fensterband	102
6.5	Ergebnisvergleich Berechnungsformel, Elementverband und 3D-Modell beim System GSP-Fensterband ($q = 1$ kN/m ² , $L = 4.4$ m)	106

Symbole und Abkürzungen

In der Literatur finden sich für Sandwichbauteile unterschiedliche Nomenklaturen und Abkürzungen. In dieser Arbeit werden vorwiegend Bezeichnungen aus DIN EN 14509 [5] und den Preliminary European Recommendations for the Design of Sandwichpanels with Openings [17] verwendet.

Symbole

A	Querschnittsfläche der Kernschicht
B	Elementbreite
BS	Biegesteifigkeit des Sandwichquerschnittes
D	Gesamthöhe des Sandwichelementes
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft, Last, Auflagerreaktion
G	Schubmodul
I	Trägheitsmoment
L	Stützweite, Abstand
M	Biegemoment
N	Normalkraft
S	Schubsteifigkeit
T	Temperatur
Q	Querkraft
b	Breite der Öffnung
c	Federkonstante
e	Abstand der Deckschicht-Schwerpunkte
d	Höhe eine Deckschichtprofiles bzw. Sickentiefe
f	Festigkeit, Streckgrenze
k	Parameter, Korrekturfaktor, Bettungsziffer, Federsteifigkeit
m	Masse
q	Streckenlast
t	Dicke der Deckschicht
w	Durchsenkung, Querverformung
x,y,z	Koordinatenrichtungen
α	Wärmeausdehnungskoeffizient
β	Parameter
γ	Schubwinkel
ν	Querdehnzahl
ρ	Dichte
σ	Normalspannung
τ	Schubspannung
φ	Kriechzahl

Indizes

C	Kernschicht
F	Deckschicht
J	Längsfuge (von Englisch: joint)
T	Torsion
W	Knitter- (von Englisch: wrinkling)
c	Druck
k	charakteristisch
o	Öffnung
t	Zug
v	Schub
y	Fließgrenze (von Englisch: yield)
1	äußere Deckschicht, Oberseite
2	äußere Deckschicht, Unterseite

Abkürzungen

abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
DMS	Dehnmessstreifen
FEM	Finite Elemente Methode
GSP	Glas-Sandwich-Paneel
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
MW	Mineralwolle
P	Position
PK	Probekörper
PUR	Polyurethan
WA	Wegaufnehmer

1 Einleitung

Seit Jahrzehnten besetzen industriell gefertigte Sandwichpaneele aus dünnen, metallischen Deckschichten und weichem Kern eine wichtige Rolle in der Fassadengestaltung, vor allem im Industriebau. Sie ermöglichen eine geschlossene, dichte und wärmegeämmte Gebäudehülle. Durch den steifen Verbund der einzelnen Sandwichschichten haben die Paneele überdies eine sehr hohe Tragfähigkeit und können große Stützweiten überspannen. Aufwendig gestaltet sich jedoch auch heute noch die Ausführung von Öffnungen in der Gebäudehülle, wie z.B. Türen oder Fenster. Normativ nicht geregelt, wird dafür meist eine extra Unterkonstruktion aus Riegeln und Pfosten im Öffnungsbereich verbaut. Diese stützt die geschwächten Sandwichpaneele und trägt Lasten, welche auf die Öffnung einwirken, direkt in die Unterkonstruktion ab.

Eine Weiterentwicklung der konventionellen Sandwichpaneele stellt das Glas-Sandwich-Paneel des Herstellers iconic skin in Gersthofen bei Augsburg dar, das folgend abgekürzt als GSP bezeichnet wird. Bei diesem Produkt wird ein konventionelles Sandwichpaneel durch Aufkleben einer opaken, individuell bedruckbaren Glasscheibe veredelt. Damit werden die Vorteile der bewährten, standardisierten Sandwichbauweise mit der ästhetisch hochwertigen Oberfläche von Glas kombiniert. In Abb. 1.1 ist eine GSP-Fassade mit horizontal verlegten Elementen abgebildet.



Abb. 1.1: GSP-Fassade eines Lebensmittelhändlers in Kufstein ©iconic skin

Die Motivation dieser Arbeit besteht darin, die Möglichkeiten zur Ausführung von Öffnungen in modernen GSP-Fassaden ohne Notwendigkeit einer zusätzlichen Unterkonstruktion zu forcieren. Dies erfolgt an zwei konkreten Anwendungen. Einerseits werden Fensterrahmen in voller Elementbreite in Wandpaneele integriert, wie dies in Abb. 1.2 dargestellt ist. Dazu wird der Fensterrahmen biegesteif mit den oben und unten liegenden Paneelstücken verbunden. Es entsteht ein so genanntes Öffnungselement, welches ähnliche Tragfähigkeitswerte und Verformungseigenschaften wie ein volles Paneel haben soll. Dieses wird experimentell

und numerisch geprüft. Der Fokus liegt auf der Entwicklung des biegesteifen Anschlusses zwischen Sandwichpaneel und Fensterrahmen.

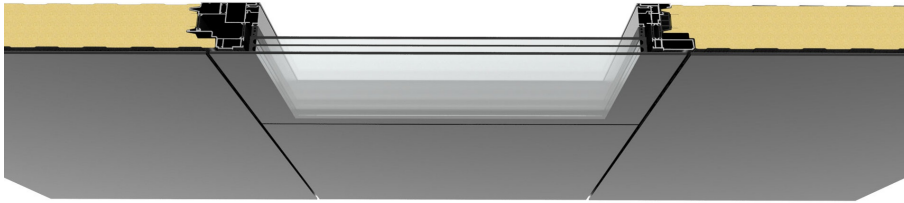


Abb. 1.2: Integrierter Fensterrahmen bei GSP-Wandelementen ©iconic skin

Daneben wird der Einsatz von Fensterbändern in voller Paneelgröße bei horizontal verlegten Glas-Sandwich-Paneeelen untersucht (siehe Abb. 1.3). Es werden sowohl die Tragwirkung quer zur Fassadenebene mit entsprechenden Kopplungseffekten, als auch der gewünschte Abtrag der Fensterband-Eigenlasten durch das unten liegende GSP analysiert. Es sei erwähnt, dass für beide Anwendungen vereinfacht nur ein reines Sandwichpaneel ohne aufgeklebter Glasscheibe betrachtet wird, da diese vernachlässigbar zum Lastabtrag beiträgt (vgl. [31]).

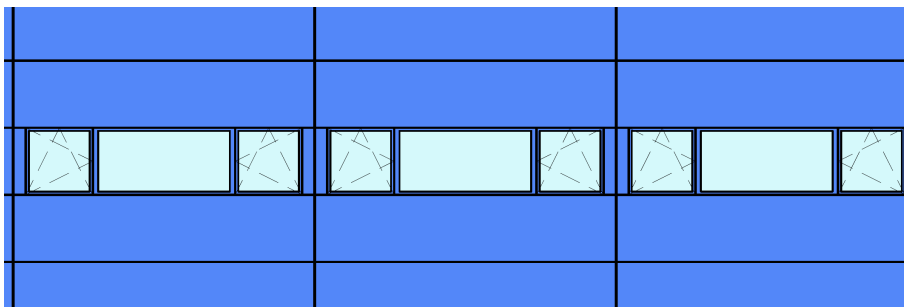


Abb. 1.3: Fensterbänder bei horizontal verlegten GSP ©iconic skin

Gliederung Zu Beginn Arbeit erfolgt eine Einführung in die Sandwichtechnologie mit ihren statischen Besonderheiten. Anschließend wird der bisherige Stand der Wissenschaft bzw. Technik im Bezug auf Öffnungen ohne zusätzlicher Unterkonstruktion ausgewertet. Dies bildet ebenso die Basis für die Entwicklung der geplanten Öffnungsvarianten, wie die Untersuchung der Quersteifigkeit von Sandwichpaneelen im darauffolgenden Kapitel. Im Hauptteil der Arbeit werden zunächst die Öffnungselemente untersucht. Der abschließende Abschnitt umfasst die Betrachtung der Glas-Sandwich-Paneele mit Fensterbändern.

2 Einführung in die Sandwichbauweise

2.1 Allgemeines

Im Bauwesen verwendete Sandwichbauteile bestehen üblicherweise aus zwei dünnen, metallischen Deckschichten, die durch einen schubweichen Kern verbunden sind (siehe Abb. 2.1). Sie werden im deutschsprachigen Raum u.a. als *Sandwichpaneelle*, *Sandwichelemente*, *Dämmpaneelle* oder *Isolierpaneelle* bezeichnet. Im englischsprachigen Raum werden meist die Begriffe *Sandwich Panel* oder *Composite Panel* verwendet.

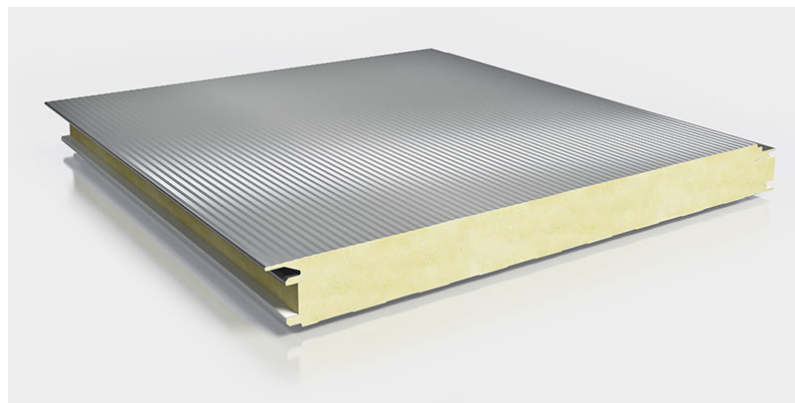


Abb. 2.1: Wandpaneel Roma Typ M [13]

Die Deckschichten können eben bzw. quasi eben (leicht profiliert) oder profiliert geformt sein und bestehen in der Regel aus Stahlblechen. Alternativ kann auch Edelstahl oder Aluminium zum Einsatz kommen. Die Kernschicht wird aus Polyurethan-Hartschaum, Mineralwolle oder Polystyrol hergestellt.

Sandwichelemente sind im Allgemeinen standardisierte Bauteile. In Europa ist ihre Verwendung in der Norm *EN 14509: Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten geregelt*. Die Systembreite liegt meist bei 1 m, die Paneellänge dagegen ist variabel und vorwiegend durch die Produktionsanlage oder den Transport zur Baustelle limitiert. Die Bauteildicke, abhängig von statischen oder bauphysikalischen Anforderungen, variiert in etwa zwischen 40 und 250 mm. Die Dichtigkeit der Gebäudehülle wird durch ein Nut-Feder-System in den Längsfugen hergestellt, wie dies beispielhaft in Abb. 2.2 dargestellt ist.

Die hohe Steifigkeit und Tragfähigkeit von Sandwichpaneelen, gepaart mit geringem Eigengewicht, machen sie zu einem sehr guten Bauteil für Wand- und Dachverkleidungen im Hochbau. Der große Vorteil liegt in der Vereinigung der Eigenschaften *Tragen*, *Dichten* und *Dämmen*. Die Paneele werden industriell, meist in kontinuierlichen Verfahren, hergestellt. Auf der Baustelle werden sie mit der Unterkonstruktion direkt (sichtbar) oder indirekt (verdeckt) verschraubt (siehe Bsp. verdeckte Befestigung in Abb. 2.2). Mit rund 10 m²/min erfolgt die Montage laut Koschade [22] rasch und damit sehr wirtschaftlich. Auch der



Abb. 2.2: Nut-Feder-Längsfuge mit verdeckter Befestigung beim Brucha FP-P Wandpaneel [12]

Wartungsaufwand ist gering. Der Erfolg der Bauweise zeigt sich, ebenfalls laut Koschade [22], mit über 12 Millionen Quadratmeter verlegten Sandwichpaneelen in Deutschland im Jahr 2008, bei steigendem Marktanteil.

Eingesetzt wird die Sandwichbauweise bereits seit über 50 Jahren und wird dabei ständig weiterentwickelt. Während in der Anfangszeit vor allem der Bedarf an Tiefkühl- und Kühlhäusern, mit rein funktionalen und ökonomischen Ansprüchen, bedient wurde, kann in den letzten Jahrzehnten auch zunehmend anspruchsvolle Architektur mit unterschiedlichsten Gebäudetypen realisiert werden (siehe z.B. Abb. 2.3).



Abb. 2.3: 1. Platz beim Architekturpreis 2014 des SP-Herstellers Romakowski [9]

Die Hintergründe dafür sind vielfältig. Bei steigenden Energiekosten und zunehmenden ökologischen Anforderungen ermöglicht die Sandwichbauweise, mit ihrer hervorragenden Wärmedämmeigenschaft, eine nachhaltige Gebäudehülle, welche zerstörungsfrei wieder demontiert, erweitert oder modifiziert werden kann. Außerdem haben die führenden Hersteller von Sandwichpaneelen in puncto Systemvielfalt, Qualität und optische Erscheinung ihre Produkte stetig verbessert. Dabei wurde, neben individuellen Anforderungen des Marktes, dem heute wichtigen Prinzip der Komplettbauweise Rechnung getragen [22, 27]. Mit dem Glas-Sandwich-Paneel (GSP) von iconic skin soll diese Entwicklung weiter forciert werden.

2.2 Materialkennwerte

Im Bauwesen verwendete Sandwichpaneele sind in der Regel aus dünnen, metallischen Deckschichten und einer Kernschicht aus Polyurethan-Hartschaum (PUR) oder Mineralwolle (MW) aufgebaut. Auch expandiertes oder extrudiertes Polystyrol kann als Kernwerkstoff verwendet werden.

Tab. 2.1: Typische Materialkennwerte von Sandwichpaneelen[27]

	Stahl	PUR
Rohdichte [kN/m^3]	7860	35 – 45
Elastizitätsmodul [N/mm^2]	210000	2 – 6
Schubmodul [N/mm^2]	81000	2 – 5
Druckfestigkeit [N/mm^2]	320	0.1 – 0.15
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	50	0.02

Am Beispiel des Kernwerkstoffes PUR in Tab. 2.1 ist ersichtlich, dass die Eigenschaften von Deckschicht- und Kernwerkstoffen kaum unterschiedlicher sein könnten. Jede Komponente übernimmt bestimmte Aufgaben. Die metallischen Deckschichten geben dem Element Tragfähigkeit und Steifigkeit und stellen auch die Dampfdichtheit sicher. Der Kernwerkstoff übernimmt die Wärmedämmung und stellt den schubfesten Verbund der Deckschichten her. Mineralwolle als Kernmaterial bietet im Vergleich zu PUR höheren Brandwiderstand, weist jedoch schlechtere Wärme-Dämmeigenschaften auf. Ein besonders wichtiger Kennwert eines Sandwichpaneels ist die Knitterspannung. Dies ist jene Druckspannung in einer Deckschicht, bei welcher ein Versagen durch örtliches Beulen eintritt. Sie wird versuchstechnisch ermittelt [27].

Geregelt werden die Werkstoffeigenschaften in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (*abZ*), welche jeder Hersteller in der Regel für seine Sandwichpaneel-Typen erlangen muss. Die Werte gelten in Element-Längsrichtung. Für das GSP sind Wandelemente mit PUR- und MW-Kern geplant. In Tab. 2.2 sind die wichtigsten Kennwerte aus den *abZ* einiger Sandwichhersteller für eine Paneeldicke von 100 mm aufgelistet. Die streuenden Werte der Knitterspannung ergeben sich durch die zur Auswahl stehenden, unterschiedlichen Deckblechprofil-Typen, und einer Temperaturabhängigkeit.

Tab. 2.2: Kennwerte von Brucha PUR- und Pflaum MW-Paneelen [1], [2]

	Brucha FP-P 100	Pflaum FI 100
Kernschichtmaterial	Polyurethan	Mineralwolle
Rohdichte der Kernschicht [kN/m^3]	40	130 – 150
Schubmodul [N/mm^2]	3.4	8.5
Schubfestigkeit - kurzzeitig [N/mm^2]	0.09	0.08
Druckfestigkeit [N/mm^2]	0.10	0.13
Knitterspannungen (für $t_N = 0.5 \text{ mm}$)		
äußere Deckschicht - im Feld [N/mm^2]	70 – 141	105 – 124
innere Deckschicht - im Feld [N/mm^2]	70 – 141	105 – 124

2.3 Tragverhalten und theoretische Grundlagen der Sandwichbauweise

Die Tragfähigkeit eines Sandwichbalkens, bei Beanspruchung aus der Ebene, beruht auf dem Verbund der dehnsteifen Deckschichten mit dem schubsteifen Kern. Isoliert betrachtet, weisen die einzelnen Bestandteile sehr geringe Tragfähigkeiten auf. Eine metallische Deckschicht, meist ein Stahlblech mit einer Dicke von weniger als 1 mm, kann kaum ihr Eigengewicht ohne große Verformungen tragen. Auch der Kern, vorwiegend aus Polyurethan-Hartschaum oder Mineralwolle bestehend, ist aufgrund seines geringen Elastizitätsmoduls sehr biegeweich. Werden die Deckbleche aber zug- und schubfest mit dem Kern verbunden, entsteht ein völlig neues Tragsystem mit hoher Tragfähigkeit, dessen Gesamtbiegesteifigkeit vielfach höher als die Summe der Eigenbiegesteifigkeiten seiner Bestandteile ist. In Abb. 2.4 ist der Einfluss der schubfesten Kopplung verdeutlicht.

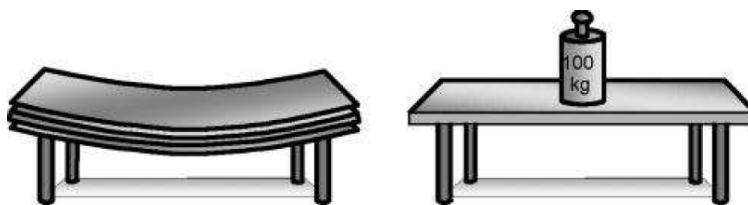


Abb. 2.4: Vergleich Tragfähigkeit ohne und mit Verbund [27]

2.3.1 Tragverhalten bei quasi-ebenen Deckschichten

Die Aufteilung der Schnittkräfte bei ebenen Deckschichten haben u.a. Stamm/Witte [30] untersucht. Im Vergleich zu den metallischen Deckschichten weist der weiche Kern eine sehr geringe Dehnsteifigkeit auf. Deshalb wird praktisch das gesamte Biegemoment von den dünnen Deckschichten in Form eines Kräftepaars aufgenommen, wobei der Hebelarm dem Abstand ihrer Schwerpunkte entspricht. Ein positives Biegemoment bewirkt demzufolge Druckspannungen in der oberen und Zugspannungen in der unteren Deckschicht. Die sehr dünnen Deckschichten wirken wie Membrane und haben im Vergleich zur Kernschicht eine sehr geringe Schubsteifigkeit. Deshalb übernimmt der Kern faktisch die gesamte Querkraft. Der Schubspannungsverlauf in der Kernschicht wird als konstant angenommen. Diese Schubtragfähigkeit des Kerns ermöglicht erst die Verbundwirkung des Sandwichbauteils. Bei leicht profilierten Deckschichten (Sickentiefe ≤ 5 mm) wird gemäß *EN 14509* [5] selbiges Tragverhalten angenommen. Solche Deckschichten werden als quasi-eben bezeichnet.

Neben der Schnittkraft- bzw. Spannungsverteilung, unterscheiden sich Sandwichpaneele auch im Verformungsverhalten von typischen Biegeträgern. Betrachtet man die Anteile aus Schubverformung an der Gesamtverformung, so sind diese z.B. bei Stahlträgern oder Holzbalken verschwindend gering. Beim Sandwichbalken dagegen kann der Anteil aus Schubverformung annähernd jenen der Biegeverformung erreichen und darf bei der Berechnung keinesfalls vernachlässigt werden.

Begründet werden kann dies mit der Art des Verbundes. Bei homogenen Bauteilen, oder solchen mit quasi-homogener Materialzusammensetzung, wird starrer Verbund, mit Ebenbleiben des Querschnitts nach Bernoullischer Hypothese, angenommen. Bei einem Sandwichbalken mit schubweichem Kern muss dagegen die *Theorie des elastischen Verbundes*

angesetzt werden, welche auch als *Sandwichtheorie* bezeichnet wird. Die Unterschiede sind in Abb. 2.5 verdeutlicht.

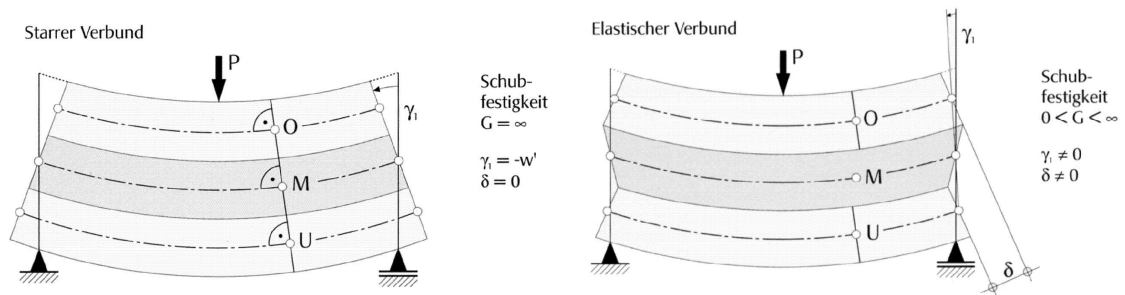


Abb. 2.5: Starrer Verbund (links) und elastischer Verbund (rechts) [15]

Eine analytische Lösung für den Sandwichbalken mit ebenen Deckschichten wurde von Stamm/Witte [30] hergeleitet. Die (entkoppelten) Differentialgleichungen für den Sonderfall Biegebelastung ohne Normalkraft ergeben sich dabei zu:

$$w^{IV} = +\frac{q}{BS} - \frac{q^{II}}{AC}, \gamma^{IV} = -\frac{q}{S} \quad (2.1)$$

$$BS = \frac{(E_{F,1} \cdot t_{F,1} \cdot E_{F,2} \cdot t_{F,2}) \cdot B}{E_{F,1} \cdot t_{F,1} + E_{F,2} \cdot t_{F,2}} \cdot e^2 \quad (2.2)$$

$$S = G_C \cdot B \cdot e \quad (2.3)$$

mit:

w	.....	Gesamtdurchsenkung
q	.....	Gleichförmige Belastungen
BS	.....	Biegesteifigkeit des Sandwichpanels
S	.....	Schubsteifigkeit der Kernschicht
γ	.....	Schubwinkel
$E_{F,1/2}$	.....	E-Modul der äußeren/inneren Deckschicht
$t_{F,1/2}$	.....	Dicke der äußeren/inneren Deckschicht
B	.....	Elementbreite
e	.....	Abstand der Deckschicht-Schwerpunkte
G_C	.....	Schubmodul der Kernschicht

Anstatt mit den Verschiebungsgrößen Gesamtdurchsenkung und Schubwinkel kann der Verformungszustand auch durch die Methode der Partialdurchsenkungen des Biege- und Schubanteils beschrieben werden. Für den Sonderfall Biegung ohne Normalkraft ergibt sich:

$$w_M^{IV} = +\frac{q}{BS}, w_Q^{II} = -\frac{q}{S} \quad (2.4)$$

mit:

w_M	.....	Biegeanteil der Gesamtdurchsenkung
w_Q	.....	Schubanteil der Gesamtdurchsenkung

Unabhängig von der Wahl der angeführten Methode können die Differentialgleichungen durch Integration und Einsetzen der Lagerungsbedingungen an den Balkenenden (Randbedingungen) und der Zwischenbedingungen (z.B. Innenabstützungen) gelöst werden.

Sind die Verformungsgrößen des Sandwichbalkens ermittelt, können daraus das Biegemoment und die Querkraft abgeleitet werden. Bei statisch bestimmt gelagerten Sandwichbalken kann die Schnittgrößenmittlung aber auch direkt aus den Gleichgewichtsbedingungen im statischen System erfolgen. Mit den Schnittkräften lassen sich die Schubspannungen im Kern, sowie die Normalspannungen in den Deckschichten berechnen, deren Verteilung in Abb. 2.6 nochmals dargestellt ist.

$$\sigma_{F,1} = \frac{M}{t_{F,1} \cdot B \cdot e} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{F,2} = \frac{M}{t_{F,2} \cdot B \cdot e} \quad (2.6)$$

$$\tau_C = \frac{Q}{e \cdot B} \quad (2.7)$$

mit:

$\sigma_{F,1}$	.....	Normalspannung in der äußeren Deckschicht
$\sigma_{F,2}$	.....	Normalspannung in der inneren Deckschicht
M	.....	Biegemoment
τ_C	.....	Schubspannung in der Kernschicht
Q	.....	Querkraft

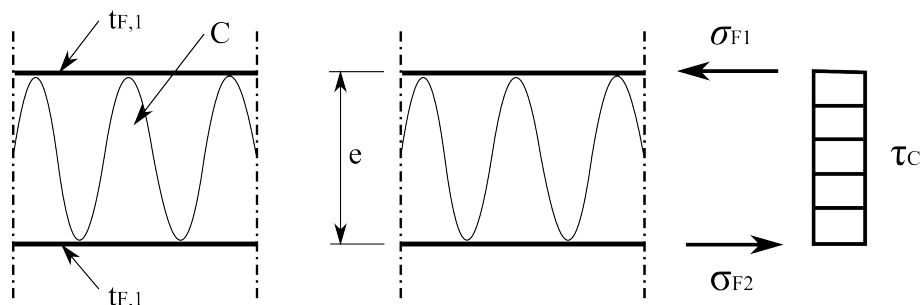


Abb. 2.6: Spannungsverteilung bei ebenen oder leicht profilierten Deckschichten [5]

2.3.2 Tragverhalten bei profilierten Deckschichten

Im Bauwesen werden auch Sandwichbauteile mit einseitig oder beidseitig profilierten Deckschichten eingesetzt, vor allem für Dachelemente (siehe Abb. 2.7). Die profilierten Deckbleche, ähnlich Trapezblechprofilen, weisen eine nicht mehr zu vernachlässigbare Eigenbiege- und Eigenschubsteifigkeit auf, die bei der Schnittkraftermittlung berücksichtigt werden muss. Damit tragen die Deckschichten selbst einen Teil des Biegemomentes bzw. der Querkraft ab. Das Gesamtsystem des Sandwichelementes ist deshalb innerlich statisch unbestimmt. Der Berechnungsaufwand, vor allem bei Mehrfeldsystemen, wird damit ungleich höher. Im Zuge dieser Arbeit werden jedoch nur Sandwichpaneele mit ebenen bzw. leicht profilierten Deckschichten behandelt, da beim GSP nur solche eingesetzt werden.

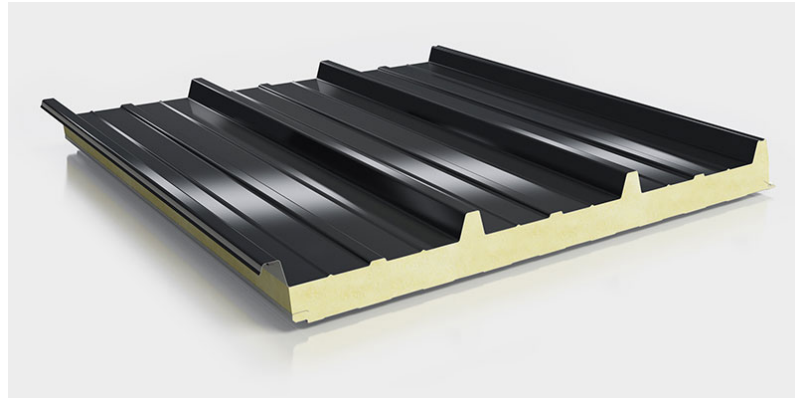


Abb. 2.7: Dachpaneel Roma Typ D mit profilierten Deckschichten [4]

2.3.3 Versagensformen

Die möglichen Versagensformen von Sandwichelementen sind in Abb. 2.8 abgebildet. Das Zugversagen einer Deckschicht wird mit dem Erreichen der Fließgrenze definiert. Das in der Sandwichbauweise typische Knitterversagen der druckbeanspruchten Deckschicht ist ein Spannungsproblem II. Ordnung und wird im folgenden Unterkapitel noch näher erläutert. Das Druckversagen des Kernes wird durch das Überschreiten der Kernwerkstoff-Druckfestigkeit im Bereich der Auflagerfläche festgelegt. Beim Scherversagen des Kernes wird die Schubfestigkeit des Kernquerschnittes durch die einwirkende Querkraft erreicht. Auf das Versagen der Befestigungsmittel wird im Kap. 2.5 noch näher eingegangen.

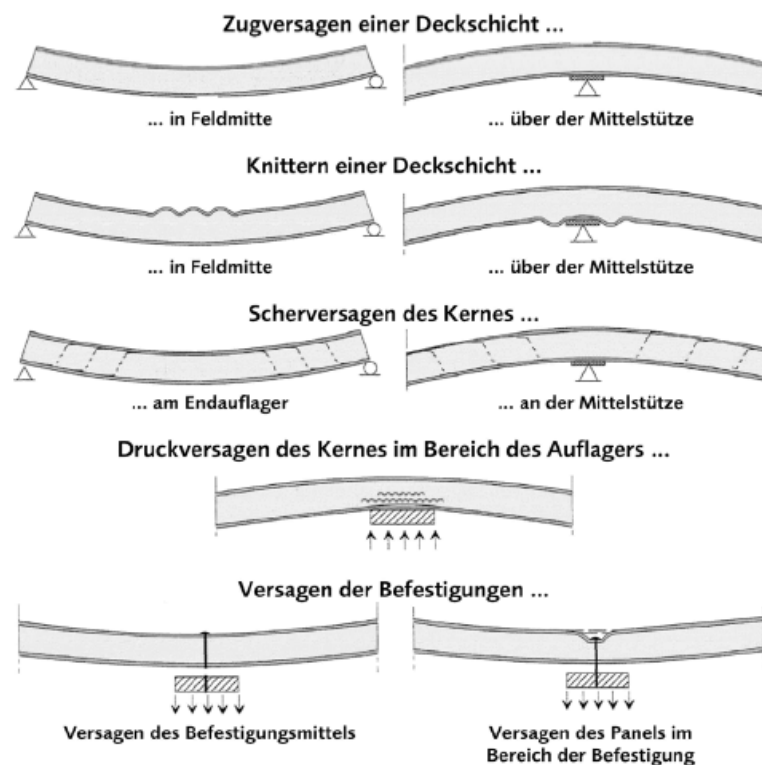


Abb. 2.8: Versagensarten von Sandwichelementen [27]

Knitterversagen der druckbeanspruchten Deckschicht

Eine charakteristische Versagensform von Sandwichbauteilen ist das sogenannte Knittern. Damit wird lokales Ausbeulen der druckbelasteten Deckschicht bezeichnet, das bereits unterhalb der Fließspannung eintritt (siehe Abb. 2.9). Eine Stabilisierung der druckbelasteten Deckschicht erfolgt durch den Verbund mit der Kernschicht, die als elastische Bettung wirkt. Der Stabilisierungseffekt wird durch die Qualität des Haftverbundes und die Steifigkeit des Kernwerkstoffes gesteuert. Je steifer der Kernwerkstoff, desto kürzer stellen sich die Knitterwellen ein. Dies führt zu einer Erhöhung der maximalen Druckspannung und damit zu einer Erhöhung der Traglast. „Bei Überschreiten eines kritischen Grenzwertes, der sog. Knitterspannung, ist die Bettung jedoch nicht mehr ausreichend und es bildet sich eine typische, kurze Knitterfalte, indem sich das Blech in den Kernwerkstoff eindrückt.“ [27]



Abb. 2.9: Knitterfalte beim 6-Punkt-Biegeversuch

Für die analytische Ermittlung der Knitterspannung betrachten Stamm/Witte [30] dieses Problem näherungsweise als knickstabähnliches Versagen des elastisch gebetteten Balkens, wie er in Abb. 2.10 dargestellt ist.

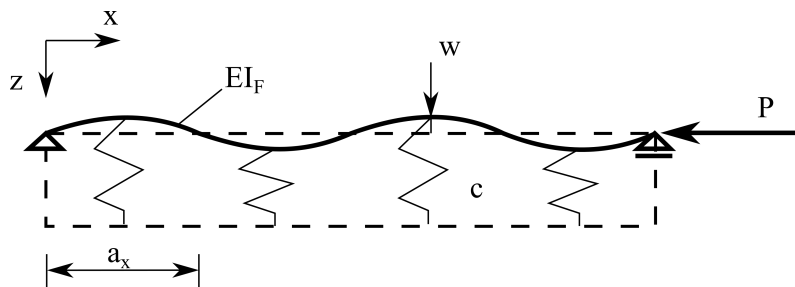


Abb. 2.10: Knickstabähnliches Beulen des elastisch gebetteten Balkens

Mit der zugehörigen Differentialgleichung

$$EI_F \cdot w^{IV} + P \cdot w^{II} + c \cdot w = 0 \quad (2.8)$$

und einem sinusförmigem Lösungsansatz für die Verformung

$$w = w_0 \cdot \frac{\pi \cdot x}{a_x} \quad (2.9)$$

leiteten sie die Bettungsziffer für isotropes, dickes Kernschichtmaterial her.

$$k = \frac{2 \cdot (1 - \nu_C)}{3 - 4 \cdot \nu_C} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot G_C \cdot E_C}{1 + \nu_C}} \quad (2.10)$$

mit:

$E I_F$	.....	Biegesteifigkeit der Deckschicht
w	.....	Querverschiebung
P	.....	Normalkraft in der Deckschicht
c	.....	Federkonstante der Kernschicht
a_x	.....	Halbwellenlänge
k	.....	Bettungsziffer
ν_C	.....	Querdehnzahl des Kernmaterials
G_C	.....	Schubmodul des Kernmaterials
E_C	.....	E-Modul des Kernmaterials

Damit kann die zulässige Knitterspannung beim Sandwichbalken mit ebenen oder leicht profilierten Deckschichten ermittelt werden.

$$\sigma_w = \kappa \cdot \sqrt[3]{E_F \cdot E_C \cdot G_C \kappa} = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot (1 - \nu_C)^2}{2 \cdot (1 + \nu_C) \cdot (3 - 4 \cdot \nu_C)^2 \cdot (1 - \nu_F^2)}} \quad (2.11)$$

mit:

σ_w	.....	Knitterspannung
E_F	.....	E-Modul der Deckschicht
κ	.....	Einflussfaktor der Querdehnzahl des Deckschicht- und Kernmaterials
ν_F	.....	Querdehnzahl des Deckschichtmaterials

Wie Lange/Berner [27] anmerken, muss ein isotropes Verhalten des Kerns, u.a. aufgrund des Produktionsprozesses, als Näherung betrachtet werden. Ebenso ist die Annahme einer dicken Kernschicht, bei der die Bettungsdruckspannungen über die Dicke abgeklungen sind, für dünne Sandwichelemente nicht zwingend berechtigt. Auch der verwendete, gemittelte E-Modul aus Druck- und Zug-E-Modul ignoriert die meist höheren Werte des Zug-E-Moduls.

Versuche aus der Praxis zeigen, dass die analytische Berechnung die tatsächlichen Knitterspannungen oft überschätzt [27]. Dies liegt daran, dass die analytische Lösung eine ideal-ebene Deckschicht vorausgesetzt. Die ermittelte Knitterspannung ist daher nur ein theoretischer oberer Grenzwert; eine Verzweigungsspannung. In der Realität führen herstellungsbedingte Imperfektionen zu zusätzlichen Beanspruchungen, womit das Stabilitätsproblem vielmehr in ein Spannungsproblem II. Ordnung übergeleitet wird.

Dafür entwickelte Berechnungsformeln liefern allerdings bis heute ebenso wenig hinreichend genaue Ergebnisse, wie eine Modellierung mit der Finiten Elemente Methode. Ursache dafür ist vordergründig die Anisotropie der verwendeten Kernwerkstoffe, die für PUR-Kerne in Kap. 4 noch näher erläutert wird. Zusätzlich sind quasi-ebene Deckschichten meist mit Linierung oder leichter Profilierung gefertigt, um die Beulfelder zu begrenzen und damit die erreichbare Knitterspannung zu erhöhen. Aus diesem Grund hält sich die

experimentelle Bestimmung der Knitterspannung laut Lange/Berner [27] bis heute als „... optimale Grundlage für den Einsatz von Sandwichelementen im Bauwesen.“

2.4 Beanspruchungen

Auf Sandwichbauteile wirken ständige Lasten aus Eigengewicht und Ausbau, sowie veränderliche Lasten aus Verkehrslasten, Wind, Schnee und Montagelasten. Gegebenenfalls sind auch Erdbebenbeanspruchungen und Gebäudebewegungen zu berücksichtigen. Zusätzlich ergeben sich durch die Besonderheiten von Sandwichbauteilen noch zwei weitere Lasteinwirkungen.

2.4.1 Temperaturunterschiede der inneren und äußeren Deckschicht

Durch die wärmedämmenden Eigenschaften der Kernschicht werden bei Temperatureinwirkung, wie z.B. Sonneneinstrahlung, große Temperaturdifferenzen zwischen der inneren und der äußeren Deckschicht hervorgerufen. Dies bewirkt unterschiedliche Längenausdehnungen der Deckbleche und dadurch eine Verkrümmung des Bauteils. Während dieser Effekt bei Paneelen mit ebenen Deckschichten und statisch bestimmter Lagerung nur zu Biegeverformungen führt, werden bei statisch unbestimmten Systemen und generell bei profilierten Deckschichten neben Biegeverformungen auch zusätzliche Zwangsschnittgrößen generiert. Wie in *EN 14509* [5] angemerkt wird, stellt die Temperatur häufig den vorherrschenden Lastfall dar und kann höhere Spannungen und Verformungen verursachen als z.B. Windlasten.

Für die Bemessung müssen die beiden Szenarien Winter (äußere Deckschicht kälter) und Sommer (äußere Deckschicht wärmer) untersucht werden. Die Farbgebung der äußeren Deckschicht beeinflusst die Bemessungstemperatur maßgeblich, da dunklere Farben mehr Wärmestrahlung absorbieren und somit im Sommer Oberflächentemperaturen von bis zu 80 °C erreicht werden.

2.4.2 Kriechen des Kernwerkstoffes

Kernwerkstoffe wie Polyurethan oder Polystyrol haben visko-elastische Eigenschaften und neigen zum Schubkriechen. Das bedeutet, dass bei konstanter, langzeitiger Belastung (wie Eigengewicht oder Schnee) eine zusätzliche Verformung eintritt. Der Einfluss des Kriechens kann mit einem zeitabhängigen Schubmodul des Kernwerkstoffes unter Verwendung eines Kriechbeiwertes ermittelt werden [5, 15].

$$G_{Ct} = \frac{G_C}{1 + \varphi_t} \quad (2.12)$$

mit:

G_{Ct}	.....	zeitabhängiger Schubmodul des Kernwerkstoffes
G_C	.....	Kurzzeit-Schubmodul des Kernwerkstoffes
φ_t	.....	Kriechbeiwert

Für die Bemessung wird in den *abZ* der Sandwichhersteller auch die Langzeitschubfestigkeit für den Kernwerkstoff angegeben. Für den Einsatz als Wandverkleidung können die

Kriecheffekte aufgrund der geringen ständigen Lasten in der Regel vernachlässigt werden. Beim Glas-Sandwich-Paneel (GSP) wirkt durch die aufgeklebte Glasscheibe allerdings eine größere ständige Last, deren Einfluss untersucht werden muss. Auch beim geplanten Abtrag von Fensterband-Eigenlasten, wie er in Kap. 6 vorgestellt wird, ist eine nähere Betrachtung des Kriechverhaltens sinnvoll.

2.5 Baupraktische Bemessung

Die Nachweise von in Querrichtung belasteten Sandwichelementen werden in *EN 14509* [5] im Anhang E für den Grenzfall der Tragfähigkeit (GZT) und den Grenzfall der Gebrauchstauglichkeit (GZG) geregelt. Die Kombinationsgleichungen in dieser Norm entsprechen *DIN EN 1990*, die Kombinationsbeiwerte und Teilsicherheitswerte (Materialseite) sind jedoch für die Besonderheiten von Sandwichelementen ausgelegt und deshalb extra angeführt (vgl. Schubverformung, erhöhte Spannungen und Verformungen aus Temperatur, Kriechen). Die Festigkeitswerte können den *abZ* der jeweiligen Sandwichpaneel-Hersteller entnommen werden.

Im Zuge dieser Arbeit wird eine Einschränkung auf Wandelemente mit ebener bzw. leicht profilierter Deckschicht vorgenommen, wie sie beim GSP vorliegen und in *EN 15409* gemäß Abb. 2.11 definiert sind.

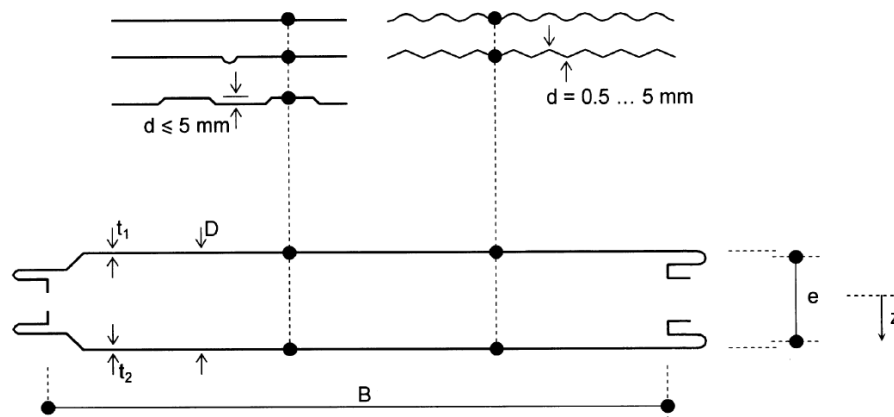


Abb. 2.11: Definition Elementquerschnitt für ebene, leicht profilierete oder mikroprofilierete Deckschichten [5]

2.5.1 Ermittlung der Beanspruchungseinwirkung

In Kap. 2.3 wurde bereits die grundsätzliche Schnittgrößen- und Spannungsverteilung bei Sandwichelementen mit ebenen oder leicht-profilierten Deckschichten erläutert. Die Spannungsermittlung erfolgt gemäß Gleichungen (2.5), (2.6) und (2.7).

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit darf neben der elastischen Schnittgrößenermittlung auch das Traglastverfahren eingesetzt werden. Das heißt die Momentenverteilung darf, unter Einhaltung des inneren Gleichgewichtes und unter Voraussetzung vorhandener Tragfähigkeit, frei gewählt werden. Dies wird genutzt, um Knittergelenke (Fließgelenke) über Innenstützen von Mehrfeldsystemen einzuführen, und das System somit in eine Kette von Einfeldträgern überzuleiten. Die Schnittkraftermittlung kann somit am statisch bestimmten

Einfeldträger erfolgen. Für den Nachweis der Befestigung dürfen keine Knittergelenke angesetzt werden. Auch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist nur die elastische Schnittgrößenermittlung zulässig.

Für einfache Bemessungsaufgaben ausreichend, bietet *Tabelle E.10.1* in *DIN EN 14509* einen Formelapparat für die Schnittgrößen- und Verformungsberechnung von Einfeldträgern und Mehrfeldträgern mit gleichen Stützweiten. Auch Bemessungshilfen auf Basis von Tabellenkalkulationsprogrammen (z.B. SandExcel von iS-engineering GmbH) sind kostenlos verfügbar.

Werden die Schnittgrößen und Verformungen mit einem Stabwerk-Softwareprogramm ermittelt, so muss dieses die Schubverformungen des Kerns berücksichtigen. Möglich ist ebenso eine Modellierung und Berechnung mit FEM-Softwareprogrammen, wie in den folgenden Kapiteln noch näher vorgestellt wird. Naujoks/Misiek [28] stellen zusätzlich eine Modellierung des Sandwichelementes als Fachwerkträger vor. Damit können die Schnittkräfte von statisch unbestimmten Systemen, auch mit ungleichen Stützweiten und/oder profilierten Deckschichten, mit einfachen Stabwerkprogrammen ermittelt werden.

2.5.2 Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

Folgende Versagensformen können auftreten und müssen nachgewiesen werden:

- Fließen einer Deckschicht und daraus resultierendes Versagen
- Knittern (lokales Beulen) einer Deckschicht und daraus resultierendes Versagen
- Schubversagen des Kernes
- Versagen des Verbundes zwischen Deck- und Kernschicht
- Druckversagen des Kerns an einem Auflager
- Versagen des Elementes an den Verbindungspunkten mit der Unterkonstruktion

Der Nachweis erfolgt mit der Grundkombination.

2.5.3 Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Der GZG ist durch einen der folgenden Zustände definiert:

- Fließen einer Deckschicht ohne resultierendes Versagen
- Knittern (lokales Beulen) einer Deckschicht ohne resultierendes Versagen
- Schubversagen des Kernes
- Versagen des Verbundes zwischen Deck- und Kernschicht
- Erreichen einer festgelegten Durchbiegungsgrenze
- Erreichen festgelegter Werte für axiale Bewegungen aufgrund thermischer Dehnungen in den Deckschichten

Zur Vermeidung von sichtbaren Schäden am Element ist die seltene Kombination anzuwenden. Maßgebend wird diese für gewöhnlich nur für Deckschichten im Bereich von Zwischenauflagern von Mehrfeldsystemen, wenn die Schnittkraftermittlung im GZT nicht elastisch, sondern mit dem Traglastverfahren erfolgt.

Für die Durchbiegungsbegrenzung darf die häufige Kombination angewendet werden. Falls keine Vorgaben aus nationalen Normen oder andere Anforderungen vorliegen, kann für die Durchbiegungsbegrenzung von Wänden ein Richtwert von $l/100$ verwendet werden.

2.5.4 Nachweis der Befestigung

Die Befestigung von Sandwichpaneelen an der Unterkonstruktion erfolgt mit Schrauben. Diese müssen primär Zugkräfte aus abhebenden Lasten wie Windsog und Temperatur abtragen. Erhöhter Windsog in Eck- und Randbereich ist anzusetzen. Das Versagen kann durch Überknöpfen im Bereich der oberen Deckschicht, Herausziehen aus der Unterkonstruktion oder Zugbruch der Schraube erfolgen. Die Zugtragfähigkeit einer Schraubenverbindung wird von der Deckblechdicke, der Steifigkeit des Kernwerkstoffes und dem Durchmesser der Unterlegscheibe bestimmt. Das Deckblech verteilt die Schraubenzugkraft über Biegung, der Kern wirkt als Bettung und übernimmt dadurch auch direkt Lasten. Die Unterlegscheibe verbessert die Lastverteilung, wobei diese bei wachsendem Scheibendurchmesser irgendwann selbst versagt. Auftretende Querkräfte in Scheibenebene (z.B. aus Eigengewicht) werden über die innere Deckschicht in die Schraube eingeleitet. Bei gleichzeitiger Zug- und Querkraftbeanspruchung der Schrauben ist eine Interaktion vorzunehmen. Für die Dauerfestigkeit muss die Schraubenkopfauslenkung begrenzt werden, die aufgrund der thermischen Ausdehnung des äußeren Deckbleches auftritt [27]. Diese Auslenkung entspricht der Längsverschiebung des äußeren Deckblechs im Verbindungsbereich. Diese kann mit dem Wärmeausdehnungskoeffizient des Deckschichtmaterials α_F , der Deckblechlänge L und dem Temperaturunterschied ΔT ermittelt werden zu:

$$\Delta L = \alpha_F \cdot L \cdot \Delta T \quad (2.13)$$

Bei der Ausführung wird in direkte (sichtbare) oder indirekte (verdeckte) Befestigung

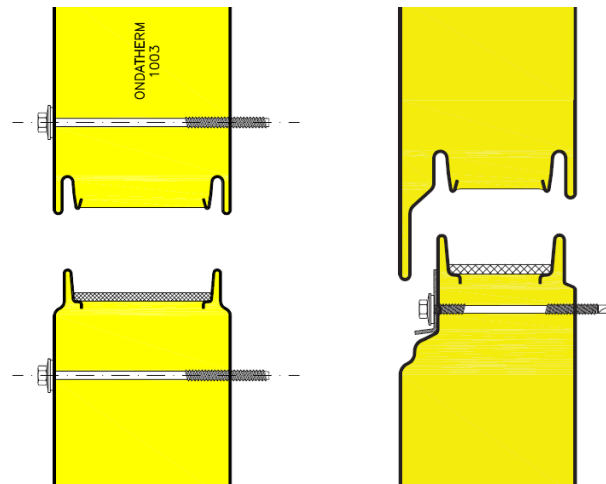


Abb. 2.12: Direkte Befestigung (links) und indirekte Befestigung (rechts)[10, 11]

unterschieden (siehe Abb. 2.12). Bei der direkten Befestigung sind die Schrauben über die Elementbreite verteilt angeordnet. Bei der indirekten Befestigung, wie sie beim GSP eingesetzt wird, wird das Panel nur einseitig, und versteckt in der Längsfuge, verschraubt. Die andere Seite wird durch die profilierte Nut/Feder-Längsfuge mittels Formschluss vom Nachbarpaneel gehalten. Die Schraubenanzahl ist dadurch begrenzt, weshalb die indirekte Befestigung, im Vergleich zur direkten, eher bemessungsmaßgebend für das Bauteil wird.

Der Nachweis der Befestigungsmittel von Sandwichpaneelen mit Unterkonstruktionen aus Stahl und Holz ist nicht in *EN 14509*, sondern in der *abZ Z-14.4-407* [3] geregelt. In

dieser Sammelzulassung verschiedener Schraubenhersteller sind Angaben zur Zugkrafttragfähigkeit, Querkrafttragfähigkeit und maximaler Schraubenkopfauslenkung bereitgestellt. Daneben gibt es Europäische Technische Zulassungen von einzelnen Schraubenherstellern, die inhaltlich der genannten *abZ* entsprechen [21]. Bei verdeckter Befestigung sind gesonderte Angaben aus den jeweiligen Zulassungen der Sandwichhersteller maßgebend.

3 Öffnungen in Sandwichelementen

Um moderne Gebäude nutzbar und gestalterisch ansprechend zu entwerfen, sind Öffnungen für

- Fenster und Türen,
- Belüftungs-, Entlüftungs- oder Versorgungsleitungen,
- Durchdringungen von Konstruktionen

notwendig. Entsprechend der verschiedenen Öffnungstypen unterscheiden sie sich in Größe, Lage und Form (siehe schematisch in Abb. 3.1).

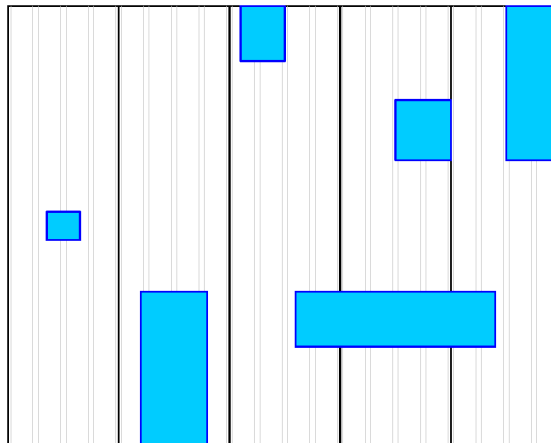


Abb. 3.1: Öffnungsvarianten [17]

Werden für Gebäudehüllen Sandwichelemente eingesetzt, so spannen diese in der Regel als Einfeld- oder Mehrfeldbalken zwischen der Unterkonstruktion und sind den erwähnten Beanspruchungen aus Kap. 2 ausgesetzt. Öffnungen schwächen den Querschnitt und damit die Tragfähigkeit der Sandwichpaneele. Ihr Einfluss ist in *DIN EN 14509* [5] jedoch nicht geregelt. Aktueller Stand der Technik ist es vielmehr, Öffnungen durch eine zusätzliche Unterkonstruktion auszuwechseln, welche als Auflager für Paneele und Öffnungselemente dient und Lasten direkt in das Primärtragwerk ableitet (siehe Abb. 3.2).

Solche Auswechslungen sind aufwendig und bei Berücksichtigung von Paneel-Resttragfähigkeit und Lastumlagerungen nicht immer statisch erforderlich. Deshalb wurden in den letzten Jahrzehnten Berechnungs- und Bemessungskonzepte für Sandwichelemente mit Öffnungen ohne zusätzlicher Unterkonstruktion entwickelt. Diese lassen sich in folgende Kategorien einteilen und werden in diesem Kapitel, mit Einschränkung auf Sandwichpaneele mit ebenen bzw. leicht profilierten Deckschichten, näher beschrieben:

- Kleine Öffnungen mit Nachweis des Restquerschnittes
- Große Öffnungen mit Lastumlagerungen auf benachbarte Paneele
- Verstärkung des Paneels im Öffnungsbereich

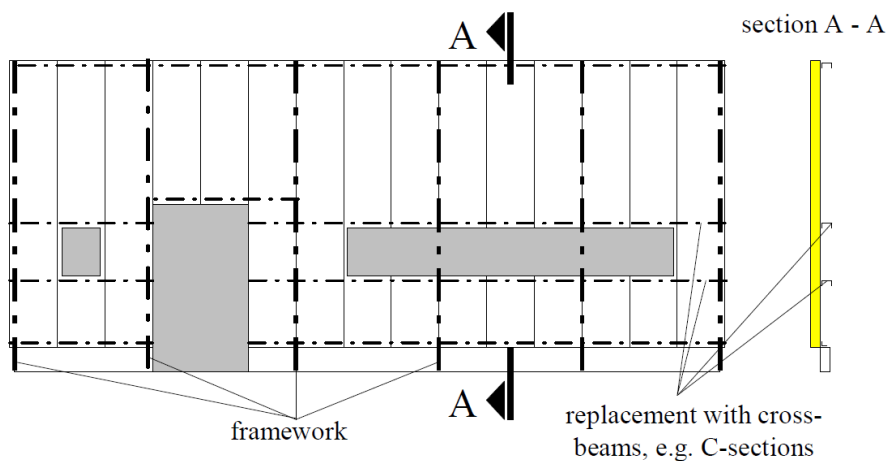


Abb. 3.2: Erforderliche Unterkonstruktion für Öffnungen [17]

Mit den *Preliminary European Recommendations for the Design of Sandwich Panels with Openings* [17] wurden 2014 Richtlinien für Tragwerksplaner als Ergänzung zu *DIN EN 14509* bereitgestellt, welche aktuelle Forschungsergebnisse beinhalten.

3.1 Kleine Öffnungen mit Nachweis des Restquerschnitts

Als kleine Öffnungen werden nach [17] symmetrisch oder exzentrisch zur Bauteilachse gelegene Ausschnitte im Einzelelement definiert, deren Ränder mindestens 10 % der Paneelbreite (bzw. mindestens 100 mm) vom seitlichen Paneelrand entfernt liegen. Damit ist die Öffnungsbreite auf maximal 80 % der Paneelbreite begrenzt. Der Lastabtrag erfolgt über den Restquerschnitt, der in Abb. 3.3 schematisch dargestellt ist.

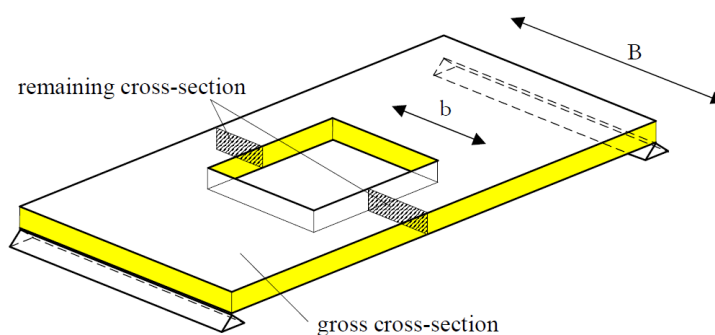


Abb. 3.3: Sandwichelement mit kleiner Öffnung [17]

Jedoch ist ein bloßer Tragfähigkeitsnachweis des Nettoquerschnitts im Öffnungsbereich nicht ausreichend, da im Eckbereich der Öffnung erhöhte Kerbspannungen auftreten. Diesen Kerbeffekt untersuchten Courage/Toma [32] experimentell und numerisch am Einfeldträger. Sie konnten Erhöhungsfaktoren zur Berücksichtigung der Kerbwirkung sowohl für die Knitterspannung als auch für Schubtragfähigkeit des Kerns entwickeln, die von Böttcher [16] noch vereinfacht wurden.

In [17] werden Bemessungsgleichungen für kleine Öffnungen angegeben, die symmetrisch zur Bauteillängsachse sind. Sie gelten für Sandwichelemente mit ebenen oder leicht profilierten Deckschichten und nur für Einfeldträger bzw. Feldbereiche von Mehrfeldsystemen. Die Ausschnitte können rechteckig oder rund sein.

Nachweis der druckbeanspruchten Deckschicht auf Knittern:

$$\sigma_{F,d} = \frac{M_{o,d}}{e \cdot B \cdot t_F} \leq k_F \cdot \frac{\sigma_w}{\gamma_M} \quad (3.1)$$

$$k_F = \begin{cases} (1 - \beta)^2 & \text{wenn } 0 \leq \beta \leq 0,4 \\ 0,6 \cdot (1 - \beta) & \text{wenn } 0,4 < \beta \leq 0,8 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\beta = \frac{b}{B} \quad (3.3)$$

mit:

$\sigma_{F,d}$	.....	Bemessungsdruckspannung in der Deckschicht
$M_{o,d}$	.....	Bemessungsmoment im Bereich der Öffnung
e	.....	Abstand der Deckschicht-Schwerpunkte
B	.....	Elementbreite
t_F	.....	Dicke der Deckschicht
k_F	.....	Abminderungsfaktor der Knitterspannung
σ_w	.....	Charakteristische Knitterspannung
γ_M	.....	Materialsicherheitsbeiwert der jeweiligen Versagensform
β	.....	Öffnungsverhältnis
b	.....	Öffnungsbreite

Nachweis der Kernschicht auf Schubversagen

$$\tau_{C,d} = \frac{V_{o,d}}{e \cdot B} \leq k_C \cdot \frac{f_{C,k}}{\gamma_M} \quad (3.4)$$

$$k_C = (1 - \beta) \text{ wenn } 0 \leq \beta \leq 0,8 \quad (3.5)$$

mit:

$\tau_{C,d}$	.....	Bemessungsschubspannung in der Kernschicht
$V_{o,d}$	.....	Bemessungsquerkraft im Bereich der Öffnung
k_C	.....	Abminderungsfaktor der Schubfestigkeit
$f_{C,k}$	.....	Charakteristische Schubfestigkeit

Auch zur Berücksichtigung von Öffnungen, die exzentrisch zur Bauteilachse liegen, stellt [17] Bemessungsgleichungen bereit. Dabei fließen zusätzlich geometrische Parameter und die Verteilung der Querbiegesteifigkeit ein.

3.2 Große Öffnungen mit Lastumlagerungen auf benachbarte Paneele

Im vorigen Kapitel erfolgte die Betrachtung ausschließlich am einzelnen Paneel. In der Realität sind Sandwichelemente durch ihre profilierte Längsfuge (Nut-Feder-System) jedoch gekoppelt. Öffnungen in einem Element reduzieren dessen Biege- und Schubsteifigkeit. Aufgrund der vorausgesetzten Verformungskompatibilität sind Lastumlagerungen in die

steiferen Nachbarpaneele über die Längsfugen unvermeidlich (dargestellt in Abb. 3.4). Mit zunehmender Öffnungsweite steigt der Anteil der Umlagerung in die benachbarten Elemente. Beim Grenzfall des Vollausschnittes, also einer Öffnung über die ganze Paneelbreite, erfolgt ein vollständiger Lastübertrag auf die Nachbarpaneele.

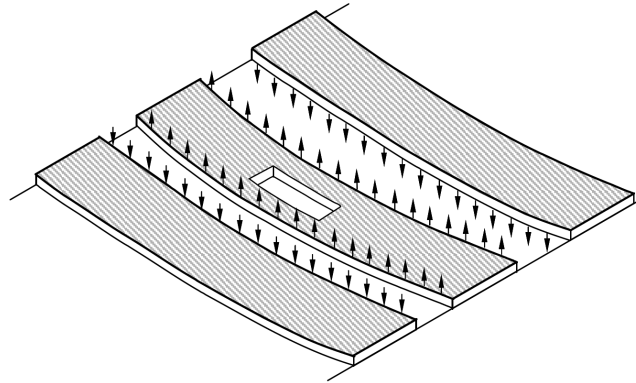


Abb. 3.4: Lastumlagerung als Linienlast in der Längsfuge [17]

Analytische Ansätze zur Berechnung solch gekoppelter Systemen entwickelten Höglund [20] und Davies [18]. Böttcher [16] untersuchte gekoppelte Systeme mit Öffnungen experimentell und numerisch. Er entwickelte mit seinem Elementverband eine praxisnahe Modellierungsvariante, die eine Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen für Einfeldträger-Systeme mit ebenen bzw. leicht profilierten Deckschichten erlaubt. Dabei wird das System durch ein räumliches Stabwerk gebildet, dessen Stäbe die jeweiligen Steifigkeitseigenschaften der Sandwichpaneele in Längs- und Querrichtung bzw. die Steifigkeit der Längsfuge abbilden. Ein zur Berechnung verwendetes Stabwerkprogramm (z.B. RSTAB) muss mit schubweichen Stäben arbeiten können.

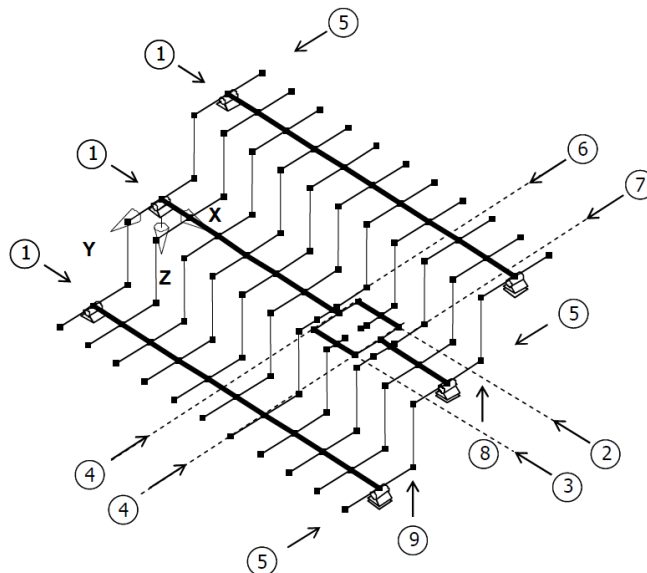


Abb. 3.5: Isometrische Darstellung des Elementverbandes von Böttcher [17]

Für das Modell werden drei Materialtypen benötigt:

1. Starr: $E_1, G_1 = \infty$

2. Sandwich längs: $E_2 = E_F, G_2 = G_{C,xz}, \alpha_{T,2} = \alpha_{T,F}$

3. Sandwich quer: $E_3 = E_V, G_2 = G_{C,yz}, \alpha_{T,3} = \alpha_{T,F}$

mit:

E_F	.....	E-Modul der Deckschicht in Längsrichtung
E_V	.....	E-Modul der Deckschicht in Querrichtung
$G_{C,xz}$	.....	Schubmodul der Kernschicht in Längsrichtung
$G_{C,yz}$	.....	Schubmodul der Kernschicht in Querrichtung
$\alpha_{T,D}$	.....	Wärmeausdehnungskoeffizient der Deckschicht

In Abb. 3.5 ist das Koordinatensystem des Systems definiert. Der Elementverband setzt sich aus folgenden Stabtypen zusammen, die ebenfalls in Abb. 3.5 bezeichnet sind:

① Längsträger im ungeschwächten Bereich (Material 2)

$$I_{y,1} = \frac{B \cdot t_{F,1} \cdot t_{F,2}}{t_{F,1} + t_{F,2}} \cdot e^2 \quad (3.6)$$

$$I_{T,1} = 4 \cdot e^2 \cdot B \cdot \frac{t_{F,1} \cdot t_{F,2}}{t_{F,1} + t_{F,2}} \cdot \left(1 - \frac{\tanh\left(\lambda \cdot \frac{B}{2}\right)}{\lambda \cdot \frac{B}{2}} \right) \cdot \frac{G_D}{G_{C,xz}} \quad (3.7)$$

$$A_1 = B \cdot e \quad (3.8)$$

mit:

$$\lambda = \sqrt{\frac{G_{C,xz}}{G_D} \cdot \frac{t_{F,1} + t_{F,2}}{e \cdot t_{F,1} \cdot t_{F,2}}} \quad (3.9)$$

②,③ Rand-Längsträger im Öffnungsbereich (Material 2)

$$I_{y,2/3} = \frac{b_{2/3} \cdot t_{F,1} \cdot t_{F,2}}{t_{F,1} + t_{F,2}} \cdot e^2 \quad (3.10)$$

$$I_{T,2/3} = 4 \cdot e^2 \cdot b_{2/3} \cdot \frac{t_{F,1} \cdot t_{F,2}}{t_{F,1} + t_{F,2}} \cdot \left(1 - \frac{\tanh\left(\lambda \cdot \frac{b_{2/3}}{2}\right)}{\lambda \cdot \frac{b_{2/3}}{2}} \right) \cdot \frac{G_D}{G_{C,xz}} \quad (3.11)$$

$$A_{C,2/3} = b_{2/3} \cdot e \quad (3.12)$$

④ Lastverteiler (Material 1)

$$I_{T,4} = \infty \quad (3.13)$$

$$A_4 = \infty \quad (3.14)$$

⑤ Querträger im ungestörten Bereich (Material 3)

$$I_{y,5} = \frac{l_Q \cdot t_{F,1} \cdot t_{F,2}}{t_{F,1} + t_{F,2}} \cdot e^2 \quad (3.15)$$

$$I_{T,5} = 0 \quad (3.16)$$

$$A_5 = l_Q \cdot e \quad (3.17)$$

mit:

$$l_Q = \frac{L}{n+1} \quad (3.18)$$

⑥,⑦ Querträger vor/nach der Öffnung mit entsprechender Einflussbreite (Material 3)

$$I_{y,6/7} = \frac{l_{Q,6/7} \cdot t_{F,1} \cdot t_{F,2}}{t_{F,1} + t_{F,2}} \cdot e^2 \quad (3.19)$$

$$I_{T,6/7} = 0 \quad (3.20)$$

$$A_{6/7} = l_{Q,6/7} \cdot e \quad (3.21)$$

⑧,⑨ Längsfuge als Pendelstab (Material 2)

$$I_{y,8/9} = 0 \quad (3.22)$$

$$I_{T,8/9} = 0 \quad (3.23)$$

$$A_{8/9} = \frac{k_{J,8/9} \cdot l_Q \cdot L_J}{E_D} \quad (3.24)$$

mit:

I_y	.....	Flächenträgheitsmoment um die y-Achse
B	.....	Elementbreite
$t_{F,1/2}$	.....	Dicke der äußeren/inneren Deckschicht
e	.....	Schwerpunktsabstand der Deckschichten
I_T	.....	Torsionswiderstandsmoment nach Stamm/Witte
λ	.....	Torsionssteifigkeitsparameter
G_D	.....	Schubmodul der Deckschicht
A	.....	Querschnittsfläche
$b_{2/3}$	.....	Restquerschnittsbreite links/rechts der Öffnung
l_Q	.....	Abstand der Querträger
L	.....	Gesamtstützweite
n	.....	gewählte Anzahl der Querträger
$l_{Q,6/7}$	.....	Einflussbreite des Querträgers vor/nach der Öffnung
k_J	.....	Fugensteifigkeit
L_J	.....	Länge des Stabes

An den Einzelstäben im Elementverband können die für die Bemessung notwendigen Schnittgrößen abgelesen werden.

①,②,③ $M_{y,EV}, Q_{z,EV}, w_z$ ⑧,⑨ N_J

mit:

$M_{y,EV}$	.....	Biegemoment im SP um die y-Achse im Elementverband
$Q_{z,EV}$	.....	Querkraft im SP in z-Richtung im Elementverband
w_z	.....	Verformung des Panels in z-Richtung
N_J	.....	Vertikale Kontaktkraft in der Längsfuge

Neben den Material- und Querschnitteigenschaften in Paneellängsrichtung, welche in Kap. 2 schon gezeigt wurden, werden sowohl für eine analytische Lösung als auch für eine

numerische Berechnung (wie beim Elementverband) Material- und Querschnittseigenschaften in Elementquerrichtung benötigt. Diese sind in den Zulassungen der Hersteller jedoch nicht angeführt. Die Quersteifigkeits-Eigenschaften werden deshalb in Kap. 4 genauer untersucht.

3.2.1 Spannungsverteilung bei exzentrischer Belastung

Durch die exzentrische Belastung über die Längsfuge wirkt neben der zusätzlichen Biegeauch eine verdrehende Beanspruchung im benachbarten Sandwichpaneel. Beim Elementverband von Böttcher wird dies über das auftretende Torsionsmoment deutlich. Allerdings wird das Sandwichpaneel dabei als wölbfreier Querschnitt mit reiner St. Venant'scher Torsion betrachtet, wonach sich das Torsionsmoment nur als zusätzliche Schubspannung im Sandwichpaneel auswirken müsste. Experimentelle Untersuchungen von Rädle [29] zeigen jedoch eine zusätzliche, nicht konstant verteilte Deckblechspannungen, welche aus der Torsionsbelastung resultiert. Ihr Maximalwert liegt am freien Rand, also gegenüber der exzentrischen Lasteinwirkung. Auch numerische FEM-Analysen bestätigen diesen Effekt, der in der Membranwirkung der dünnen Deckschichten und der Schubweichheit des Kerns vermutet wird.

Für die praxisnahe Ermittlung der zusätzlichen Deckblechspannungen entwickelte Rädle [29] Bemessungsdiagramme, aus denen ein Spannungs-Erhöhungsfaktor in Abhängigkeit vom Schubmodul der Kernschicht, sowie dem Längen/Breitenverhältnis und der Biegesteifigkeit des Sandwichpaneels abgelesen werden kann. Damit kann die maximale Zusatznormalspannung in der Deckschicht, die aus der Lastumlagerung resultiert, ermittelt werden. Der Lasterhöhungsfaktor muss nur auf das Zusatzmoment aus dem Nachbarpaneel, nicht jedoch auf das ohnehin wirkende Eigenmoment am Sandwichelement aufgebracht werden.

$$\Delta\sigma_{F,1/2} = \frac{\Delta M \cdot k_{\sigma}}{e \cdot B \cdot t_{F,1/2}} \quad (3.25)$$

$$\Delta M = M_{y,EV} - M_{y,SP,isoliert} \quad (3.26)$$

mit:

$\Delta\sigma_{F,1/2}$	.....	zusätzliche Normalspannung in der äußeren/inneren Deckschicht
ΔM	.....	zusätzliches Biegemoment am Sandwichelement
k_{σ}	.....	Spannungs-Erhöpfungsfaktor für exzentrische Lasteinleitung
e	.....	Schwerpunktsabstand der Deckschichten
B	.....	Elementbreite
$t_{F,1/2}$	.....	Dicke der äußeren/inneren Deckschicht
$M_{y,EV}$	.....	Biegemoment am Sandwichpaneel im Elementverband um y-Achse
$M_{y,SP,isoliert}$	.....	Biegemoment eines isolierten Sandwichpaneels um y-Achse

Auch die zusätzliche Querkraft aus der Lastumlagerung verteilt sich nicht konstant in der Kernschicht des Paneels. Der Lastabtrag der Zusatzlast kann gemäß [29] auf einer mitwirkenden Paneelbreite von 250 mm am Rand der Lasteinleitung angenommen werden, womit sich die zusätzliche Schubspannung im Kern folgend ergibt. Anzumerken ist, dass sich diese Einflussbreite auf eine Paneelbreite von 1000 mm bezieht.

$$\Delta\tau_C = \frac{\Delta Q_z}{e \cdot 250 \text{ mm}} \quad (3.27)$$

$$\Delta Q_z = Q_{z,EV} - Q_{z,SP,isoliert} \quad (3.28)$$

mit:

$\Delta\tau_C$	.....	zusätzliche Schubspannung im Kern
ΔQ_z	.....	zusätzliche Querkraft im SP
$Q_{z,EV}$	.....	Querkraft im SP in z-Richtung im Elementverband
$Q_{z,SP,isoliert}$	.....	Querkraft im SP in z-Richtung bei einem isolierten Paneel

Um die Gesamtspannungen zu erhalten, müssen die Normal- und Schubspannungen aus der Umlagerung mit den auftretenden Spannungen eines identisch belasteten Einzelpaneels überlagert werden.

$$\sigma_{F,ges} = \Delta\sigma_{F,1/2} + \sigma_{F,1/2,SP,isoliert} = \frac{\Delta M_y \cdot k_\sigma + M_{y,SP,isoliert}}{e \cdot B \cdot t_{F,1/2}} \quad (3.29)$$

$$\tau_{C,ges} = \Delta\tau_C + \tau_{C,SP,isoliert} = \frac{\Delta Q_z}{e \cdot 250 \text{ mm}} + \frac{Q_{z,SP,isoliert}}{e \cdot B} \quad (3.30)$$

3.2.2 Tragfähigkeit und Steifigkeit der Längsfuge

Wird bei der Bemessung eine Lastumlagerung auf Nachbarpaneele über die Längsfuge berücksichtigt, so muss die Tragfähigkeit, aber auch die Dichtigkeit, der Längsfuge sichergestellt sein. Zur realistischen Betrachtung sollte zudem ihre Steifigkeit im Berechnungsmodell abgebildet werden. Jedoch hat in der Regel jeder Paneel-Hersteller seine eigenen Längsfugen-Geometrien. Weiters unterscheiden sich diese bei direkter und indirekter Befestigung. Böttcher [16] untersuchte verschiedene Paneeltypen mit unterschiedlichen Fugegeometrien und entwickelte daraus eine Abschätzformel für die Tragfähigkeit.

$$q_{F,d} = 1,1 \cdot d_K \cdot f_{C,v} \quad (3.31)$$

mit:

$q_{F,d}$	.....	zulässige Fugenkraft
d_K	.....	Kragarmhöhe der Feder in der Fuge
$f_{C,v}$	.....	zulässige Schubspannung in der Kernschicht

Versuche von Rädle [29] zeigten jedoch, dass die Ergebnisse mit dieser Abschätzformel nicht immer auf der sicheren Seite liegen. Ebenso variabel wie die Tragfähigkeit zeigte sich auch die Steifigkeit der Längsfuge, wobei diese mit steigender Belastung abnimmt und somit nicht-linear ist. Sowohl Böttcher als auch Rädle verwendeten bei numerischen Berechnungen in der Folge jedoch eine Fugensteifigkeit von 10 kN/(m·cm), da deren Variation die Berechnungsergebnisse nur geringfügig beeinflusst.

In der Praxis müssen die Eigenschaften der Längsfuge stets experimentell ermittelt werden. In [17] wird dafür der Versuchsaufbau von Böttcher vorgeschlagen. Daneben wird darin auch ein vereinfachtes Test- und Bemessungskonzept für die Beurteilung der Längsfuge und die Gesamttragfähigkeit vorgestellt.

3.3 Verstärkungen des Paneels im Öffnungsbereich

In den letzten beiden Abschnitten wurde gezeigt, wie Sandwichpaneele mit unverstärkten Öffnungen bemessen werden können. Aus folgenden Gründen können allerdings Verstärkungen im Öffnungsbereich notwendig oder gewünscht sein:

- Die Tragfähigkeit des Restquerschnittes bei kleinen Öffnungen ist nicht ausreichend.
- Die Steifigkeit ist im Vergleich zum vollen Paneel zu gering, wodurch ungewünschte Lastumlagerungen hervorgerufen werden.
- Die Lastumlagerung in benachbarte Paneele ist generell nicht möglich oder erwünscht.
- Die Tragfähigkeit der Längsfugen oder der Nachbarpaneele ist nicht ausreichend.

Ein großer Nachteil für das Heranziehen der Nachbarpaneele beim Lastabtrag ist die aufwendige, versuchstechnische Ermittlung der Längsfugeneigenschaften. Außerdem reduziert sich der Berechnungsaufwand, wenn ein Sandwichpaneel mit Öffnungen seine Lasten durch Verstärkungen selbst abtragen und somit weitgehend isoliert betrachtet werden kann. In [17] werden die statisch-tragenden Verstärkungsmaßnahmen in zwei Kategorien unterteilt.

Tragender Rahmen Die erste Variante umfasst die Ausführung eines tragfähigen Rahmens im Öffnungsumfang, welcher biege- und schubsteif mit dem Sandwichpaneel verbunden ist. Bei Betrachtung eines Vollausschnittes werden somit sämtliche Schnittkräfte vom Paneel in den Rahmen übergeleitet. Berner/Pfaff [14] führten bereits Orientierungsversuche mit solchen Rahmen, mittig im Sandwichpaneel angeordnet, durch. Bei diesen werden die Deckblechkräfte über mechanische Verbindungsmittel oder Verklebung, verteilt über die Elementbreite, in Querträger an der Ober- und Unterseite des Paneels eingeleitet. Diese Querträger führen die Lasten zu den Öffnungsrändern ab und übertragen sie in Längsträger, welche durch Kunststoffstege annähernd schubsteif verbunden, jedoch thermisch entkoppelt sind. Das Lastableitungskonzept ist in Abb. 3.6 dargestellt. Im Vergleich zum ungeschwächten Paneel konnten Traglasten von rund 60% des ungeschwächten Paneels erreicht werden.

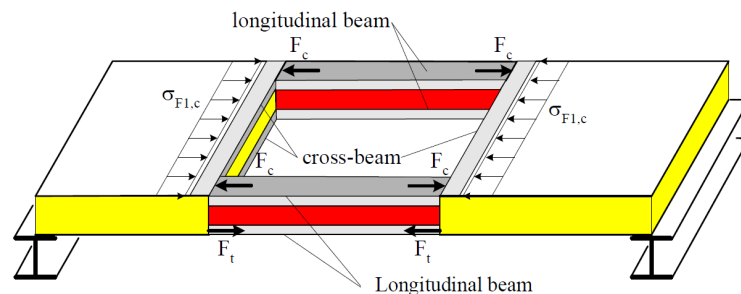


Abb. 3.6: Sandwichpaneel mit integriertem, tragendem Rahmen [17]

Verstärkung der Längsfuge Als zweite Variante wird eine Verstärkung der Paneel-Längsfuge zwischen zwei Sandwichbauteilen aufgezeigt, die sich über die volle Bauteillänge erstreckt (siehe Abb. 3.7). Damit kann das Sandwichelement im Bereich der Öffnung entlastet werden. Die aufgenommenen Lasten werden direkt in die Unterkonstruktion abgegeben.

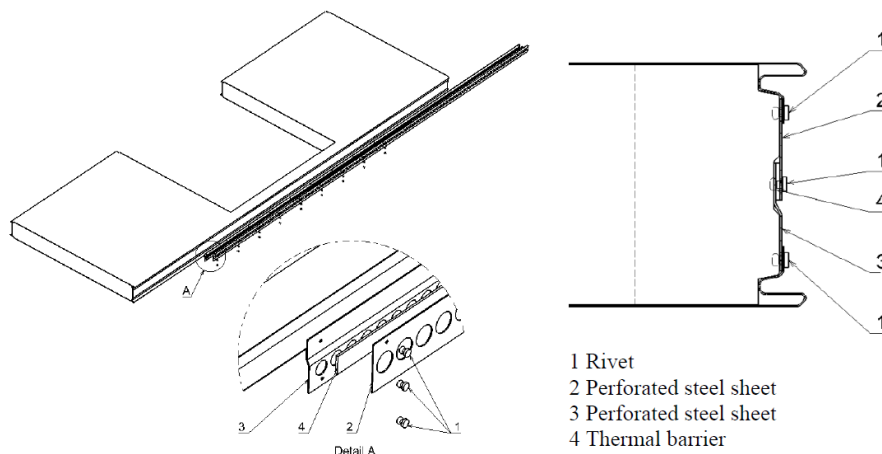


Abb. 3.7: Verstärkung der Längsfuge [17]

Daneben haben diverse Hersteller von Fenstern und Sandwichpaneelen in den letzten Jahrzehnten auch konstruktive Systeme entwickelt, um Öffnungen in Sandwichelementen zu verstärken und/oder einen bauphysikalisch guten Anschluss zu realisieren. Auf Basis von Umfragen bei Herstellern teilt Rädle [29] diese in drei Hauptgruppen ein:

Adapterprofile Sollen Fensterbänder ein vollständiges Sandwichpaneel ersetzen, so kann durch Adapterprofile ein sauberer Anschluss realisiert werden. Diese sind beidseitig an der Längsfuge des Fensterbandes angeordnet und direkt mit der Unterkonstruktion befestigt. Sie weisen oft die Profilform des originalen Sandwichelementes auf und ermöglichen somit den üblichen Formschluss. In Abb. 3.8 ist ein Beispiel der Firma Thyssen Krupp im Schnitt dargestellt. Grundsätzlich trägt bei einem solchen System das Fensterband seine Lasten direkt in die Unterkonstruktion ab. Durch die Kopplung sind jedoch Lastumlagerungen zwischen den beiden Bauteilen Fensterband und Sandwichpaneel zu erwarten, welche durch unterschiedliche Steifigkeitseigenschaften oder Belastungseinwirkungen hervorgerufen werden. In Kap. 6 wird diese Problematik am Beispiel des horizontal verlegten GSP mit Fensterbändern genauer untersucht.

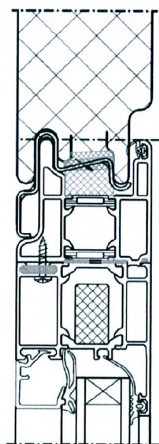


Abb. 3.8: Querschnitt eines Adapterprofils von Thyssen Krupp Steel Europe [29]

Punktuelle Befestigung Diese Variante wird ebenfalls bei Fensterbändern eingesetzt, wobei diese nicht über selbsttragende Adapterprofile gestützt, sondern nur punktuell mit den angrenzenden Sandwichelementen verbunden sind. Die Lasten des Fensterbandes müssen von den Nachbarpaneelen mitabgetragen werden. Damit reduziert sich die Variante prinzipiell von einer tatsächlichen Verstärkungs- zu einer definierten Lasteinleitungsstruktur.

Öffnungen mit aussteifendem Rahmen Während bei den ersten beiden Hauptgruppen die Integration von Fensterbändern im Fokus steht, werden mit aussteifenden Rahmen Einzelöffnungen verstärkt. Dies erfolgt durch den Fensterrahmen, der mit dem Sandwichpaneel verklebt und/oder durch Klemmwirkung verbunden ist (z.B. Fech-Jet-System von Fech Fenstertechnik GmbH & Co. KG). Im Unterschied zum bereits beschriebenen, tragenden Rahmen, ist der Fensterrahmen nicht für die Lastabtragung dimensioniert bzw. der Anschluss an das Sandwichbauteil nicht biegesteif ausgeführt. Experimentelle Versuche von Rädle [29] haben gezeigt, dass die Tragfähigkeitssteigerung durch ein solches System gering ist. Lokales Deckblechknittern in den Öffnungsecken tritt bereits bei ähnlich hohen Lasten wie bei unverstärkten Öffnungen auf.

4 Quersteifigkeit von Sandwichpaneelen mit mikro-profilierten Deckschichten

4.1 Allgemein

Die Steifigkeitseigenschaften einer PUR-Kernschicht unterscheiden in sich Längs- und Querrichtung. Ursache dafür ist zunächst die Anisotropie des Kernwerkstoffes. Werden Sandwichpaneele mit leicht profilierten Deckschichten verwendet, so ist auch die Dehnsteifigkeit der Deckbleche in Querrichtung verringert. In den *abZ* der Paneelhersteller finden sich zu den Materialeigenschaften in Querrichtung jedoch keine Angaben. Für die Modellierung von Öffnungen und gekoppelten Systemen von Sandwichelementen sind die Quersteifigkeits-Eigenschaften jedoch wichtige Parameter. Böttcher [16] untersuchte deshalb die beiden genannten Effekte experimentell und entwickelte ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung der nötigen Kennwerte.

Die genannte Anisotropie des Kernwerkstoffes ist vor allem dem Produktionsprozess geschuldet. Im Randbereich, nahe den angrenzenden Deckblechen, wird der Kernwerkstoff beim Aufschäumen gestaucht. Damit ist das Porenvolumen geringer und die Dichte höher. Die mechanischen Kennwerte sind jedoch nicht zwangsläufig höher als im Kerninneren, wie Kurpiela [23] zeigt. Außerdem bilden sich die Poren beim Verschäumungsprozess oval in die freie Längsrichtung aus, während sie im Querschnitt nahezu rund sind. Der Kernwerkstoff weist daher unterschiedliche E-Moduln in alle drei Richtungen auf. Der in den *abZ* angeführte E-Modul senkrecht zur Paneelebene ist aufgrund der Zellstruktur der geringste. Der Schubmodul in Querrichtung ist geringer als jener in Längsrichtung. Die jeweiligen Querdehnzahlen können nicht wie bei isotropen Werkstoffen aus E- und Schubmodul berechnet, sondern müssen experimentell ermittelt werden.

Für das GSP werden Sandwichpaneele mit quasi-ebenen Deckschichten verwendet. Das bedeutet, dass die Deckbleche nicht völlig eben sind, sondern eine leichte Profilierung (Mikro-Profilierung) aufweisen (dargestellt am Beispiel des Brucha FP-P 100 Panels in Abb. 4.1).



Abb. 4.1: Mikro-Profilierung beim Brucha FP-P 100 Paneel (Profil 1 gemäß [1])

Die Mikro-Profilierung erhöht, durch eine geringfügige Versteifung der Deckschichten, die maximale Knitterspannung des Paneels. Jedoch wird dadurch die Dehnsteifigkeit der Deckbleche in Querrichtung reduziert, da zusätzlich zur Längsdehnung des Stahlquerschnitts nun auch Biegeverformungen auftreten. Böttcher [16] berücksichtigt diesen Effekt durch die Ermittlung eines Ersatz-E-Moduls für die Querrichtung.

4.2 Ermittlung des Ersatz-E-Moduls für die Querrichtung

Auch in Querrichtung kann das Deckblech eines Sandwichpaneels als elastisch gebetteter Einfeldträger mit Einzellast durch Stabzüge modelliert werden (siehe Abb. 4.2).

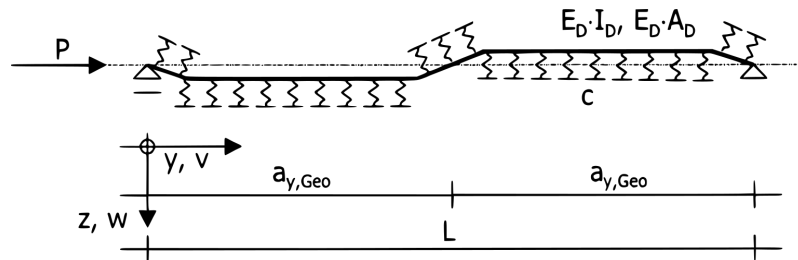


Abb. 4.2: Deckblech in Querrichtung [16]

Zur Berechnung des Systems wird die Steifigkeitsziffer der Stabbettung in z-Richtung benötigt. Diese kann mit der geometrischen Halbwellenlänge und der Bettungsziffer (gemäß Gl. (2.10)) ermittelt werden. Durch die Vorverformung der Deckschicht (aufgrund der Mikro-Profilierung) stellt sich die Halbwellenlänge mit der Sickenbreite ein, weshalb sie als geometrische Halbwellenlänge bezeichnet wird. Für den E-Modul der Kernschicht wird wiederum der gemittelte Wert für Zug- bzw. Druckbeanspruchung angenommen.

$$c = \frac{\pi}{a_{y,Geo}} \cdot k = \frac{\pi}{a_{y,Geo}} \cdot \frac{2 \cdot (1 - \nu_C)}{3 - 4 \cdot \nu_C} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot G_C \cdot E_C}{1 + \nu_C}} \quad (4.1)$$

mit:

c	.....	Federkonstante der Kernschicht
$a_{y,Geo}$	.....	geometrisch bedingte Halbwellenlänge
k	.....	Bettungsziffer
ν_C	.....	Querdehnzahl des Kernmaterials
$G_{C,yz}$	.....	Schubmodul des Kernmaterials in Querrichtung
E_C	.....	E-Modul des Kernmaterials

Mit einem Stabwerksprogramm (z.B. RSTAB) kann die horizontale Verformung am Lastangriffspunkt für das System ermittelt und der Ersatz-E-Modul bestimmt werden.

$$E_V = \frac{P \cdot L}{v \cdot A_F} \quad (4.2)$$

mit:

E_V	.....	Ersatz-E-Modul in Querrichtung
P	.....	horizontale Einzellast
L	.....	Systemlänge
A_F	.....	Fläche der Deckschicht

4.3 Einfluss der Materialkennwerte auf die Querdehnsteifigkeit der Deckbleche

Für die Berechnung des Ersatz-E-Moduls in Querrichtung sind neben dem E-Modul E_z in Dickenrichtung auch der Schubmodul G_{yz} in Querrichtung und die Querdehnzahl ν des Kernwerkstoffes nötig. Diese Kennwerte sind in den Zulassungen des Paneelherstellers, wie erwähnt, nicht angegeben und können allgemein nur versuchstechnisch ermittelt werden. Eine Annahme einer Querdehnzahl von rund $0,2 - 0,3$ scheint allerdings realistisch (vgl. [16, 23, 27]). Für die Abschätzung des Schubmoduls G_{yz} in Querrichtung gibt Böttcher [16] eine Abschätzformel an, welche bisher nicht durch umfangreiche Versuchsserien bestätigt wurde:

$$G_{C,yz} = 0.6 \cdot G_{xz} \quad (4.3)$$

mit:

$G_{C,yz}$ Schubmodul in Querrichtung
 $G_{C,xz}$ Schubmodul in Längsrichtung aus abZ (G_C)

Zur Beurteilung des Einflusses auf den Ersatz-E-Modul in Querrichtung wird eine Parameterstudie mit Variation der Querdehnzahl und des Quer-Schubmoduls durchgeführt. Die Untersuchung erfolgt für das innere Deckblech eines Brucha FP-P 100 Wandpaneels. Die verwendeten Eingangsparameter sind in Tab. 4.1 angeführt. Die Ermittlung der Bettung wird mit dem Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel durchgeführt. Anschließend wird die horizontale Verformung am elastisch gebetteten Träger mit der Statiksoftware RFEM linear-elastisch ermittelt. Alle Daten sind tabellarisch im Anhang A1 angefügt.

Tab. 4.1: Eingangswerte Parameterstudie Quersteifigkeit

Deckschicht	
Material	Stahl S320GD
E_S [N/mm ²]	210000
t_F [mm]	0.5
B [mm]	1000
$a_{y,Geo}$ [mm]	50
Kernschicht	
$E_{C,z}$ [N/mm ²]	3.5
$G_{C,xz}$ [N/mm ²]	3.4
System	
P [N]	10000
L [mm]	100

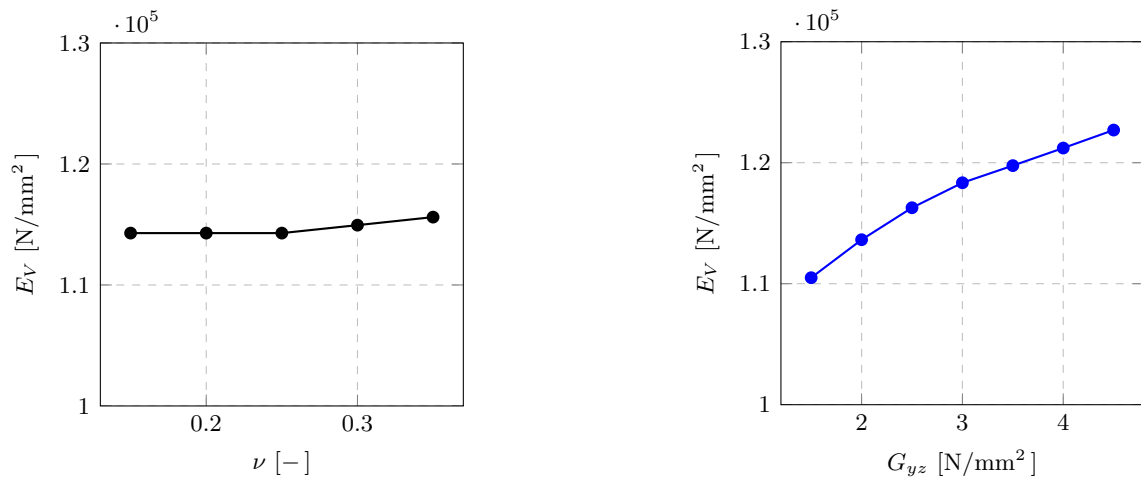


Abb. 4.3: Einfluss der Querdehnzahl und des Schubmoduls auf den Ersatz-E-Modul in Querrichtung

Wie in Abb. 4.3 im linken Diagramm ersichtlich, spielt die Größe der Querdehnzahl kaum eine Rolle für den Ersatz-E-Modul. Die Abweichung in der untersuchten Variationsbreite beträgt nur 1.16 %. Bezogen auf die Bettungsziffer beträgt die Abweichung rund 6 %. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den Untersuchungen von Kurpiela [23], die ebenfalls einen sehr kleinen Einfluss der Querdehnzahl auf die Bettung feststellt.

Der Schubmodul in Querrichtung hat ebenfalls einen geringen Einfluss auf die Dehnsteifigkeit in Querrichtung. Bei einer Variation des Quer-Schubmoduls zwischen 1.5 und 4.5 N/mm² verändert sich E_V nur um 11 %. Dies zeigt, dass selbst eine Verdreifachung des Schubmoduls keinen erheblichen Einfluss bewirkt.

4.4 Ermittlung der Quersteifigkeitsparameter für das Brucha FP-P Paneel

Für das Glas-Sandwich-Paneel werden sowohl für die vertikale Verlegung als auch für die horizontale Verlegung u.a. FP-P Wandpaneele der Firma Brucha mit einem PUR-Kernmaterial verwendet. Dessen Eigenschaften sind in der *abZ 10.4-620* [1] geregelt. Es kommen verschiedene Kernschichtdicken zum Einsatz. Die Geometrie der Deckblechprofilierung ist immer gleich.

Schubmodul in Querrichtung

Laut Böttcher [16] liegt das Ergebnis seiner Abschätzformel (4.3) stets unter den Versuchswerten. Für die in weiterer Folge betrachteten Problemstellungen (Lastumleitung vom Sandwichpaneel in einen tragenden Fensterrahmen bei vertikaler Verlegung bzw. Lastumlagerungen zwischen Sandwichpaneel und Adapterprofilen bei horizontaler Verlegung) kann der verminderte Schubmodul in Querrichtung jedoch nicht allgemein als günstig oder ungünstig eingestuft werden. Darum wird unter Annahme einer besseren Mittelwertabbildung die Abschätzformel modifiziert zu:

$$G_{C,yz} = 0.7 \cdot G_{xz} \quad (4.4)$$

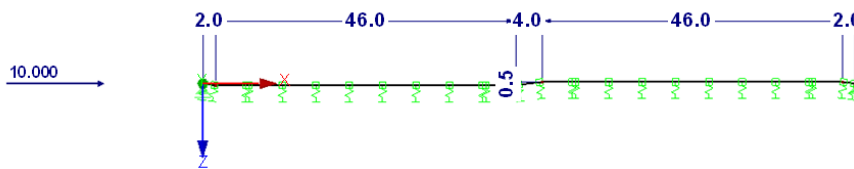
Tab. 4.2: Schubmoduln für Sandwichpaneel beim Brucha FP-P Paneel

Elementdicke H [mm]	G_{xz} [N/mm ²]	G_{yz} [N/mm ²]
40 – 80	4.0	3.4
100 – 200	2.8	2.4

Es sei darauf hingewiesen, dass diese Annahme durch Versuche bestätigt werden muss.

Ersatz-E-Modul E_V des Deckbleches in Querrichtung

Es wurde gezeigt, dass der Schubmodul in Querrichtung und die Querdehnzahl nur geringe Auswirkungen auf die Größe des Ersatz E-Modul haben. Die modifizierte Abschätzformel (4.4) wird übernommen, die Querdehnzahl mit $\nu = 0.25$ festgelegt. Die Berechnung der horizontalen Verformung erfolgt nach Theorie II. Ordnung mit der Statiksoftware RFEM. Abb. 4.4 zeigt die Modellierung des inneren Deckbleches. Die Berechnung erfolgt für eine Breite von 1000 mm.

**Abb. 4.4:** Modellierung Deckblech in Querrichtung beim FP-P 100**Tab. 4.3:** Ersatz-E-Moduln beim Brucha FP-P Paneel

Elementdicke H [mm]	Deckblechseite	Deckblechdicke t [mm]	E_V [N/mm ²]
40 – 80	innen	0.5	105263
	außen	0.6	112613
100 – 200	innen	0.5	102564
	außen	0.6	109649

Die ermittelten Ersatz E-Moduln (siehe Tab. 4.3) zeigen, dass die Querdehnsteifigkeit der quasi-ebenen Deckschichten sowohl von der Deckblechdicke (Eigenbiegesteifigkeit), als auch geringfügig von der Kernschichtdicke (Schubmodul) abhängen. Vereinfacht wird ein Wert von $E_V = 105000 \text{ N/mm}^2$ für alle Brucha FP-P Paneele bei der weiteren Modellierung verwendet. Der Wert beträgt somit 50 % des E-Moduls in Längsrichtung. Eine Aussage über die ertragbaren Knitter- bzw. Knickspannungen in Querrichtung kann nicht getroffen werden.

5 Öffnungselemente mit integriertem Fensterrahmen

5.1 Beschreibung des Öffnungselementes

Für vertikal verlegte Glas-Sandwich-Wandpaneel (GSP) von iconic skin sollen elementbreite Fensteröffnungen ohne zusätzliche Unterkonstruktion realisiert werden, wie sie schematisch in Abb. 5.1 dargestellt sind. Dafür müssen die Schnittkräfte von ober- und unterhalb situierten Paneelen in einen tragenden Fensterrahmen übergeleitet werden.

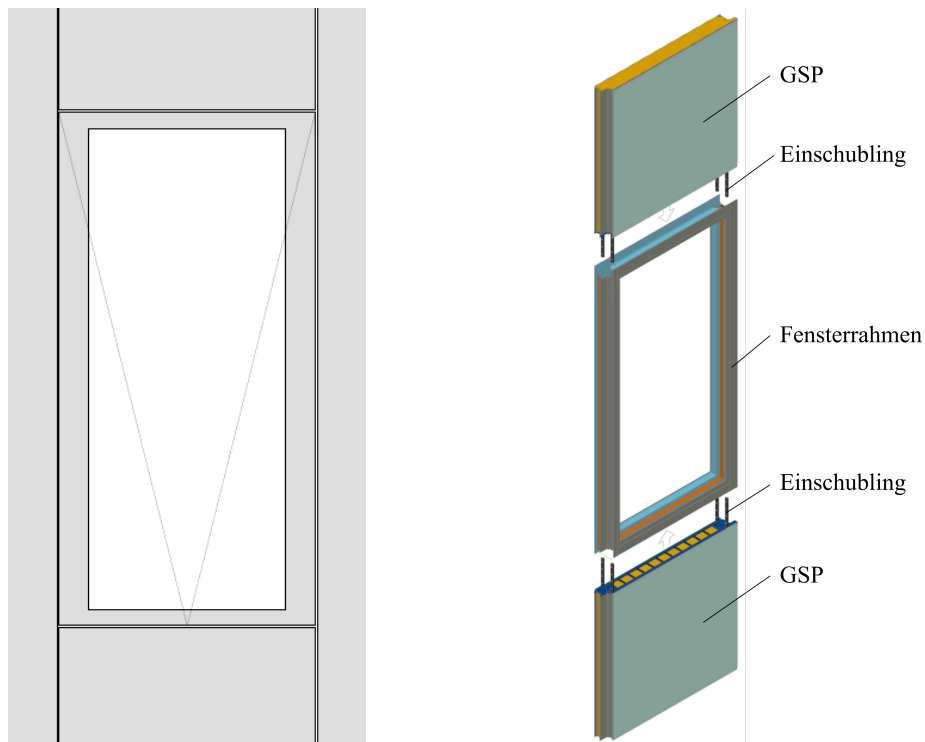


Abb. 5.1: Integrierte, tragende Fensterrahmen beim vertikal verlegten GSP

Für den biegesteifen Anschluss zwischen Rahmen und Sandwich-Paneel werden Verbindungsbauteile entwickelt, welche folgend als Einschublinge bezeichnet werden. Im Gegensatz zu den Untersuchungen von Berner/Pfaff [14] liegen diese innerhalb der Deckschichten des Sandwichpaneels. Prinzipiell soll das System auch für Mehrfeldsysteme mit mehreren Öffnungen einsetzbar sein, in der Entwicklungsphase werden jedoch nur Einfeldträger mit einer mittigen Fensteröffnung untersucht.

Ein solches Öffnungselement besteht somit aus den Komponenten:

- 2 x Glas-Sandwich-Paneel (GSP),
- 2 x Einschubling,
- 1 x Fensterrahmen

Diese sind in der Explosionsdarstellung in Abb. 5.2 (oben) bezeichnet. Die Einzelkomponenten werden folgend näher beschrieben. Der Montageprozess des Öffnungselementes wird bei der Probekörperherstellung in Kap. 5.2 behandelt.



Abb. 5.2: Öffnungselement in der Explosionsdarstellung (oben) und zusammgebaut (unten)

5.1.1 Glas-Sandwich-Paneel (GSP)

Das Glas-Sandwich-Paneel (GSP) setzt sich aus einem Industrie-Sandwichpaneel und einer darauf verklebten TVG-Scheibe zusammen. Für die Entwicklung des Öffnungspaneels werden ausschließlich Sandwichpaneele vom Typ FP-P 100 des Herstellers Brucha mit PUR-Kern verwendet. In Tab. 5.1 sind dessen wichtigste Querschnittswerte ebenso aufgelistet wie die erforderlichen Materialkennwerte aus der Produktzulassung [1].

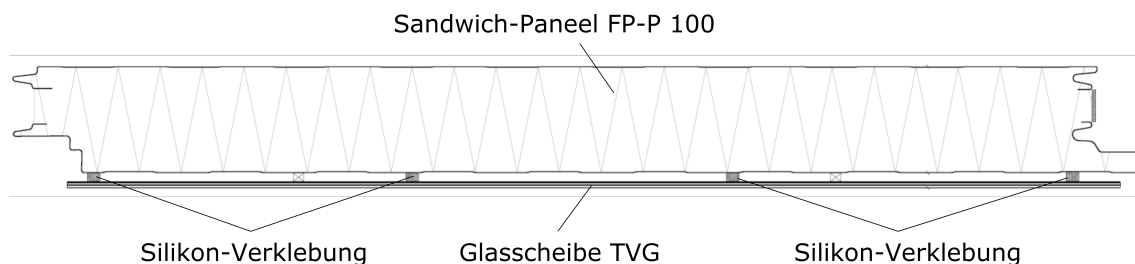


Abb. 5.3: Querschnitt des Glas-Sandwich-Paneels

Tab. 5.1: Querschnitts- und Materialkennwerte des Brucha FP-P 100 Panels

Material Deckschichten	Stahl S320GD
Material Kernschicht	PUR-Hartschaum ISOPUR-P02
Elementbreite B	1000 mm
Elementdicke D	100 mm
Abstand der Deckschicht-Schwerpunkte e	99.5 mm
Deckblechgeometrie	Profil 1 (gemäß [1])
Dicke der äußeren Deckschicht $t_{F,1}$	0.6 mm
Dicke der inneren Deckschicht $t_{F,2}$	0.5 mm
E-Modul der Deckschichten E_F	210000 N/mm ²
Schubmodul der Kernschicht G_C	3.4 N/mm ²

Die Biegesteifigkeit BS des Panels kann mit Gl. 2.2 aus Kap. 2 ermittelt werden.

$$BS (\cong EI_y) = \frac{(210000 \cdot 0.6 \cdot 210000 \cdot 0.5) \cdot 1000}{210000 \cdot 0.6 + 210000 \cdot 0.5} \cdot 99.5^2 = 5.67 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

Damit ergibt sich das Flächenträgheitsmoment I_y des Sandwichpaneels zu:

$$I_y = \frac{BS}{E_F} = \frac{5.67 \cdot 10^{11}}{210000} = 270 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Die Schubsteifigkeit S wird nach Gl. (2.3) berechnet.

$$S = G_C \cdot e \cdot B = 3.4 \cdot 99.5 \cdot 1000 = 3.38 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

An der äußeren Paneel-Deckschicht wird eine opake TVG-Scheibe mit linienförmigen Silikonraupen im Structural-Glazing-Verfahren ohne Nothalter angebracht (siehe Abb. 5.3). Die Steifigkeit der Silikonverklebung ist im Vergleich zur Paneelsteifigkeit sehr gering. Aus diesem Grund wirkt sich die verklebte Glasscheibe kaum auf das Tragverhalten eines Glas-Sandwich-Paneels aus, wie beispielsweise in [31] angeführt wird. Auf eine Berücksichtigung der Glasscheibe wird für die folgenden experimentellen und numerischen Untersuchungen deshalb verzichtet und ausschließlich das reine Sandwichpaneel FP-P 100 betrachtet.

5.1.2 Tragender Fensterrahmen

Der Fensterrahmen besteht aus Stranggussprofilen des Werkstoffes Aluminium 6060-T66, die speziell für diese Anwendung konzipiert wurden (siehe Abb. 5.4). Die seitlichen Pfosten (siehe Abb. 5.5 (links) und (mittig)) weisen außenseitig die gleiche Profilform wie die Sandwichpaneel auf. Die Längsfuge des Öffnungselementes ist somit über die gesamte Bauteillänge konstant und ein sauberer Anschluss an die Nachbarpaneel gewährleistet. Aus diesem Grund unterscheiden sich die beiden Pfosten deutlich in ihrer Querschnittsform und Biegesteifigkeit. Die oben und unten liegenden Riegel (siehe Abb. 5.5 (rechts)) sind dagegen identisch im Querschnitt.

Bei allen vier Rahmenprofilen setzt sich der Querschnitt aus zwei Teilprofilen zusammen, die durch zwei Kunststoffstege verbunden sind. Dies sorgt für thermische Entkopplung und ermöglicht trotzdem eine relativ schubsteife Verbindung. Der Zusammenschluss zum

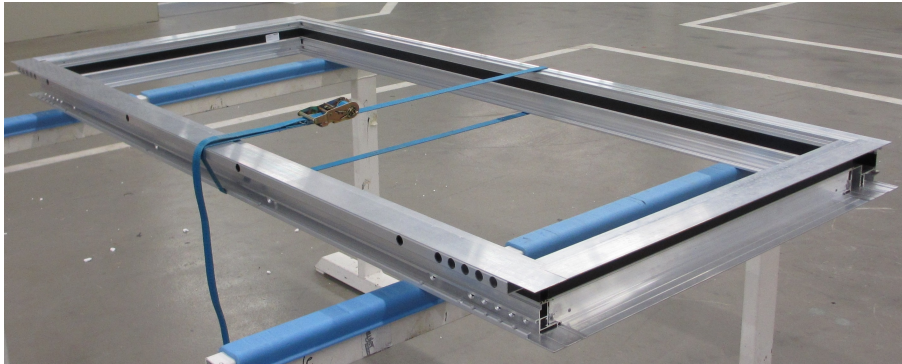


Abb. 5.4: Fensterrahmen beim Öffnungselement

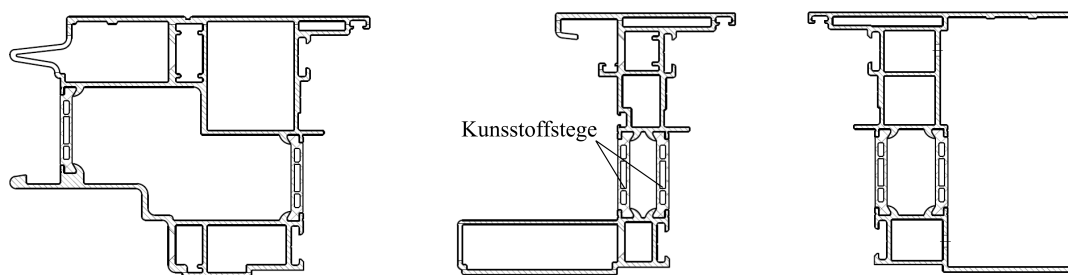


Abb. 5.5: Profilquerschnitte des Fensterrahmens: Pfostenprofil 1 (links), Pfostenprofil 2 (mittig), Riegel (rechts)

Rahmen erfolgt durch verschraubte T-Verbinders und zusätzlicher Verklebung in den Ecken und ist nicht-biegesteif dimensioniert. Der globale Lastabtrag des Öffnungselementes erfolgt nur über die außen liegenden Pfosten, in die Riegel werden nur lokale Lasten aus dem Fenster eingeleitet. Die Querschnittswerte und die Hauptachseneigung für die Postenprofile wurden mit der CAD Software AutoCAD 2013 und der Zusatzsoftware Athena automatisch ermittelt und sind in Tab 5.2 aufgelistet. Zur Berücksichtigung der weicheren Kunststoffstege sind die dargestellten Werte mit einem Faktor von 0.7 abgemindert, welcher vom Hersteller empfohlen wird.

Tab. 5.2: Querschnittswerte der Rahmen-Pfosten-Profile

	I_Y [mm ⁴]	I_Z [mm ⁴]	A [mm ⁴]	α [°]
Pfostenprofil 1	$159.3 \cdot 10^4$	$229.3 \cdot 10^4$	1630	24.2
Pfostenprofil 2	$128.5 \cdot 10^4$	$65.9 \cdot 10^4$	1090	23.7
Gesamt	$287.8 \cdot 10^4$	-	2720	-

Für die Gesamt-Biegesteifigkeit des Fensterrahmens EI_{FR} werden die Einzelwerte der beiden Pfostenprofile zusammengezählt und mit dem Aluminium-E-Modul E_A von 70000 N/mm² multipliziert.

$$EI_{FR} = I_{y,ges} \cdot E_A = 287.8 \cdot 10^4 \cdot 70000 = 2.01 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

Diese beträgt damit rund 35 % der Biegesteifigkeit des FP-P 100 Sandwich-Paneels.

5.1.3 Einschubling

Der Einschubling muss die Übertragung von Biegemomenten- und Querkräften vom schubweichen Sandwichpaneel zum schubstarreren Fensterrahmen sicherstellen. Die Bezeichnung Einschubling resultiert aus der Art des Einbaus. Das Bauteil soll durch Einschub in Sandwichbauteil und Fensterrahmen nach der Montage nicht mehr sichtbar sein. In der statischen Entwicklungsphase wird der Einschubling aus Baustahl gefertigt, im Optimierungsprozess sind andere Werkstoffe mit günstigeren, thermischen Verhalten denkbar.

Die große Herausforderung im Design des Einschublings besteht primär darin, die gleichmäßig über die Paneelbreite verteilten Deckblech-Normalspannungen und Kernschicht-Schubspannungen in die seitlichen Pfosten des Fensterrahmens überzuleiten. Dafür wurden die in Abb. 5.6 gezeigten Einschublings-Typen entwickelt und experimentell sowie analytisch untersucht.

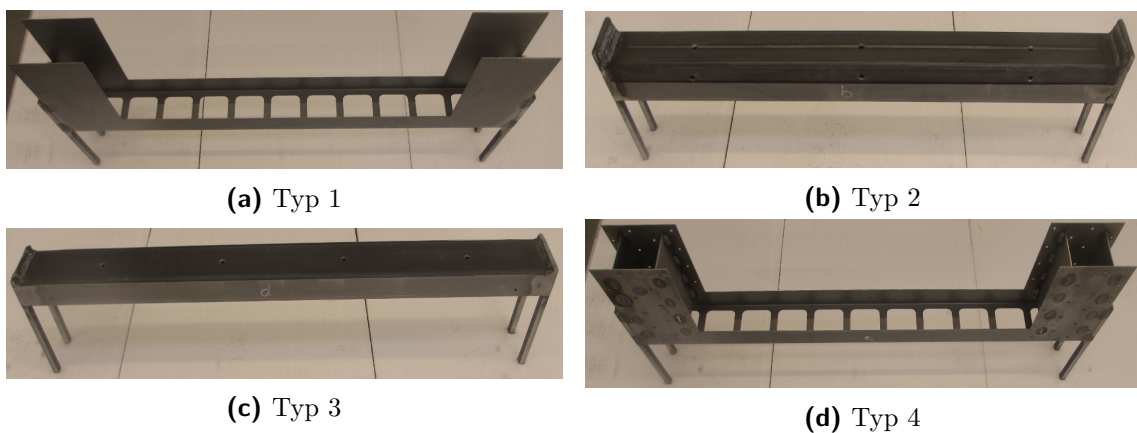


Abb. 5.6: Einschublingstypen

Wie in Abb. 5.6 erkennbar, unterscheiden sich alle vier Typen im Mittelbereich, wo der Anschluss zum Sandwichpaneel erfolgt. Im Unterkapitel 5.1.4 wird die Formgebung im Mittelbereich näher erläutert. Die beiden stirnseitig angeschweißten Seitenteile sind dagegen bei allen Varianten gleich gestaltet. Ein Seitenteil besteht aus einem Stahlblech-Zuschnitt aus Baustahl S355 mit einer Dicke von 10 mm. Funktionell unterteilt er sich in einen Rahmen, an welchem die Schweißverbindung mit dem Mittelteil erfolgt, und zwei Einstabstiele, wo der Anschluss an den Fensterrahmen erfolgt (siehe Abb. 5.7 (links)).

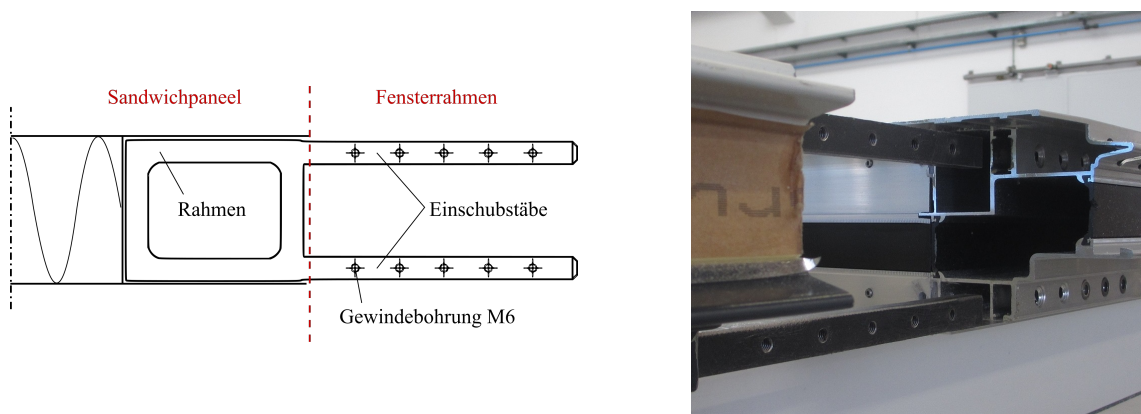


Abb. 5.7: Einschubling-Seitenteil (links) und Anschluss am Fensterrahmen (rechts)

Die Verbindung zwischen Einschubling und Fensterrahmen wird mittels auskragender Einschubstäbe realisiert, die in entsprechende Hohlkammern der Fensterrahmenpfosten eingeschoben und mit den Pfosten verschraubt werden (siehe Abb. 5.7 (rechts)). Dieser Anschluss wurde bereits vor dem Beginn dieser Masterarbeit entwickelt, mit internen Versuchen bei iconic skin getestet und wird für alle Einschublingsvarianten übernommen.

Statisch betrachtet werden Biegemomente durch ein Zug-/Druck-Kräftepaar im unteren/oberen Stab vom Einschubling in die Rahmenpfosten eingeleitet. Auftretende Querkräfte teilen sich auf beide Stäbe auf (siehe Abb. 5.8). Die Schrauben müssen ausschließlich Scherkräfte übertragen. Für die durchgeführten Traglastversuche wurde die Schraubverbindung für eine Zug-/Druckkraft von 35 kN im Stab dimensioniert (entspricht der rechnerischen Tragfähigkeit eines vollen Panels bei charakteristischer Kombination) und mit 5 x M6 - K70 Senkkopfschrauben ausgeführt.

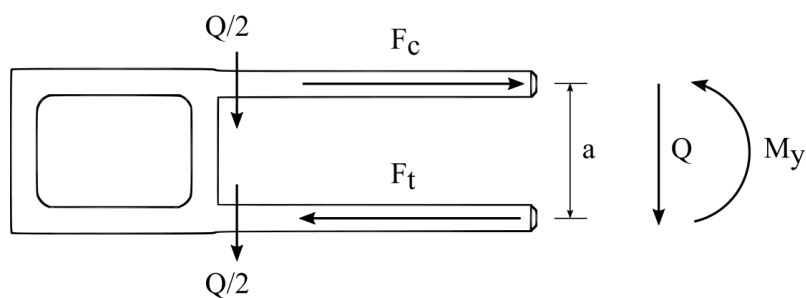


Abb. 5.8: Schnittkräfte im Anschlussbereich Einschubling zu Fensterrahmen

5.1.4 Einschublings-Typen

Die Entwicklung des Einschubling-Mittelteils steht, wie erwähnt, im Fokus der Untersuchung, um folgende Anforderungen erfüllen zu können:

- Aufnahme der Normalspannungen aus dem oberen und unteren Deckblech
- Stabilisierung des druckbeanspruchten Deckblechs gegen Knitterversagen
- Aufnahme der Schubspannungen aus der Kernschicht
- Übertrag der Lasten auf die Einschubling-Seitenteile

Es werden vier Einschublings-Typen mit unterschiedlichen Mittelteilen entwickelt, die jeweils aus Baustahl S235 gefertigt werden. Der Anschluss an die Seitenteile erfolgt durch eine stirnseitige Verschweißung.

Typ 1 - U-Profil 95x50 mm mit Laschen

Bei der ersten Variante besteht das Mittelstück aus einem gekanteten U-Profil (95x50x2 mm) mit auskragenden Laschen (200x130 mm) an den Rändern (siehe Abb. 5.10). Die Deckblechspannungen (Zug/Druck) werden vom Paneel randnah über diese großflächigen Laschen eingeleitet (siehe schematisch dargestellt in Abb. 5.9). Von den Laschen werden die Lasten direkt in die Seitenteile des Einschublings und weiter in die Pfostenprofile des Rahmens übertragen. Der Einschubling besitzt keine relevante Eigenbiegesteifigkeit. Die Verbindung erfolgt mit jeweils 16 x ϕ 4.8 mm Edelstahlnieten zwischen Lasche und Deckblech in versetzter Anordnung. Querkräfte werden durch Kontaktpressung zwischen Paneel-Kern und Einschubling bzw. Zugkräfte in den Nieten übertragen.

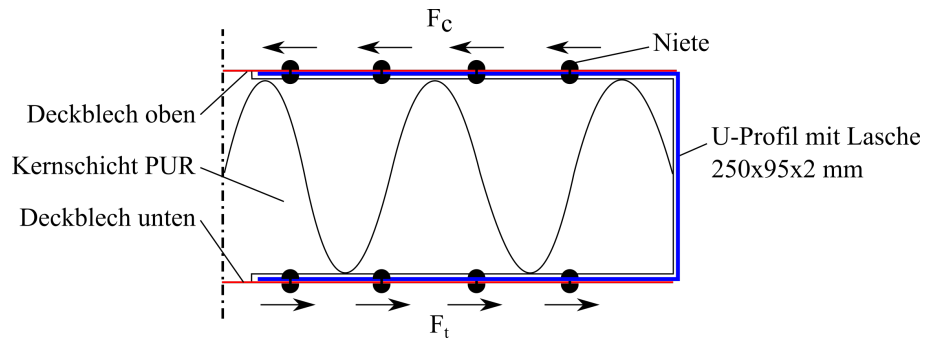


Abb. 5.9: Anschluss Einschubling - Deckblech beim Typ 1 (Schnitt im Bereich der Laschen - schematisch)

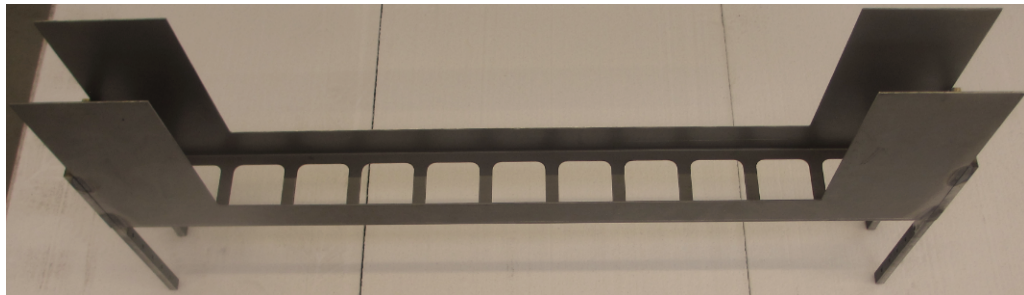


Abb. 5.10: Isometrische Darstellung von Einschubling Typ 1

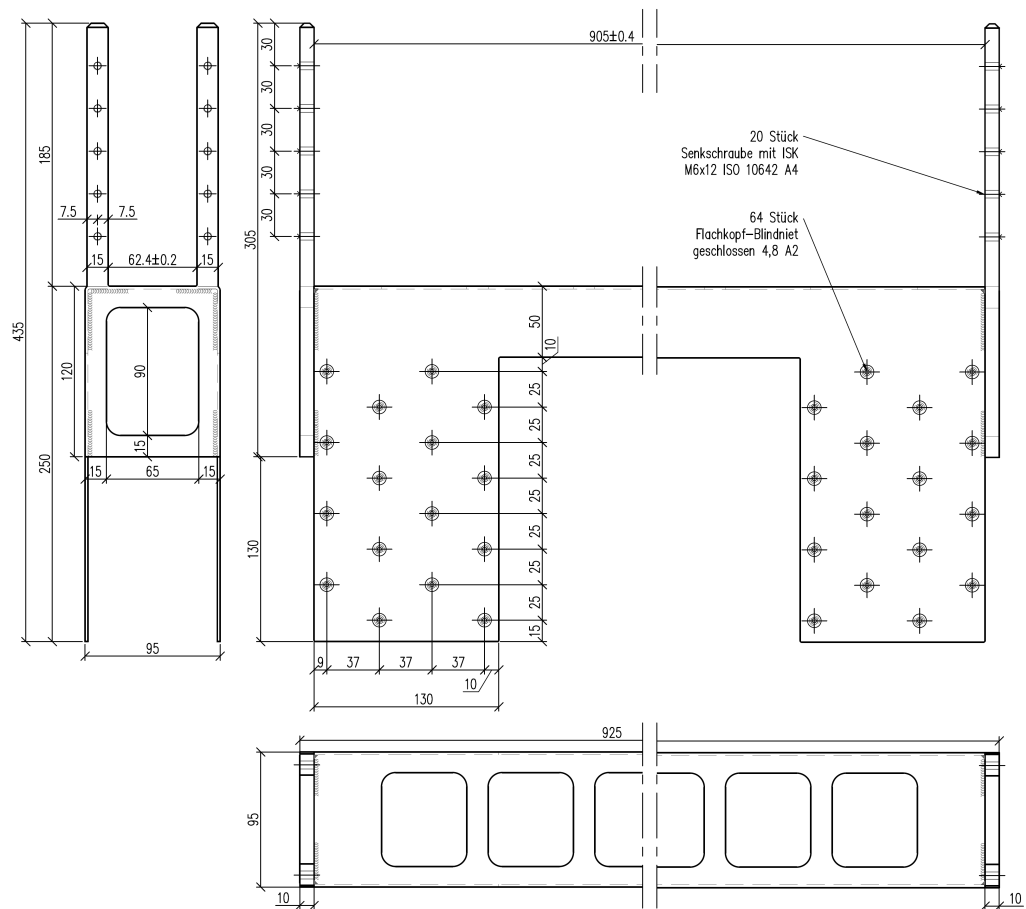


Abb. 5.11: Konstruktionszeichnung von Einschubling Typ 1

Typ 2 - Rohrprofil 90x90 mm

Bei diesem Typ besteht das Mittelteil aus einem quadratischen Formrohr QRO 90x90x4 mm. Auf dieses wird, an der dem Fensterrahmen zugewandten Seite, ein U-Profil mit 95x50x2 mm als Futterblech aufgesteckt und verschweißt, um den Innenabstand der Deckbleche zu erreichen. Auf einer Tiefe von 40 mm verbleibt damit ein Restspalt von 2 mm zwischen Einschubling und Deckblech. Die Konstruktion ist in Abb. 5.12 dargestellt.

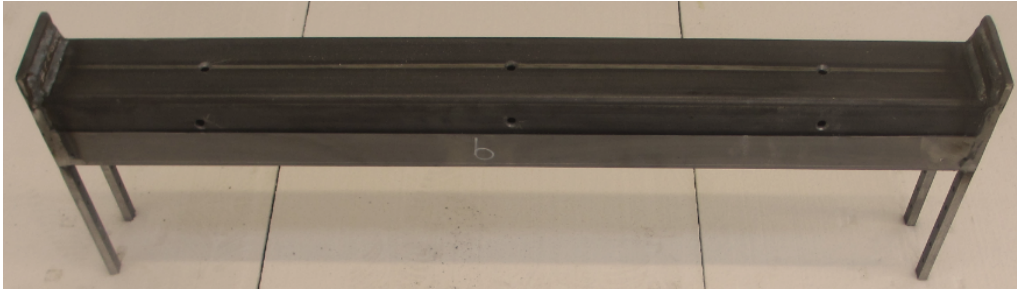


Abb. 5.12: Isometrische Darstellung von Einschubling Typ 2

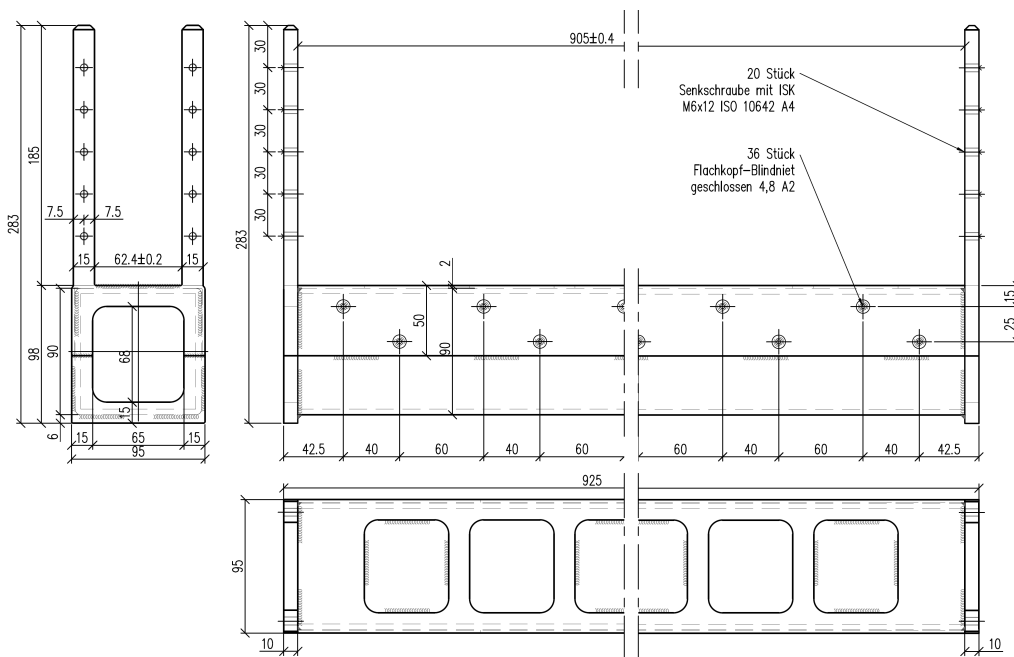


Abb. 5.13: Konstruktionszeichnung von Einschubling Typ 2

Die Deckblechspannung wird über eine zweireihige Vernietung in voller Elementbreite (18 x ϕ 4.8 mm Edelstahlnieten) vom Paneel in den Einschubling übertragen. Die Vernietung erfolgt nur in den Sicken der Deckblech-Mikroprofilierung. Wie in Abb. 5.14 schematisch dargestellt, wirken auf das Formrohr entgegengesetzte Abscherkräfte aus den Nieten (Zug/-Druck). Diese Belastung erzeugt ein Torsionsmoment im Rohr, welches in die Seitenteile des Einschublings abgetragen und als Zug/Druck-Kräftepaar in den Fensterrahmen eingeleitet wird. Um eine, über die Paneelbreite, gleichmäßige Lasteinleitung vom Deckblech in das Mittelteil des Einschublings zu erreichen, muss das Formrohr eine hohe Torsionsteifigkeit aufweisen. Für das eingesetzte Formrohr QRO 90x90x4 mm beträgt dieses $I_T = 260 \text{ cm}^4$.

Zur Stabilisierung des druckbeanspruchten Deckbleches gegen Knitterversagen wird 2-Komponenten-Polyurethan-Schaum (Fischer PU 2/403 B2) in den Fugenspalt zwischen Einschubling und Sandwichpaneel eingebracht. Dieser verbindet sich mit dem Kernmaterial und dem Deckblech und stellt die originale Bettung des Deckbleches wieder her.

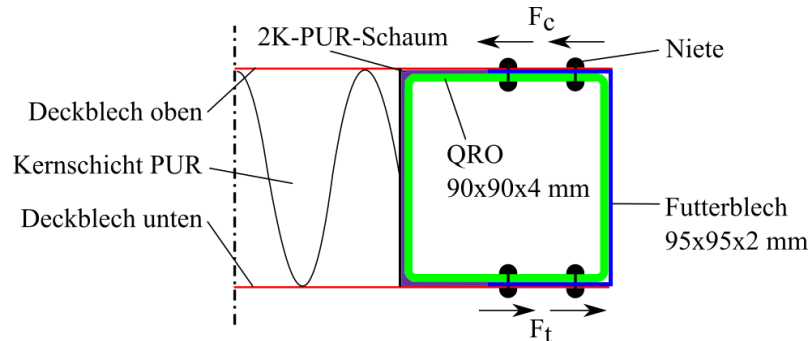


Abb. 5.14: Anschluss Einschubling - Deckblech beim Typ 2 (Schnitt - schematisch)

Typ 3 - Rohrprofil 90x50 mm

Bei dem in Abb. 5.15 dargestellten Einschubling Typ 3 wird ein rechteckiges Formrohr RRO 90x50x4 mm verwendet. Dessen Torsionsträgheitsmoment ist mit $I_T = 97,5 \text{ cm}^4$ deutlich geringer als bei Typ 2. Ansonsten entspricht diese Variante exakt Typ 2. Da Formrohr und U-Profil die gleiche Tiefe aufweisen, entfällt der Restspalt. Die Verklebung mit 2-Komponenten-Polyurethan-Schaum erfolgt daher nur im Fugenspalt zwischen Einschubling und Kernschicht.



Abb. 5.15: Isometrische Darstellung von Einschubling Typ 3

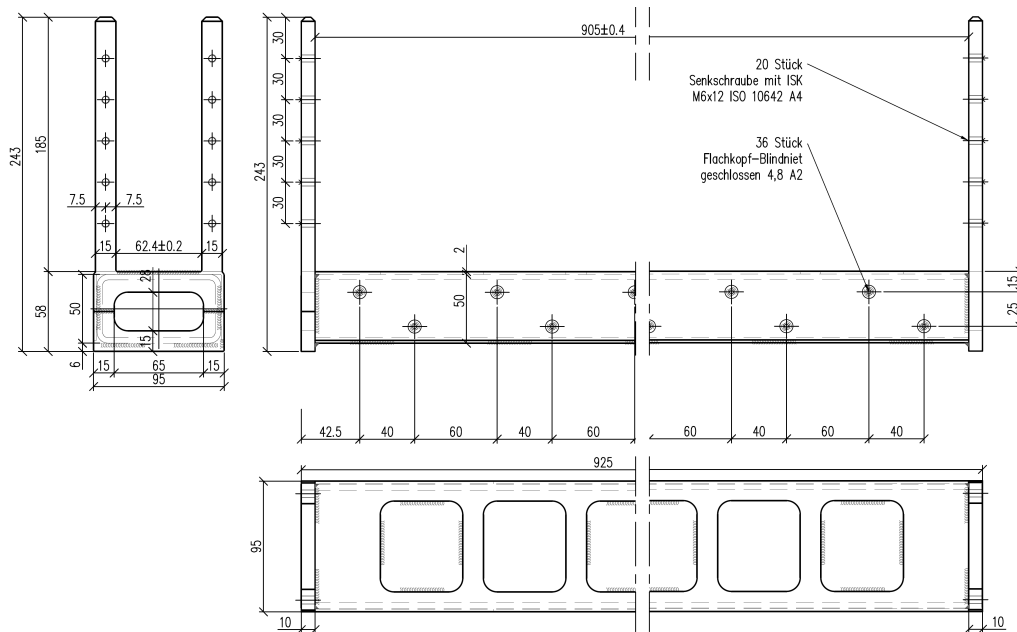


Abb. 5.16: Konstruktionszeichnung von Einschubling Typ 3

Typ 4 - U-Profil 95x50 mm mit Laschen - versteift

Diese letzte Variante ist eine Modifikation von Typ 1. Es werden zusätzlich jeweils zwei Steifen (Blechstärke 2 mm) zwischen den Laschen eingeschweißt, wie in in Abb. 5.17 zu erkennen ist. Damit werden die Laschen gegen ein Ausknicken stabilisiert. Außerdem wird durch diese Verbindungsstege die Biegesteifigkeit des Einschublings im Laschenbereich stark erhöht. Während beim Typ 1 das Flächenträgheitsmoment der zwei Laschen vernachlässigt werden kann, beträgt dieses beim Typ 4 $I_y = 137 \text{ cm}^4$. Die Verbindung erfolgt identisch zu Typ 1 mit jeweils 16 x ϕ 4,8 mm Edelstahlnieten zwischen Laschen und Deckblech. Für die Stabilisierung des druckbeanspruchten Deckbleches wird 2-Komponenten-Polyurethanschaum im Bereich der Laschenenden eingebracht, welcher sich mit dem Kernmaterial und dem Deckblech verbindet.

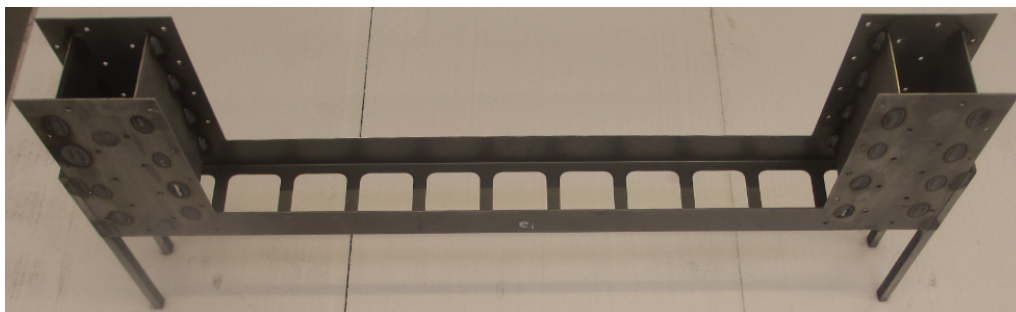


Abb. 5.17: Isometrische Darstellung von Einschubling Typ 4

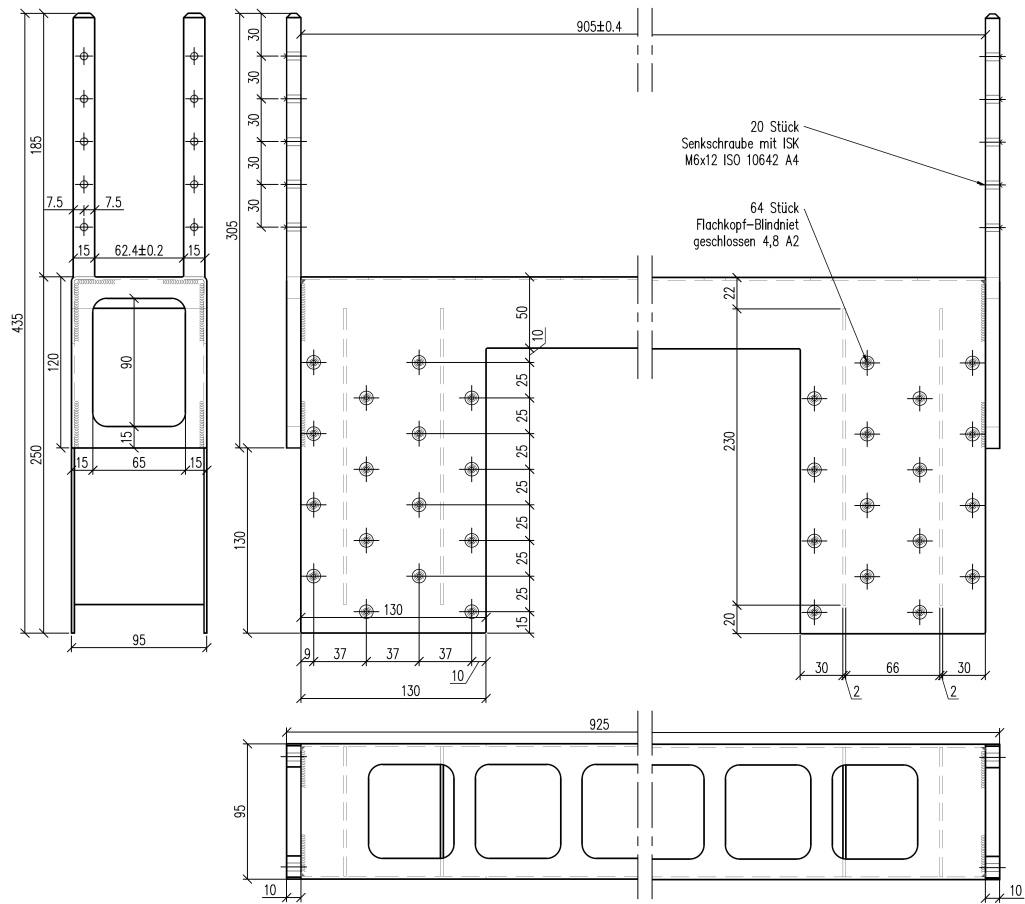


Abb. 5.18: Konstruktionszeichnung von Einschubling Typ 4

5.2 Traglastversuche am Öffnungselement (GSP-Rahmentest)

Um die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten von Öffnungselementen mit unterschiedlichen Einschublingstypen bei Querbelastung (z.B. Wind, Temperatur) zu beurteilen, wurden Traglastversuche durchgeführt (exemplarisch dargestellt in Abb. 5.2). Die Versuche wurden zwischen Mai und Juli 2016 im Versuchslabor von iconic skin ausgeführt und werden folgend als GSP-Rahmentest bezeichnet. Es wurde meist nur ein Probekörper pro Einschublingstyp geprüft, weshalb die Testreihe unter die Kategorie Orientierungsversuche eingestuft wird.



Abb. 5.19: GSP-Rahmentest

5.2.1 Probekörper

Tab. 5.3 bietet eine Übersicht der untersuchten Probekörper. Die Anzahl von Schrauben und Nieten bezieht sich auf den gesamten Probekörper. Mit Probekörper 4000-1 wurde ein volles Paneel als Referenz getestet.

Tab. 5.3: Übersicht Probekörper beim GSP-Rahmentest

Probekörper	Einschubling	Anzahl Nieten	Anzahl Schrauben	Verklebung
4000-1	volles Paneel	-	-	-
4000-2	Typ 1	128	40	-
4000-5	Typ 1	92	24	-
4000-11	Typ 2	72	40	2K-PUR-Schaum
4000-12	Typ 3	72	40	2K-PUR-Schaum
4000-13	Typ 4	128	40	2K-PUR-Schaum
4000-21	Typ 3	72	40	2K-Klebstoff

Herstellung der Probekörper

Zur die Herstellung der Probekörper wurde zunächst die Negativform des jeweiligen Einschublings manuell aus der Kernschicht des Paneels ausgeschnitten (siehe am Beispiel von Einschubling Typ 1 in Abb. 5.20 (links)). In Abb. 5.20 (rechts) sind die Ausschnitte für die Einschubling Typen 2 bis 4 dargestellt.



Abb. 5.20: Herstellen der Einschubling-Negativformen im Paneel bei Typ 1 (links) bzw. vollendete Negativformen bei Typ 2-4 (rechts)

Die Einschublinge vom Typ 1 wurden extern gefertigt. Für die Herstellung der Typen 2-4 wurden Einschublinge des Typ 1 manuell im Versuchslabor modifiziert. Für Typ 2 und Typ 3 wurde das Mittelteil entfernt und durch das entsprechende Formrohr ersetzt. Für das U-Profil (Futterblech) wurde das entfernte Mittelstück genutzt, welches um 10 mm gekürzt und dessen Laschen entfernt wurden. Außerdem wurden die Rahmenbereiche der Seitenteile an die Abmessungen des Mittelstückes angepasst, um stirnseitig eine umlaufende Verschweißung zu ermöglichen. Für Typ 4 wurden ebenfalls Einschublinge des Typs 1 modifiziert, indem zwischen den Laschen beidseitig je zwei Stege eingeschweißt wurden.

Im nächsten Schritt erfolgte die Verbindung von Einschubling und Paneel. Bei Probekörper 4000-2 und 4000-5 (jeweils Typ 1) wurde der Einschubling eingeschoben, die Nietlöcher gebohrt und die Nieten eingebracht. Bei Probekörper 4000-11 (Typ 2) und Probekörper 4000-12 (Typ 3) wurde in die Innenkanten der Paneel-Ausschnitte ein 2-Komponenten PUR-Schaum (Fischer PU 2/403 B2) eingebracht. Unmittelbar danach wurden die Einschublinge eingeschoben und in der Lage fixiert. Nach der Aushärtung des PUR-Schaums wurden Nietlöcher und Vernietung hergestellt. Die Herstellung von Probekörper 4000-21 erfolgte nach selbigem Prinzip, nur dass ein 2-Komponenten-Klebstoff (SikaForce 7710 L35) in den Paneelausschnitt eingefüllt wurde. Damit sollte durch Verklebung von Deckblech und Einschubling die Nachgiebigkeit der Verbindung reduziert werden. Für Probekörper 4000-13 (Typ 4) wurde der Einschubling zunächst eingeschoben und vernietet. Danach wurde der PUR-Schaum in die Hohlkammern des Einschublings eingebracht.

Der Zusammenbau der Fensterrahmen erfolgte durch Verbindung der Pfosten- und Riegelprofile mit Eckverbindern und zusätzlicher Verklebung mit 2-Komponenten Klebstoff (SikaFast 5221 NT). Abschließend wurden die beiden Paneele mit den eingebauten Einschublingen und der Fensterrahmen zusammengeschoben und im Bereich der Einschubstäbe mit dem Rahmen verschraubt (exemplarisch gezeigt für Probekörper 4000-13 in Abb. 5.21).

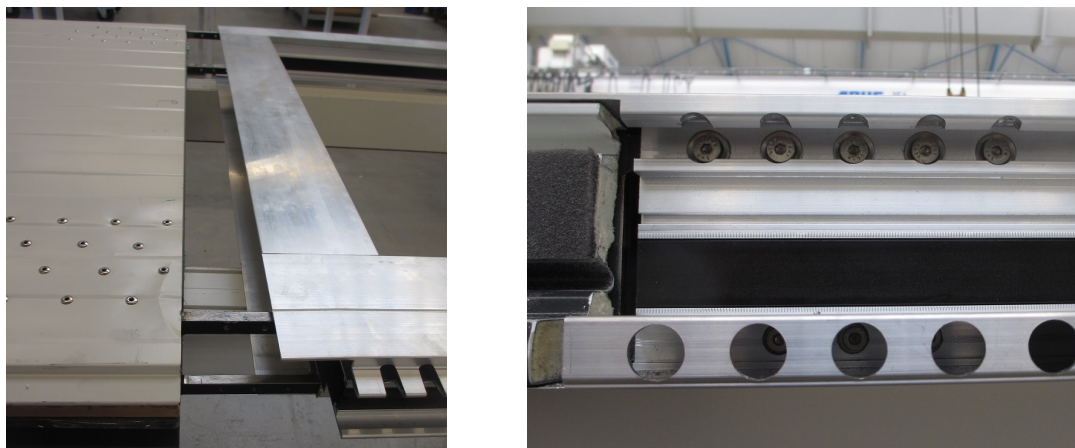


Abb. 5.21: Zusammenbau von Sandwichpaneel und Fensterrahmen bei Probekörper 4000-13 (Einschubling Typ 4)

5.2.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau orientierte sich weitgehend an Kapitel A.5 *Prüfung zur Bestimmung des aufnehmbaren Biegemoments eines Einfeld-Elementes* aus EN 14509 [5] und wurde als 6-Punkt-Biegeversuch durchgeführt (siehe Abb. 5.22). Durch diese Belastungsanordnung ergibt sich dasselbe, maximale Biegemoment wie bei betragsmäßig adäquater, gleichmäßig verteilter Gesamtlast. Abweichend zu EN 14509 wurden nicht beide Lagen, sondern nur die Negativlage geprüft. Bei dieser liegt das innere Deckblech oben und erfährt Druckspannungen (entspricht z.B. Windsog, Temperaturbelastung im Sommer). Diese Vereinfachung basiert auf der Annahme, dass das dünnere, innere Deckblech stets maßgebend für die erwartete Versagensart Knittern ist.

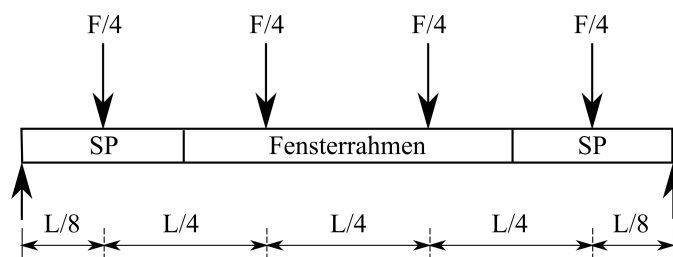


Abb. 5.22: Lasteinleitung und Schnittkraftverteilung beim 6-Punkt-Biegeversuch

Es wurde ein Fensterrahmen mit einer Länge von 2000 mm eingebaut, der mittig im Öffnungspaneel lag. Die beiden Sandwichpaneele hatten jeweils eine Länge von 1000 mm. Die Gesamtlänge betrug damit 4000 mm, die Spannweite ergab sich durch die Auflagerung zu 3800 mm. Eine Darstellung des Versuchsaufbaus mit den Hauptabmessungen ist in Abb. 5.23 dargestellt. In Anhang A1 ist eine detaillierte Darstellung mit Beschriftung und Schnitt beigefügt.

Zur Sicherstellung eines Biegeversagens der Deckschichten (anstatt Schubversagen des Kerns) ist gemäß Tabelle A.1 in EN 14509 eine Mindeststützweite von 6000 mm für eine Paneeldicke von 100 mm nötig. Statische Berechnungen ließen beim gewählten Paneel-Typ das gewünschte Biegeversagen jedoch auch für die vorhandene Stützweite von 3800 mm erwarten. Deshalb wurde die Abweichung zur Norm als unkritisch eingestuft.

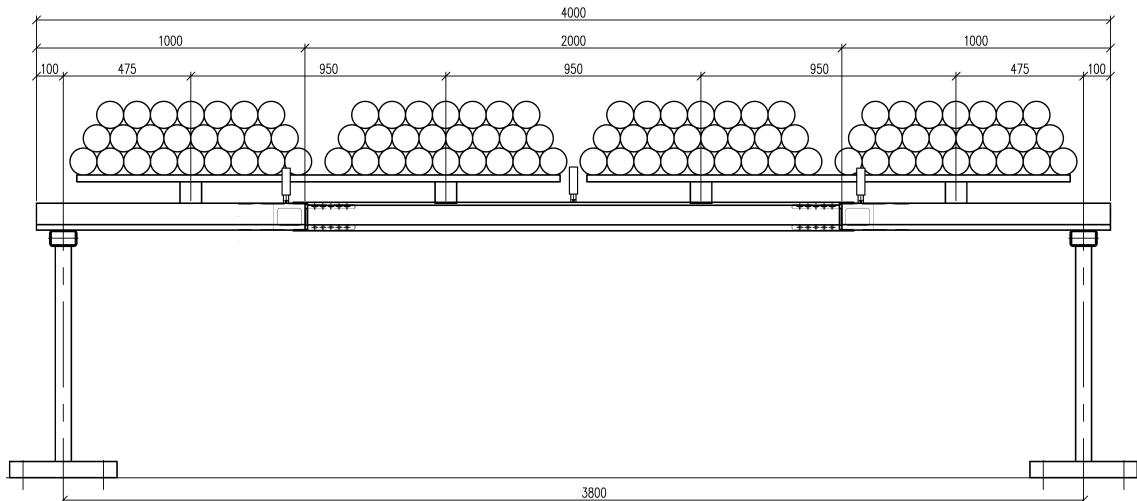


Abb. 5.23: Übersicht Versuchsaufbau beim GSP-Rahmentest

Die Belastung erfolgte in Laststufen von rund 90 kg (oder geringer) mittels Sandsäcken, die gewogen und anschließend gleichmäßig auf zwei Lastverteiler-Konstruktionen verteilt wurden. Von diesen erfolgte die Lasteinleitung in das Öffnungselement. Eine Lastverteiler-Konstruktion (siehe Abb. 5.24) bestand aus einer doppelten OSB-Platte und zwei Querträgern, wobei die Querträger die Mindestbreite der Lasteinleitung von 80 mm gemäß EN 14509 sicherstellten. Die Masse der Lastverteiler-Holzkonstruktion wurde gewogen und als erster Lastschritt der Gesamtbelastung angerechnet.



Abb. 5.24: Lastverteiler-Konstruktion beim GSP-Rahmentest

Die Lagerung erfolgte beidseitig auf Lagerböcken, welche zur Kippsicherung im Boden verschraubt wurden. Die in EN 14509 angegebene Mindestauflagerbreite von 100 mm wurde durch eine Lastverteilerplatte zwischen Lagerbock und Probekörper realisiert (siehe Abb. 5.25). Diese stellte auch eine behinderungsfreie Verdrehung des Elementes sicher.

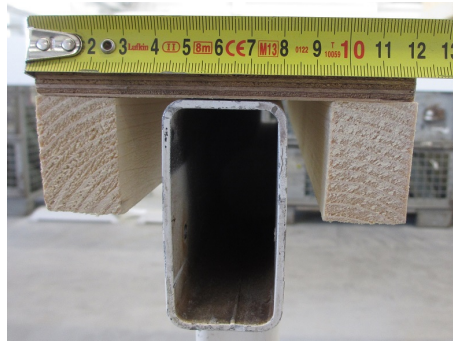


Abb. 5.25: Lastverteilerplatte im Auflagerbereich beim GSP-Rahmentest

Verformungsmessung

Die vertikalen Durchsenkungen wurden für alle Probekörper mit sechs Wegaufnehmern des Herstellers HBM mit einem Messbereich von 100 mm aufgezeichnet. Sie werden folgend als WA-1 bis WA-6 abgekürzt. Die Messstellen waren beidseitig am Öffnungsrand und in Öffnungsmitte angeordnet (dargestellt in Abb. 5.26). Die genaue Position ist in der Übersichtszeichnung des Versuchsaufbaus im Anhang A1 ersichtlich. Die Aufzeichnung der Verformungen wurde mit dem Softwareprogramm Catman Easy V4.2 und dem Messverstärker-Typ Spider 8 der Firma HBM durchgeführt. Die Zuordnung der Lastschritte zur Durchsenkung erfolgte im Zuge der Auswertung manuell. Bei den Probekörpern 4000-11, 4000-12 und 4000-21 war der Messbereich für die Wegaufnehmer nicht ausreichend, weshalb diese während des Prüfvorganges einmal nachgestellt wurden.

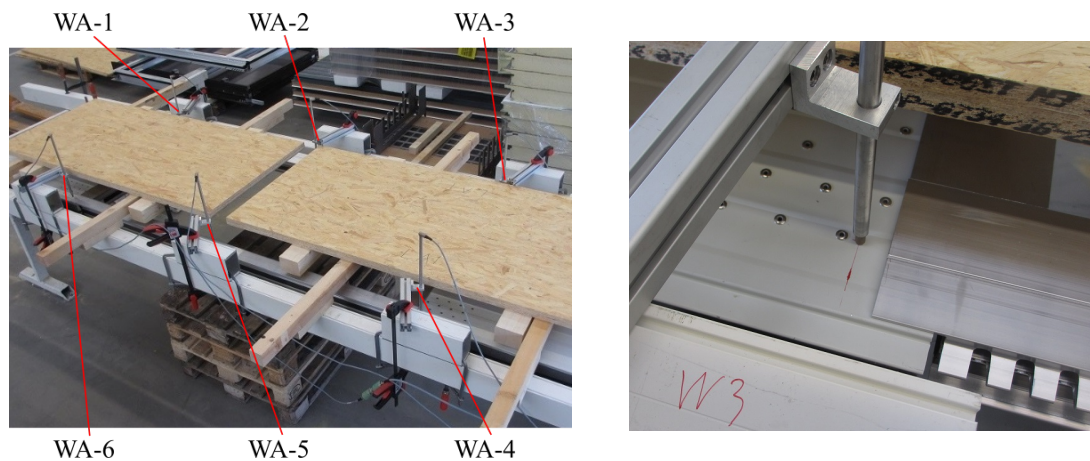


Abb. 5.26: Übersicht der Wegaufnehmer (links) und Nahaufnahme von Wegaufnehmer WA-3 (rechts) beim GSP-Rahmentest

DMS-Messung

Beim Probekörper 4000-21 wurden, neben den Verformungen, auch Verzerrungen in der oberen Deckschicht mit fünf Dehnmessstreifen gemessen. Eine Umrechnung von Verzerrungen auf Spannungen erfolgte linear mit dem Hook'schen Gesetz ($\sigma = E \cdot \varepsilon$). Für den E-Modul der Deckbleche wurde ein Wert von 210000 N/mm^2 festgelegt. Es wurden Rosetten-Dehnmessstreifen vom Typ RY41-6/120 des Herstellers HBM verwendet, wodurch

die Spannungen parallel und quer zur Bauteilachse, sowie die Hauptspannungen und die Hauptrichtung ermittelt werden konnten. Sie werden folgend abgekürzt als DMS-1 bis DMS-5 bezeichnet. Die Dehnmessstreifen wurden in den Sicken der Mikro-Profilierung im Bereich des Öffnungsrandes (bei $x=815\text{ mm}$) verteilt über die Paneelbreite appliziert (siehe Abb. 5.27). Die genauen Positionen können der Übersichtszeichnung des Versuchsaufbaus im Anhang A1 entnommen werden. Eine exakt symmetrische Anordnung war aufgrund der Sickenverteilung nicht möglich, weshalb der mittlere Dehnmessstreifen (DMS-3) leicht versetzt angeordnet werden musste.

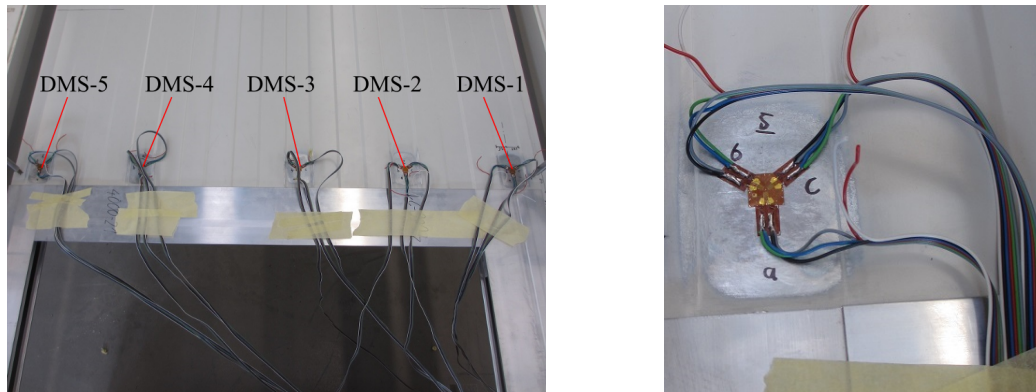


Abb. 5.27: Übersicht der Dehnmessstreifen (links) und Nahaufnahme von DMS-5 beim Probekörper 4000-21 (Einschubling Typ 3)

Auf eine Temperaturkompensation wurde aufgrund der konstanten Temperaturbedingungen während der kurzen Belastungsdauer verzichtet. Deshalb wurden alle DMS in einer Viertelbrückenschaltung angeschlossen. Die Aufzeichnung der Dehnungen wurde mit dem Softwareprogramm Catman Easy V4.2 und dem Messverstärker-Typ QuantumX 16-15 B der Firma HBM durchgeführt. Die Zuordnung der Lastschritte zu den Spannungen erfolgte manuell bei der Versuchsauswertung.

5.2.3 Ergebnisse und Auswertung

Ergebnisübersicht

In Tab. 5.4 ist eine Übersicht der Ergebnisse aus dem GSP-Rahmentest dargestellt. Die Traglast bezieht sich stets auf die externe Belastung ohne Eigengewicht. F_{lokal} gibt jene Traglast an, bei der (bei einigen Probekörpern) ein lokales Versagen bereits deutlich vor Erreichen der globalen Traglast F_{global} sichtbar wurde. Alle Öffnungselemente versagten im Bereich des Öffnungsrandes. Das zugehörige Biegemoment am Öffnungsrand (M_{lokal} bzw. M_{global}) wird mit den Abmessungen aus Abb. 5.23 nach Gl. (5.1) ermittelt. Für das volle Paneel (PK-4001) wird das Biegemoment an der Versagenstelle bei $x = 2375\text{ mm}$ angegeben. Mit $w_{P2,max}$ wird die maximale Durchsenkung in Bauteilmitte (Position 2) angegeben, mit $w_{P1,max}$ (Position 1) jene am Öffnungsrand bei $x=830\text{ mm}$.

$$M_{\text{ÖR}} = M_{(x=0.9\text{m})} = \frac{F}{2} \cdot 0.9 - \frac{F}{2} \cdot 0.425 = F \cdot 0.344 \quad (5.1)$$

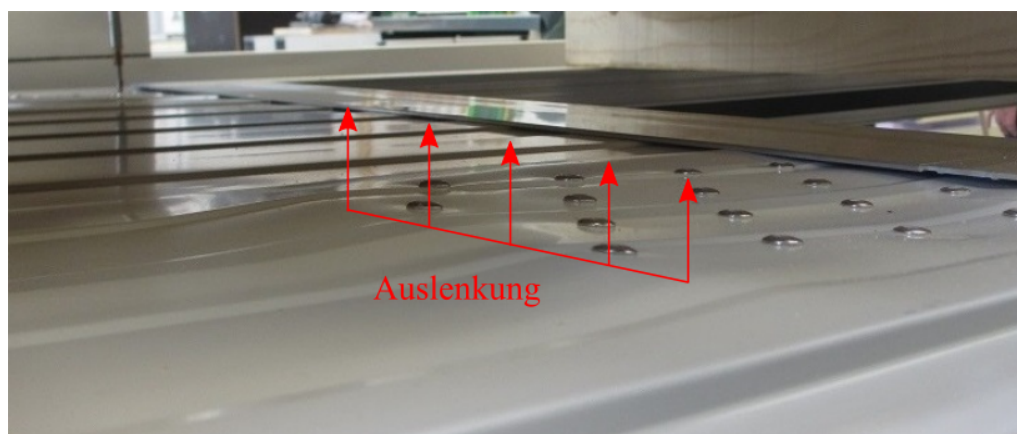
Tab. 5.4: Übersicht der Ergebnisse des GSP-Rahmentests

Probekörper	Einschubling	F_{lokal} [kg]	F_{global} [kg]	M_{lokal} [kNm]	M_{global} [kNm]	$w_{P2,max}$ [mm]	$w_{P1,max}$ [mm]
4000-1	volles Paneel	-	1439	-	6.84	35.7	23.8
4000-2	Typ 1	470	699	1.62	2.40	65.2	58.6
4000-5	Typ 1	439	801	1.51	2.76	71.9	55.9
4000-11	Typ 2	-	1661	-	5.71	152.2	113.0
4000-12	Typ 3	-	1520	-	5.23	153.9	122.0
4000-13	Typ 4	1132	1278	3.89	4.39	103.6	74.4
4000-21	Typ 3	-	1668	-	5.74	138.5	107.2

Traglast und Versagensform

Das volle Paneel (4000-1) versagte schlagartig durch Ausbildung einer Knitterfalte über die gesamte Bauteilbreite.

Probekörper 4000-2 und 4000-5 erreichten, verglichen mit dem vollen Paneel, nur eine Traglast von rund 30% und ein (auf die Versagensstelle bezogenes) Tragmoment von 23%. Beide Probekörper wurden mit dem Einschubling vom Typ 1 (U-Profil mit Laschen) ausgeführt. Es wurde ein Stabilitätsversagen des druckbelasteten, oberen Deckblechs im Vernietungsbereich mit der Lasche des Einschublings beobachtet (lokales Versagen). Wie in Abb. 5.28 abgebildet, weicht das freie Ende der Lasche nach außen aus. Der fehlende Verbund mit der PUR-Kernschicht wird als Ursache vermutet, da keine Stabilisation von Deckblech und Lasche erfolgen kann.

**Abb. 5.28:** Lokales Versagen des Probekörpers 4000-2 (Einschubling Typ 1)

Durch weitere Belastungssteigerung wurde die Instabilität ausgeprägter, bis globales Versagen durch Knittern der oberen Deckschicht eintrat (siehe Versagensbild in Abb. 5.29). Die Knitterfalte verläuft nicht über die gesamte Bauteilbreite. Stattdessen stellten sich, außerhalb des Vernietungsbereiches, zwei getrennte Falten schräg über die Paneelecken ein. Als Ursache wird die Spannungsverteilung vermutet. Die bei Sandwichpaneelen normalerweise gleichmäßig verteilten Deckblechspannungen konzentrieren sich in den Vernietungsbereichen am Rand. Es wird dadurch ein sprengwerkähnlicher Lastpfad mit zwei Druckstreben und

einer Zugstrebe angenommen (siehe schematisch dargestellt in Abb. 5.29). Die Knitterfalten bilden sich normal auf die Druckstreben aus.

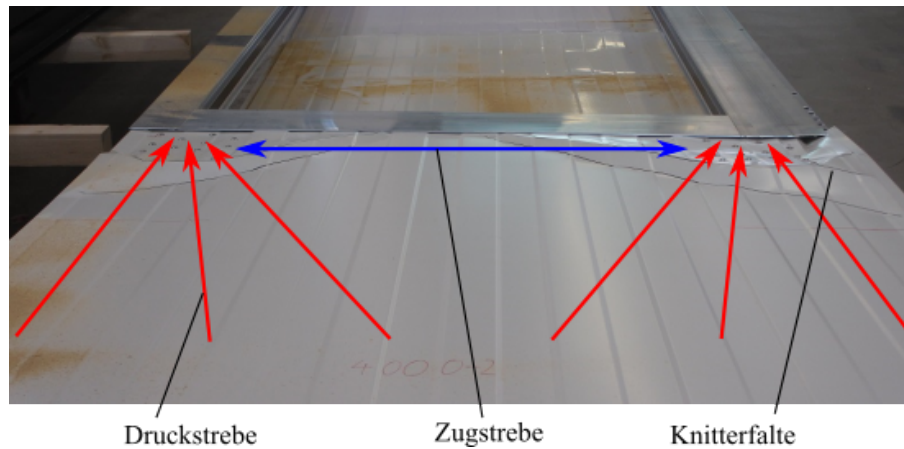


Abb. 5.29: Globales Versagen des Probekörpers 4000-2 (Einschubling Typ 1) mit Sprengwerkbildung (schematisch)

Der Probekörper 4000-11 wurde mit dem Einschubling vom Typ 2 (Rohrprofil 90x90 mm) ausgeführt, die Probekörper 4000-12 und 4000-21 jeweils mit Typ 3 (Rohrprofil 90x50 mm). Alle drei Bauteile erreichten eine globale Traglast von rund 1600 kg, womit diese rund 10 % höher als jene des vollen Paneels (PK 4000-1) ist. Bezogen auf das maximale Biegemoment wurden rund 80 % des vollen Paneels erreicht. Das Versagen erfolgte jeweils plötzlich durch Entstehen einer elementbreiten Knitterfalte, die sich in einem der Anschlussbereiche zwischen Einschubling und Paneel ausbildete (siehe Abb. 5.30). Das Versagensbild gleicht jenem beim vollen Paneel (PK 4000-1).

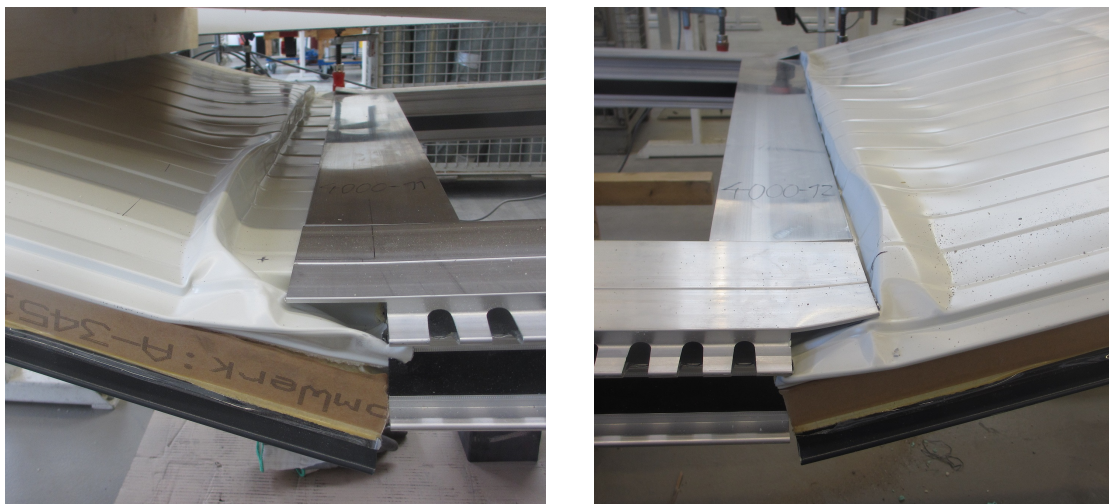


Abb. 5.30: Versagensbild bei den Probekörpern 4000-11 mit Einschubling Typ 2 (links) und 4000-12 mit Einschubling Typ 3 (rechts)

Sowohl durch den Einsatz von 2K-PUR-Schaum (PK 4000-11 und 4000-12) als auch von 2K-Klebstoff (PK 4000-21) konnte ein Verbund zwischen Deckblech und Kernmaterial im Übergangsbereich hergestellt werden. Das Ablösen des Deckblechs beim Knitterversagen begann erst im Bereich des originalen Verbundes, wie im Querschnitt des Anschlussbereiches von PK 4000-12 in Abb. 5.31 erkennbar ist.

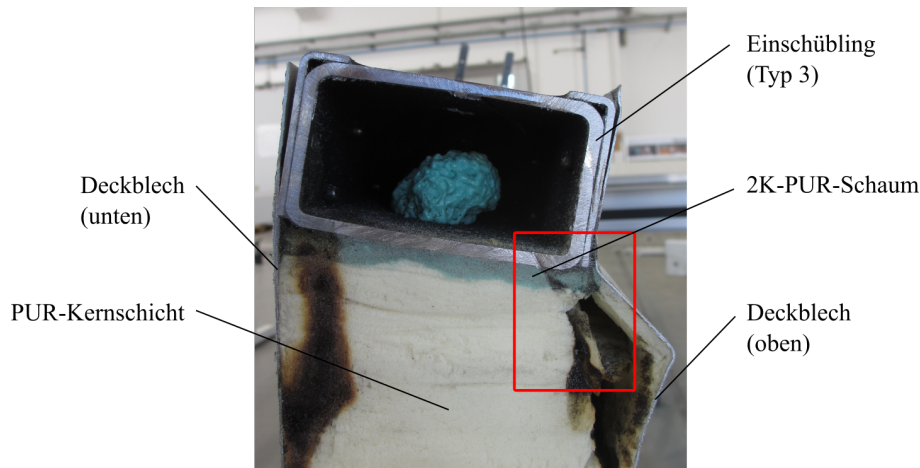


Abb. 5.31: Querschnitt bei Probekörper 4000-12 (Einschubling Typ 3)

Beim Probekörper 4000-13 mit dem Einschubling vom Typ 4 (U-Profil mit Laschen - versteift) konnte wie bei Typ 1 ein lokales Stabilitätsversagen im Vernietungsbereich beobachtet werden. Dieses trat jedoch erst geringfügig unterhalb der globalen Traglast ein. Im Vergleich zum vollen Paneel (PK 4000-1) konnten 80 % von dessen Traglast und knapp 60 % des bezogenen Tragmomentes erreicht werden. Das globale Versagen erfolgte wiederum durch Knittern der oberen Deckschicht. Die Knitterfalte bildete sich über die ganze Elementbreite aus, jedoch nicht gleichförmig (siehe Abb. 5.32, linkes Bild). Das untere Deckblech wurde durch die Verdrehung des Einschublings nach außen weggedrückt, wie in Abb. 5.32 auf dem rechten Bild gut erkennbar ist.

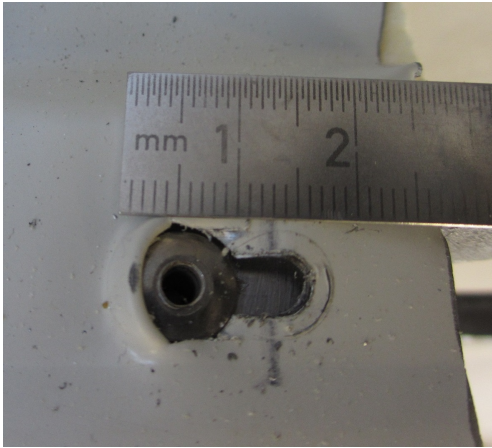


Abb. 5.32: Versagensbild beim Probekörper 4000-13 (Einschubling Typ 4) an der Oberseite (links) und Unterseite (rechts)

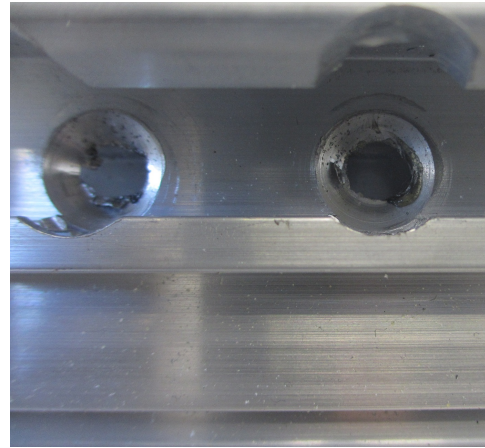
Verbindungsmittel

Bei den Probekörpern 4000-11, 4000-12 und 4000-21, welche die höchsten Traglasten erreichten, konnte im Bereich der Nietverbindungen zwischen Einschubling und Paneel-Deckblech eine deutliche Langlochbildung von bis zu 10 mm beobachtet werden (siehe

Abb. 5.33a). Bei den übrigen Probekörpern, die nur geringere Traglasten erreichten, bildeten sich keine Langlöcher. Beim Probekörper 4000-21 konnte die geplante Verklebung zwischen Deckblech und Einschubling nicht erfolgreich hergestellt werden, da sich kein adhäsiver Haftverbund zwischen dem Klebstoff und dem Einschubling entwickelte.



(a) Langlochbildung im Deckblech bei der Ver-
nietung des Probekörper 4000-12 (Typ 3)



(b) Langlochbildung im Pfostenprofil bei der Ver-
schraubung des Probekörper 4000-12 (Typ
3)

Bei der Schraubverbindung zwischen dem Einschubling und dem Fensterrahmen war bei hohen Traglasten ebenfalls eine klare Langlochbildung erkennbar. Wie in Abb. 5.33b am Beispiel von Probekörper 4000-12 dargestellt, bildeten sich diese in den Senklöchern des Aluminium-Pfostenprofils aus. Die steilen Flanken der Senklöcher wurden durch die Abscherbelastung eingedrückt. Die Verbindung mit Senkkopfschrauben wird als ungeeignet für diese Anwendung betrachtet. Vorschläge für eine alternative Ausführung werden im Kap. 5.5 diskutiert.

Ergebnisse der Verformungsmessung

Im folgenden werden Ergebnisse der Verformungsmessung beim GSP-Rahmentest gezeigt. Zur besseren Übersicht sind nur Ergebnisse an der Bauteilseite von Pfostenprofil 1 dargestellt (Wegaufnehmer WA-1 bis WA-3). Die Ergebnisse auf der gegenüberliegenden Bauteilseite (Wegaufnehmer WA-4 bis WA-6) weisen qualitativ ähnliche Ergebnisse auf und sind im Anhang A2 beigefügt.

Abb. 5.34 zeigt die Last-Verformungs-Kurve für den Wegaufnehmer WA-1 am Öffnungsrand (Position P1, $x = 830$ mm). Abb. 5.35 zeigt jene für den Wegaufnehmer WA-2 in Feldmitte (Position P2, $x = 1900$ mm). In beiden Abbildungen ist klar ersichtlich, dass das volle Sandwichpaneel (PK 4000-1) eine deutlich höhere Biegesteifigkeit als sämtliche Öffnungspaneele aufweist. Auffallend ist zudem, dass alle Öffnungspaneele, unabhängig vom Einschublingstyp, eine sehr ähnliche Last-Verformungskurve haben. Probekörper 4000-5 wurde nach Erreichen der lokalen Tragfähigkeit entlastet und wieder belastet, wobei sich ein erheblicher Schlupf zeigt. Die Werte von WA-3 sind aufgrund der Symmetrie jenen von WA-1 betragsmäßig ähnlich, die entsprechende Last-Verformungskurve ist ebenso im Anhang A2 enthalten.

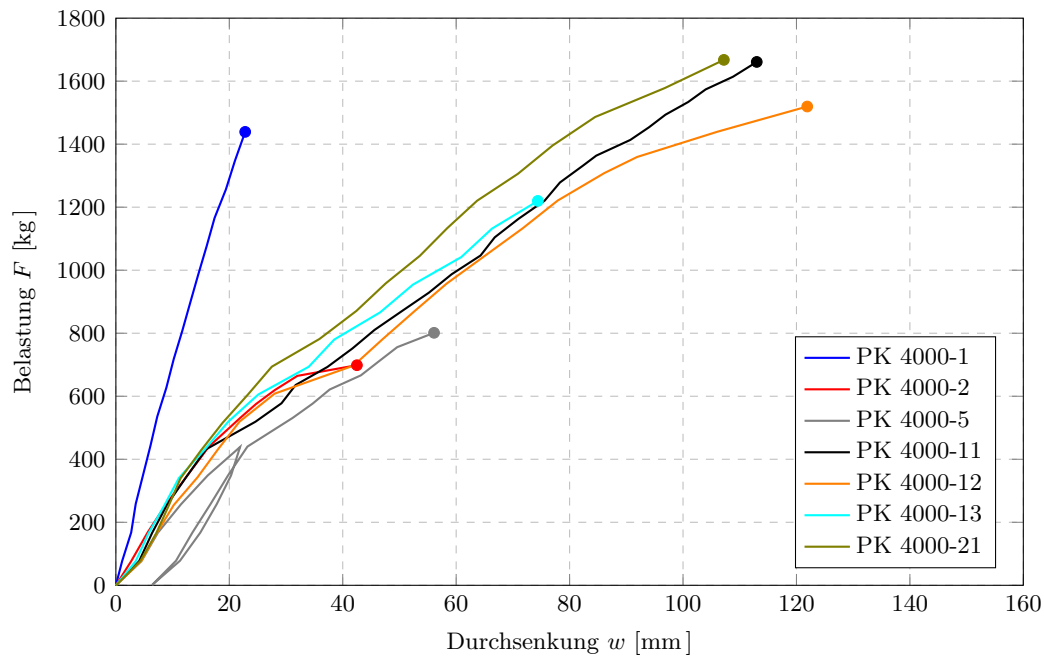


Abb. 5.34: Last-Verformungskurven für Wegaufnehmer WA-1 (Öffnungsrand)

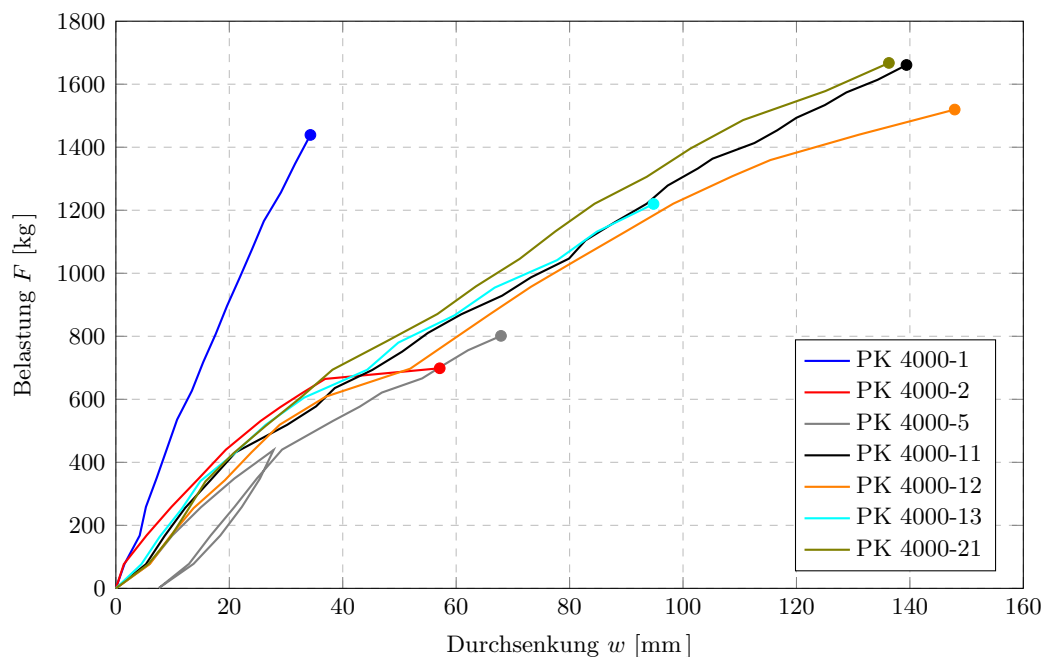


Abb. 5.35: Last-Verformungskurven für Wegaufnehmer WA-2 (Feldmitte)

Um die Verformungseigenschaften des zusammengesetzten Öffnungselementes genauer zu beurteilen, wird in Abb. 5.36 die, linear zwischen den drei Messpunkten und den Auflagern, interpolierte Biegelinie abgebildet. Sie zeigt die Durchsenkungen für eine Belastung von 600 kg, wofür die gemessenen Verformungen linear auf diesen Wert skaliert wurden. Der Belastungswert von 600 kg entspricht einer Flächenlast von knapp 1.6 kN/m^2 . Er wurde gewählt, da alle Probekörper einen relativ linearen Last-Verformungs-Verlauf bis zu dieser

Laststufe zeigten. Probekörper 4000-5 wird aufgrund der Vorverformung aus Ent- und Wiederbelastung nicht berücksichtigt.

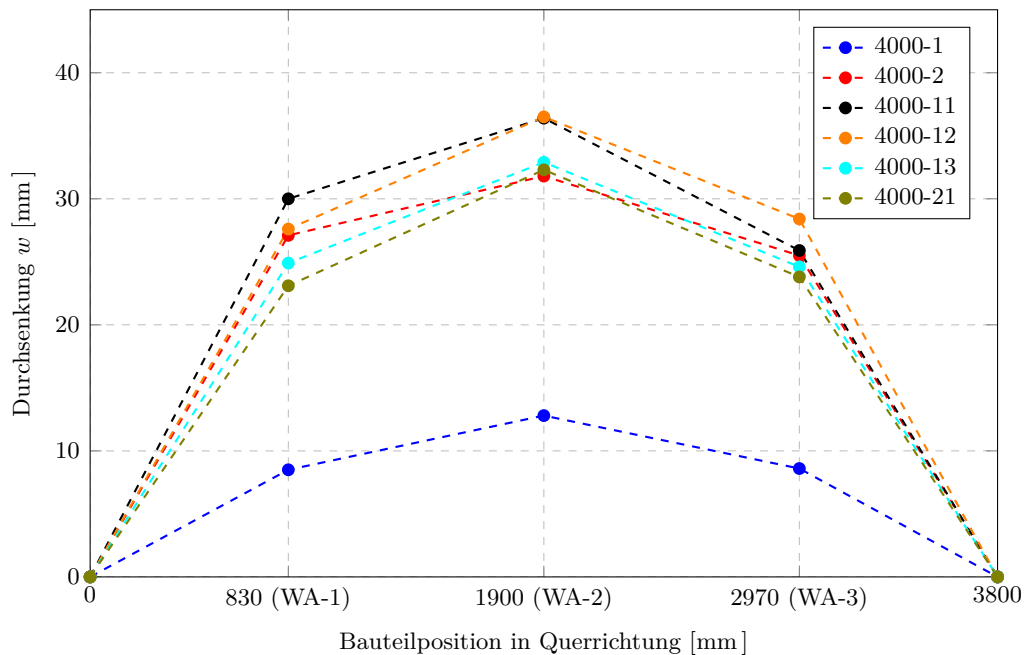


Abb. 5.36: Durchsenkungen bei Pfostenprofil 1 für $F = 600$ kg

Wie bereits in den Last-Verformungs-Kurven, ist auch in diesem Diagramm die deutlich höhere Biegesteifigkeit des vollen Panels (PK 4000-1) ersichtlich. Im Bereich der Öffnungsränder sind die Verformungen der Öffnungselemente zwischen 170 % und 250 % höher als jene des vollen Panels. In Feldmitte dagegen nur zwischen 150 % und 185 %. Daraus schließt sich, dass die Biegelinien des vollen Panels und der Öffnungselemente nicht nur betragsmäßig, sondern auch in der Form voneinander abweichen.

Ergebnisse der Spannungsmessung

Bei Probekörper 4000-21 mit Einschubling Typ 3 (Rohr 90x50 mm) kamen Rosetten-Dehnmessstreifen zur Erfassung von Dehnungen bzw. Spannungen am Deckblech zur Anwendung. Ausgewählte Ergebnisse der Untersuchung werden im Folgenden gezeigt. Weitere Ergebnisse sind im Anhang A3 beigefügt. In Abb. 5.37 sind die gemessenen Spannungs-Last-Kurven der Dehnmessstreifen DMS-1 bis DMS-5 für die Spannung in Bauteillängsrichtung (X-Achse) dargestellt.

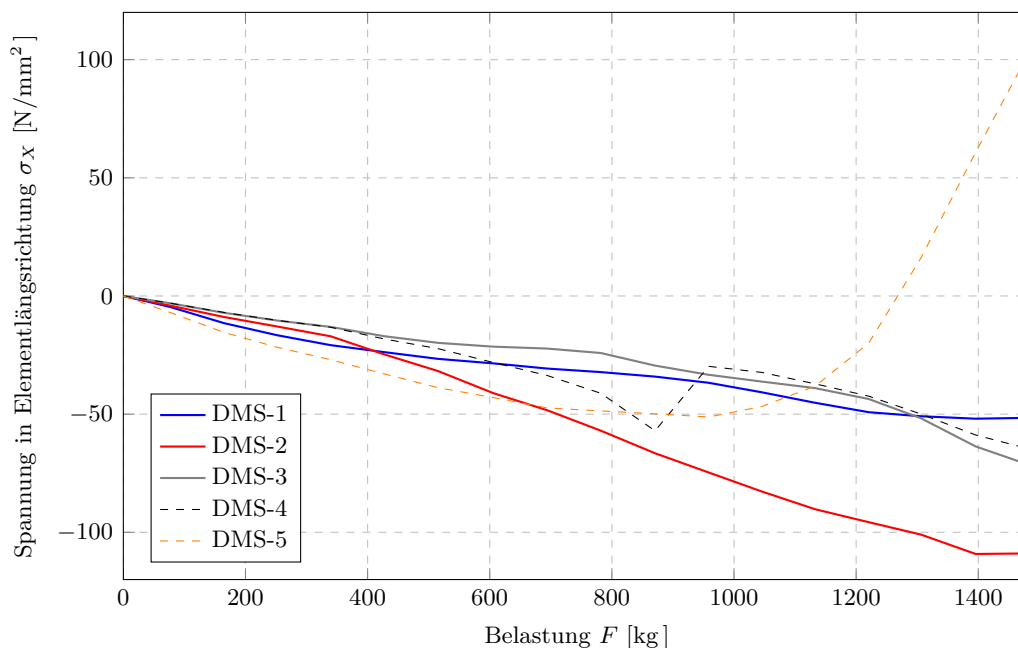


Abb. 5.37: Spannungs-Last-Kurven für σ_x in Bauteillängsrichtung (Probekörper 4021, Einschubling Typ 3)

In Abb. 5.37 ist erkennbar, dass die Spannungs-Last-Kurven der Dehnmessstreifen DMS-4 und DMS-5 atypische Verläufe aufweisen. Bei DMS-4 erfolgt ein plötzlicher Spannungsabfall zwischen zwei Lastschritten, bevor die Spannung wieder ansteigt. Bei DMS-5 nimmt die Druckspannung ab einer Last von rund 1000 kg kontinuierlich ab und geht in eine positive Zugspannung über. Beides kann nicht durch das Verformungsverhalten des Öffnungselementes begründet werden, weshalb ein Versagen der Klebefuge oder eine äußere Schädigung vermutet wird. In der Folge werden die Ergebnisse von DMS-4 und DMS-5 nicht mehr berücksichtigt und nur eine Paneelhälfte (DMS-1 bis DMS-3) abgebildet (siehe Abb. 5.38).

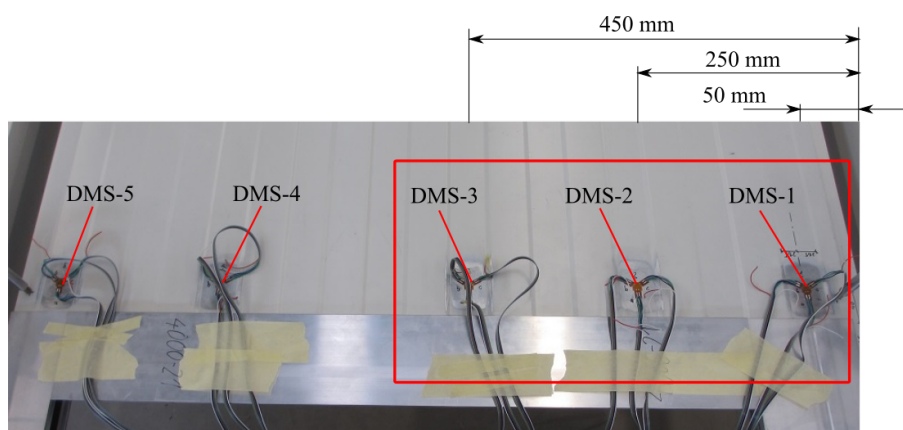


Abb. 5.38: Position der ausgewerteten Dehnmessstreifen beim GSP-Rahmentest

In Abb. 5.39 sind die Spannungs-Last-Kurven für die Dehnmessstreifen DMS-1 bis DMS-3 für die Spannung in Bauteilquerrichtung (Y-Achse) abgebildet. Es zeigt sich, dass die Spannungen in Querrichtung, im Vergleich zu jenen in Längsrichtung, betragsmäßig an allen Messpunkten gering sind.

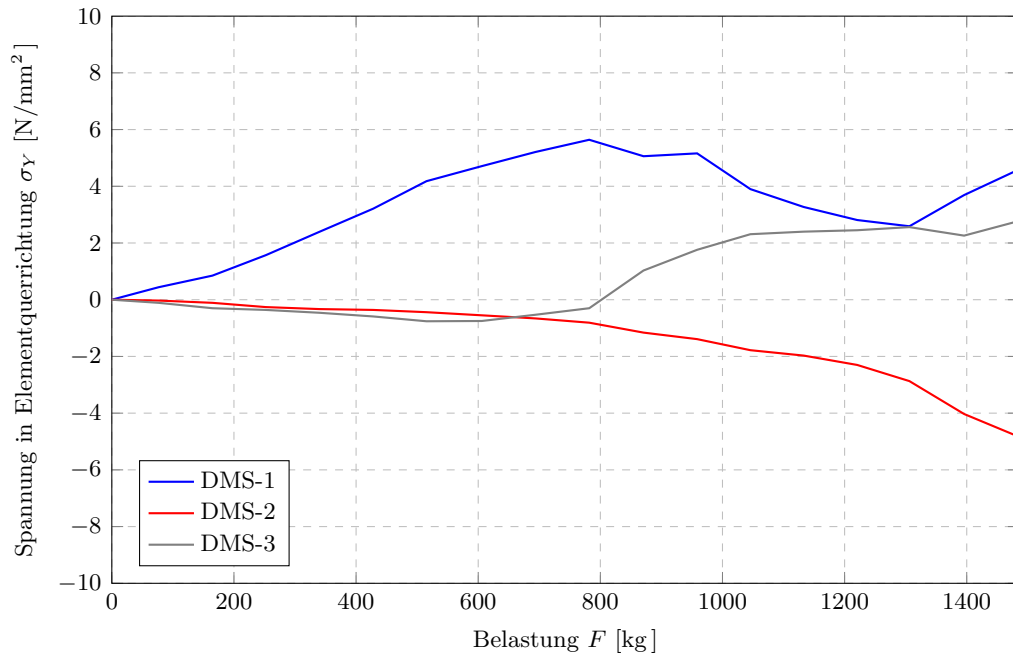


Abb. 5.39: Spannungs-Last-Kurven für σ_Y in Bauteilquerrichtung (Probekörper 4021, Einschubling Typ 3)

Eine Übersicht über die erfassten Hauptspannungen bietet Tab. 5.5. Die letzte Spalte zeigt zum Vergleich die theoretischen Hauptdruckspannungen σ_{VP} eines vollen Paneels, welche konstant über die Breite angenommen werden. Die Werte in der Tabelle zeigen, dass die Hauptdruckspannungen an jedem Dehnmesstreifen deutlich größer als die Hauptzugspannungen sind. Weiters ist erkennbar, dass die Spannungen mit zunehmender Last nicht an jedem DMS gleichmäßig ansteigen. Zur Verdeutlichung sind die Hauptdruckspannungen σ_2 in Abb. 5.40 über die Paneelbreite verteilt abgebildet. Die Darstellung erfolgt für verschiedene Lastniveaus (mit konstantem Intervall), auf welche die gemessenen Werte skaliert werden. Als Referenz sind die Hauptdruckspannungen eines vollen Paneels mit waagrechten Linien eingetragen.

Tab. 5.5: Übersicht Hauptspannungen beim GSP-Rahmentest (PK 4021, Einschubling Typ 3)

F [kg]	$\sigma_{2,DMS-1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{1,DMS-1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,DMS-2}$ [N/mm ²]	$\sigma_{1,DMS-2}$ [N/mm ²]	$\sigma_{2,DMS-3}$ [N/mm ²]	$\sigma_{1,DMS-3}$ [N/mm ²]	σ_{VP} [N/mm ²]
339.5	-23.2	4.8	-17.5	0.1	-13.1	-0.4	-16.3
605.8	-32.7	8.9	-41.2	-0.5	-21.5	-0.7	-39.3
870.7	-40.8	11.7	-66.6	-1.1	-32.4	3.9	-56.4
1133.0	-56.0	14.0	-90.3	-1.9	-42.8	6.2	-73.4
1395.7	-62.1	13.8	-109.2	-4.0	-67.1	5.7	-90.5
1667.5	-45.7	14.9	-95.2	-7.4	-91.6	9.2	-108.1

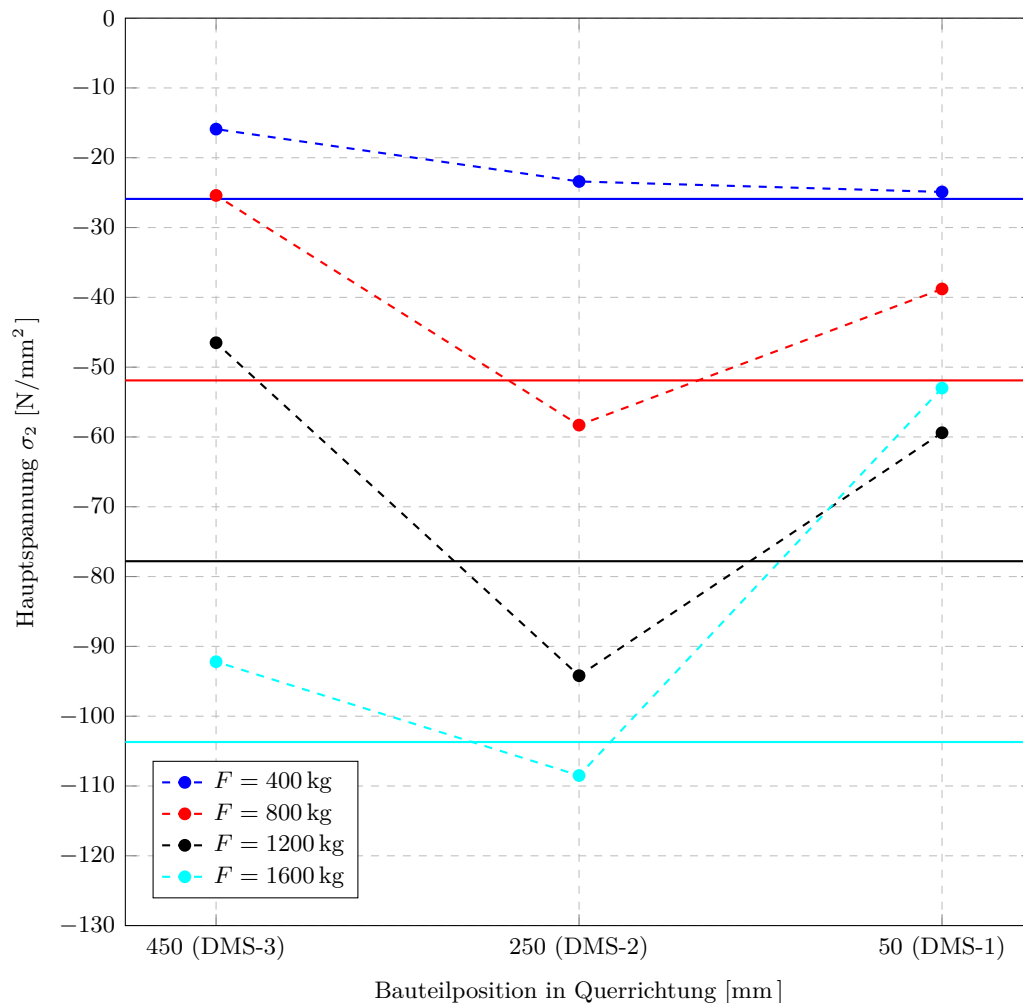


Abb. 5.40: Hauptdruckspannungen σ_2 für $F = 400$ bis 1600 kg (PK 4000-21, Einschubling Typ 3)

In Abb. 5.40 ist deutlich erkennbar, dass die gemessenen Spannungen, abhängig von der Position in Querrichtung, unterschiedlich stark ansteigen. Bei einer Last von $F = 400$ kg weisen noch alle drei Messpunkte ähnlich hohe Spannungswerte auf. Mit zunehmender Belastung steigt die Spannung am DMS-2 überproportional zu jener des vollen Panels an, während die Spannung an DMS-1 und DMS-3 deutlich unterproportional anwächst. Im Bereich des randnahen DMS-1 sind keine Niete mehr angeordnet, weshalb die schwach ansteigende Deckblechspannung schlüssig ist. Die gering ansteigende Spannung an DMS-3 zeigt, dass in Bauteilmitte zunächst nur wenig Last übertragen werden kann. Es wird klar, dass trotz des torsionssteifen Rohres von Einschubling Typ 3 kein gleichmäßiger Lastübertrag über die gesamte Paneelbreite möglich ist. Beim Lastniveau von $F = 1600$ kg (kurz unterhalb der Traglast) ändert sich die Charakteristik der Spannungsverteilung. Die Spannung am DMS-1 fällt ab, jene am DMS-2 steigt nur mehr leicht an. Dagegen ist am DMS-3 ein deutlicher Sprung erkennbar. Als Ursache wird das Lochleibungsversagen des Deckbleches (Langlochbildung) an den äußeren Niete vermutet. Wie erwähnt trat das globale Versagen des Probekörpers durch Knittern der oberen Deckschicht auf. Das bedeutet, dass das Lochleibungsversagen einzelner Niete zu keinem globalen Versagen führt, sondern Lasten in die Niete im Bereich der Bauteilmitte umgelagert werden.

5.3 Statische Modellierung des Öffnungselementes

Im folgenden Kapitel wird das vorgestellte Öffnungselement mit den Bestandteilen

- 2 x Sandwichpaneel,
- 2 x Einschubling,
- 1 x Fensterrahmen

durch zwei statische Berechnungsmodelle abgebildet. Im ersten Modell wird das Bauteil durch ein eindimensionales Stabwerkmodell vereinfacht. Zur genaueren Untersuchung der Spannungs- und Steifigkeitsverteilung erfolgt eine 3D-Modellierung mit Berechnung mittels Finite Elemente Methode (FEM).

5.3.1 Stabwerkmodell des Öffnungselementes

Als eindimensionales Stabwerk betrachtet, gliedert sich das Öffnungselement in zwei Bereiche unterschiedlicher Biege- und Schubsteifigkeitseigenschaften und ihrer Verbindung am Öffnungsrand, deren Nachgiebigkeit als Drehfeder abgebildet werden kann (siehe Abb. 5.41).

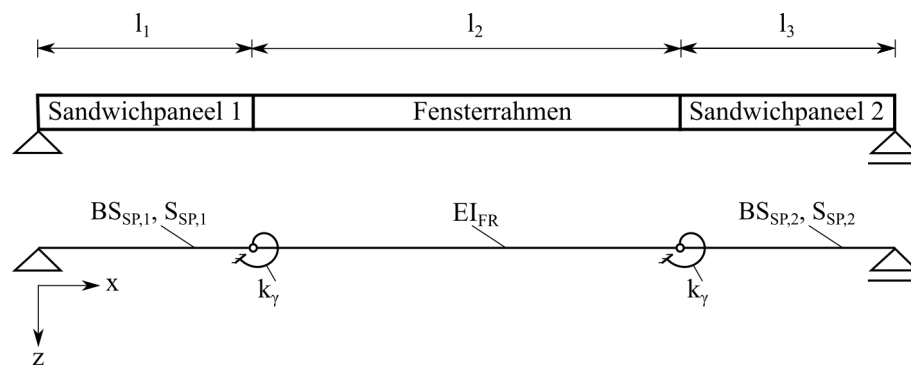


Abb. 5.41: Stabwerkmodell des Öffnungselementes

Bei dieser Modellierung werden folgende Vereinfachungen gemacht:

- Die Verteilung der Spannungen und der Steifigkeit über die Bauteilbreite wird vernachlässigt.
- Die unterschiedliche Biegesteifigkeit der beiden Rahmenpfosten-Profile wird nicht berücksichtigt, sondern die Gesamtbiegesteifigkeit des Fensterrahmens verwendet.
- Auf eine Modellierung der Einschublinge wird verzichtet. Deren Steifigkeitseigenschaften werden durch eine Drehfedersteifigkeit k_γ abgebildet.
- Es wird ein symmetrisches System mit mittig liegendem Fensterrahmen und zwei identischen Einschublingen betrachtet.

Durch die statisch bestimmte Lagerung bleibt der Schnittgrößenverlauf, im Vergleich zu einem vollen Sandwichpaneel, unverändert. Die Verformungsfigur ist im Vergleich zum vollen Paneel jedoch verändert. Für die außen liegenden Sandwichpaneele wird die Theorie des elastischen Verbundes nach Kap. 2.3.1 angenommen. Ihre Durchsenkung bei Querbelastung setzt sich aus einem Biege- und einem Schubanteil zusammen. Der tragende Fensterrahmen wird als schubstarres Bauteil betrachtet. Seine Querverformung resultiert nur aus dem

Biegeanteil. Die Durchsenkung dieses Systems (ohne Drehfedern) kann an jeder beliebigen Stelle mit dem Prinzip der virtuellen Kräfte berechnet werden.

$$\begin{aligned}
 w_{(m)}^I = & \underbrace{\int_0^{l_1} \left(\frac{M_{(x)} \cdot \bar{M}_{(x)}}{BS_{SP,1}} + \frac{V_{(x)} \cdot \bar{V}_{(x)}}{S_{SP,1}} \right) \cdot dx}_{\text{Anteil Sandwichpaneel 1}} + \underbrace{\int_{l_1}^{l_2} \frac{M_{(x)} \cdot \bar{M}_{(x)}}{EI_{FR}} \cdot dx}_{\text{Anteil Fensterrahmen}} + \\
 & \underbrace{\int_{l_2}^{l_3} \left(\frac{M_{(x)} \cdot \bar{M}_{(x)}}{BS_{SP,2}} + \frac{V_{(x)} \cdot \bar{V}_{(x)}}{S_{SP,2}} \right) \cdot dx}_{\text{Anteil Sandwichpaneel 2}}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

mit:

- $w_{(m)}^I$ Durchsenkung ohne Drehfeder an der Stelle m
- $l_{1/3}$ Länge des ersten/zweiten Sandwichpaneels
- l_2 Länge des Fensterrahmens
- $M_{(x)}$ Moment aus der Belastung
- $\bar{M}_{(x)}$ Virtuelles Moment aus "1"-Last an der Stelle m
- $BS_{SP,1/2}$ Biegesteifigkeit des ersten/zweiten Sandwichpaneels
- $V_{(x)}$ Querkraft aus der Belastung
- $\bar{V}_{(x)}$ Virtuelle Querkraft aus "1"-Last an der Stelle m
- $S_{SP,1/2}$ Schubsteifigkeit des ersten/zweiten Sandwichpaneels
- EI_{FR} Gesamt-Biegesteifigkeit des Fensterrahmens

Die nachgiebigen Verbindungsbauteile (Einschublinge) erzeugen einen Knick in der Verformungskurve und erhöhen die Gesamtdurchsenkung. In Abb. 5.42 (links) ist die Verformungsfigur (halbseitig) für ein symmetrisches System schematisch dargestellt. Der Knickwinkel γ aus der Drehfeder-Verdrehung ist die Differenz der Endverdrehung α des Sandwichpaneels und der Anfangsverdrehung β des Fensterrahmens und kann rechnerisch nach Gl. (5.3) ermittelt werden.

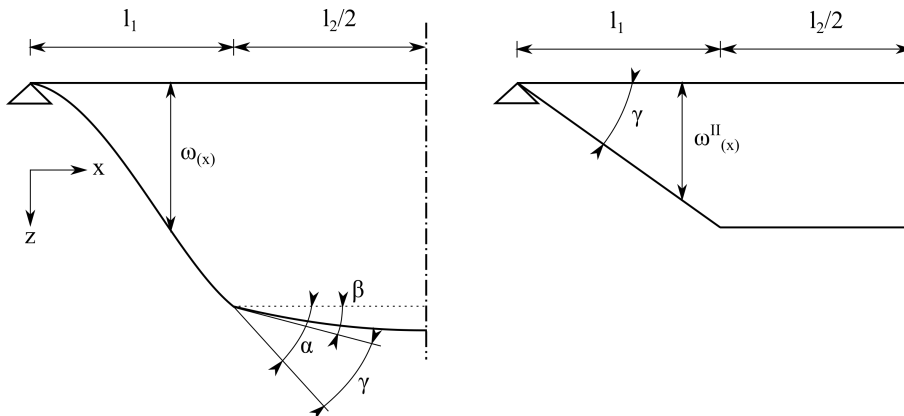


Abb. 5.42: Verformungsfigur des Öffnungselementes gesamt (links) und durch die Drehfeder alleine (rechts)

$$\gamma = \frac{M_{(l_1)}}{k_\gamma} \quad (5.3)$$

mit:

γ	.....	Knickwinkel durch die Verdrehung am Einschubling
$M_{(l_1)}$	.....	Moment aus der Belastung an der Stelle $x = l_1$
k_γ	.....	Drehfedersteifigkeit der Verbindung mit dem Einschubling

Betrachtet man die Verformungen aus der Drehfeder isoliert, so stellt sich durch die Symmetrie des Systems eine Waagrechte nach dem Knick ein (siehe Abb. 5.42 (rechts)). Die zusätzliche Verformung aus dem Knick kann geometrisch abgeleitet werden, wobei $\tan \gamma = \gamma$ (für kleine Winkel) angenommen wird. Aufgrund der Unstetigkeit im Knickpunkt müssen zwei Bereiche unterschieden werden.

für $0 \leq m \leq l_1$ gilt:

$$w_{(m)}^{\text{II}} = \gamma \cdot l_{(m)} = \frac{M_{(l_1)}}{k_\gamma} \cdot l_{(m)} \quad (5.4)$$

für $l_1 < m \leq l_2/2$ gilt:

$$w_{(m)}^{\text{II}} = \gamma \cdot l_1 = \frac{M_{(l_1)}}{k_\gamma} \cdot l_1 \quad (5.5)$$

Durch Aufsummieren aller Verformungsanteile ergibt sich die Gesamtdurchsenkung im System zu:

$$w_{(m)} = w_{(m)}^{\text{I}} + w_{(m)}^{\text{II}} \quad (5.6)$$

Umgeformt auf die Drehfederkonstante gilt für $0 \leq m \leq l_1$:

$$k_\gamma = \frac{M_{(l_1)} \cdot l_{(m)}}{w_{(m)} - w_{(m)}^{\text{I}}} \quad (5.7)$$

Für $l_1 < m \leq l_2/2$ gilt:

$$k_\gamma = \frac{M_{(l_1)} \cdot l_1}{w_{(m)} - w_{(m)}^{\text{I}}} \quad (5.8)$$

mit:

$w_{(m)}^{\text{II}}$	.....	Durchsenkungsanteil aus der Drehfeder an der Stelle m
$w_{(m)}$	.....	Gesamtdurchsenkung an der Stelle m

Wird die Durchsenkung $w_{(m)}$ eines Öffnungspaneels messtechnisch erfasst, kann die Federsteifigkeit k_γ des Einschublings durch Einsetzen in Gl. (5.7) bzw. Gl. (5.8) ermittelt werden.

Die Modellierung des Öffnungselementes als Stabwerk kann alternativ auch mit einem Stabwerk-Softwareprogramm (z.B. RSTAB von Dlubal) erfolgen, sofern dieses die Schubverformungen von Stäben berücksichtigt. Im Modell wird zwischen den Sandwich-Paneel-Stäben und dem Rahmen-Stab eine Gelenk mit der Federsteifigkeit k_γ eingefügt.

Ermittlung der Drehfedersteifigkeiten des GSP-Rahmentest

Für die durchgeführte Versuchsreihe GSP-Rahmentest werden die Drehfedersteifigkeiten der Einschublinge ermittelt. Die Belastungsanordnung war bei allen Probekörpern gleich, womit sich eine Schnittkraftverteilung gemäß Abb. 5.43 ergibt.

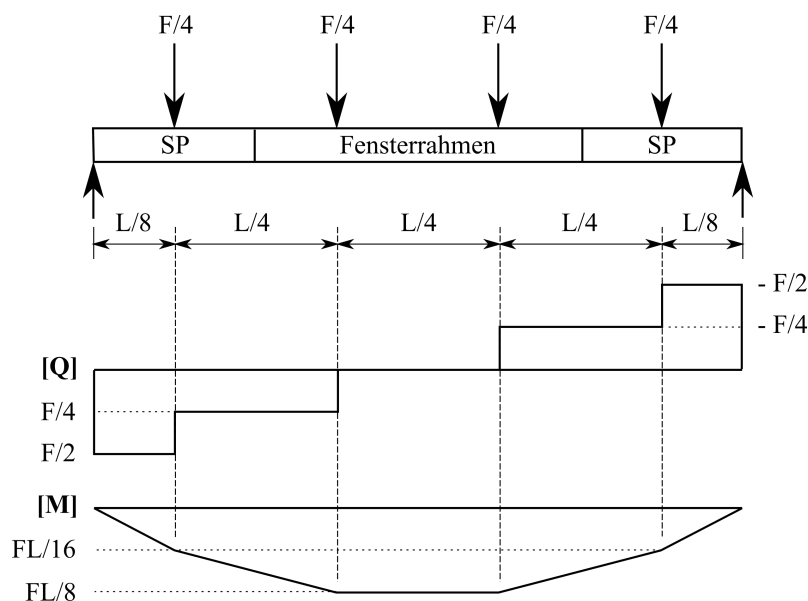


Abb. 5.43: Schnittkraftverteilung beim GSP-Rahmentest

Die Auswertung erfolgt unabhängig voneinander an der Position des Wegaufnehmers WA-1 nahe des Öffnungsrandes (Position P1, $x = 830$ mm) und des Wegaufnehmers WA-2 in Feldmitte (Position P2, $x = 1900$ mm) mithilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes MS Excel. Die verwendeten Bauteil-Steifigkeitswerte sind in Tab. 5.6 angegeben. Die beim GSP-Rahmentest gemessenen Verformungen werden auf Belastungswerte von 6, 9 und 12 kN skaliert. Für Position P1 am Öffnungsrand wird ein Mittelwert der Messwerte von Wegaufnehmer WA-1, WA-3, WA-4 und WA-6 verwendet (\bar{w}_{P1}), für Position P2 in Feldmitte jener der Wegaufnehmer WA-2 und WA-5 (\bar{w}_{P2}). Der Probekörper 4000-5 wird aufgrund der Be- und Wiederentlastung nicht berücksichtigt.

Tab. 5.6: Steifigkeitswerte des Öffnungselementes beim Stabwerkmodell

Sandwichpaneel	
BS_{SP} [kNmm ²]	567014320
S_{SP} [kN]	338.3
Fensterrahmen	
$EI_{y,FR}$ [kNmm ²]	201000000
S_{FR} [kN]	∞

mit:

BS_{SP}	.....	Biegesteifigkeit Sandwichpaneel
EI_{FR}	.....	Biegesteifigkeit Fensterrahmen
$S_{SP/FR}$	.....	Schubsteifigkeit Sandwichpaneel/Fensterrahmen

Für die Nennlast von $F = 6$ kN sind die Ergebnisse in Tab. 5.7 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Werte der Drehfedersteifigkeit für Position P1 und Position P2 bei allen Probekörpern sehr ähnlich sind. Dies legt nahe, dass die reale Verformungsfigur mit dem gewählten Stabwerkmodell gut abgebildet werden kann. Der Vergleich der Probekörper untereinander macht deutlich, dass deren Drehfedersteifigkeiten allesamt in der Größenordnung von 200 bis 300 kNm/rad liegen.

Tab. 5.7: Drehfedersteifigkeiten der Probekörper für $F = 6$ kN beim GSP-Rahmentest

Probekörper	Einschubling	\bar{w}_{P1} [mm]	\bar{w}_{P2} [mm]	$k_{\gamma,P1}$ [kNm/rad]	$k_{\gamma,P2}$ [kNm/rad]
4000-2	Typ 1	26.6	34.0	194	231
4000-11	Typ 2	28.0	36.4	168	177
4000-12	Typ 3	28.2	37.0	164	169
4000-13	Typ 4	24.6	33.2	251	257
4000-21	Typ 3	23.3	32.3	310	290

Die Auswertung für unterschiedliche Belastungsniveaus zeigt, dass die Drehfedersteifigkeit bei ansteigender Belastungen bei allen Probekörpern abnimmt (siehe Abb. 5.44). Eine potentielle Ursache der veränderlichen Drehfedersteifigkeiten ist ein Plastifizieren der Niet- bzw. Schraubenverbindungen des Einschublings bei höheren Lasten, womit sich die Steifigkeit der Verbindung reduziert. Daneben wirkt sich eine Differenz zwischen berechneter und realer Verformung, z.B. durch Abweichung der realen und angenommenen Querschnittswerte, auf die ermittelten Drehfedersteifigkeiten aus.

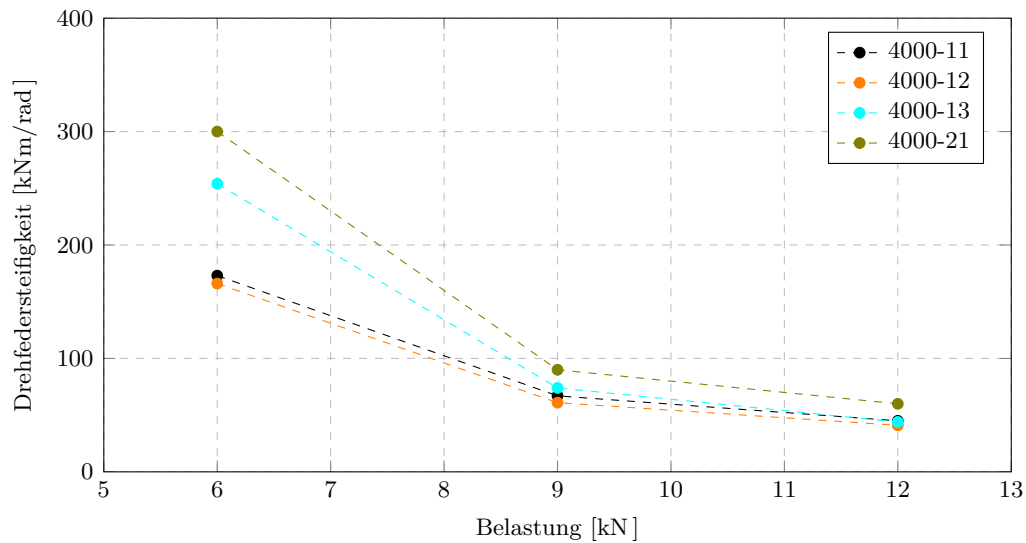


Abb. 5.44: Verlauf der Einschubing-Drehfedersteifigkeit bei veränderlicher Belastung

Abb. 5.44 zeigt, dass der Betrag der Drehfedersteifigkeit von der Gesamtbelastung abhängt. Die Auswirkung einer veränderlichen Drehfedersteifigkeit auf die Gesamtdurchsenkung wird deshalb in einer Parameterstudie untersucht. Für eine Belastung von $F = 6$ kN wird die Drehfedersteifigkeit k_γ variiert und die Gesamtdurchsenkung in Feldmitte ermittelt. Die in Abb. 5.45 dargestellten Ergebnisse zeigen eine abfallende Funktion, die sich dem Minimalwert der Durchsenkung (mit starrer Einschubing-Verbindung) annähert. Unterhalb einer Drehsteifigkeit von 400 kNm/rad (wie für alle Probekörper ermittelt) ist die Gesamtdurchsenkung sehr stark von der Drehfederkonstante abhängig. Ab einer Drehfedersteifigkeit von rund 400 kNm/rad ist deren Einfluss auf die Gesamtdurchsenkung kleiner als 15 %.

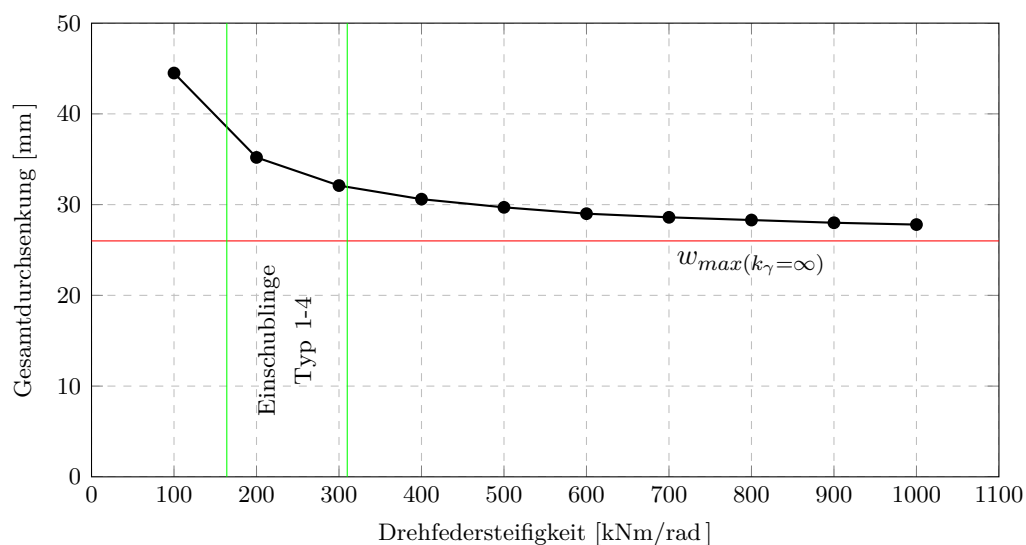


Abb. 5.45: Einfluss der Drehfedersteifigkeit auf die Gesamtdurchsenkung in Feldmitte beim Öffnungselement

5.3.2 3D-Modell des Öffnungselementes

Modellbeschreibung

Um die Spannungsverteilung und die Verformungseigenschaften genauer zu untersuchen, wird das Öffnungselement als 3D-Modell abgebildet (siehe Abb. 5.46). Es werden Modelle mit Einschublingen von Typ 2 und 3 erstellt, welche aufgrund der positiven Versuchsergebnisse für die weitere Entwicklungsphase in Betracht kommen. Als Länge des Modells wird die Spannweite des Öffnungspaneels beim GSP-Rahmentest von 3800 mm gewählt.

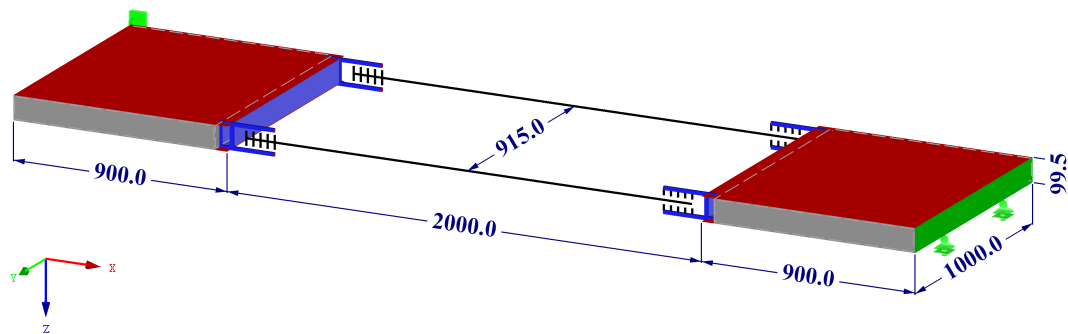


Abb. 5.46: Übersicht 3D-Modell Öffnungselement mit Einschubling Typ 3

Im 3D-Modell werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Das Sandwichpaneel wird konstant über die Breite abgebildet. Die reale Längsfuge wird nicht modelliert, da sie eine sehr komplexe Geometrie aufweist und ihr Einfluss für die Untersuchung als eher gering eingestuft wird.
- Die beidseitige Auflagerung des Bauteils wird vereinfacht als Linienlager abgebildet, da der Randbereich nicht im Fokus der Untersuchungen steht. Es wird weder die reale Auflagerbreite, noch die Verschraubung mit der Unterkonstruktion im Modell berücksichtigt.
- Auf eine Modellierung der Rahmenriegel wird verzichtet, da der globale Lastübertrag direkt von den Einschublingen in die Rahmen-Pfosten erfolgt.

Der Berechnungsvorgang erfolgt nach Theorie I. Ordnung mit der Finite Elemente Methode. Dazu wird das Statik-Softwareprogramm RFEM von Dlubal verwendet. Es wird die direkte Methode zur Lösung des Gleichungssystems gewählt, sowie zwei Laststufen und maximal 30 Iterationsschritte festgelegt. Folgend wird die Modellierung der einzelnen Bestandteile am Beispiel des Öffnungselementes mit Einschubling Typ 3 genauer beschrieben. Das Öffnungselement mit Typ 4 ist bezüglich der Modellierung ähnlich, es unterscheidet sich nur in der Geometrie des Einschubling-Mittelteils und der Anordnung bzw. Anzahl der Nieten.

Sandwich-Paneel Das Sandwich-Paneel (Abb. 5.47) besteht aus Flächen und Volumenkörpern mit den Querschnitts- und Materialeigenschaften nach Tab. 5.8. Die Abbildung der metallischen Deckschichten erfolgt durch ebene Flächenelemente (rot) mit entsprechender Dicke und orthotroper Materialeigenschaft. Die Mikroprofilierung der Deckschichten wird nicht berücksichtigt, ihr Einfluss auf die Quersteifigkeit fließt durch den in Kap. 4.4

ermittelten Ersatz-E-Modul für die Querrichtung ein. Es wird für beide Deckschichten ein gemittelter Wert von $E_{F,quer} = 105000 \text{ N/mm}^2$ verwendet.

Tab. 5.8: Maßgebende Kennwerte FP-P Paneel im 3D-Modell Öffnungselement

Deckschichten	
Material	Stahl S320GD, orthotrop elastisch 2D
$E_{F,längs}$ [N/mm ²]	210000
$E_{F,quer}$ [N/mm ²]	105000
$t_{F,1}$ [mm]	0.6
$t_{F,2}$ [mm]	0.5
Kernschicht	
Material	Polyurethan, isotrop linear elastisch
E_C [N/mm ²]	3.5
G_C [N/mm ²]	3.4
e [mm]	99.5

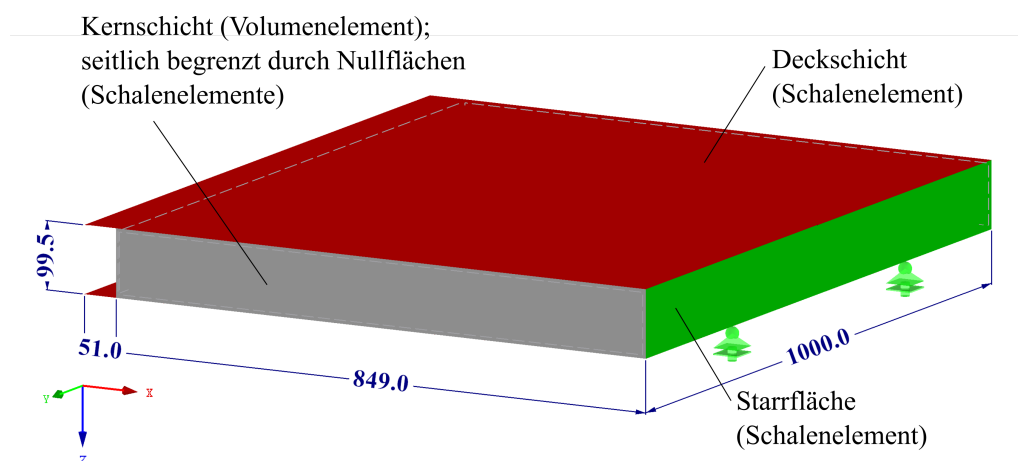


Abb. 5.47: Modellierung Sandwich-Paneel beim 3D-Modell Öffnungselement

Der PUR-Kern wird durch einen Volumenkörper modelliert, der an den Seitenflächen des Paneels durch Nullflächen (grau) begrenzt wird, die keine Steifigkeit aufweisen. Die Materialeigenschaften werden vereinfacht als isotrop angenommen. Der Verbund zwischen Deckschichten und Kernschicht ist starr. Am auflagerseitigen Paneelende verbindet ein starres Flächenelement (grün) die obere und untere Deckschicht. Dies dient der Vermeidung lokaler Verformungen an den als linienförmig vereinfachten Auflagern. Im Anschlussbereich zum Fensterrahmen wird, zusätzlich zum Kernausschnitt für den Einschubling, ein Spalt von 1 mm zwischen Volumenkörper und Einschublingfläche definiert, damit keine Kopplung beider Elemente besteht.

Fensterrahmen Der Fensterrahmen wird durch die Pfostenprofile abgebildet. Diese werden als Stabelemente mit den Querschnittswerten gemäß Tab. 5.9 modelliert. Die durch die unsymmetrische Profilform bedingte Hauptachsenschneidung wird durch eine lokale Drehung der Stabachsen berücksichtigt, wie in Abb. 5.48 angedeutet ist.

Tab. 5.9: Maßgebende Kennwerte Pfostenprofile im 3D-Modell Öffnungselement

Material	Aluminium 6060 – T66, isotrop linear elastisch
E_A [N/mm ²]	80000
ν_A [-]	0.296
Pfostenprofil 1	
I_Y [mm ⁴]	$159.3 \cdot 10^4$
I_Z [mm ⁴]	$229.3 \cdot 10^4$
A [mm ⁴]	1630
α [°]	24.2
Pfostenprofil 2	
I_Y [mm ⁴]	$128.5 \cdot 10^4$
I_Z [mm ⁴]	$65.9 \cdot 10^4$
A [mm ⁴]	1090
α [°]	23.7

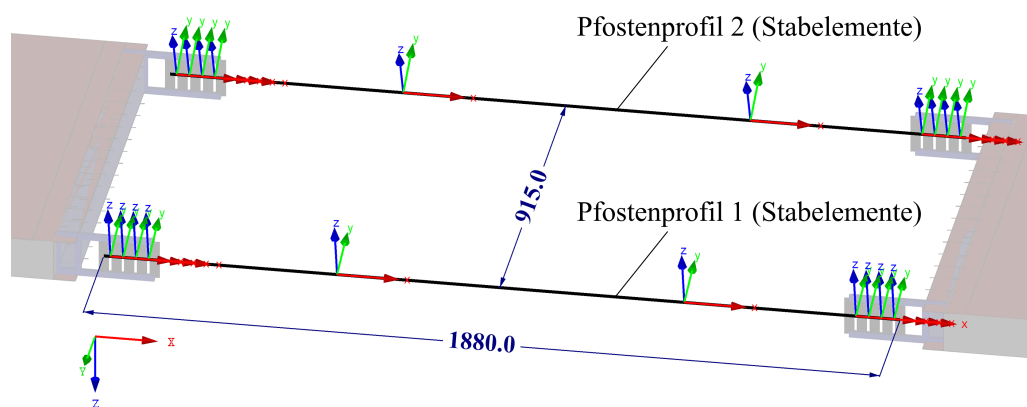


Abb. 5.48: Modellierung Rahmen beim 3D-Modell Öffnungselement

Einschubling und Verbindungen Die Einschublinge jedes Types setzen sich aus einem Mittel- und zwei Seitenteilen zusammen (siehe Abb. 5.49). Die maßgebenden Material- und Querschnittswerte sind in Tab. 5.10 angeführt.

Der Mittelteil wird mit Flächen gebildet. Dort erfolgt die Überleitung der Deckblech-Membrankräfte in den Einschubling durch die Nietverbindung. Die Nieten werden als Starrstäbe modelliert, die mit dem Einschubling starr verbunden sind (siehe Abb. 5.50a). Der Anschlusspunkt mit der Deckschichtfläche ist gelenkig ausgebildet. Im Stabendgelenk wird die Nachgiebigkeit der Verbindung auf Abscherbeanspruchung durch Querkraftfedern in Längs- und Querrichtung des Öffnungselementes (X- bzw. Y-Richtung) berücksichtigt.

Tab. 5.10: Maßgebende Kennwerte Einschubling Typ 2 im 3D-Modell Öffnungselement

Mittelteil	
Material	Stahl S235, isotrop linear elastisch
E_S [N/mm ²]	210000
ν_S [-]	0.296
b/h [mm]	50/95
t_{Rohr} [mm]	4
Seitenteil	
Material	Stahl S355, isotrop linear elastisch
E_S [N/mm ²]	210000
ν_S [-]	0.296
b/h [mm]	10/15

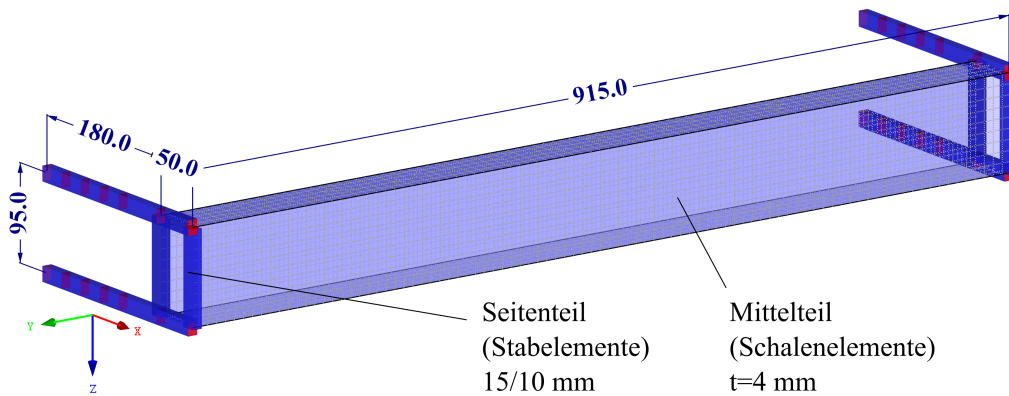


Abb. 5.49: Modellierung Einschubling Typ 2 beim 3D-Modell Öffnungselement

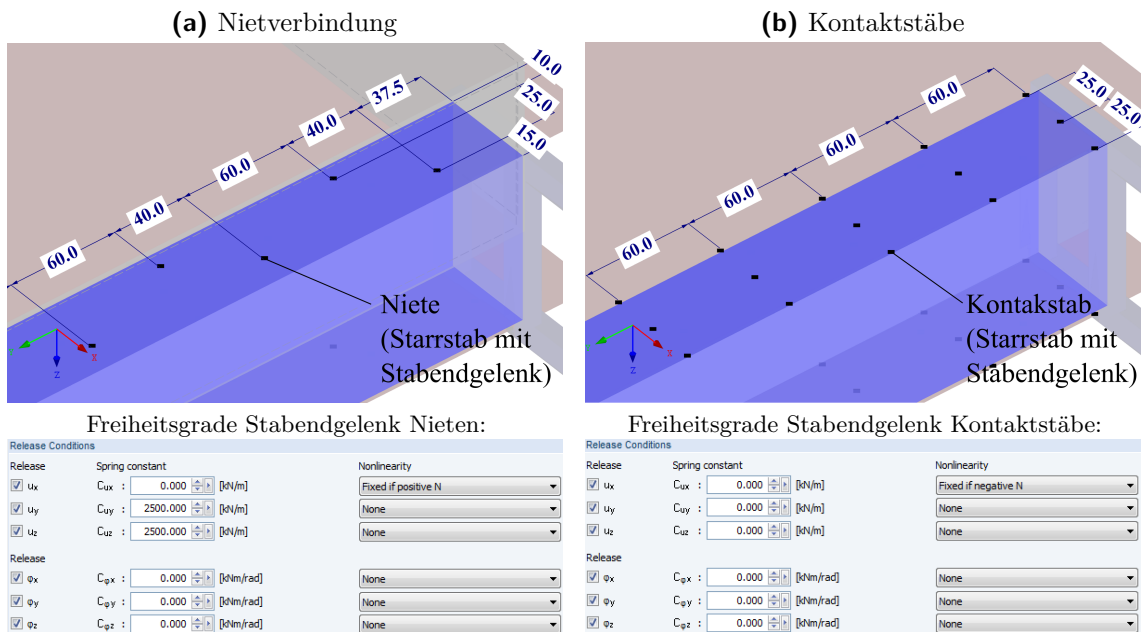


Abb. 5.50: Modellierung Nietverbindung (links) und Kontaktpressung (rechts) beim 3D-Modell Öffnungselement

Der Übertrag von Querkraften vom Sandwichpaneel auf den Einschubling erfolgt durch Kontaktpressung zwischen Deckblech und Einschubling bzw. Zugkräfte in den Nieten. Die Nieten-Stäbe werden im Stabendgelenk mit Druckausfall modelliert und können nur Zugkräfte aufnehmen. Um die erwähnte Kontaktpressung zwischen Einschubling- und Deckblechfläche zu ermöglichen, werden zusätzlich Starrstäbe orthogonal zwischen diesen Flächen angeordnet (siehe Abb. 5.50b). Diese können durch Einfügen eines Stabendgelenkes einzig negative Normalkräfte (Druck) übertragen. Die zusätzliche Verklebung beim GSP-Rahmentest wird nicht berücksichtigt, da der verwendete 2K-PUR-Schaum als sehr weich angenommen wird und primär der Stabilisation der Deckschicht dient.

Die Einschubling-Seitenteile mit Rahmen und Einschubstäben werden aus Stabelementen erzeugt. Die Schweißverbindung mit dem Mittelteil wird als starrer Anschluss modelliert. Die Überleitung der Normalkräfte aus den Einschubstäben in die Pfostenprofile des Rahmens erfolgt durch die Schraubverbindung. Wie in Abb. 5.51 dargestellt, wird diese durch Starrstäbe abgebildet, die fest am Pfostenprofil und gelenkig an den Einschubstäben angeschlossen sind. Die Nachgiebigkeit bei der Abscherbeanspruchung wird durch Querkraftfedern in Paneellängsrichtung (X-Richtung) am Stabendgelenk modelliert. Der Betrag dieser Federsteifigkeit wird in Kap. 5.3.2 näher untersucht. Die Stäbe können auch Normalkräfte in beide Richtungen aufnehmen und übertragen somit die globalen Querkräfte zwischen Einschubling und Fensterrahmen.

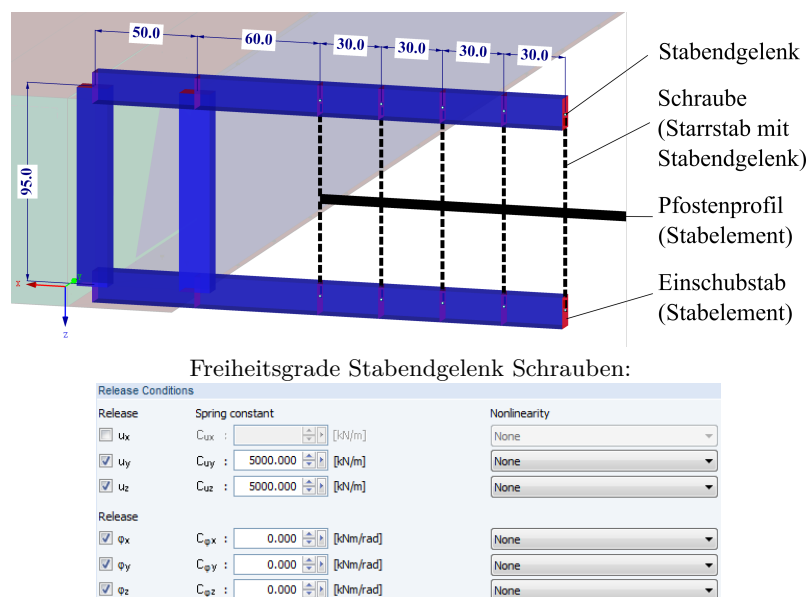


Abb. 5.51: Modellierung Schraubverbindung Rahmen-Einschubling beim 3D-Modell Öffnungselement

Lagerungsbedingungen Global erfolgt die Lagerung als Einfeldträger. Die Verschraubung des Öffnungspaneels mit der Unterkonstruktion wird nicht modelliert. Ebenso wird die reale Auflagerbreite nicht abgebildet. Stattdessen werden an beiden Bauteilenden gelenkige Linienlager an der äußeren Deckschicht eingeführt. Durch die linienförmige Auflagerung würden lokale Verformungen im weichen Kernwerkstoff resultieren, weshalb die Deckbleche am Bauteilende über eine Starrfläche gekoppelt werden. Am linken Auflager wird die Verschiebung in Paneellängsrichtung und Belastungsrichtung (X- und Z-Achse) gesperrt, am oberen nur jene in Belastungsrichtung (Z-Achse). Die zur Systemstabilität

erforderliche Festhaltung in Bauteilquerrichtung (Y-Richtung) wird als Knotenlager am inneren Deckblech des unteren Bauteilendes realisiert. Die Modellierung der Lager und ihre Freiheitsgrade sind in Abb. 5.52 dargestellt.

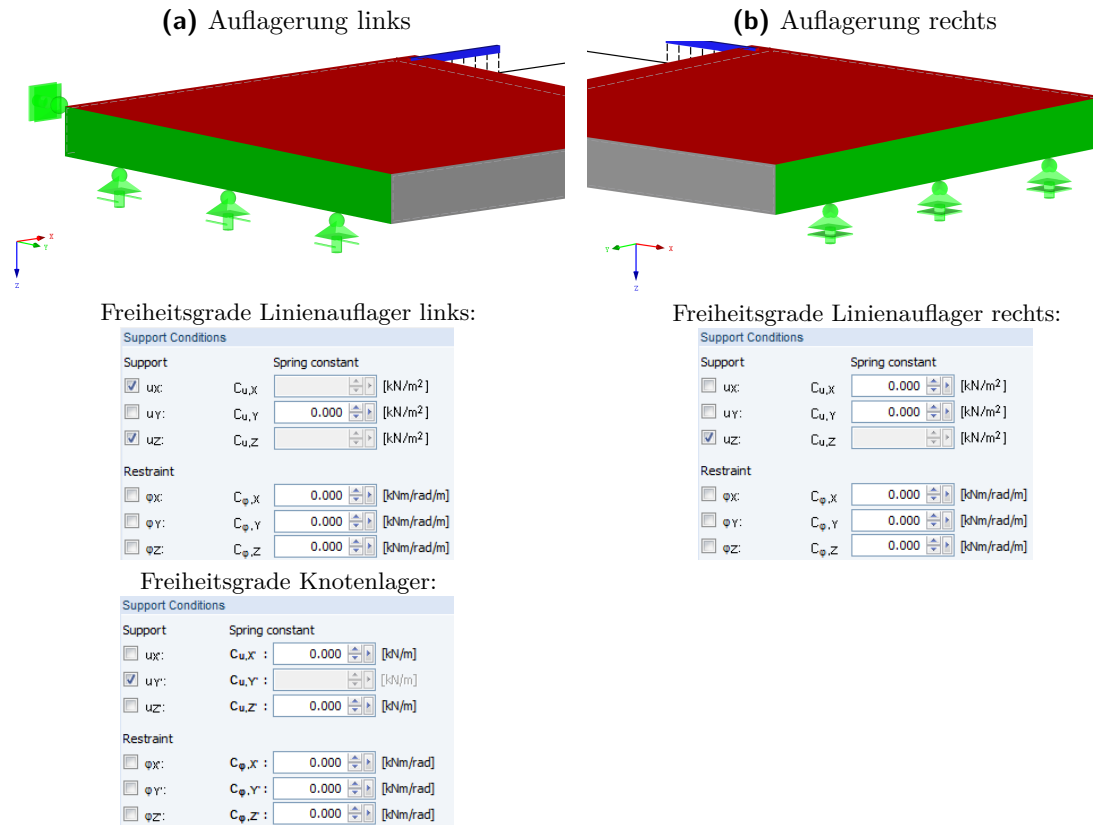


Abb. 5.52: Auflagerungsbedingungen Öffnungselemente beim 3D-Modell Öffnungselement

FE-Netz Die Netzgenerierung erfolgt automatisch generiert mit drei- und viereckigen Elementen für Flächen- und Volumenkörper. Das Grundnetz wird mit einer angestrebten Kantenlänge von 50 mm festgelegt. Dadurch werden zwei Reihen von Volumenkörper für die Kernschicht des Sandwichpaneels in Dickenrichtung erzeugt. Für die Flächen der Einschublinge sind aufgrund der komplexen Geometrie und der engen Nieten-Abstände kleinere Elemente sinnvoll. Es wird eine Konvergenzstudie für den Einfluss der Elementgröße auf die Verformung (in Feldmitte) und die Hauptspannungen (im Deckblech) durchgeführt. Auf Basis dieser Untersuchung wird die angestrebte Element-Kantenlänge dort auf 10 mm festgelegt. Dies erfolgt ebenso für die Flächen der Deckschichten bis zum Abstand von 50 mm vom Einschubling, wie in Abb. 5.53 dargestellt ist. Die Vernetzung im Volumenkörper des Kerns passt sich der Netzdichte der angrenzenden Flächen an.

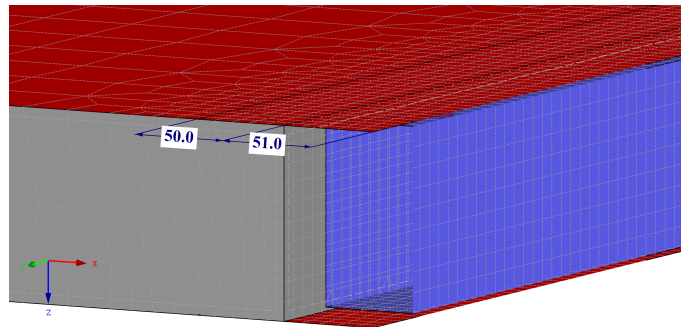


Abb. 5.53: FE-Netz im Anschlussbereich beim 3D-Modell Öffnungselement

Lastaufbringung im 3D-Modell des Öffnungselementes

Im Zuge dieser Untersuchung wird als Belastungssituation der 6-Punkt-Biegeversuch der Versuchsreihe GSP-Rahmentest herangezogen (siehe Abb. 5.54). Im Bereich der Sandwichpaneele erfolgt die Lasteinleitung durch freie Flächenlasten mit der Lasteinleitungsfläche von 100 x 1000 mm. Die beiden inneren Lasten werden über Stabeinzellasten in die Pfostenprofile des Rahmens eingeleitet.

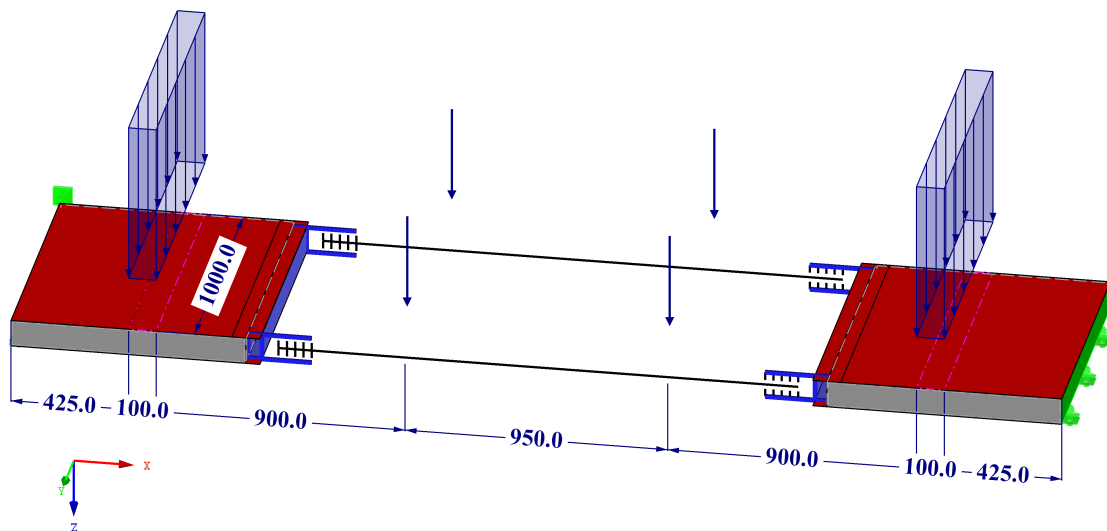


Abb. 5.54: Belastung gemäß 6-Punkt-Biegeversuch beim 3D-Modell Öffnungselement

In der baupraktischen Anwendung als Wandpaneel wird ein Öffnungselement primär durch Windlasten und Temperaturunterschiede zwischen Außen- und Innenbereich einer Gebäudehülle beansprucht. Es wird empfohlen, die Belastungen im Bereich der Sandwichpaneele als Flächenlasten anzusetzen. Im Bereich der Öffnung wird eine Lasteinleitung durch Stablasten an den Pfostenprofil-Stäben empfohlen. In Abb. 5.55 ist eine mögliche Beanspruchung durch Winddruck abgebildet. Beiden Pfostenprofilen wird die halbe Windlast der Öffnungsfläche zugeordnet.

Abb. 5.56 zeigt eine mögliche Belastung durch einen Temperaturanstieg an der Außenseite. Der Temperaturunterschied wird als konstante Temperatur T_C an der äußeren Deckschicht des Sandwichpaneels angesetzt, da sich nur diese erwärmt (Wärmedämmung durch Kernschicht aus PUR). Die Pfostenprofile des Fensterrahmens werden mit einem linearen Temperaturunterschied von ΔT beaufschlagt.

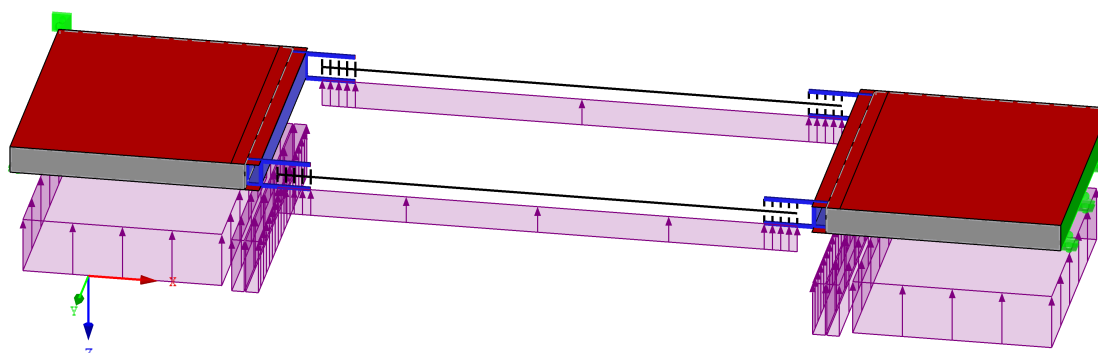


Abb. 5.55: Lastaufbringung bei Winddruck beim 3D-Modell Öffnungselement

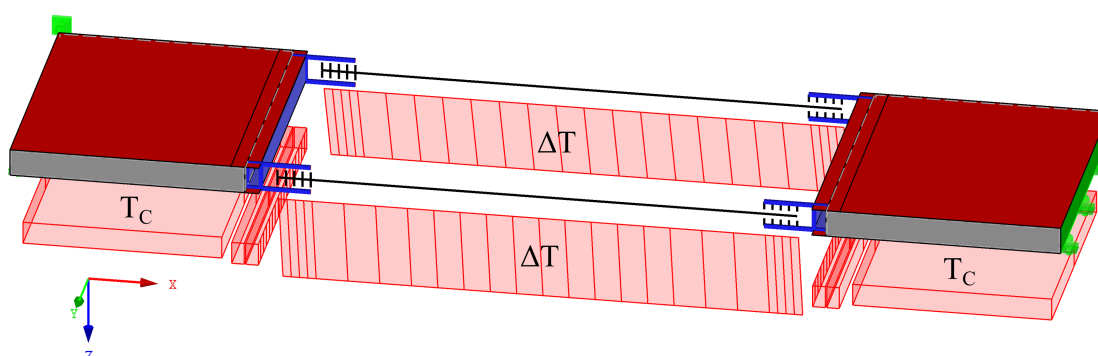


Abb. 5.56: Lastaufbringung bei Temperaturbeanspruchung beim 3D-Modell Öffnungselement

Ermittlung der Federsteifigkeit von Niet- und Schraubverbindung

Wie in der Modellbeschreibung erläutert, werden Querkraftfedern an den Niet- und Schraubenstäben eingeführt, um die Verbindungsnachgiebigkeit abzubilden. Im ersten Schritt wird die Federsteifigkeit jeder Niete k_N und jeder Schraube k_S auf unendlich gesetzt. In Tab. 5.11 sind die zugehörigen Berechnungsergebnisse am 3D-Modell der Verformungsmessung beim GSP-Rahmentest für eine Belastung $F = 6 \text{ kN}$ gegenübergestellt. Die Messwerte werden aus Tab. 5.7 übernommen. Position P1 (nahe des Öffnungsrandes) liegt bei $x = 830 \text{ mm}$, Position P2 (in Feldmitte) bei $x = 1900 \text{ mm}$. Für den Einschubling-Typ 3 werden die Messwerte von Probekörper 4000-12 angesetzt, für jene des Typs 4 die von Probekörper 4000-13.

Tab. 5.11: Vergleich der Durchsenkungen von GSP-Rahmentest und 3D-Modell ohne Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel ($F = 6 \text{ kN}$)

Einschubling	$\bar{w}_{P1,Modell}$ [mm]	$\bar{w}_{P1,Versuch}$ [mm]	$\bar{w}_{P2,Modell}$ [mm]	$\bar{w}_{P2,Versuch}$ [mm]
Typ 3	20,3	28,2	29,7	37,0
Typ 4	20,0	24,6	28,0	33,2

Der Vergleich in Tab. 5.11 zeigt, dass die Biegesteifigkeit des realen Öffnungselementes im 3D-Modell überschätzt wird, wenn keine Nachgiebigkeit der Niet- bzw. Schraubverbindung modelliert wird.

Um die realen Steifigkeitseigenschaften der Nieten zu erhalten, wird ein Zugversuch an der realen Nietverbindung empfohlen. Wie in Abb. 5.57 am Beispiel eines internen Versuches der Firma iconic skin dargestellt, kann dafür eine kurzes Paneelstück mit beidseitiger Vernietung untersucht werden. Die Federsteifigkeit einer Einzelniete ergibt sich aus der ermittelten Last-Verformungskurve zu:

$$k_N = \frac{F}{n \cdot w} \quad (5.9)$$

mit:

k_N	.....	Federsteifigkeit einer Einzelniete auf Abscherbeanspruchung
F	.....	Belastung (im elastischen Bereich der Last-Verformungs-Kurve)
n	.....	Gesamtanzahl der Nieten im Probekörper
w	.....	Verformung des Probekörpers bei der Belastung F

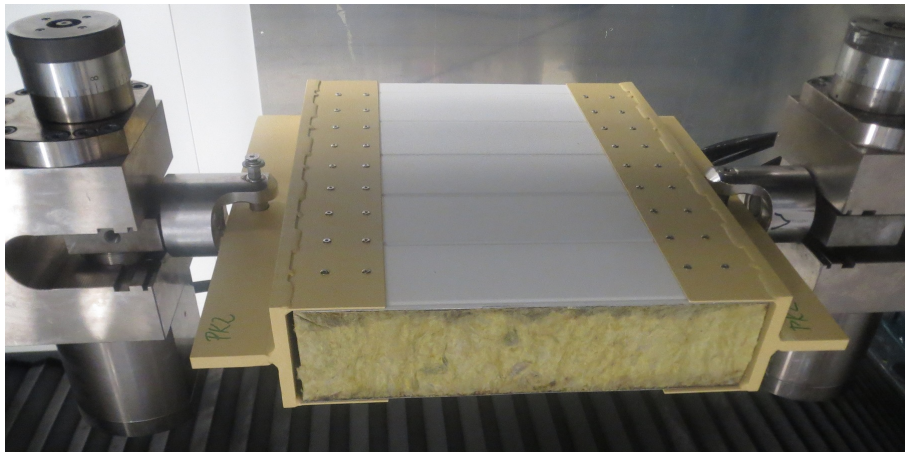


Abb. 5.57: Lasteinleitung in die Nietverbindung [interner Versuch: iconic skin GmbH]

Um die Federsteifigkeit in der Schraubverbindung abzuschätzen, wird selbiges Prinzip vorgeschlagen. Der Zugversuch kann an zwei Einschubstäben mit beidseitig verschraubtem, kurzem Rahmen-Pfostenprofil erfolgen.

Für das untersuchte Öffnungselement sind noch keine experimentell ermittelten Steifigkeitswerte für die Niet- und Schraubverbindung vorhanden. Aus diesem Grund wird im 3D-Modell eine Parameterstudie für den Einfluss der Nietfedersteifigkeit k_N und Schraubfedersteifigkeit k_S auf die Durchsenkung in Feldmitte bei Position P2 durchgeführt. Die Belastung beträgt wiederum $F = 6 \text{ kN}$. Es wird jeweils ein Parameter variiert, während die zweite Federsteifigkeit auf unendlich gesetzt wird. Die Ergebnisse sind für das Öffnungselement mit Einschubling Typ 3 in Abb. 5.58 und für jenes mit Einschubling Typ 4 in Abb. 5.59 dargestellt. Die gemessene Durchsenkung beim GSP-Rahmentest $\bar{w}_{P2, \text{Versuch}}$ ist waagrecht eingetragen. Ebenso der untere Grenzwert $\bar{w}_{P2, k=\infty}$ mit unendlicher Federsteifigkeit von Nieten und Schrauben.

Die Parameterstudie zeigt für beide Modelle, dass die Federsteifigkeit einer Schraube deutlich höher als jene einer Niete angenommen werden muss, um die gleiche Verformung zu erhalten. Weiters ergibt sich keine einheitliche Federsteifigkeit k_N der Nieten für beide Modelle, was sich am jeweiligen vertikalen Abstand der Kurvenpunkte zum gemessenen Wert $\bar{w}_{P2, \text{Versuch}}$ erkennen lässt.

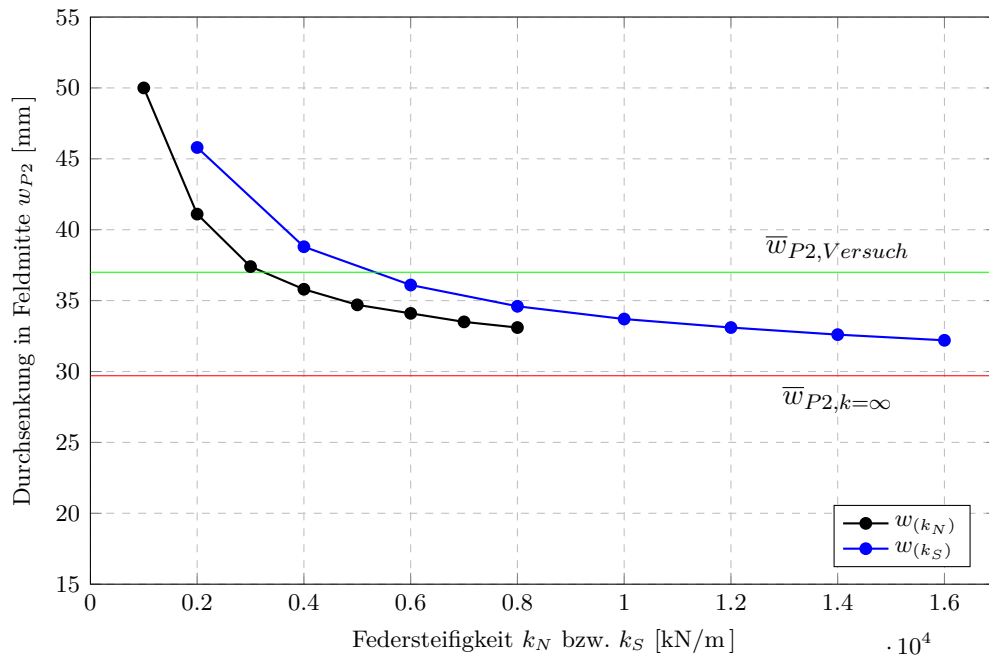


Abb. 5.58: Durchsenkungen in Abhängigkeit der Federsteifigkeit von Nieten (k_N) und Schrauben (k_S) - Einsubbling Typ 3

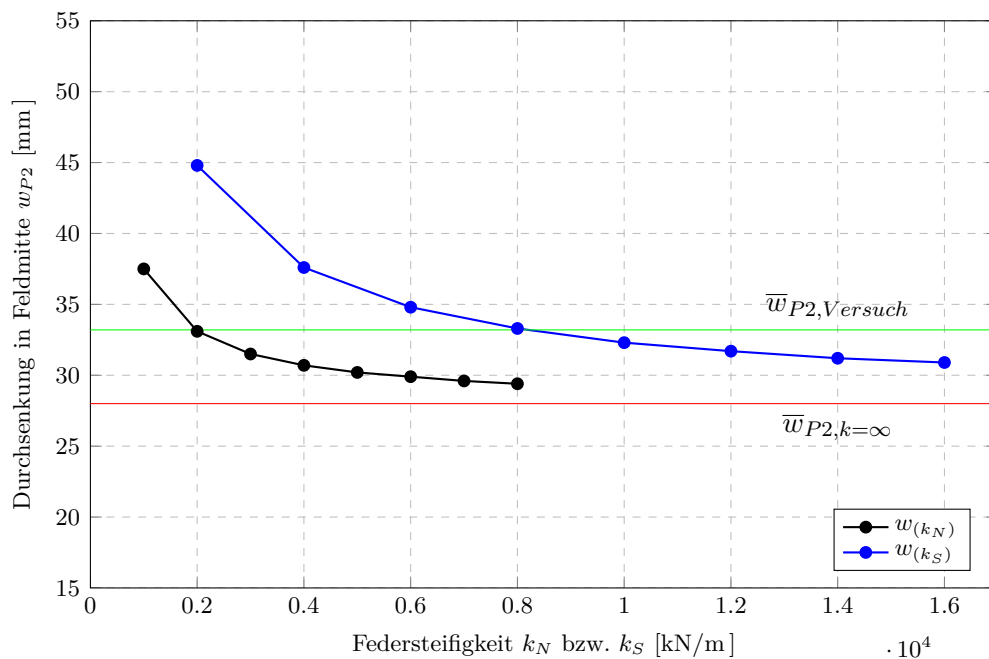


Abb. 5.59: Durchsenkungen in Abhängigkeit der Federsteifigkeit von Nieten (k_N) und Schrauben (k_S) - Einsubbling Typ 4

Das Verformungsverhalten des realen Öffnungselementes wird stets aus einer Kombination der Nachgiebigkeit beider Verbindungsmittel, Niete und Schrauben, beeinflusst. Eine isolierte Betrachtung, wie in der gezeigten Parameterstudie, kann deshalb nur Anhaltspunkte liefern. Es zeigt sich zudem, analog zum gezeigten Stabwerkmodell in Kap. 5.3.1, eine starke Lastabhängigkeit der Federsteifigkeiten. Für das Öffnungselement wird deshalb eine Kombination beider Parameter für verschiedene Laststufen ermittelt, die bestmöglich die Ergebnisse der Verformungsmessung beim GSP-Rahmentest abbildet. Die Berechnung erfolgt iterativ, die vorgeschlagenen Kombinationen sind in Tab. 5.12 mit den zugehörigen Verformungswerten dargestellt.

Tab. 5.12: Kombinierte Federsteifigkeiten von Niete (k_N) und Schraube (k_S) mit zugehöriger Verformung am 3D-Modell

Einschubling	k_N [kN/m]	k_S [kN/m]	$\bar{w}_{P1,Modell}$ [mm]	$\bar{w}_{P1,Versuch}$ [mm]	$\bar{w}_{P2,Modell}$ [mm]	$\bar{w}_{P2,Versuch}$ [mm]
$F = 3 \text{ kN}$						
Typ 3	9000	18000	12.7	12.8	17.6	17.1
Typ 4	∞	∞	10.0	9.6	14.1	12.9
$F = 6 \text{ kN}$						
Typ 3	6000	12000	27.6	28.2	37.5	37.0
Typ 4	6000	12000	25.0	24.6	33.5	33.2
$F = 9 \text{ kN}$						
Typ 3	2500	5000	53.8	54.0	69.4	69.9
Typ 4	2000	4000	50.2	48.7	63.8	65.3
$F = 12 \text{ kN}$						
Typ 3	2000	4000	78.6	76.1	100.0	98.2
Typ 4	1500	3000	74.6	72.4	93.2	97.6

Vergleich der Spannungen von 3D-Modell und GSP-Rahmentest

Die gemessenen Spannungen aus dem GSP-Rahmentest werden in Abb. 5.60 jenen aus dem 3D-Modell für unterschiedliche Lastniveaus gegenübergestellt. Die vollen Linien zeigen die gemessenen Werte, die strichlierten Linien die modellierten. Der Vergleich erfolgt für die Hauptdruckspannungen σ_2 in der oberen Deckschicht. Am 3D-Modell werden die in Tab. 5.12 vorgeschlagenen Federsteifigkeiten für die Niet- und Schraubverbindung verwendet.

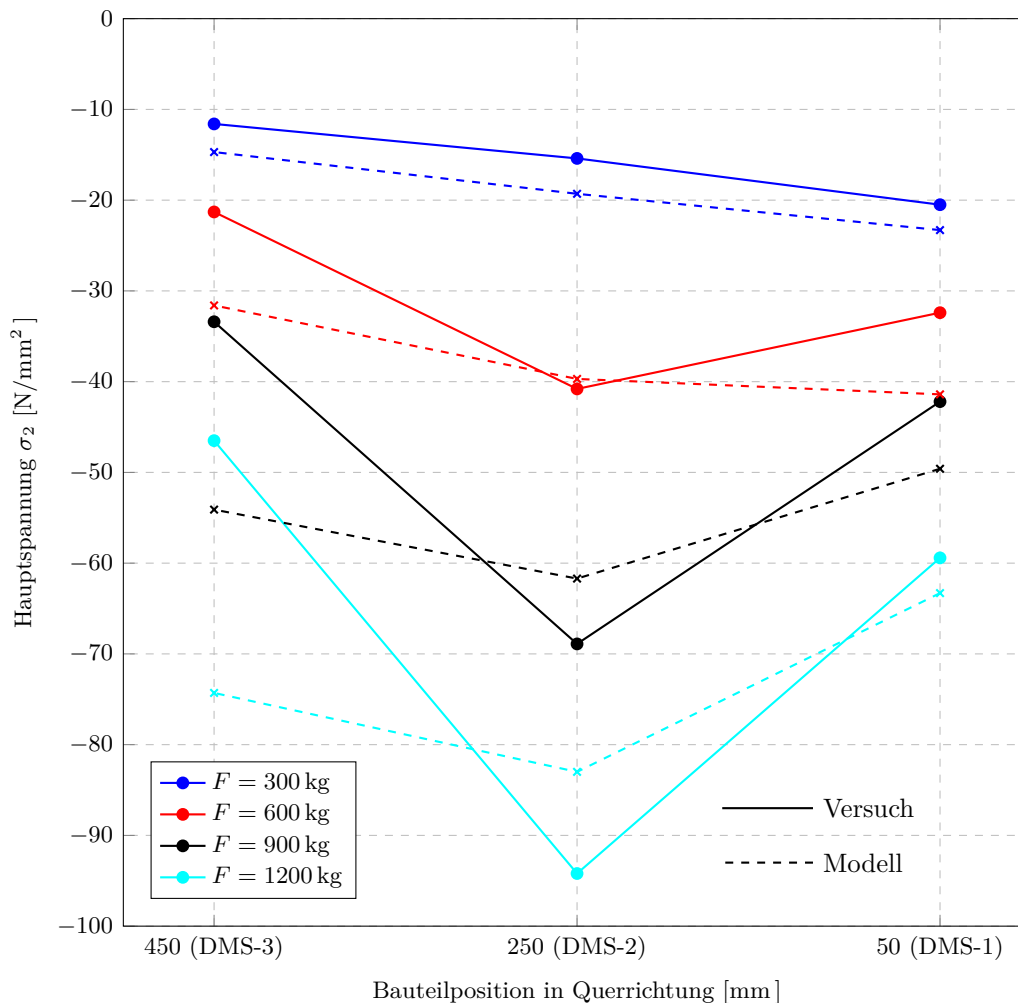


Abb. 5.60: Vergleich von σ_2 im 3D-Modell und beim GSP-Rahmentest für $F = 300$ bis 1200 kg

Der Spannungsvergleich in Abb. 5.60 zeigt deutliche Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Spannungen. Die Spannungen am Modell sind bei allen Laststufen gleichmäßiger über die Bauteilbreite verteilt. Im Trend für steigende Belastung sind jedoch Gemeinsamkeiten erkennbar. Im Bereich von DMS-1 erhöhen sich sowohl gemessene als auch berechnete Spannungen unterdurchschnittlich, da dort keine Nieten mehr angeordnet sind. Dagegen herrscht im Bereich von DMS-2 jeweils die höchste Spannung vor. Am Messpunkt von DMS-3 überschätzen die Spannungen aus dem Modell jene aus der Messung jedoch deutlich. Das bedeutet im Mittelbereich des Öffnungselementes kann vom Einschubling real nicht so viel Last übertragen werden, wie dies das Berechnungsmodell darstellt.

5.4 Vorschlag Bemessungskonzept

Der Einsatz des vorgestellten Öffnungselementes als Wandelement von Gebäudehüllen erfordert die statische Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG). Die folgenden Bemessungsvorschläge beziehen sich nur auf Einfeldsysteme eines isoliert betrachteten Bauteils ohne Nachbarpaneel.

In der Praxis kann sich das Öffnungselement nicht frei verformen, wenn es an Nachbarpaneel mit einer anderen Biegesteifigkeit angrenzt. Lastumlagerungen über die Nut-Feder-Längsfuge sind unvermeidlich. Ein Ansatz zur Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen im Gesamtsystem wird im folgenden Kapitel 6 gezeigt. Bei der Abbildung des Öffnungselementes als Stabwerkmodell bietet sich der Elementverband von Böttcher [16] zur Berücksichtigung der Nachbarpaneel an, welcher in Kap. 3.2 beschrieben wurde.

5.4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

Mit dem vorgestellten 3D-Modell können die Schnittgrößen bzw. Spannungen für alle Komponenten des isolierten Öffnungselementes ermittelt und jedes Einzelbauteil bemessen werden.

Sandwichpaneel

Für die Sandwichpaneel werden die erforderlichen Nachweise nach Kap. 2.5.2 bzw. EN 15409 [5] empfohlen:

- Fließen einer Deckschicht und daraus resultierendes Versagen
- Knittern (lokales Beulen) einer Deckschicht und daraus resultierendes Versagen
- Schubversagen des Kernes
- Versagen des Verbundes zwischen Deck- und Kernschicht
- Druckversagen des Kerns an einem Auflager
- Versagen des Elementes an den Verbindungspunkten mit der Unterkonstruktion

Zu beachten ist, dass die maximale Knitterspannung durch die Niet-Verbindung zwischen Einschubling und Sandwichpaneel reduziert wird. Für ein Brucha FP-P 100 Paneel mit einer Deckblechdicke von $t = 0.5$ mm wird in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) [1] eine charakteristische Knitterspannung von 141 N/mm^2 im Feldbereich angegeben. Dieser Wert konnte beim GSP-Rahmentest mit maximal gemessenen 109 N/mm^2 nicht erreicht werden, bevor das untersuchte Öffnungselement durch Knittern versagte. Eine Übernahme der Knitterspannungen aus den abZ der Paneel-Hersteller wird deshalb als unzulässig betrachtet. Es wird stattdessen empfohlen, die Knitterspannung (analog zum GSP-Rahmentest) im 6-Punkt-Biegeversuch gemäß EN 14509 [5] experimentell zu ermitteln.

Die Querkrafttragfähigkeit im Anschlussbereich von Sandwichpaneel und Einschubling wurde im Zuge dieser Masterarbeit nicht näher untersucht. Eine experimentelle Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit in Anlehnung an EN 14509 [5], Kapitel A.5 *Schubversuch am Kernwerkstoff* wird als sinnvoll erachtet. Weiters liegen keine Erkenntnisse über die Momenten-Querkraft-Interaktion vor, wofür ebenfalls experimentelle Untersuchungen ange-regt werden.

Fensterrahmen

Für die Pfostenprofile des Fensterrahmens ist der Nachweis der Normal- und Schubspannungen zu führen. Zu beachten ist die zweiachsige Biege- und Querkraftbeanspruchung durch die unsymmetrische Profilform. Weiters wird eine genauere Untersuchung des Abminderungsfaktors für den Einfluss der Kunststoffstege empfohlen. Dieser wird vom Hersteller üblicherweise mit 0.7 für Flächenträgheits- und Widerstandsmomente angegeben.

Einschubling

Sowohl für den Mittelteil als auch für die beiden Seitenteile muss die Einhaltung der Normal- und Schubspannungen gewährleistet werden. Ein Nachweis auf Basis der Vergleichsspannungen nach Mises wird empfohlen. Für den Nachweis der Schweißverbindung von Mittel- und Seitenteilen (nach EN 1993-1-8 [7]) können die Schnittkräfte des Seitenteils im Rahmenbereich herangezogen werden.

Nietverbindung Einschubling - Sandwichpaneel

Die Nieten müssen primär Abscher-, aber auch Zugkräfte übertragen. Die Schnittkräfte können aus dem 3D-Modell ausgelesen werden. Vereinfacht ist auch ein plastischer Ansatz denkbar, bei dem die gesamte Normalkraft aus dem Deckblech gleichmäßig auf alle Niete aufgeteilt wird.

Maßgebend für die Verbindung ist die Lochleibungsfestigkeit des Deckbleches. Aufgrund seiner geringen Dicke ($< 1 \text{ mm}$) wird von einem Nachweis der Lochleibungsfestigkeit nach EN 1993-1-8 [7] abgeraten. Für die Ermittlung der Tragfähigkeit pro Niete wird stattdessen ein Zugversuch an der realen Verbindung empfohlen, wie er in Kap. 5.3.2 bereits für die Abschätzung der Federsteifigkeit vorgeschlagen wurde. Interne Versuche der Firma *iconic skin* ergaben eine Tragfähigkeit auf Abscherbeanspruchung von rund 1.5 bis 2 kN pro Niete (Mittelwert).

Schraubverbindung Einschubling - Fensterrahmen

Auf die Schraubverbindung wirkt eine kombinierte Abscher- und Normalkraftbeanspruchung. Die Schnittkräfte können aus dem vorgestellten 3D-Modell ermittelt werden. Ein plastischer Ansatz durch gleichmäßige Schnittkraft-Aufteilung auf alle Schrauben ist ebenso möglich. Nachzuweisen sind die Lochleibungsfestigkeit im Pfostenprofil des Rahmens nach EN 1999-1-1 [8], die Lochleibungsfestigkeit in den Einschubstäben und die Schraubenfestigkeit nach EN 1993-1-8 [7], sowie die Spannungen am Nettoquerschnitt der Einschubstäbe.

5.4.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Für das Öffnungselement wird im GZG die Betrachtung folgender Zustände in Anlehnung an Kap. 2.5.3 bzw. EN 15409 [5] empfohlen:

- Erreichen einer festgelegten Durchbiegungsgrenze
- Erreichen festgelegter Werte für axiale Bewegungen aufgrund thermischer Dehnungen

Als Durchbiegungsgrenze des Öffnungselementes wird analog zu vollen Paneelen ein Wert von $w_{max} = l/100$ vorgeschlagen. Nach Erfordernis ist auch die relative Durchbiegung des Fensterrahmens selbst zu begrenzen, um seine Funktion nicht zu beeinträchtigen. Die Verformungen können mit dem vorgestellten 3D-Modell oder vereinfacht mit dem gezeigten Stabwerkmodell ermittelt werden. Beide Modelle erfordern eine experimentelle Ermittlung der Verbindungsnachgiebigkeit, wie sie in den vorangegangenen Kapiteln 5.3.1 bzw. 5.3.2 vorgeschlagen wurden.

5.5 Öffnungselement - Erkenntnisse und Ausblick

In diesem Kapitel wurden Sandwichpaneele mit Vollausschnitt und integriertem, tragendem Fensterrahmen experimentell und numerisch untersucht. Die Bauteile werden als Öffnungselemente bezeichnet. Der biegesteife Anschluss zwischen den Paneelen und dem Fensterrahmen wird durch Verbindungsbauteile realisiert, die als Einschublinge bezeichnet werden. Es wurden vier Typen von Einschublingen entwickelt. Für diese wurden Traglastversuche am Öffnungselement durchgeführt (GSP-Rahmentest).

Die Einschublinge mit Rohrquerschnitten im Mittelteil (Typ 2 und Typ 3) erreichten die höchste Biege-Tragfähigkeit (rund 80 % eines vollen Paneels, bezogen auf die Stelle des Bauteilversagens). Sie ermöglichen eine verteilte Einleitung der Deckblechspannungen über die Paneelbreite. Nachteilig sind die dicken Wandstärken des Rohrquerschnitts, die eine Wärmebrücke zwischen innerer und äußerer Fassadenebene herstellen. Es wird eine Optimierung des Querschnitts mit dünneren Wandstärken, Wandausschnitten oder thermisch günstigeren Werkstoffen (z.B. Edelstahl) empfohlen. Dabei ist auf die Balance zwischen geringer Wärmeleitung und ausreichend Torsionssteifigkeit zu achten. Mit Einschubling Typ 4 (U-Profil mit Laschen - versteift) wurde eine Tragfähigkeit von rund 60 %, bezogen auf ein volles Paneel, erreicht. Aufgrund der geringeren Wärmeleitung bietet sich dieser Typ als Alternative zu den Rohrquerschnitten an. Mit Einschubling Typ 1 konnten dagegen nur sehr geringe Traglasten erreicht werden, da sich die Verbindung als instabil im Druckbereich erwies.

An der ausgeführten Nietverbindung zwischen Einschubling und Deckblech kam es bei höheren Lasten stets zu einem Lochleibungsversagen im Deckblech (Langlochbildung). Ein globales Versagen des Öffnungselementes hatte dies jedoch nicht zur Folge, da sich Lastumlagerungen in benachbarte Nieten einstellten. Durch die punktuelle Lasteinleitung in das dünne Deckblech zeigte diese Verbindung eine sehr hohe Nachgiebigkeit. Als Alternative kommt eine vollflächige Verklebung von Deckblech und Einschubling in Betracht, wie diese bereits Berner/Pfaff [14] vorschlagen. Allerdings wird die Herstellung einer solchen Verklebung an der Innenseite der Deckbleche als durchaus aufwendig betrachtet.

Durch das zusätzliche Einbringen von 2K-PUR-Schaum zwischen Einschubling und Deckblech konnte der originale Verbund zwischen Deckblech und Kernschicht im Anschlussbereich wieder hergestellt werden. Damit wurde das druckbeanspruchte Deckblech gegen vorzeitiges Knittern stabilisiert. Die Maßnahme erwies sich als einfach in der Herstellung und wird empfohlen.

Die Schraubverbindung zwischen den Einschublingen und dem Fensterrahmen führte zu keinem globalen Versagen. Allerdings wurden die Flanken der Senklöcher im Pfostenprofil des Rahmens durch die Abscherbeanspruchung eingedrückt (Langlochbildung). Damit war auch diese Verbindung sehr nachgiebig. Die ausgeführten Senklöcher, mit einem Flankenwinkel von 45° , werden als ungeeignet eingestuft. Stattdessen wird der Einsatz von Zylinderkopfschrauben mit geradem Bohrloch empfohlen, wodurch die Anpressfläche im Pfostenprofil höher ist. Auch Senkschrauben mit steileren Flanken (wie in Abb. 5.61 dargestellt) bieten eine Alternative, wenn ein Überstehen des Schraubenkopfes aus konstruktiven Gründen nicht zulässig ist.

Mit den experimentellen Untersuchungen wurde gezeigt, dass durch Öffnungselemente eine ausreichende Tragfähigkeit realisiert werden kann, um auf eine extra Unterkonstruktion für große Öffnungen zu verzichten.

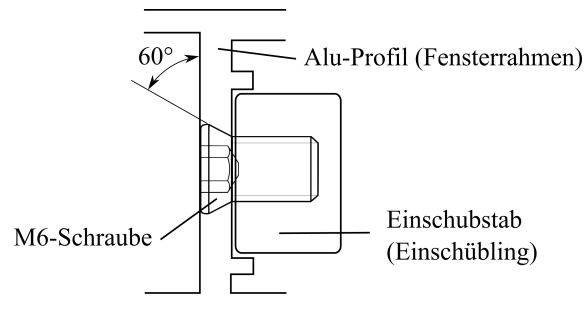


Abb. 5.61: Alternative Senkkopfschraube (Flankenwinkel 60°)

Allerdings wurden bei allen Typen von Einschüblingen rund dreimal höhere Durchsenkungen als bei vollen Paneelen gemessen. Dies wird einerseits auf die erwähnten Nachgiebigkeiten in den Verbindungen und auf Verformungen im Einschubling selbst zurückgeführt. Andererseits beträgt die Gesamtbiegesteifigkeit des Fensterrahmens nur 35 % von jener des Sandwichpaneels. Durch die geringere Biegesteifigkeit des Öffnungselementes sind Lastumlagerungen auf angrenzende Sandwichpaneel in der Nut-Feder-Längsfuge unvermeidbar und müssen bei der Bemessung dieser berücksichtigt werden. Dies kann natürlich auch bewusst genutzt werden, um Tragreserven in angrenzenden Paneelen auszunützen und das Öffnungselement schwächer zu dimensionieren. Jedenfalls muss die Tragfähigkeit der Längsfuge (experimentell) ermittelt werden. Zur Beurteilung der Lastumlagerungen werden Traglastversuche von Öffnungselementen mit benachbarten Paneelen empfohlen, wie diese Rädle [29] für Sandwichpaneel mit Fensterbändern durchführte.

Um Öffnungselemente baupraktisch bemessen zu können, wurden zwei numerische Modelle zur Ermittlung der Schnitt- und Verformungsgrößen entwickelt. Beim ersten, dem vereinfachten Stabwerksmodell, wurde der Einschubling mit seinen Nachgiebigkeiten zusammengefasst als Drehfeder abgebildet. Kalibriert wurde diese durch die gemessenen Verformungen beim GSP-Rahmentest. Es ergaben sich lastabhängige und somit nicht konstante Drehfedersteifigkeiten. Das Stabwerkmodell kann einfach in den Elementverband von Böttcher [16] integriert werden, womit auch die Berechnung eines System mit angrenzenden Nachbarpaneelen möglich ist. Im zweiten Modell, dem 3D-FEM-Modell, wurden alle maßgebenden Bestandteile des Öffnungselementes abgebildet. Dies ermöglicht die Ermittlung aller Teilschnittgrößen, die für eine Bemessung erforderlich sind. Zur Kalibrierung auf das reale Verformungsverhalten ist eine experimentelle Ermittlung der Nachgiebigkeiten in der Schraub- und Nietverbindung (durch Zugversuche an den Verbindungen) nötig. Das 3D-Modell kann durch angrenzende Nachbarpaneel erweitert werden, um die Lastumlagerungen in einem gekoppelten Gesamtsystem zu erfassen. In Kap. 6 wird dies am Beispiel von Sandwichpaneelen mit angrenzenden Fensterbändern gezeigt.

6 Horizontal verlegte Glas-Sandwich-Paneele mit Fensterbändern

6.1 Systembeschreibung

In Gebäudehüllen aus horizontal verlegten Glas-Sandwich-Paneelen (GSP) der Firma iconic skin sollen Fensterbänder in voller Paneelgröße integriert werden. In Abb. 6.1 ist ein Ausschnitt einer solchen Fassade am Beispiel eines Massivbaus in der Ansicht und im Schnitt dargestellt.

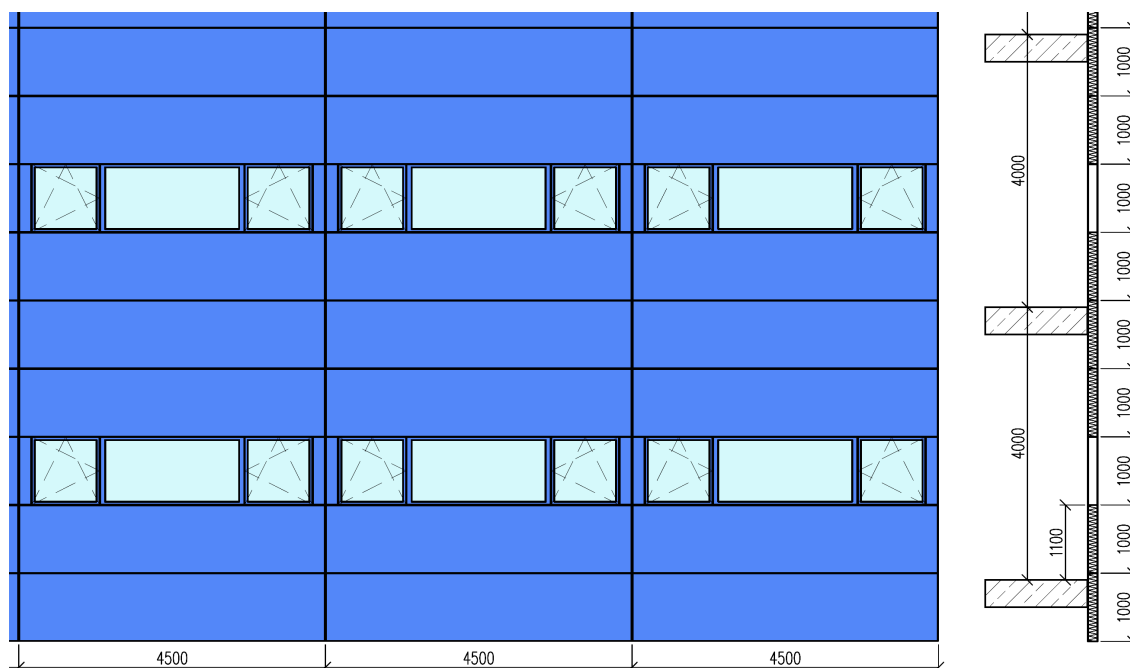


Abb. 6.1: Ansicht und Schnitt einer GSP-Fassade mit Fensterbändern ©iconic skin

Die Glas-Sandwich-Paneele spannen dabei als Einfeldträger zwischen der Unterkonstruktion (Stützen oder Pfosten) und sind an den Auflagern mit dieser verschraubt. Auch die Fensterbänder werden als Einfeldträger ausgeführt. Am oberen und unteren Rand eines Fensterbandes befindet sich jeweils ein Adapterprofil, welches den konstruktiven Anschluss an das darüber- bzw. darunterliegende Sandwichpaneel sicherstellt (grün dargestellt in Abb. 6.2). An den Enden sind die horizontalen Adapterprofile über Eckverbinder an vertikale Pfostenprofile angeschlossen (rot dargestellt in Abb. 6.2). Die Verschraubung mit der Unterkonstruktion erfolgt über Winkel an den vertikalen Pfosten. In diesen Rahmen aus Adapterprofilen und Pfosten werden die Fenster und/oder die Festverglasung eingebaut.

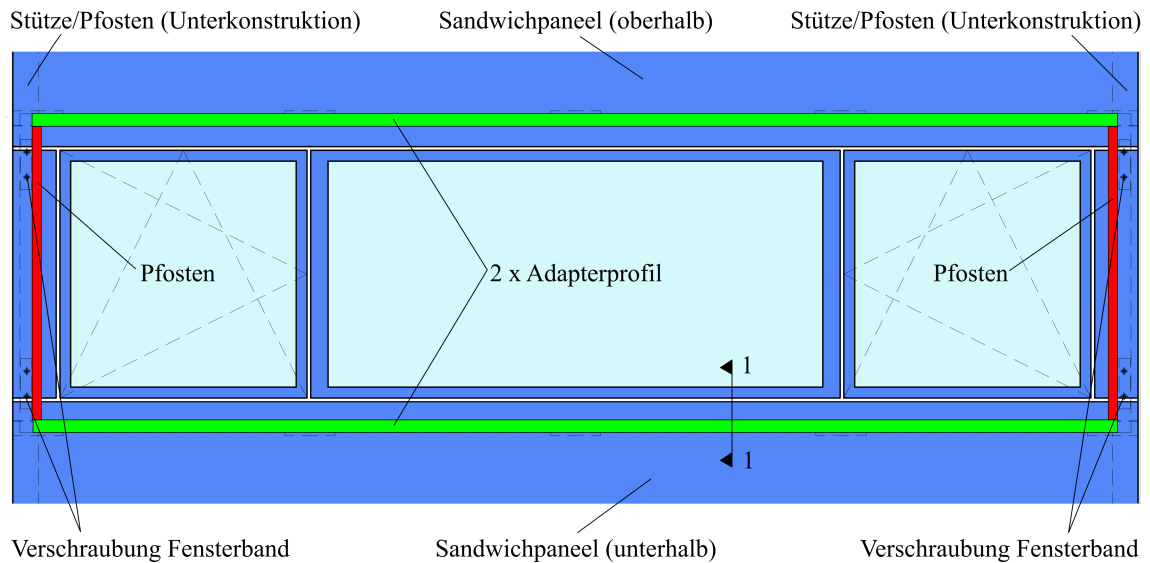


Abb. 6.2: Ansicht Fensterband mit Adapterprofilen

In Abb. 6.3 ist ein Schnitt im Bereich einer Festverglasung dargestellt. Wie in dieser zu erkennen ist, wird die originale, profilierte Längsfuge der angrenzenden Sandwichpaneele (aus konstruktiven Gründen) abgetrennt. Stattdessen umfasst das Adapterprofil das Sandwichpaneel beidseitig und stellt einen Formschluss sicher. Die Adapterprofile nehmen die

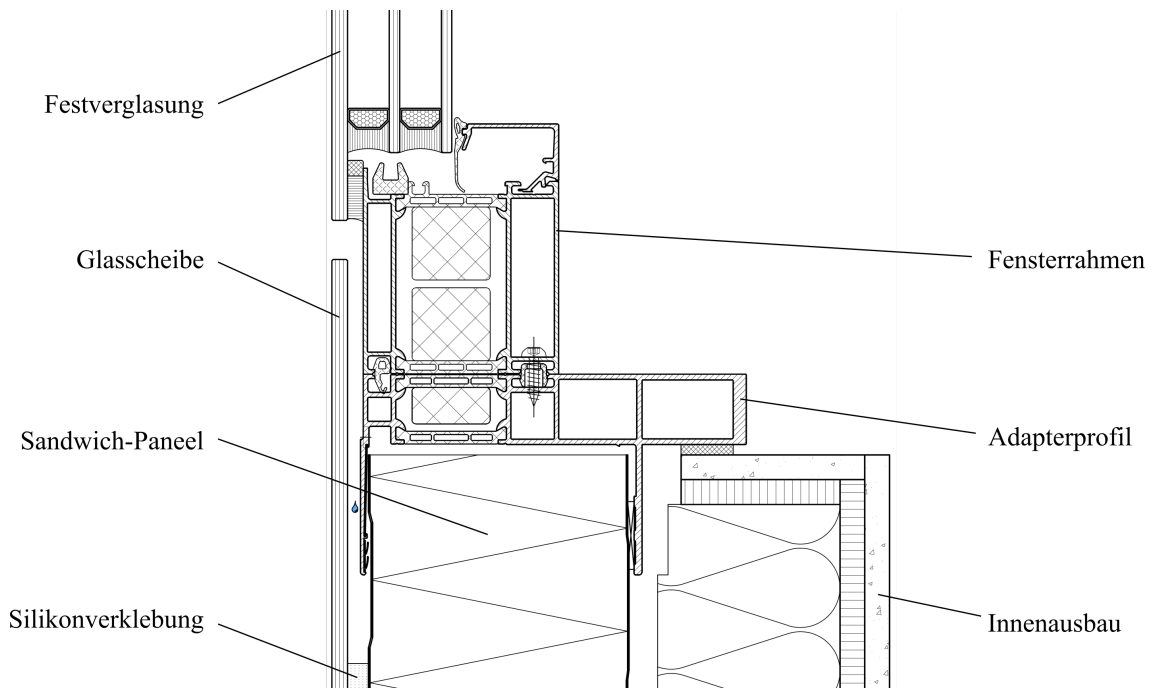


Abb. 6.3: Schnitt 1-1: Anschlussbereich von GSP und Fensterband

auf das Fensterband einwirkenden Querlasten (Wind, Temperatur, offene Fenster) auf und tragen sie in die Unterkonstruktion ab. Das Eigengewicht des Fensterbandes soll dagegen vom darunter liegenden Paneel aufgenommen und von diesem in die Unterkonstruktion abgeleitet werden. Damit können die Adapterprofile sehr schlank ausgeführt werden. Das beschriebene Fassadensystem soll für unterschiedliche GSP-Dicken (ca. 100 bis 180 mm),

veränderliche Fensterhöhen (1 bis 2 m) und variable Spannweiten (4 bis 5 m) eingesetzt werden.

6.2 Statische Modellierung

Wie beschrieben besteht das System aus einem Fensterband und zwei angrenzenden Glas-Sandwich-Paneeeln. Alle drei Bauteile spannen als Einfeldträger zwischen den Stützen bzw. Pfosten der Unterkonstruktion. An der oberen und unteren Längsfuge ist das Fensterband mit den angrenzenden GSP gekoppelt (Formschluss). Das System wird bei der statischen Modellbildung durch folgende Schritte vereinfacht:

- Es wird nur ein halbes System (unteres GSP und halbes Fensterband) abgebildet, da das System um die Längsachse des Fensterbandes symmetrisch ist.
- Anstelle des halben Fensterbandes wird nur das Adapterprofil modelliert, welches die halbe Fensterbandfläche als Lastezugsfläche besitzt. Die Pfosten aus Abb. 6.2 werden vernachlässigt und stattdessen das Adapterprofil direkt an beiden Endpunkte gelagert.
- Die aufgeklebte Glasscheibe beim GSP wird nicht berücksichtigt, da sie aufgrund der schubweichen Verklebung einen sehr geringen Einfluss auf die Tragwirkung hat (siehe auch Kap. 5.1.1).

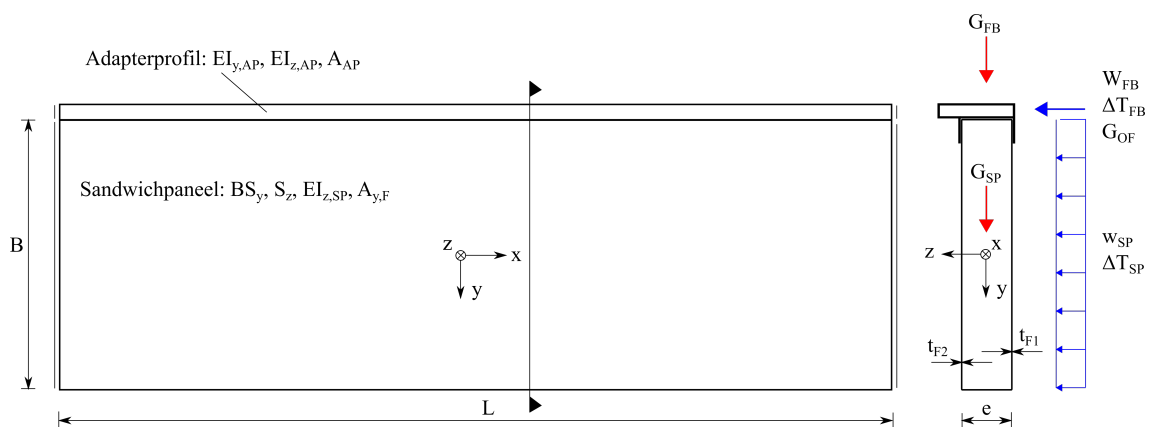


Abb. 6.4: Statisches System Sandwichpaneel-Adapterprofil mit Belastung

Querschnittswerte:

L	.....	Spannweite
B	.....	Paneelbreite
e	.....	Abstand der Deckschicht-Schwerpunkte
$t_{F,1/2}$	.....	Dicke der äußeren/inneren Deckschicht
BS_y	.....	Biegesteifigkeit des Sandwichpaneels um die y-Achse
S_z	.....	Schubsteifigkeit der Kernschicht in z-Richtung
$EI_{z,SP}$	.....	Biegesteifigkeit des Sandwichpaneels um die z-Achse
$A_{z,F}$	.....	Schubfläche der Deckschichten in y-Richtung
$EI_{z,AP}$	.....	Biegesteifigkeit des Adapterprofils um die z-Achse
$EI_{y,AP}$	.....	Biegesteifigkeit des Adapterprofils um die y-Achse
A_{AP}	.....	Fläche des Adapterprofils

Belastungen:

G_{FB}	.....	Eigengewicht Fensterband
G_{SP}	.....	Eigengewicht Sandwich-Paneel (bzw. Glas-Sandwich-Paneel)
G_{FB}	.....	Querlast durch offene Fenster am Adapterprofil
W_{FB}	.....	Windbelastung am Fensterband
ΔT_{FB}	.....	Temperaturbelastung am Fensterband
w_{SP}	.....	Windbelastung am Sandwichpaneel
ΔT_{FB}	.....	Temperaturbelastung am Sandwichpaneel

In Abb. 6.4 ist das statische System mit den einwirkenden Lasten dargestellt. Wie bereits erwähnt, soll das Adapterprofil die einwirkenden Querlasten (Wind, Temperatur, Querbelastung durch offene Fenster) selbst abtragen. Durch die gekoppelte Längsfuge treten jedoch Lastumlagerungen auf, die einen Einfluss auf die Bauteil-Bemessung haben. Das Eigengewicht des Fensterbandes soll vom Sandwichpaneel aufgenommen werden. Die dabei auftretende Belastung des Sandwichpaneels parallel zur Paneelebene ist normativ nicht geregelt. Zunächst wird der Abtrag von Lasten parallel und quer zur Fassadenebene getrennt voneinander betrachtet. Zuletzt wird ein 3D-Modell vorgestellt, in dem Lasten quer- und parallel zur Fassadenebene aufgebracht werden können.

6.3 Lastabtragung quer zur Fassadenebene

Das Sandwichelement und das Adapterprofil sind durch den Form- und Kraftschluss in der gemeinsamen Längsfuge fest gekoppelt. Die Verformung in der Längsfuge ist dadurch stets identisch (siehe Punkt 1 in Abb. 6.5). Bei unterschiedlicher Verformungssteifigkeit beider Bauteile kommt es, auch bei gemeinsamer Belastung beider Bauteile (z.B. Wind), zu Schnittkraftumlagerungen über die Längsfuge, da sich keine freie Verformung einstellen kann. Bei ungleichmäßiger Belastung sind Umlagerungen auch bei gleicher Verformungssteifigkeit nicht zu vermeiden. Dies tritt z.B. bei Querbelastung des Adapterprofils durch offene Fenster auf, aber auch bei Temperaturbelastungen. Letztere führen bei Sandwichpaneelen aufgrund der isolierenden Kernschicht zu erheblichen Biegeverformungen. Beim Fensterband mit höherem Wärmedurchgang tritt eine solche Temperatur-Biegeverformung vermutlich nicht in der gleichen Größenordnung auf.

Deshalb wird eine Schnittgrößenermittlung am gekoppelten System Sandwichpaneel-Adapterprofil zur Berücksichtigung der Lastumlagerungen als notwendig erachtet. Es wird im Folgenden eine Berechnungsformel für die Momentenumlagerung entwickelt, sowie ein Stabwerkmodell zur Berechnung der Schnittgrößen vorgestellt. Die Ergebnisse beider Varianten werden gegenübergestellt.

Q_{FB}	.....	Querbelastung am Fensterband
q_{SP}	.....	Querbelastung am Sandwich-Paneel
$w_{z,AP}$	.....	Verformung des Adapterprofils in z-Richtung
$w_{z,SP}$	.....	Verformung des Sandwichpaneel an der Kopplungsfuge in z-Richtung

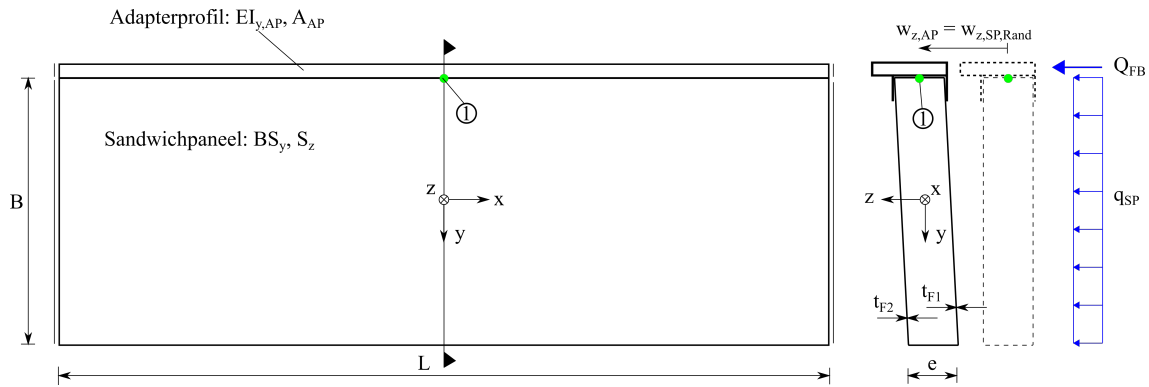


Abb. 6.5: Statisches System Sandwichpaneel-Adapterprofil mit Belastung quer zur Fassadenebene

6.3.1 Berechnungsformel für die Momentenumlagerung

Würden bei Belastung quer zur Fassadenebene beide Bauteile isoliert voneinander betrachtet werden, so stellten sich durch die Belastung folgende Biegemomente in Feldmitte ein:

$$M_{y,SP,isoliert} = \frac{q_{SP} \cdot B \cdot L^2}{8} \quad (6.1)$$

$$M_{y,AP,isoliert} = \frac{Q_{AP} \cdot L^2}{8} \quad (6.2)$$

Jedoch tritt durch erwähnte Kopplung ein Umlagerungsmoment ΔM_y auf. Es wird eine analytische Lösung entwickelt, um dieses betragsmäßig erfassen zu können. Benötigt wird der Zusammenhang zwischen den Eingangsparametern

- Biegesteifigkeit $EI_{y,AP}$ des Adapterprofils,
- Biegesteifigkeit BS_y und Schubsteifigkeit S_z des Sandwichpaneels,
- Paneelbreite B ,
- Systemlänge L

zum Umlagerungsmoment ΔM_y . Die Untersuchung erfolgt für ein Einfeldträgersystem. An beiden Bauteilen wird eine gleichmäßig verteilte Lasteinwirkung (z.B. Wind, Temperatur) vorausgesetzt. Es wird der gemeinsame Randpunkt ① des Sandwichpaneels und des Adapterprofils in Feldmitte betrachtet (siehe Abb. 6.5). Wie erwähnt stellt sich dort aufgrund der Kopplung stets die gleiche Verformung ein.

$$w_{z,AP} = w_{z,SP,Rand} \quad (6.3)$$

Bei dem schubweichen Sandwichpaneel setzt sich die Gesamtverformungen gemäß Gl. (2.4) aus den Anteilen Biege- und Schubverformung zusammen. EN 14509 [5] gibt in Tabelle E.10.1 eine Berechnungsformel für die Gesamtverformung eines gleichmäßig belasteten, einfeldrigen Sandwichpaneels in Bauteilmitte an. Der Anteil der Schubverformung wird über einen Erhöhungsfaktor k berücksichtigt, der von der Systemlänge und dem Verhältnis von Biege- und Schubsteifigkeit abhängt.

$$w_{z,SP} = \frac{5 \cdot q_{SP} \cdot L^4}{384 \cdot BS} \cdot (1 + 3.2 \cdot k) = \frac{M_{y,SP} \cdot L^2}{9.6 \cdot BS} \cdot (1 + 3.2 \cdot k) \quad (6.4)$$

mit:

$$k = \frac{3 \cdot BS}{L^2 \cdot G_C \cdot B} \quad (6.5)$$

Gl. (6.4) gilt jedoch für ein isoliertes Paneel, dessen Verformung über die Bauteilbreite konstant ist. Im vorliegenden, gekoppelten System treten dagegen Lastumlagerungen in der Längsfuge auf, die als zusätzliche Randlast auf das Paneel einwirken. Dadurch unterscheiden sich die Verformungen am Bauteilrand und im Bauteilzentrum. In Kap. 3.2.1 wurde bereits die Verteilung der Deckschicht-Spannungen über die Bauteilbreite bei exzentrisch belasteten Sandwichpaneelen beschrieben. Die erhöhten Randspannungen können durch den Faktor k_σ nach Rädcl [29] ermittelt werden, mit welchem das umgelagerte Biegemoment ΔM_y erhöht wird. Gemäß Gl. (3.29) ergibt sich das Moment am Rand des Sandwichpaneels zu:

$$M_{y,SP} = \Delta M_y \cdot k_\sigma + M_{y,SP,isoliert} \quad (6.6)$$

Der Erhöhungsfaktor wird für die Ermittlung der Randverformung übernommen. Die

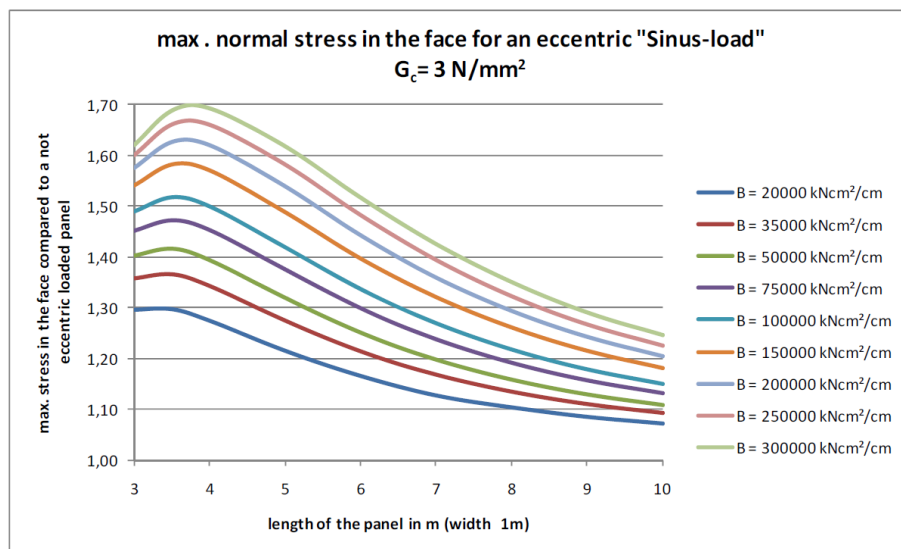


Abb. 6.6: Nomogramm zur Bestimmung des Lasterhöhungsfaktors k_σ (für Kernschicht-Schubmodul $G_C = 3 \text{ N/mm}^2$) [17]

entsprechenden Werte für k_σ können mit Nomogrammen aus den *Preliminary European Recommendations for the Design of Sandwich Panels with Openings* [17] ermittelt werden. Abhängig ist der Erhöhungswert vom Schubmodul der Kernschicht, der Biegesteifigkeit des Sandwichpaneels und der Spannweite des Paneels. In Abb. 6.6 ist ein solches Nomogramm für einen Schubmodul der Kernschicht von $G_C = 3 \text{ N/mm}^2$ beispielhaft dargestellt. Durch Einsetzen von Gl. (6.6) in Gl. (6.4) kann die Verformung des Sandwichpaneels am betrachteten Randpunkt wie folgt dargestellt werden:

$$w_{z,SP,Rand} = \left(\frac{(\Delta M_y \cdot k_\sigma + M_{y,SP,isoliert}) \cdot L^2}{9.6 \cdot BS} \right) \cdot (1 + 3.2 \cdot k) \quad (6.7)$$

Die Verformung $w_{z,AP}$ des schubstarren Adapterprofils kann ebenfalls mit der Berechnungsformel für gleichmäßig belastete Einfeldträger ermittelt werden:

$$w_{AP} = \frac{5 \cdot q_{AP} \cdot L^4}{384 \cdot EI_{AP}} = \frac{M_{y,AP} \cdot L^2}{9.6 \cdot EI_{AP}} \quad (6.8)$$

Analog zum Sandwichpaneel setzt sich das Gesamtmoment am Adapterprofil $M_{y,AP}$ aus dem Moment eines isolierten Paneels $M_{y,AP,isoliert}$ und dem Umlagerungsmoment ΔM_y zusammen, welches abgezogen wird.

$$w_{z,AP} = \frac{(M_{y,AP,isoliert} - \Delta M_y) \cdot L^2}{9.6 \cdot EI_{AP}} \quad (6.9)$$

Durch Einsetzen von Gl. (6.7) und Gl. (6.9) in Gl. (6.3) ergibt sich die Verformungskompatibilität am Punkt 1 zu:

$$\frac{(M_{y,AP,isoliert} - \Delta M_y) \cdot L^2}{9.6 \cdot EI_{AP}} = \frac{(\Delta M_y \cdot k_\sigma + M_{y,SP,isoliert}) \cdot L^2}{9.6 \cdot BS} \cdot (1 + 3.2 \cdot k) \quad (6.10)$$

Durch Vereinfachen und Umformen kann das umgelagerte Moment ΔM_y ausgedrückt werden zu:

$$\Delta M_y = \frac{\frac{M_{y,AP,isoliert}}{EI_{AP}} - \frac{M_{y,SP,isoliert} \cdot (1+3.2 \cdot k)}{BS}}{\frac{k_\sigma}{BS} \cdot (1 + 3.2 \cdot k) + \frac{1}{EI_{AP}}} \quad (6.11)$$

Mit Gl. (6.11) kann das umgelagerte Moment ΔM_y in Feldmitte für beliebige Steifigkeitsverhältnisse von Sandwichpaneel und Adapterprofil ermittelt werden. Auch der Einfluss der Systemlänge und der Paneelbreite wird berücksichtigt. Mit dem Betrag der Momentenumlagerung können die maximal einwirkenden Feldmomente an Sandwichpaneel und Adapterprofil, sowie die maximale Verformung in der gekoppelten Längsfuge bestimmt werden:

$$M_{y,SP} = M_{y,SP,isoliert} + k_\sigma \cdot \Delta M_y \quad (6.12)$$

$$M_{y,AP} = M_{y,AP,isoliert} - \Delta M_y \quad (6.13)$$

$$w_{z,SP,Rand} = w_{z,AP} = \frac{(M_{y,AP,isoliert} - \Delta M_y) \cdot L^2}{9.6 \cdot EI_{AP}} \quad (6.14)$$

mit:

$M_{y,SP}$	.....	Biegemoment Sandwichpaneel um y-Achse
$M_{y,SP,isoliert}$	.....	Biegemoment isoliertens Sandwichpaneel um y-Achse
k_σ	.....	Erhöhungsfaktor für exzentrische Belastung
ΔM_y	.....	Umgelagertes Moment um y-Achse
$M_{y,AP}$	.....	Biegemoment Adapterprofile um y-Achse
$M_{y,AP,isoliert}$	.....	Biegemoment isoliertes Adapterprofil um y-Achse
$w_{z,SP,Rand}$	.....	Verformung Sandwichpaneel am Kopplungsrand in z-Richtung
$w_{z,AP}$	.....	Verformung des Adapterprofiles in z-Richtung
L	.....	Spannweite
EI_{AP}	.....	Biegesteifigkeit des Adapterprofiles um die z-Achse

Eine Auswertung der Berechnungsformel, für verschiedene Einflussparameter, folgt anhand eines Vergleiches mit den Ergebnissen am Elementverband in Kap. 6.3.2.

6.3.2 Stabwerkmodell des Elementverbandes

Mit dem Elementverband von Böttcher [16] können Sandwichpaneele mit Öffnungen und angrenzende, volle Paneele als Stabwerkmodell abgebildet werden. Der Aufbau und die Auswertung werden in Kap. 3.2 beschrieben. Rädle [29] nutze das Modell des Elementverbandes, um volle Sandwichpaneele mit angrenzenden Fensterbändern zu untersuchen. Dabei wird das Adapterprofil des Fensterbandes als Stabzug abgebildet, der mit den Querträgern des Sandwichpaneels über Pendelstäbe gekoppelt ist. Die Pendelstäbe bilden dort die Steifigkeit der Längsfuge ab. Im vorliegenden System können einige Vereinfachungen getroffen werden:

- Die profilierte Längsfuge wird vom Paneel abgetrennt. Deren Nachgiebigkeit entfällt somit und muss nicht durch Pendelstäbe berücksichtigt werden. Stattdessen schließen die Querträger des Sandwichpaneels direkt am Adapterprofil an. Es wird im Kopplungsbereich ein Stabendgelenk an den Querträgern eingeführt, welches nur den Übertrag von Querkräften in z-Richtung erlaubt.
- Es werden nur jene Querträger modelliert, die an das Adapterprofil anschließen, da auf die gegenüberliegenden keine Belastung einwirkt.

Mit den Vereinfachungen ergibt sich der Elementverband für das System Sandwichpaneel-Adapterprofil gemäß Abb. 6.7. Die Belastungen können als Stablasten am Adapterprofil bzw. am Längsträger des Sandwichpaneels aufgebracht werden.

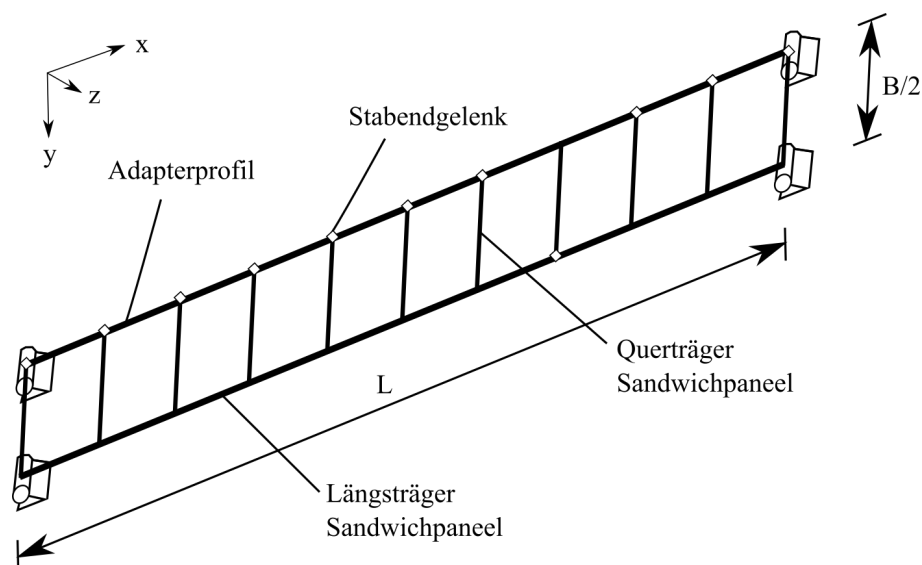


Abb. 6.7: Elementverband für das System Sandwichpaneel-Adapterprofil

Es wird eine Parameterstudie mit einer Variation des Flächenträgheitsmomentes des Adapterprofils $I_{y,AP}$ am Elementverband durchgeführt. Dabei werden Systeme mit Spannweiten von 4.0 m, 4.5 m und 5.0 m, sowie Paneeldicken von 100 mm und 140 mm untersucht. Daraus ergeben sich die sechs Konfigurationen:

- FP-P 100 Paneel ($D = 100$ mm), Spannweite 4.0 m
- FP-P 100 Paneel ($D = 100$ mm), Spannweite 4.5 m
- FP-P 100 Paneel ($D = 100$ mm), Spannweite 5.0 m
- FP-P 140 Paneel ($D = 140$ mm), Spannweite 4.0 m
- FP-P 140 Paneel ($D = 140$ mm), Spannweite 4.5 m
- FP-P 140 Paneel ($D = 140$ mm), Spannweite 5.0 m

Die Paneelbreite und die Breite des Fensterbandes betragen jeweils 1 m. Die Untersuchung erfolgt für eine, auf beide Bauteile wirkende, Flächenlast von 1.0 kN/m^2 . Damit ergeben sich folgende Stablasten:

$$q_{SP} = q \cdot B = 1 \cdot 1 = 1 \text{ kN/m}$$

$$q_{AP} = q \cdot \frac{B_{FB}}{2} = 1 \cdot \frac{1}{2} = 0.5 \text{ kN/m}$$

mit:

q_{SP}	.....	Stablast am Längsträger des Sandwichpaneels
q	.....	Flächenbelastung an der Fassade
B	.....	Breite Adapterprofil
q_{AP}	.....	Stablast am Adapterprofil
B_{FB}	.....	Breite Fensterband

Die Untersuchung erfolgt für FP-P Wandpaneelle des Herstellers Brucha. Die Paneele sind jeweils mit einer Deckschicht der Stahlgüte $S320GD$ und einer Kernschicht aus PUR gefertigt. Die Deckblechdicken betragen außen $t_{F,1} = 0.6$ mm und innen $t_{F,2} = 0.5$ mm. Die Materialkennwerte sind der abZ des Herstellers Brucha [1] entnommen. Das Adapterprofil wird aus Aluminium der Güte 6060 – T66 gefertigt.

In Tab. 6.1 sind die maßgebenden Material- und Querschnittswerte für die Stäbe des Elementverbandes aufgelistet. Sie werden nach Kap. 3.2 mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes MS Excel ermittelt. Die Querschnittsfläche des Adapterprofils wird mit $A_{AP} = 1000 \text{ mm}^2$ angenommen. Dieser Wert liegt im Bereich jener Adapterprofile, die von der Firma iconic skin für den Einsatz in den Fensterbändern geplant sind. Der Einfluss der Mikroprofilierung der Deckschichten auf die Quersteifigkeit fließt durch den in Kap. 4.4 ermittelten Ersatz-E-Modul für die Querrichtung ein. Es wird ein gemittelter Wert von $E_{SP,Q} = 105000 \text{ N/mm}^2$ verwendet. Für den Schubmodul in Querrichtung wird nach Gl. (4.4) ein Wert von $G_{SP,Q} = 2.38 \text{ N/mm}^2$ verwendet. Die Systemberechnung erfolgt mit der Stab-Statik-Software RSTAB des Herstellers Dlubal. Der Abstand der Querstäbe wird mit $l_Q = 250$ mm gewählt.

Tab. 6.1: Material- und Querschnittswerte für Parameterstudie am Elementverband

Adapterprofil		
E_{Alu} [N/mm ²]	70000	
$I_{y,AP}$ [mm ⁴]	variabel	
$I_{z,AP}$ [mm ⁴]	1	
$I_{T,AP}$ [mm ⁴]	1	
A_{AP} [mm ²]	1000	
Sandwichpaneel		
	FP-P 100	FP-P 140
<u>Längsträger</u>		
$E_{SP,L}$ [N/mm ²]	210000	210000
$G_{SP,L}$ [N/mm ²]	3.4	3.4
$I_{y,SP,L}$ [mm ⁴]	2700068	5307341
$I_{z,SP,L}$ [mm ⁴]	1	1
$I_{T,SP,L}$ [mm ⁴]	32661541414	45992632768
$A_{C,SP,L}$ [mm ²]	99500	139500
<u>Querträger</u>		
$E_{SP,Q}$ [N/mm ²]	105000	105000
$G_{SP,Q}$ [N/mm ²]	2.38	2.38
l_Q [mm]	250	250
$I_{y,SP,Q}$ [mm ⁴]	675017	1326835
$I_{z,SP,Q}$ [mm ⁴]	1	1
$I_{T,SP,Q}$ [mm ⁴]	1	1
$A_{C,SP,Q}$ [mm ²]	24875	34875

In Abb. 6.8 sind die Ergebnisse der Parameterstudie am Elementverband am Beispiel eines Systems mit einem FP-P 140 Sandwichpaneel und einer Spannweite von 4.5 m dargestellt. Die Auswertung erfolgt für das Umlagerungsmoment ΔM_y in Feldmitte, welches nach Gl. (3.26) aus dem Moment am Elementverband $M_{y,EV}$ ermittelt wird. Die zweite Kurve in Abb. 6.8 zeigt zum Vergleich die Auswertung der Berechnungsformel für das Umlagerungsmoment ΔM_y nach Gl. (6.11). Dafür wurde der Faktor für den Schubanteil mit $k = 0.35$ und der Beiwert für die erhöhten Randspannungen bzw. -verformungen mit $k_\sigma = 1.44$ bestimmt. Isoliert (nicht gekoppelt) betrachtet würde sich ein Biegemoment von $M_{y,SP} = 2531$ Nm am Sandwichpaneel und $M_{y,AP} = 1266$ Nm am Adapterprofil einstellen.

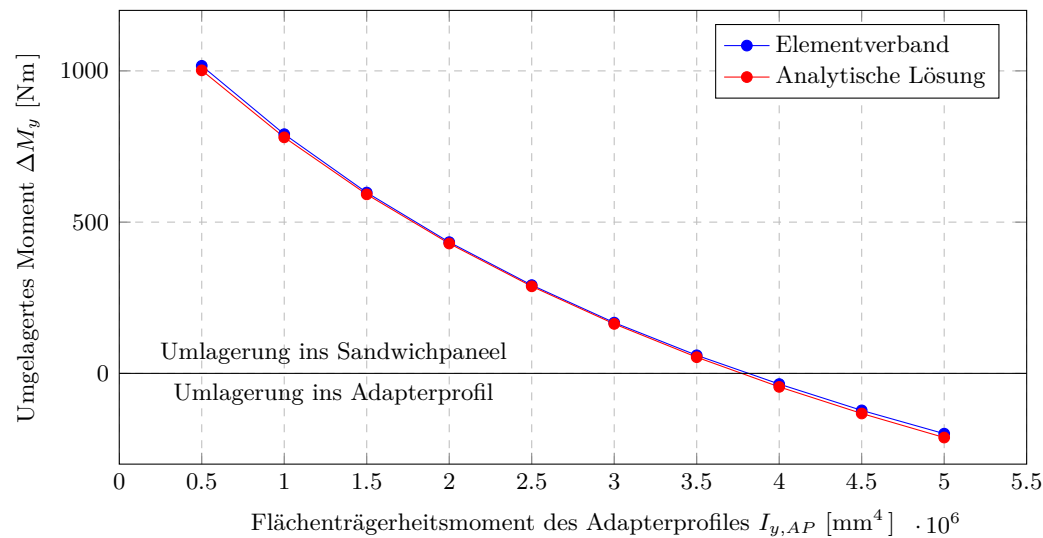


Abb. 6.8: Umlagerungsmoment in Feldmitte beim System Sandwichpaneel-Adapterprofil in Abhängigkeit der Adapterprofil-Steifigkeit; Vergleich Elementverband und analytische Lösung für Paneeltyp FP-P 140 ($D = 140$ mm), Spannweite $L = 4.5$ m, Belastung $q = 1.0$ kN/m²

Wie in Abb. 6.8 erkennbar, stimmen die Ergebnisse am Elementverband mit jenen der Berechnungsformel für alle Steifigkeitsverhältnisse Adapterprofil/Sandwichpaneel sehr gut überein. Bei der geringsten Adapterprofil-Steifigkeit von $I_{y,AP} = 0.5 \cdot 10^6$ mm⁴ beträgt die Abweichung 15 Nm, beim größten Wert von $I_{y,AP} = 5 \cdot 10^6$ mm⁴ liegt diese bei 13 Nm. In den Auswertungspunkten dazwischen ist die Abweichung stets kleiner und erreicht bei $I_{y,AP} = 2.5 \cdot 10^6$ mm⁴ mit 4 Nm ihren Minimalwert.

Es sei erwähnt, dass von der Firma iconic skin Adapterprofile mit einem Flächenträgheitsmoment von $I_{y,AP} \approx 3.5 \cdot 10^6$ mm⁴ für die Anwendung bei Fensterbändern geplant sind. Für die in Abb. 6.8 gezeigte Konfiguration würde dies eine geringe Momentenumlagerung in das Sandwichpaneel bedeuten. Die Auswertungen der anderen fünf untersuchten Spannweiten- bzw. Paneeldicken-Konfigurationen sind im Anhang A4 beigefügt und zeigen ähnliche Ergebnisse.

Aufgrund der gezeigten, guten Übereinstimmung wird Gl. (6.11) zur Bestimmung des umgelagerten Biegemomentes ΔM_y in Feldmitte als hinreichend genau betrachtet und für eine Bemessung der beiden Bauteile im gekoppelten System empfohlen.

6.4 Lastabtragung parallel zur Fassadenebene

In der Fassadenebene wirken auf das System Fensterband-Sandwichpaneel die vertikalen Eigenlasten des Glas-Sandwich-Paneels und des darüber liegenden Fensterbandes (siehe Abb. 6.9).

Zunächst werden die Biegesteifigkeiten EI_z beider Bauteile betrachtet. Für das Fensterband wird nur der Anteil des unten liegenden Adapterprofils herangezogen. Eigenbiegesteifigkeiten aus den Fensterrahmen werden, auf der sicheren Seite liegend, vernachlässigt. Ebenso eine Mitwirkung des oberen Adapterprofils. Die Flächenträgheitsmomente $I_{z,AP}$ um die z-Achse betragen bei den geplanten Adapterprofilen maximal rund 40 cm⁴. Die Biegesteifigkeit

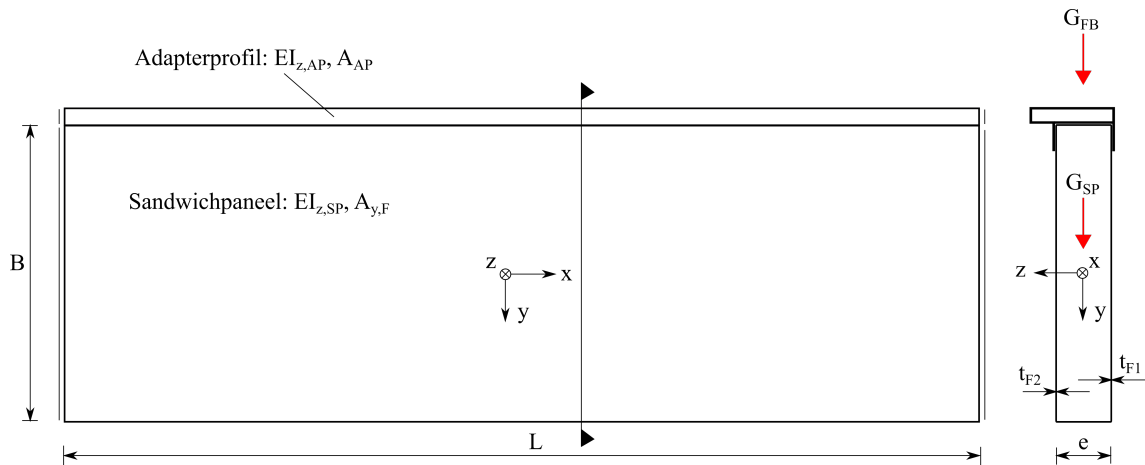


Abb. 6.9: Statisches System Sandwichpaneel-Adapterprofil bei Belastung in Fassadenebene

ergibt sich zu:

$$EI_{z,AP} = E_{Alu} \cdot I_{z,AP} = 70000 \cdot 40 \cdot 10^4 = 2.80 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2 \quad (6.15)$$

$$(6.16)$$

Das Sandwichpaneel wirkt bei vertikaler Belastung in Fassadenebene als Biegeträger mit der Paneelbreite B als statischer Nutzhöhe. Bei der Ermittlung der Biegesteifigkeit $EI_{z,SP}$ werden nur die Deckschichten aus Stahl berücksichtigt, da deren E-Modul ein Vielfaches höher als jener der Kernschicht ist (vgl. Tab. 2.1 aus Kap. 2). Die Biegesteifigkeit ergibt sich aus den Anteilen der inneren und äußeren Deckschicht. Für das Beispiel eines FP-P Paneels des Herstellers Brucha, mit einer Breite $B = 1000 \text{ mm}$ und Blechstärken von $t_{F1} = 0.6 \text{ mm}$ bei der äußeren bzw. $t_{F2} = 0.5 \text{ mm}$ bei der inneren Deckschicht, ergibt sich die Biegesteifigkeit zu:

$$EI_{z,SP} = E_S \cdot \frac{(t_{F1} + t_{F2}) \cdot B^3}{12} = 210000 \cdot \frac{0.5 + 0.6}{12} \cdot 1000^3 = 1.93 \cdot 10^{13} \text{ Nmm}^2 \quad (6.17)$$

Dies zeigt, dass die Biegesteifigkeit des Fensterbandes im Vergleich zu jener des Sandwichpaneels verschwindend gering ist. Es wird deshalb angenommen, dass sich die gesamte Eigenlast des Fensterbandes über die Längsfuge auf das darunter liegende Sandwichpaneel überträgt. In der Folge werden die kritischen Details des Systems GSP-Fensterband, dem Lastpfad folgend, beschrieben.

6.4.1 Lasteinleitung in das Sandwichpaneel

Die Lasteinleitung erfolgt durch Klotzung an kurzen U-Profilen im Bereich der Fensterrahmen-Riegel. Die U-Profile werden in die Kernschicht des Sandwichpaneels eingesteckt und mit dem Deckblech vernietet, wie in Abb. 6.10 schematisch dargestellt ist.

Die Lasteinleitung in das Deckblech erfolgt somit punktuell durch die Niete. Die Einleitung von, zur Paneelebene parallelen, Lasten in das freie Ende einer Deckschicht ist normativ nicht geregelt. Im Zuge des europäischen Forschungsprojektes EASIE (Ensuring Advancement in Sandwich Construction Through Innovation and Exploitation) erfolgten

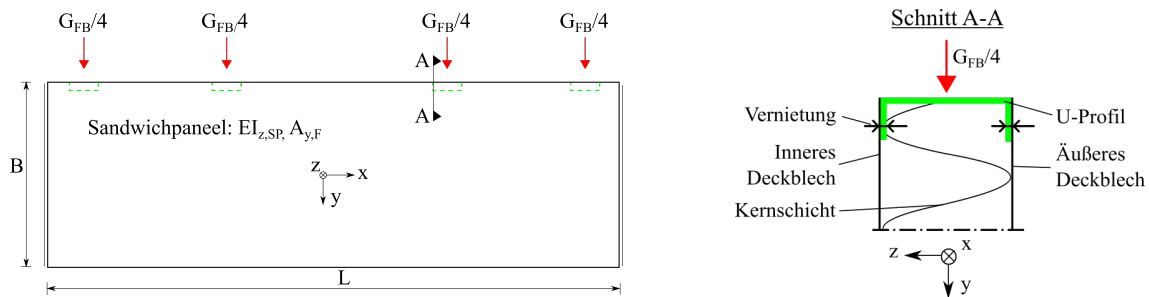


Abb. 6.10: Lasteinleitung der Fensterband-Eigenlasten in das Sandwichpaneel

jedoch bereits experimentelle und numerische Untersuchungen, die im Project Final Report zusammengefasst sind [19]. Bei der Lasteinleitung in das Deckblech versagt das Sandwichpaneel durch ein lokales Ausknicken der druckbeanspruchten Deckschicht, wie in Abb. 6.11 abgebildet ist.



Abb. 6.11: Versagen im Lasteinleitungsbereich durch Knicken des freien Deckblechendes [19]

Der Versagensmechanismus ist ähnlich dem Knittern. Bei den Versuchen konnten Spannungen im Bereich von 40 bis 90 N/mm² für Paneele mit einer Kernschicht aus PUR- und Mineralwolle erreicht werden [26]. Weiters ergaben die Versuche, dass sich inneres und äußeres Deckblech bei gleichzeitiger Belastung nicht negativ beeinflussen. Deshalb ist keine Abminderung der zulässigen Knickspannungen bei gleichzeitiger Belastung nötig.

In [26] wurde zudem ein Bemessungskonzept für die zulässige Knickspannung am freien Deckblechende entwickelt. Dieses basiert auf dem Ersatzstabverfahren nach EN 1991-1-1 [6] unter Verwendung von Knickkurven zur Berücksichtigung von Imperfektionen. Die Knickspannung $\sigma_{cr,w}$ wird analog zum elastisch gebetteten Balken beim Knittern ermittelt. Die Anpassung für das Ausknicken des freien Deckblechendes erfolgt mit der modifizierten Schlankheit λ_c . Die ermittelte Knickspannung σ_c^* wird überdies mit einem empirisch ermittelten Wert von 0.54 abgemindert, um zusätzliche Imperfektionen im Lasteinleitungsblech zu berücksichtigen (z.B. vom Sägen des Bleches.) Der Vorteil des Konzeptes besteht darin, dass nur Kennwerte aus den bestehenden Zulassungen der Sandwichpaneel-Hersteller benötigt werden. Im Folgenden werden die Bemessungsformeln dargestellt:

$$\alpha = \frac{1 + \chi_w \cdot \lambda_w^2 \cdot (\chi_w - 1) - \chi_w}{\chi_w \cdot (\lambda_w - \lambda_0)} \geq 0.21 \quad (6.18)$$

$$\chi_w = \frac{\sigma_w}{f_{y,F}} \quad (6.19)$$

$$\sigma_{cr,w} = \frac{3}{A_F} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{9} \cdot EI_F \cdot G_C \cdot E_C} \quad (6.20)$$

für eine Querdehnzahl der Deckschicht $\nu_F = 0.3$ gilt:

$$\sigma_{cr,w} = 0,82 \cdot \sqrt[3]{E_F \cdot G_C \cdot E_C} \lambda_w = \sqrt{\frac{f_{y,F}}{\sigma_{cr,w}}} \quad (6.21)$$

$$\lambda_0 = 0.7 \quad (6.22)$$

$$\sigma_c^* = \chi_c \cdot f_{y,F} \quad (6.23)$$

$$\lambda_c = \sqrt{2} \cdot \lambda_w \quad (6.24)$$

$$\chi_c = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_c^2}} \leq 1 \quad (6.25)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda_c - \lambda_0) + \lambda_c^2) \quad (6.26)$$

$$\sigma_{c,k} = 0.54 \cdot \sigma_c^* \quad (6.27)$$

mit:

α	.....	Imperfektionsfaktor
χ_w	.....	Reduktionsfaktor für Knitterspannung
λ_w	.....	Schlankheit der Deckschicht für Knittern
λ_0	.....	Plateauwert der Schlankheit
σ_w	.....	Knitterspannung
$f_{y,F}$	.....	Fließgrenze der Deckschicht
$\sigma_{cr,w}$	.....	Elastische Knitterspannung
A_F	.....	Querschnittsfläche der Deckschicht
EI_F	.....	Biegesteifigkeit der Deckschicht
G_C	.....	Schubmodul der Kernschicht
E_C	.....	E-Modul der Kernschicht (gemittelt Zug/Druck)
σ_c^*	.....	Knickspannung am freien Deckschichtende
λ_c	.....	Schlankheit der Deckschicht für Knicken am freien Deckschichtende
χ_c	.....	Reduktionsfaktor für Knicken am freien Deckschichtende
Φ	.....	Berechnungsfaktor
$\sigma_{c,k}$	.....	Reduzierte Knickspannung am freien Deckschichtende

Es wird angemerkt, dass die gezeigten Bemessungsformeln für eine Lasteinleitung parallel zur Bauteillängsrichtung entwickelt wurden. Im vorliegenden Fall erfolgt die Lasteinleitung jedoch in Querrichtung. Für diesen Fall wird empfohlen, das Bemessungskonzept unter Berücksichtigung der folgenden Unterschiede anzupassen:

- Der Schubmodul der Kernschicht in der Querrichtung unterscheidet sich von jenem in Längsrichtung.
- Bei quasi-ebenen Deckschichten ergeben sich zusätzliche Imperfektionen aufgrund der Mikroprofilierung.

Für die Materialkennwerte in Querrichtung können z.B. die Ergebnisse aus Kap. 4 bzw. die Untersuchungen von Böttcher [16] herangezogen werden. Für die Berücksichtigung der Imperfektionen aus der Mikroprofilierung ist beispielsweise die Entwicklung modifizierter Knickspannungskurven möglich.

Es erfolgt eine Auswertung der Berechnungsformel für ein FP-P 140 Paneel des Herstellers Brucha mit den Kennwerten gemäß Tab. 6.2. Die maximale Knickspannung am freien Deckblechrand ergibt sich zu $\sigma_{c,k} = 28.0 \text{ N/mm}^2$. Wird der Schubmodul für die Querrichtung nach Böttcher [16] zu $G_{yz} = 0.6 \cdot G_{xz}$ modifiziert, so reduziert sich die zulässige Knickspannung auf $\sigma_{c,k} = 23.7 \text{ N/mm}^2$. Dies entspricht einer Abminderung von rund 80 % im Vergleich zu den zulässigen Knitterspannungen. Die Werte sind für inneres und äußeres Deckblech identisch.

Tab. 6.2: Maßgebende Kennwerte Brucha FP-P 140 Paneel für Knickspannung im Lasteinleitungsbereich

Sandwichpaneel	Brucha FP-P 140
Deckschicht	Stahl S320GD
Profiltyp	1
f_y [N/mm ²]	320
E_F [N/mm ²]	210000
t_{F1} [mm]	0.6
t_{F2} [mm]	0.5
$\sigma_{W,F1}$ [N/mm ²]	107
$\sigma_{W,F2}$ [N/mm ²]	125
Schraube	M8 (Regelgewinde)
d_s [mm]	8
d_1 [mm]	6,5

Der Einfluss der Mikroprofilierung wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Zusätzlich wird erwartet, dass die ertragbaren Spannungen am freien Deckblechende durch die konzentrierte Lasteinleitung in den Nieten reduziert werden. Gleichzeitig wird jedoch angeregt, bei der geplanten Nietverbindung den Abminderungsfaktor von 0,54 genauer zu untersuchen, da kein gesägtes, freies Deckblechende vorliegt. Es wird jedenfalls eine experimentelle Untersuchung der geplanten Lasteinleitung vom Fensterband in das darunterliegende Sandwichpaneel empfohlen.

6.4.2 Lastabtrag im Sandwichpaneel

Das Sandwichpaneel spannt zwischen den Stützen oder Pfosten der Unterkonstruktion als Einfeldträger mit der Spannweite L . Die Befestigung an der Unterkonstruktion erfolgt über die Paneelbreite verteilt mit Schrauben, wie in Abb. 6.12 dargestellt ist. Nötig ist dies aufgrund der Zusatzlasten aus dem Fensterband. Eine verdeckte Befestigung in der Längsfuge (vgl. Kap. 2.5.4), wie sie beim Glas-Sandwich-Paneel ohne Öffnungen eingesetzt wird, bietet für diese Anwendung nicht genügend Tragfähigkeit.

Durch die verteilte Verschraubung über die Paneelbreite wird sich eine gewisse Randeinspannung einstellen, solange keine plastische Verformung eintritt. Im statischen Ersatzsystem in

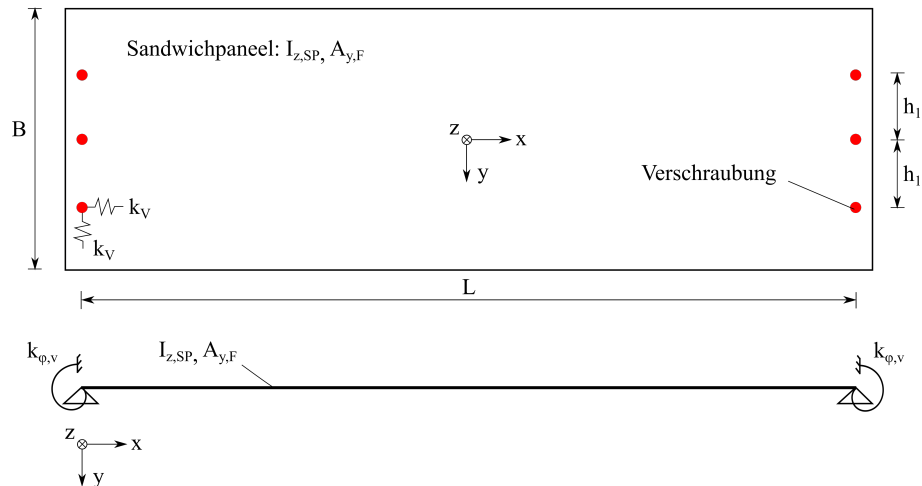


Abb. 6.12: Sandwichpaneel bei Belastung in Fassadenebene mit statischem Ersatzsystem

Abb. 6.12 wird die Einspannung als Drehfeder abgebildet. Deren Steifigkeit, und somit der Einspanngrad, hängt von der Steifigkeit der Schraubverbindung k_v und der Schraubenanordnung ab. Eine Untersuchung der Schraubverbindungs-Steifigkeit in Querrichtung erfolgt im nächsten Abschnitt. Für eine doppelt symmetrische Anordnung mit drei Schrauben pro Paneelseite ergibt sich die Drehfedersteifigkeit $k_{\phi,k}$ beispielsweise zu:

$$k_{\phi,k} = 2 \cdot k_v \cdot b_1 \quad (6.28)$$

mit:

- $k_{\phi,k}$ Steifigkeit der Drehfeder am Auflager
- k_v Steifigkeit der einzelnen Schraubverbindung
- b_1 Vertikaler Abstand der oberen/unteren Verschraubung

Bei vertikaler Belastung in Fassadenebene wirkt das Sandwichpaneel als Biegeträger mit der Paneelbreite B als statische Nutzhöhe. Aufgrund des großen Steifigkeitsunterschiedes ($E_S \gg E_C$) werden nur die Deckschichten für den Abtrag von Biegemomenten und Querkräften angesetzt. Damit ergeben sich die Querschnittswerte wie folgt:

$$I_{z,SP} = \frac{(t_{F1} + t_{F2}) \cdot B^3}{12} \quad (6.29)$$

$$W_{z,SP} = \frac{I_{z,SP}}{\frac{B}{2}} = \frac{(t_{F1} + t_{F2}) \cdot B^2}{6} \quad (6.30)$$

$$A_{y,F} = (t_{F1} + t_{F2}) \cdot B \quad (6.31)$$

mit:

- $I_{z,SP}$ Flächenträgheitsmoment des Sandwichpaneels um die z-Achse
- $t_{F,1/2}$ Dicke der äußeren/inneren Deckschicht
- B Paneelbreite
- $W_{z,SP}$ Widerstandsmoment des Sandwichpaneels um die z-Achse
- $A_{y,F}$ Schubfläche der Deckschichten in y-Richtung

Die maximal auftretenden Druck-/Zugspannungen werden unter Annahme einer linearen Normalspannungsverteilung ermittelt. Für die Querkraft wird eine parabelförmige Verteilung mit dem Maximalwert im Schwerpunkt angenommen. Analog zu EN-1993-1-1 wird

die auftretende Querkraft mit dem Faktor 1.5 beaufschlagt. Die Spannungen ergeben sich damit zu:

$$\sigma_F = \frac{M_z}{W_{z,SP}} \quad (6.32)$$

$$\tau_F = \frac{1.5 \cdot V_y}{A_{y,F}} \quad (6.33)$$

mit:

σ_F	.....	Maximale Druck-/Zugspannung in den Deckschichten aus M_z
τ_F	.....	Maximale Schubspannung in den Deckschichten aus V_y
M_z	.....	Biegemoment um die z-Achse
V_y	.....	Querkraft in y-Richtung

Es ist jedoch zu bedenken, dass eine Einleitung der Querkräfte in die Unterkonstruktion primär über das innere Deckblech stattfindet. Das bedeutet, dass die Querkraft des äußeren Deckbleches über die Kernschicht in das innere Deckblech übertragen werden muss. Da es sich dabei um ständige Lasten aus Eigengewicht handelt, sind mögliche Kriecheffekte in der Kernschicht nicht auszuschließen. Alternativ können die Querkräfte ausschließlich in das innere Deckblech eingeleitet werden, womit sich die Schubspannungen ergibt zu:

$$\tau_{F,2} = \frac{1.5 \cdot V_y}{A_{y,F,2}} \quad (6.34)$$

6.4.3 Lasteinleitung vom Sandwichpaneel in die Unterkonstruktion

Vom Sandwichpaneel werden die Lasten in die Unterkonstruktion eingeleitet. Eine von außen verschraubte, direkte Befestigung kann aufgrund der aufgeklebten Glasscheibe jedoch nicht eingesetzt werden. Deshalb wurde von der Firma iconic skin eine alternative Schraubenverbindung entwickelt. Es wird eine Hülse mit Innengewinde in das Sandwichpaneel eingebaut und fixiert. Bei der Montage der Paneele erfolgt die Verschraubung von der Fassaden-Innenseite in das Innengewinde der Hülse. Das System wird als direkte, verdeckte Befestigung bezeichnet. In Abb. 6.13 ist die Verbindung im Schnitt dargestellt.

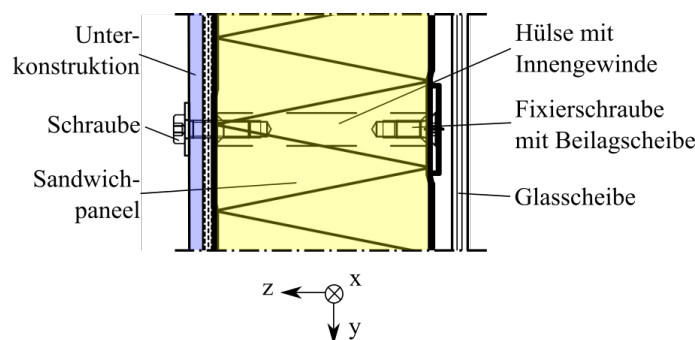


Abb. 6.13: Verdeckte, direkte Befestigung beim GSP mit Fensterband

Wie im letzten Abschnitt beschrieben, kann die Kenntnis der Verbindungssteifigkeit in Querrichtung für die Ermittlung der Schnittgrößen von Interesse sein. Eine experimentelle und numerische Untersuchung von Schraubverbindungen an Sandwichpaneelen wurde ebenfalls im bereits erwähnten EASIE Project durchgeführt. Im Project Final Report [19] wird ein mechanisches Modell für direkte Schraubverbindungen gezeigt (siehe Abb. 6.14). Die

maßgebenden Parameter für die Steifigkeit werden in der Auswertung der experimentellen Untersuchung [25] angeführt:

- Biegesteifigkeit EI der Schraube,
- Drehfedersteifigkeit C der Schraubeneinspannung in der Unterkonstruktion
- Federsteifigkeit k_{F1} der Lochleibungsverbindung am äußeren Deckblech
- Federsteifigkeit k_{F2} der Lochleibungsverbindung am inneren Deckblech

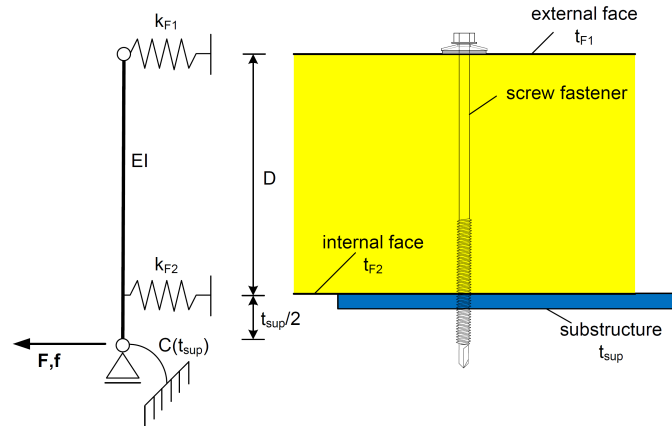


Abb. 6.14: Mechanisches Modell für direkte Befestigung [19]

Ebenso werden in [25] empirisch entwickelte Berechnungsformeln für die Ermittlung der Verbindungssteifigkeit k_v in Querrichtung angegeben. Der Einfluss des äußeren Deckblechs wird darin als klein eingestuft und das Lager am äußeren Deckblech vereinfacht als unverschieblich angenommen. Die Federsteifigkeit k_{F1} wird somit nicht berücksichtigt. Die Formeln können für Schraubengewindedurchmesser $5.5 \text{ mm} \leq d \leq 10.0 \text{ mm}$ angewendet werden und stellen sich dar zu:

$$k_v = \frac{1}{\frac{x_F}{k_{F2}} + \frac{t_{sup}^2 + 2 \cdot (1-x_F) \cdot D \cdot t_{sup}}{4 \cdot C} + \frac{3 \cdot (1-x_F) \cdot D \cdot t_{sup}^2 + t_{sup}^3}{24 \cdot EI}} \quad (6.35)$$

$$x_F = 1 - \frac{\frac{1}{k_{F2}} - \frac{D \cdot t_{sup}}{2 \cdot C} - \frac{D \cdot t_{sup}^2}{8 \cdot EI}}{\frac{1}{k_{F2}} + \frac{D^2}{C} + \frac{D^2 \cdot (2 \cdot D + 3 \cdot t_{sup})}{6 \cdot EI}} \quad (6.36)$$

$$EI = 200000 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{\pi \cdot d_S^4}{64} \quad (6.37)$$

$$C = 2400 \text{ N/mm}^2 \cdot \sqrt{t_{sup} \cdot d_1^5} \quad (6.38)$$

für $0.4 \text{ mm} \leq t_{F2} \leq 0.7 \text{ mm}$ gilt:

$$k_{F2} = 6.93 \cdot \frac{f_{u,F2} \cdot \sqrt{t_{F2}^3 \cdot d_1}}{0.26 \text{ mm} + 0.8 \cdot t_{F2}} \quad (6.39)$$

für $0.7 \text{ mm} \leq t_{F2} \leq 0.1 \text{ mm}$ gilt:

$$k_{F2} = 4.2 \cdot \frac{f_{u,F2} \cdot \sqrt{t_{F2}^3 \cdot d_1}}{0.373 \text{ mm}} \quad (6.40)$$

mit:

k_v	.....	Gesamt-Steifigkeit der Schraubverbindung in Querrichtung
x_F	.....	Berechnungsfaktor
$k_{F,2}$	.....	Lochleibungs-Steifigkeit an der inneren Deckschicht
t_{sup}	.....	Blechkdicke der Unterkonstruktion (für $1.5 \text{ mm} \leq t_{sup} \leq 10.0 \text{ mm}$)
D	.....	Gesamthöhe des Sandwichelementes (für $40 \text{ mm} \leq D \leq 200 \text{ mm}$)
C	.....	Drehfedersteifigkeit der Einspannung an der Unterkonstruktion
EI	.....	Biegesteifigkeit der Schraube
d_S	.....	Schraubenschaftdurchmesser
d_1	.....	Schraubenminstdurchmesser
$f_{u,F2}$	.....	Bruchfestigkeit der inneren Deckschicht
$t_{F,2}$	.....	Dicke der inneren Deckschicht (für $0.4 \text{ mm} \leq t_{F,2} \leq 1.0 \text{ mm}$)

Die Formeln werden für die Steifigkeit der direkten, verdeckten Verschraubung mit einer M8-Schraube (Normalgewinde) und einem FP-P Sandwichpaneel des Herstellers Brucha ausgewertet. Es werden unterschiedliche Dicken der Unterkonstruktion, sowie verschiedene Paneeldicken untersucht. In Tab. 6.3 sind die maßgebenden Eingangsparameter aufgelistet. Die höhere Biegesteifigkeit EI der Hülse gegenüber der Schraube wird vernachlässigt. Stattdessen wird der Schraubenschaftdurchmesser d_S für die gesamte Schraubenslänge vereinfacht mit dem Nennwindendurchmesser d angesetzt.

Tab. 6.3: Querschnittswerte für Parameterstudie Schraubverbindungs-Steifigkeit

Sandwichpaneel	Brucha FP-P
Deckschicht	Stahl S320GD
$t_{F,2}$ [mm]	0.5
f_u [N/mm ²]	390
Schraube	M8 (Regelgewinde)
d_s [mm]	8.0
d_1 [mm]	6.5

Die Auswertung zeigt, dass sowohl die Dicke der Unterkonstruktion (Variation $t_{sup} = 2$ bis 10 mm, maximale Abweichung 8%), als auch die Paneeldicke (Variation $D = 100$ bis 200 mm), maximale Abweichung 1%) nur einen kleinen Einfluss auf die Steifigkeit der Schraubverbindung k_v haben. Stattdessen wird diese maßgeblich von der Deckblechdicke $t_{F,2}$ bestimmt. Für die geplante, innere Deckblechdicke $t_{F,2} = 0.5 \text{ mm}$ errechnet sich die Steifigkeit der Schraubverbindung in Querrichtung, unabhängig von Paneeldicke und Dicke der Unterkonstruktion, zu $k_v \approx 3500 \text{ kN/m}$. Der Wert wird für die Modellierung und Schnittgrößenermittlung empfohlen. Auch für die Tragfähigkeit der Schraubverbindung auf Querbeanspruchung F_{Rk} wird in [25] eine Berechnungsformel angeführt:

$$F_{Rk} = 4.2 \cdot \sqrt{t_{F,2}^3 \cdot d_1 \cdot f_{u,F,2}} \quad (6.41)$$

Für das System mit den Kennwerten aus Tab. 6.3 ergibt sich eine Abscherfestigkeit von $F_{Rk} = 1476 \text{ N}$. Zur Verifizierung der berechneten Werte der Steifigkeit und Tragfähigkeit für die direkte, verdeckte Befestigung werden experimentelle Untersuchungen empfohlen. Diese können sich beispielsweise an den Versuchen beim EASIE Project orientieren, wie sie im Test Report D3.2-part 2 [24] beschrieben werden.

6.5 3D-Modell des Systems GSP mit Fensterband

In diesem Kapitel wird ein 3-D Modell für das System Glas-Sandwich-Paneel mit Fensterband vorgestellt. In diesem können Lasten parallel und quer zur Fassadenebene aufgebracht werden, wodurch eine gemeinsame Ermittlung der maßgebenden Schnittgrößen bzw. Spannungen für die Bemessung möglich ist.

6.5.1 Modellbeschreibung

Das System besteht aus den Bestandteilen Sandwichpaneel und Adapterprofil, die in der gemeinsamen Längsfuge gekoppelt sind (siehe Abb. 6.15). Die Vereinfachungen aus Kap. 6.2 werden übernommen. Alle maßgebenden Kennwerte sind in Tab. 6.4 angeführt. Die Querschnittswerte des Adapterprofils beziehen auf jenes, dass von der Firma iconic skin für den Einsatz im Fensterband bei dieser Konfiguration geplant ist. Die Bauteillängen betragen je 4500 mm, durch die Auflagerung ergibt sich die Spannweite zu 4400 mm. Die Breite des Fensterbandes beträgt 2000 mm, die Lasteinzugsbreite des Adapterprofils beträgt damit 1000 mm.

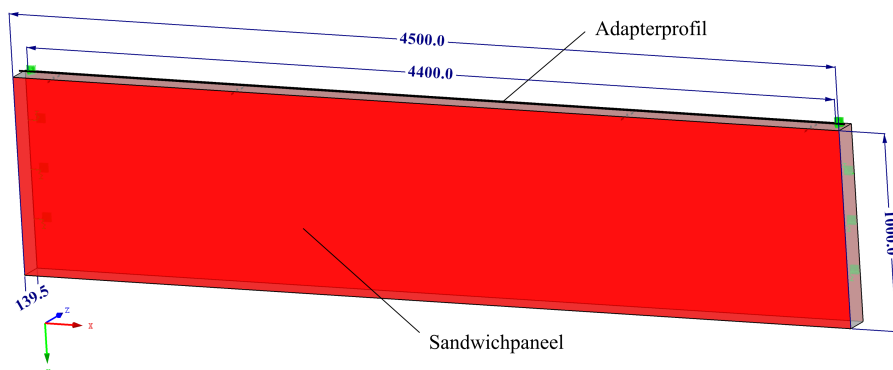


Abb. 6.15: Übersicht 3D-Modell des Systems GSP-Fensterband

Sandwich-Paneel Das Sandwich-Paneel (Abb. 6.16) besteht aus Flächen und Volumenkörpern mit den Querschnitts- und Materialeigenschaften nach Tab. 6.4. Die Abbildung der metallischen Deckschichten erfolgt durch ebene Flächenelemente (rot) mit entsprechender Dicke und orthotroper Materialeigenschaft. Die Mikroprofilierung der Deckschichten wird nicht berücksichtigt, ihr Einfluss auf die Quersteifigkeit fließt durch den in Kap. 4.4 ermittelten Ersatz-E-Modul für die Querrichtung ein. Es wird für beide Deckschichten ein gemittelter Wert von $E_{F,quer} = 105000 \text{ N/mm}^2$ verwendet. Der PUR-Kern wird durch einen Volumenkörper modelliert, der an den Seitenflächen des Paneels durch Nullflächen (grau) begrenzt wird, die keine Steifigkeit aufweisen. Die Materialeigenschaften werden vereinfacht als isotrop angenommen. Der Verbund zwischen Deckschichten und Kernschicht ist starr.

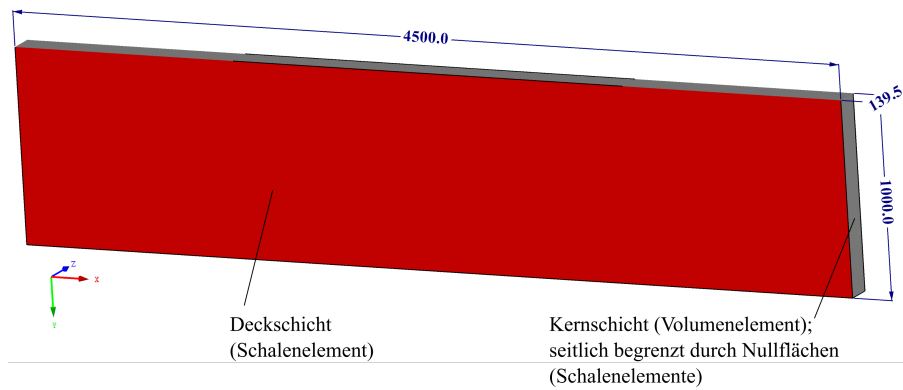


Abb. 6.16: Modellierung Sandwich-Paneel beim 3D-Modell GSP-Fensterband

Tab. 6.4: Material- und Querschnittswerte beim 3D-Modell GSP-Fensterband

Sandwichpaneel Brucha FP-P 140

Deckschicht

Material	Stahl S320GD, orthotrop elastisch 2D
$E_{F,längs}$ [N/mm ²]	210000
$E_{F,quer}$ [N/mm ²]	105000
ν_F [-]	0.3
$t_{F,1}$ [mm]	0.6
$t_{F,2}$ [mm]	0.5

Kernschicht

Material	Polyurethan, isotrop linear elastisch
E_C [N/mm ²]	3.5
G_C [N/mm ²]	3.4
e [mm]	139.5

Adapterprofil

Material	Aluminium 6060 T66, linear elastisch
E_{Alu} [N/mm ²]	70000
ν_{Alu} [-]	0.296
$I_{y,AP}$ [mm ⁴]	3312150
$I_{z,AP}$ [mm ⁴]	384010
$I_{T,AP}$ [mm ⁴]	70000
A_{AP} [mm ²]	1085

Adapterprofil Das Adapterprofil wird durch Stäbe abgebildet, die mit den Querschnittswerten gemäß Tab. 6.4 modelliert werden. Eine Darstellung erfolgt in Abb. 6.17.

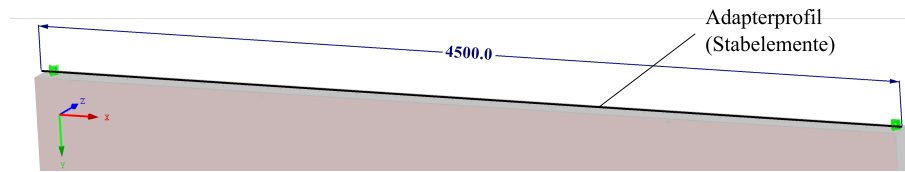


Abb. 6.17: Modellierung Adapterprofil beim 3D-Modell GSP-Fensterband

Kopplung in der Längsfuge Die Kopplung in der Längsfuge wird für Lasten parallel und quer zu Paneelebene getrennt modelliert. Der Übertrag von Lasten quer zur Paneelebene (z.B. Wind) erfolgt am realen Bauteil durch die Umfassung des Sandwichpaneels durch das Adapterprofil. Vereinfacht wird diese Kopplung durch Starrstäbe abgebildet, die das Adapterprofil mit der Kernschicht des Paneels verbinden (siehe Abb. 6.18 (links)). Ein Stabengelenk stellt sicher, dass nur Kräfte in z-Richtung übertragen werden. Die Starrstäbe sind in einem Intervall von 100 mm über die Bauteillänge verteilt.

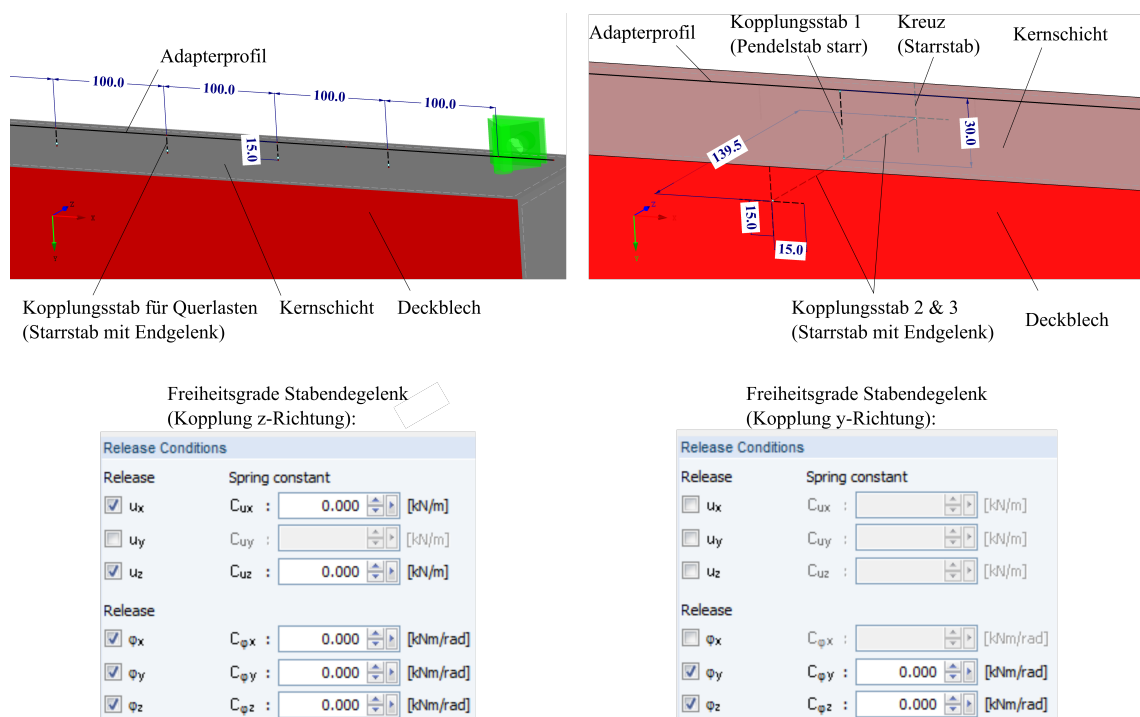


Abb. 6.18: Modellierung Kopplung in z-Richtung (quer zum Paneel, linkes Teilbild) und y-Richtung (parallel zum Paneel, rechtes Teilbild) beim 3D-Modell GSP-Fensterband

Lasten in der Paneelebene (Eigengewicht) werden real durch Klotzung an kurzen U-Profilen, die mit beiden Deckschichten vernietet sind, übertragen. Die Verbindung wird durch Starrstäbe in T-Form vereinfacht, die das Adapterprofil mit den Deckblechen verbinden (siehe Abb. 6.18 (rechts)). Der vertikale Starrstab 1 wird als Pendelstab ausgeführt. Damit wird sichergestellt, dass durch die Verbindung nur Kräfte in vertikaler y-Richtung übertragen werden. Am Anschlusspunkt der horizontalen Starrstäbe 2 und 3 mit dem Deckblech wird jeweils ein Stabengelenk eingeführt, dass den Eintrag von Biegemomenten in das Deckblech verhindert. Weiters wird an dieser Stelle ein Kreuz aus Starrstäben in der Deckschichtebene

eingeführt, welches eine besser verteilte Lasteinleitung in die Deckschicht ermöglicht. Dadurch werden modellbedingte Spannungsspitzen im Deckblech abgemindert.

Lagerungsbedingungen In der Realität bildet die Unterkonstruktion bei Querlasten in positiver y-Richtung (z.B. Windruck) ein flächiges Auflager für das Sandwichpaneel. Entgegengesetzte Lasten (z.B. Windsog) werden dagegen vom äußeren Deckblech als Zugkraft in die Verschraubung eingeleitet. Eine Belastung parallel zur Paneelebene wird vom inneren Deckblech durch Abscherkräfte in die Verschraubung übertragen. Diese komplexe Auflagersituation wird durch gelenkige Knotenlager am inneren Deckblech vereinfacht, die sich an den Positionen der Verschraubung befinden. Die Knotenlager sind in Querrichtung (z-Achse) gesperrt. Das bedeutet alle Querlasten werden dort übertragen und das flächige Auflager wird vernachlässigt. Eine Auswirkung auf die globale Tragwirkung ist durch die Vereinfachung nicht zu erwarten. Für die Verschiebung in Paneelebene (x- und y-Achse) wird eine Federsteifigkeit an den Knotenlagern eingeführt. Damit soll u.a. der Einspanneffekt durch die Verschraubungen bei Lasten in Fassadenebene richtig abgebildet werden. Die Federsteifigkeit der Schraubverbindung bei Abscherbeanspruchung wird in Kap. 6.4 zu 3500 kN/m berechnet. Außerdem werden Kreuze aus Starrstäben am Knotenlager in der Paneelebene eingeführt. Dies dient zur Reduktion von Spannungs- und Verformungsspitzen im Deckblech. In Abb. 6.19 ist die Auflagerung von Sandwichpaneel und Adapterprofil für ein Bauteilende dargestellt.

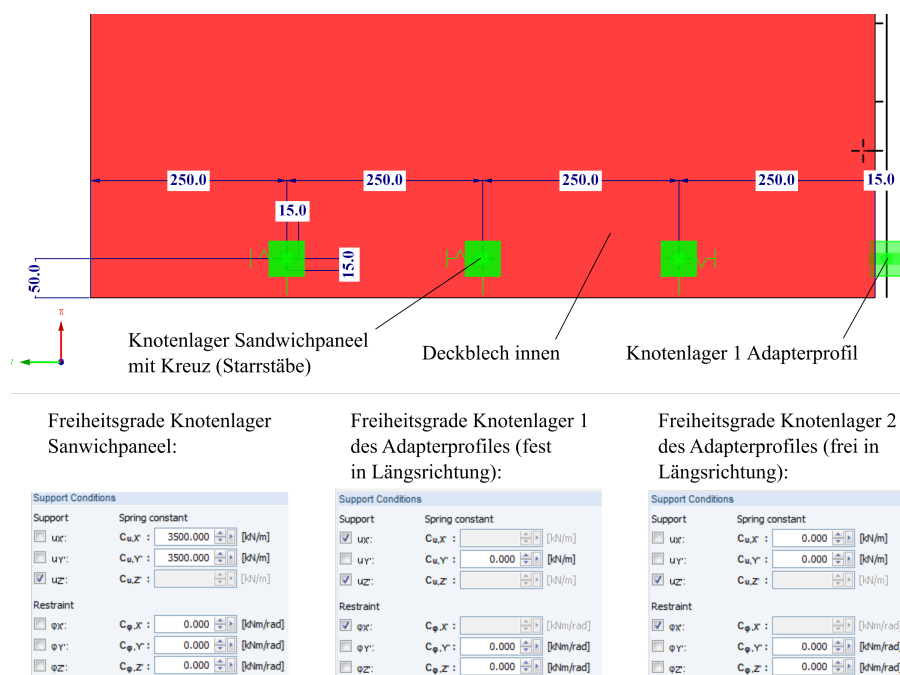


Abb. 6.19: Modellierung Lagerung beim 3D-Modell GSP-Fensterband

Die Lagerung des Adapterprofils erfolgt durch zwei Knotenlager im Abstand der Spannweite von 4400 mm. Für Querlasten (z-Richtung) wirkt das Adapterprofil als Einfeldträger, der an einem Knotenlager frei verschieblich in x-Richtung ist. In y-Richtung erfolgt keine Festhaltung des Adapterprofils, um einen vollen Lastübertrag auf das Sandwichpaneel zu erreichen.

FE-Netz Die Netzgenerierung erfolgt automatisch generiert mit drei- und viereckigen Elementen für Flächen- und Volumenkörper. Das Netz wird auf Basis einer Konvergenzstudie mit einer angestrebten Kantenlänge von 50 mm festgelegt.

6.5.2 Lastaufbringung im 3D-Modell GSP mit Fensterband

Es treten Belastungen parallel und quer zu Paneelebene auf. Als Querbeanspruchung in z-Richtung wirken Wind- und Temperaturlasten, sowie gegebenenfalls Auslenkkräfte durch offene Fenster. Deren Lastaufbringung erfolgt analog zum Öffnungselement und wird in Kap. 5.3.2 beschrieben. Abb. 6.20 zeigt beispielhaft die Lastaufbringung bei Winddruck. Das Eigengewicht des Fensterbandes wirkt in y-Richtung und wird durch Knotenlasten im Bereich der U-Profile (Kopplung y-Richtung) am Adapterprofil angesetzt. Das Eigengewicht des Sandwichpaneels wird durch die Aktivierung des Eigengewichtes der Deckschicht-Flächen und des Volumen-Kerns in y-Richtung berücksichtigt. Die Masse der nicht modellierten Glasscheibe wird als Flächenlast am äußeren Deckblech angesetzt. In Abb. 6.21 ist die Lastaufbringung der Eigenlasten dargestellt.

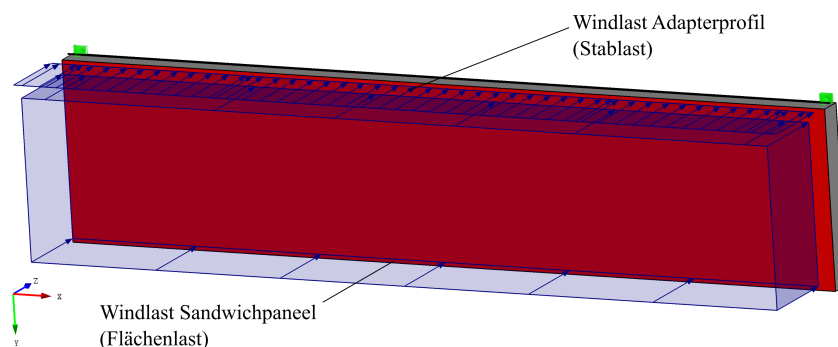


Abb. 6.20: Lastaufbringung Windlasten beim 3D-Modell GSP-Fensterband

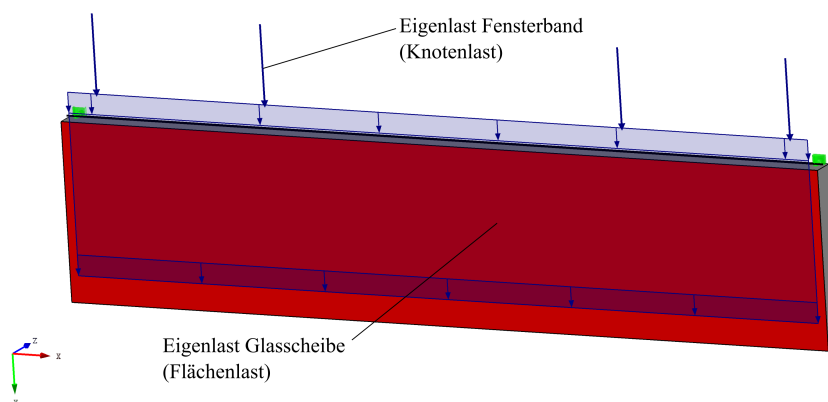


Abb. 6.21: Lastaufbringung Eigenlasten beim 3D-Modell GSP-Fensterband

6.6 Vergleich der Berechnungsmodelle

Zur Beurteilung des 3D-Modells erfolgt eine Gegenüberstellung mit der entwickelten Berechnungsformel und dem Elementverband. Dafür werden bei einer Querbelastung von 1 kN/m^2 auf Fensterband und Sandwichpaneel folgende Ergebnisse herangezogen:

- Biegemoment des Adapterprofils in Feldmitte $M_{y,AP}$
- Umlagerungsmoment in Feldmitte ΔM_y
- Maximale Spannung im äußeren Deckblech $\sigma_{F1,max}$
- Verformung des Adapterprofils in Feldmitte w_{AP}

Die Berechnung bezieht sich auf die Systemabmessungen und -kennwerte aus der Modellbeschreibung des 3D-Modells (siehe Kap. 6.5.1).

Tab. 6.5: Ergebnisvergleich Berechnungsformel, Elementverband und 3D-Modell beim System GSP-Fensterband ($q = 1 \text{ kN/m}^2$, $L = 4.4 \text{ m}$)

	Berechnungsformel	Elementverband	3D-Modell
$M_{y,AP}$ [Nm]	1613.3	1628.5	1553.4
ΔM_y [Nm]	806.7	791.5	866.6
$\sigma_{F1,max}$ [N/mm ²]	42.8	42.5	45.2
w_{AP} [mm]	14.0	14.5	15.7

Die Berechnungsergebnisse sind in Tab. 6.5 dargestellt. Die händische Berechnungsformel und der Elementverband liefern sehr ähnliche Ergebnisse. Beim 3D-Modell treten Erhöhungen von rund 6 % bei der Deckblechspannung und rund 10 % bei der Durchbiegung des Adapterprofils auf. Das Adapterprofil wird im 3D-Modell damit etwas biegeweicher abgebildet.

6.7 Vorschlag Bemessungskonzept

Für Fassadenbereiche aus Glas-Sandwich-Paneeelen mit Fensterbändern müssen die erforderlichen Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) erbracht werden. Die folgenden Bemessungsvorschläge beziehen sich auf das vorgestellte, gekoppelte System aus Sandwichpaneel und einem Adapterprofil des Fensterbandes. Der Nachweis der Glasscheibe und deren Verklebung beim GSP wird ebenso wenig berücksichtigt, wie eine detaillierte Bemessung der einzelnen Fensterband-Elemente.

Das System Sandwichpaneel - Adapterprofil wird durch Lasten quer- und parallel zur Fassadenebene belastet. Bei Belastung quer zur Fassadenebene (Wind, Temperatur, offene Fenster) sind Lastumlagerungen zwischen Sandwichpaneel und Adapterprofil aufgrund von Steifigkeitsunterschieden oder unterschiedlicher Belastung kaum zu vermeiden. Für eine präzise Schnittgrößenermittlung wird deshalb die Betrachtung des gekoppelten Systems Sandwichpaneel - Adapterprofil empfohlen, welches in Kap. 6.2 beschrieben wird. Eine Möglichkeit dafür bietet der Elementverband nach Böttcher [16], mit welchem unter Verwendung von Gl. (3.26) bzw. Gl. (3.28) die umgelagerten Schnittgrößen Biegemoment

bzw. Querkraft erfasst werden können. Für die Ermittlung des umgelagerten Biegemomentes kann außerdem die entwickelte Berechnungsformel (Gl. (6.11)) angewendet werden.

Als Belastung parallel zur Fassadenebene wirken Eigenlasten von Fensterband und GSP. Aufgrund der geringen Eigenbiegesteifigkeit des Fensterbandes für vertikale Lasten wird ein vollständiger Lastübertrag auf das darunter liegende Sandwichpaneel angenommen. Bei der Schnittgrößenermittlung ist die Einspannwirkung durch die Befestigung mit der Unterkonstruktion gegebenenfalls zu berücksichtigen (siehe Kap. 6.4). Eine gemeinsame Schnittgrößenermittlung, bei Belastung quer- und parallel zur Fassadenebene, kann mit dem gezeigten 3D-Modell des Systems GSP-Fensterband erfolgen (siehe Kap. 6.5).

6.7.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Sandwichpaneel

Für das Sandwichpaneel werden die erforderlichen Nachweise nach Kap. 2.5.2 bzw. EN 15409 [5] empfohlen:

- Fließen einer Deckschicht im Zugspannungsbereich
- Knittern einer Deckschicht im Druckspannungsbereich
- Schubversagen des Kerns
- Druckversagen des Kerns an einem Auflager
- Versagen des Elementes an den Verbindungspunkten mit der Unterkonstruktion

Aufgrund der Belastung parallel zur Paneelebene werden zwei weitere, mögliche Versagensarten angemerkt:

- Schubversagen einer Deckschicht
- Ausknicken einer Deckschicht im Lasteinleitungsbereich

Für Belastungen parallel zur Fassadenebene wird eine Begrenzungen der Normalspannung σ_F im Deckblech analog zur Belastung quer zur Paneelebene als sinnvoll betrachtet. Zur Ermittlung der maximalen Deckblechnormalspannungen bei kombinierter Beanspruchung wird eine Überlagerung der Spannungen aus Querlasten (Gl. (3.29)) und aus Lasten in der Fassadenebene (Gl. (??)) empfohlen:

$$\sigma_{F,ges} = \frac{\Delta M_y \cdot k_\sigma + M_{y,SP,isoliert}}{e \cdot B \cdot t_{F,1/2}} + \frac{M_z}{W_{z,SP}} \quad (6.42)$$

mit:

$\sigma_{F,ges}$	.....	Maximale Druck-/Zugspannung im Deckblech
ΔM	.....	zusätzliches Biegemoment am Sandwichelement um y-Achse
k_σ	.....	Erhöhungsfaktor für exzentrische Lasteinleitung (aus [17])
$M_{y,SP,isoliert}$	.....	Biegemoment eines isolierten Sandwichpaneels um y-Achse
e	.....	Schwerpunktsabstand der Deckschichten
B	.....	Elementbreite
$t_{F,1/2}$	.....	Dicke der äußeren/inneren Deckschicht
M_z	.....	Biegemoment um die z-Achse
$W_{z,SP}$	.....	Widerstandsmoment des Sandwichpaneels um die z-Achse

Für das freie Deckblechende im Einleitungsbereich der Fensterband-Eigenlasten müssen die zulässigen Deckblechspannung reduziert werden. In Kap. 6.4.1 wird dies näher untersucht,

weitere experimentelle Untersuchungen werden empfohlen. Querkräfte normal zur Paneelebene trägt die Kernschicht ab, wobei die Schubspannung nach Gl. (3.30) ermittelt werden kann. Querkräfte in Paneelebene werden aufgrund der höheren Steifigkeit vom Deckblech aufgenommen. Die Schubspannung kann mit Gl. (6.33) (Lastabtrag über beide Deckbleche) oder Gl. (6.34) (Lastabtrag nur über das innere Deckblech) berechnet werden. Beim Ansatz beider Deckbleche sind Kriecheffekte im Kern zu beachten, da die Schubspannungen aus ständigen Lasten (Eigenlasten GSP und Fensterband) resultieren. Für die Schubspannungen im Deckblech wird die Schubfestigkeit der Deckschicht als Begrenzung vorgeschlagen. Eine experimentelle Untersuchung des Versagensmechanismus wird empfohlen.

Wird das 3D-Modell des Systems GSP-Fensterband zur Berechnung verwendet, so können alle bemessungsrelevanten Spannungen direkt ausgewertet werden. Für den Nachweis der Verschraubung mit der Unterkonstruktion wird auf eine Interaktion zwischen Abscher- und Zugkräften in den Schrauben hingewiesen. Die Schraubenkräfte können ebenfalls aus dem 3D-Modell ausgelesen werden.

Adapterprofil

Für die Adapterprofile wird der Nachweis der Normal- und Schubspannungen empfohlen. Die Eckverbinder im Anschlussbereich zu den Pfosten des Fensterbandes und deren Verschraubung mit der Unterkonstruktion müssen ebenfalls für die globale Tragwirkung bemessen werden.

6.7.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Die Begrenzung der Durchbiegung aus der Paneelebene wird für das Glas-Sandwich-Paneel, in Anlehnung an EN 15409 [5], mit einem Wert von $L/100$ vorgeschlagen. Für das Adapterprofil des Fensterbandes muss die Durchbiegungsgrenze entsprechend den Nutzungsanforderungen festgelegt werden, wobei ein Wert von $L/200$ als üblich betrachtet wird. Aufgrund der Verbindung in der gemeinsamen Längsfuge sind die auftretenden Verformungen im gekoppelten System zu bestimmen. Das Adapterprofil ist aufgrund der strengeren Durchbiegungsbegrenzung maßgebend. Dessen Verformung aus der Ebene kann mit Gl. (6.14), dem Elementverband oder dem 3D-Modell bestimmt werden. Verformungen parallel zur Paneelebene werden als vernachlässigbar gering eingestuft.

6.8 GSP mit Fensterbändern - Erkenntnisse und Ausblick

In diesem Kapitel wurden horizontal verlegte Glas-Sandwich-Paneele mit integrierten Fensterbändern in voller Paneelgröße betrachtet. Im Fokus der numerischen Untersuchung stand der Lastabtrag quer- und parallel zur Fassadenebene für ein vereinfachtes System aus einem Sandwichpaneel und einem Adapterprofil des Fensterbandes.

Zunächst wurde erläutert, dass bei Querbelastung der Fassade (z.B. durch Wind oder Temperatur) Lastumlagerungen über die gekoppelte Längsfuge praktisch unvermeidlich sind. Ursache sind unterschiedliche Steifigkeitsverhältnisse von Fensterband und GSP oder eine differente Belastung. Um den Umlagerungseffekt betragsmäßig erfassen zu können, wurde eine Berechnungsformel (Gl. (6.11)) für die Momentenumlagerung, auf Grundlage der Verformungskompatibilität in der Längsfuge und Untersuchungen von Rädle [29], entwickelt. Als größte Schwierigkeit dabei gestaltete sich die unterschiedliche Verformungscharakteristik beider Bauteile und das Verhalten des Sandwichpaneels bei exzentrischer Randbelastung. Mit der hergeleiteten Berechnungsformel können die maßgebenden Einflüsse, wie die Steifigkeits- und Breitenverhältnisse beider Bauteile oder die Systemlänge, berücksichtigt werden. Als Eingangswerte sind lediglich die Angaben aus den Zulassungen der Paneel-Hersteller und der Erhöhungsfaktor für exzentrische Belastung nötig. Letzterer wurde von Rädle [?] entwickelt und kann aus den *Preliminary European Recommendations for the Design of Sandwich Panels with Openings* [17] entnommen werden. Eine Berechnungsformel für die Umlagerung der Querkraft konnte im Zuge dieser Arbeit noch nicht entwickelt werden. Diese wird angeregt, um die vollständige Schnittgrößenermittlung und System-Bemessung durch händische Berechnungsformeln zu ermöglichen.

Daneben wurde das Stabwerkmodell des Elementverbandes von Böttcher [16] für das System Sandwichpaneel-Adapterprofil modifiziert, sowie ein 3D-Modell mit FE-Berechnung entwickelt. Beide Modelle ermöglichen auch die Auswertung der umgelagerten Querkräfte. Durch einen Modell-Vergleich konnte auch gezeigt werden, dass alle drei Ansätze sehr ähnliche Ergebnisse liefern und für die Bemessung des Systems als geeignet eingestuft werden können. Die vorgestellte, gemeinsame Ermittlung der Schnittgrößen unter Berücksichtigung der Umlagerungen bietet den großen Vorteil, dass auch Traglastreserven im Sandwichpaneel zum Abtrag von Fensterband-Querlasten herangezogen werden können. Da die Mindestdicke des GSP in der Regel durch bauphysikalische Anforderung (Wärmedämmung) bestimmt wird, bietet sich dadurch die Möglichkeit einer schlanken Gestaltung der Adapterprofile ohne extra Unterkonstruktion.

Eine Besonderheit des geplanten GSP mit Fensterbändern ist der Lastabtrag in Fassadenebene. Die Eigenlasten des Fensterbandes sollen vom darunterliegenden Sandwichpaneel aufgenommen werden, um die Adapterprofile mit geringer Bauhöhe ausführen zu können. Dieser Lastabtrag des Paneels als Biegeträger mit Belastung in der Paneelebene ist neuartig. Weder normative Regelungen noch gezielte Forschungsergebnisse für diese Anwendung konnten gefunden werden. Um die Tragfähigkeit zu beurteilen, wurden die kritischen Details dem Lastpfad folgend betrachtet. Zunächst wurde die geplante, punktuelle Lasteinleitung vom Fensterband in das Sandwichpaneel untersucht. Durch Anwendung von Forschungsergebnissen zur Lasteinleitung konnte festgestellt werden, dass eine Reduktion der Knitterspannungen im Deckblech um rund 80 % nötig sein könnte. Es ist jedoch zu klären, ob der angeführte Abminderungsfaktor der Knickspannung von 0,54 tatsächlich nötig ist. Denn dieser hat seinen Ursprung in zusätzlich auftretenden Imperfektionen der bearbeiteten Deckblechkante (z.B. durch Sägen), die bei der gezeigten Nietverbindung

vermutlich nicht auftreten. Ein möglicher, negativer Einfluss durch die Mikroprofilierung ist jedoch ebenso noch nicht berücksichtigt. Experimentelle Untersuchungen werden jedenfalls empfohlen. Im nächsten Schritt wurde die globale Tragwirkung unter Berücksichtigung einer Randeinspannung durch die Verschraubung mit der Unterkonstruktion analysiert und Ansätze zur Spannungsermittlung gezeigt. Zuletzt wurde noch die Verschraubung mit der Unterkonstruktion mit Fokus auf die Nachgiebigkeit der neuartigen direkten, verdeckten Befestigung bei Abscherbeanspruchung untersucht. Experimentelle Untersuchungen wurden zum Ende dieser Arbeit von der Firma *iconic skin* gerade durchgeführt.

Wie bereits erwähnt, wurde auch ein 3D-Modell entwickelt und beschrieben, mit welchem Lasten quer- und parallel zur Fassadenebene gemeinsam am System aufgebracht werden können. Dadurch wird die Bemessung wesentlich vereinfacht, Bemessungsschnittgrößen wie Deckschicht-Normalspannungen und Schubspannungen im Kern können direkt abgelesen werden. Das 3D-Modell bietet außerdem den Vorteil, dass keine zusätzlichen Kenngrößen, wie z.B. Steifigkeitswerte des Sandwichpaneels oder Erhöhungsfaktoren für exzentrische Belastung, ermittelt werden müssen.

Es kann abschließend festgestellt werden, dass durch die ganzheitliche Systembetrachtung eine sehr gute Eignung von Glas-Sandwich-Paneelen mit Fensterbändern für Gebäudehüllen bestätigt wurde. Durch die Möglichkeit, Lastumlagerungen bei Querbelastung zu erfassen, können Traglastreserven im Paneel aktiviert werden. Eine extra Unterkonstruktion im Öffnungsbereich kann vermieden werden. Beim Lastabtrag parallel zur Fassadenebene bietet das Glas-Sandwich-Paneel eine sehr hohe Tragfähigkeit und Verformungssteifigkeit zur Aufnahme der Fensterband-Eigenlasten. Kritische Details wie Lasteinleitung und Befestigung erfordern jedoch weitere Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

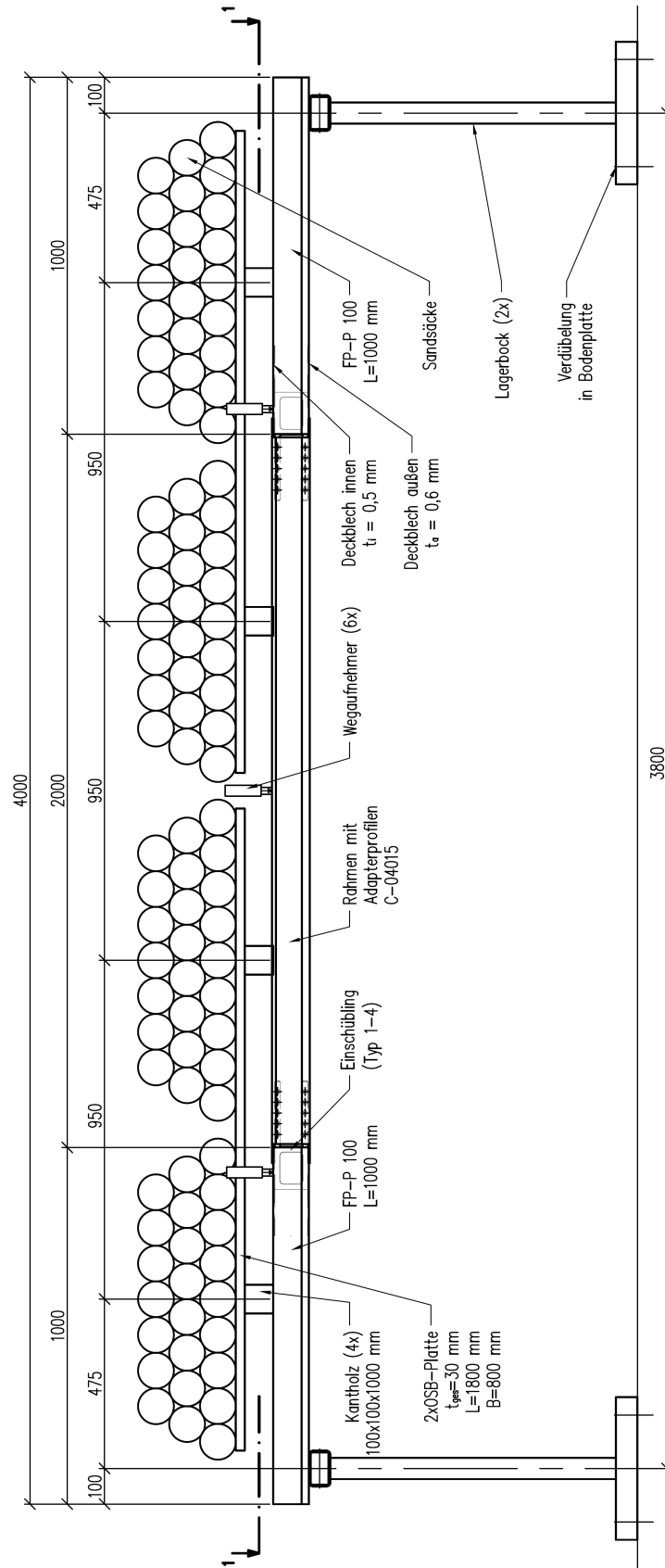
- [1] *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-10.4-620, Tragende Sandwichelemente "BRUCHA-Isolierpaneel" mit Stahldeckschichten und einem Kernwerkstoff aus Polyurethan-Hartschaum, Deutsches Institut für Bautechnik, 20.5.2014*
- [2] *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-10.49-529, Sandwichelemente "Pflaum Feuerschutz-Paneel F" nach EN14509 mit Stahldeckschichten und einem Kernwerkstoff aus Mineralwolle, Deutsches Institut für Bautechnik, 27.08.2012*
- [3] *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.4-407, Gewindeformende Schrauben zur Verbindung von Sandwichelementen mit Unterkonstruktionen aus Stahl oder Holz, Deutsches Institut für Bautechnik, 01.02.2014*
- [4] *Dachpaneel Roma Typ D, Romakowski GmbH & Co. KG. http://www.roma-daemmsysteme.de/files/roma_files/2.Produkte/2.Dachpaneele/Typ%20D/Bild/startseite-produkte-dachpaneel-typD-galerie-1.jpg, . – Zugriff: 10.06.2016*
- [5] *DIN EN 14509: 2013-12, Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten - Werkmäßig hergestellte Produkte - Spezifikationen*
- [6] *DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*
- [7] *DIN EN 1993-1-8:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*
- [8] *DIN EN 1999-1-1:2014-03, Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln*
- [9] *Produktions- und Bürogebäude Textilmacher München, tillicharchitektur. <http://www.roma-architekturpreis.de/wp-content/uploads/2015/05/6.jpg>, . – Zugriff: 10.06.2016*
- [10] *Standard Details Pflaum - ONDATHERM 1003 (PDF), Pflaum & Söhne Bausysteme GmbH. <http://www.pflaum.at/assets/Uploads/Downloads/2014/Details-ONDATHERM-1003.pdf>, . – Zugriff: 10.06.2016*
- [11] *Standard Details Pflaum - P2-Serie (PDF), Pflaum & Söhne Bausysteme GmbH. <http://www.pflaum.at/assets/Uploads/Downloads/2014/Details-P2-ONDATHERM-2003.pdf>, . – Zugriff: 10.06.2016*
- [12] *Wandpaneel Brucha Typ FP-P, Brucha GmbH. <http://www.brucha.at/bilder/fpp.jpg>, . – Zugriff: 10.06.2016*
- [13] *Wandpaneel Roma Typ M, Romakowski GmbH & Co. KG. http://www.roma-daemmsysteme.de/files/roma_files/2.Produkte/1.Wandpaneele/Typ%20M/Bild/startseite-produkte-wandpaneel-typ-m-galerie-1.jpg, . – Zugriff: 10.06.2016*

- [14] BERNER, Klaus ; PFAFF, Ute: Openings in sandwich panels / Institute for Sandwich Technology - Mainz. 2005. – Forschungsbericht
- [15] BERNER, Klaus ; RAABE, Oliver: Bemessung von Sandwichbauteilen, IFBS, Heft 5.08. (2006)
- [16] BÖTTCHER, Marc: *Wand-Sandwichelemente mit Öffnungen*, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, TU Darmstadt, Diss., 2005
- [17] CIB ; ECCS: Preliminary European Recommendations for the Design of Sandwich Panels with Openings. 2014. – Forschungsbericht
- [18] DAVIES, John M.: *Lightweight Sandwich Construction*. Blackwell Sciences Ltd, 2001
- [19] EASIE: Project Final Report. 2011. – Forschungsbericht
- [20] HÖGLUND, Torsten: Load Bearing Strength of Sandwich Panel Walls with Window Openings. In: *Proceedings of IABSE Colloquium*, 1986, S. 349–356
- [21] KILIAN, Katrin ; LANGE, Jörg ; NAUJOKS, Bernd: Verbindungen von Sandwichelementen unter kombinierter Längs- und Querkraftbeanspruchung. In: *Stahlbau* 84 (2015), Nr. 11, S. 866–874
- [22] KOSCHADE, Rolf: *Die Sandwichbauweise: Systembau mit industriell vorgefertigten Sandwichelementen aus metallischen Deckschichten und Polyurethan-Hartschaumkern*. Ernst, 2000
- [23] KURPIELA, Aneta: *Optimierung von Sandwichbauteilen mit PUR-Kern und Stahldeckschichten*, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, TU Darmstadt, Diss., 2013
- [24] KÄPPLEIN, Saskia ; MISIEK, Thomas: EASIE Report D3.2 – part 2, Tests on the in plane-shear resistance of sandwich panels / Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine. 2011. – Forschungsbericht
- [25] KÄPPLEIN, Saskia ; MISIEK, Thomas: EASIE Report D3.3 – part 3, Connections of sandwich panels / Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine. 2011. – Forschungsbericht
- [26] KÄPPLEIN, Saskia ; MISIEK, Thomas: EASIE Report D3.3 – part 5, Introduction of loads into axially loaded sandwich panels / Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine. 2011. – Forschungsbericht
- [27] LANGE, Jörg ; BERNER, Klaus: Sandwichelemente im Hochbau. In: *Stahlbau-Kalender 2010: Schwerpunkt: Verbundbau* (2010), S. 643–699
- [28] NAUJOKS, Bernd ; MISIEK, Thomas: Praxisgerechte Nachweise zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Sandwichelementen mittels Fachwerkmodellen. In: *Stahlbau* 84 (2015), Nr. 11, S. 890–907
- [29] RÄDEL, Felicitas: *Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Sandwichelementen mit Öffnungen*, Inst für Stahlbau und Werkstoffmechanik, TU Darmstadt, Diss., 2013
- [30] STAMM, Klaus ; WITTE, Horst: *Sandwichkonstruktionen: Berechnung, Fertigung, Ausführung*. Springer-Verlag, 1974
- [31] TEICH, Martien ; MERTEL, Heiko: iconic skin glass sandwich panel: development of a new facade generation. In: *GPD Glass Performance Days 2015*

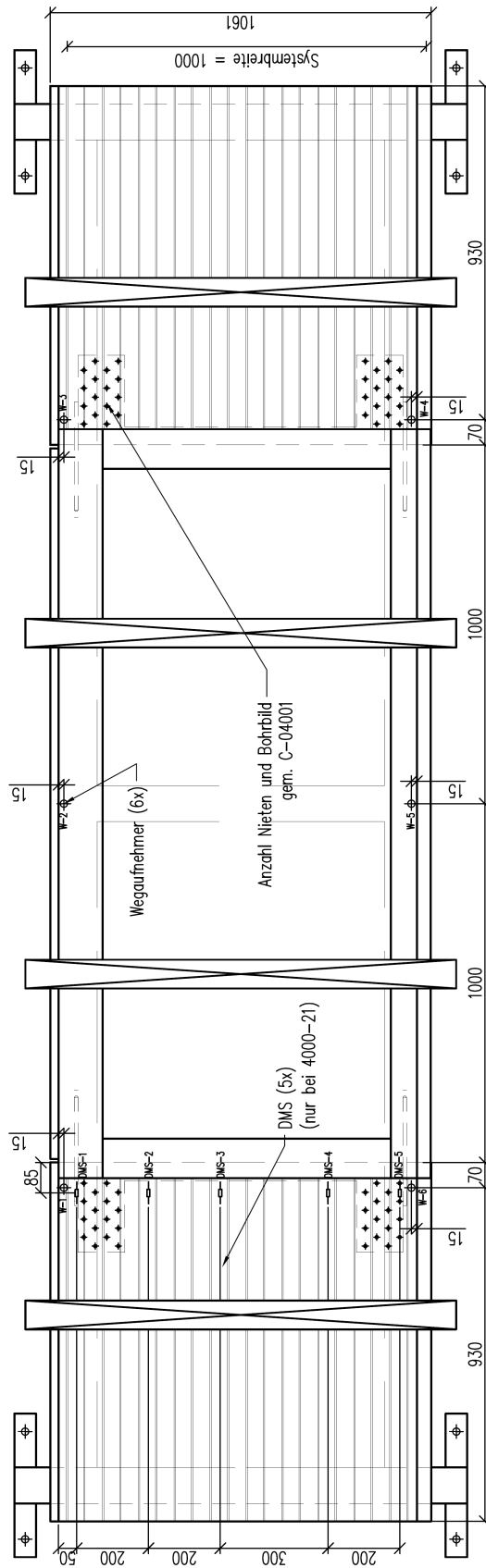
- [32] TOMA, Ton ; COURAGE, Wim: Structural detailing of openings in sandwich panels, University of Missouri, 1996

Anhang

Anhang A1 - Übersicht Versuchsaufbau beim GSP-Rahmentest



Schnitt 1-1
Maßstab 1 : 10



Anhang A2 - Last-Verformungs-Kurven beim GSP-Rahmentest

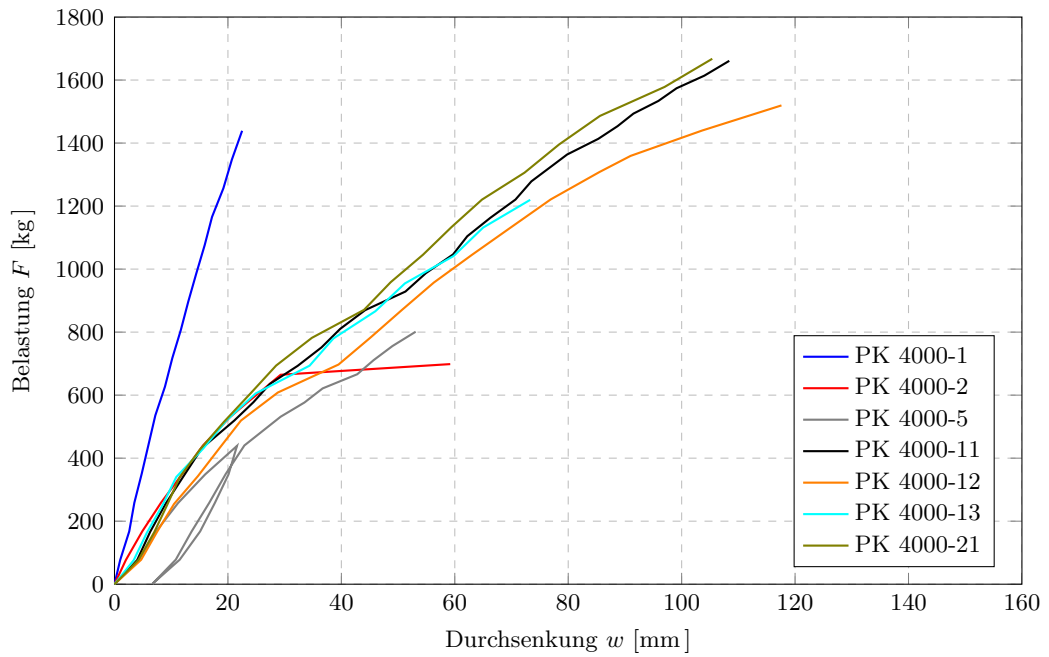


Abb. 6.1: Last-Verformungskurven für Wegaufnehmer WA-3

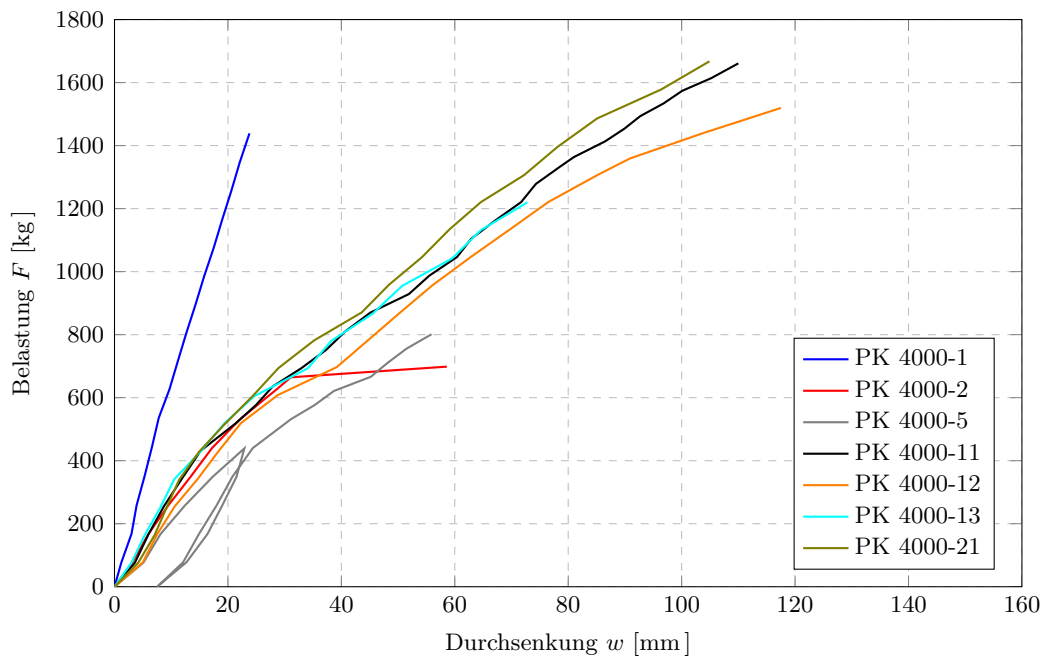
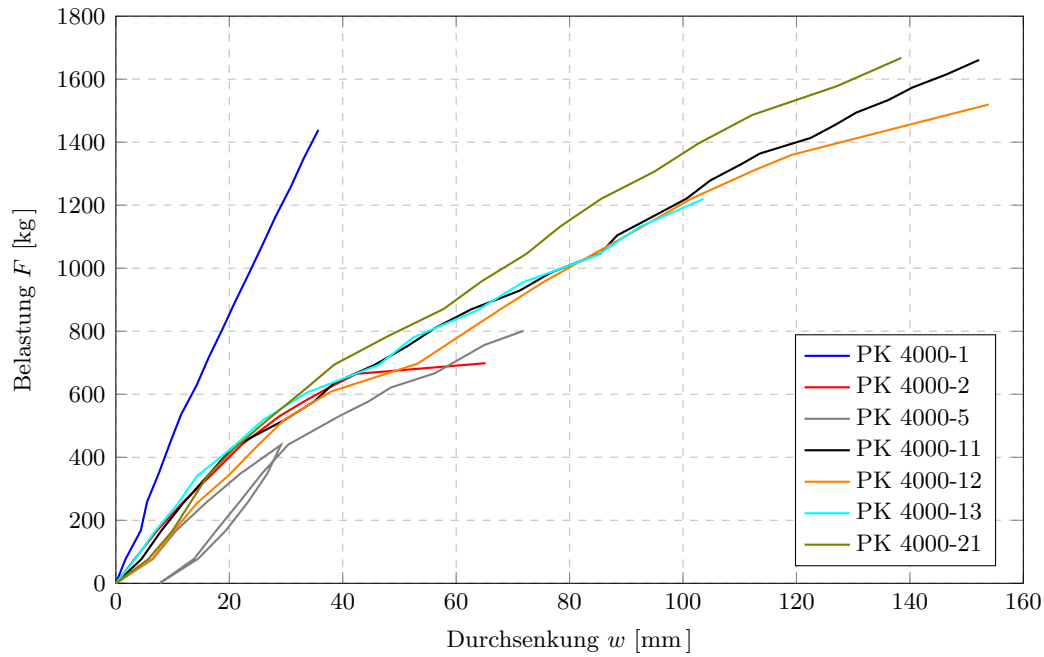
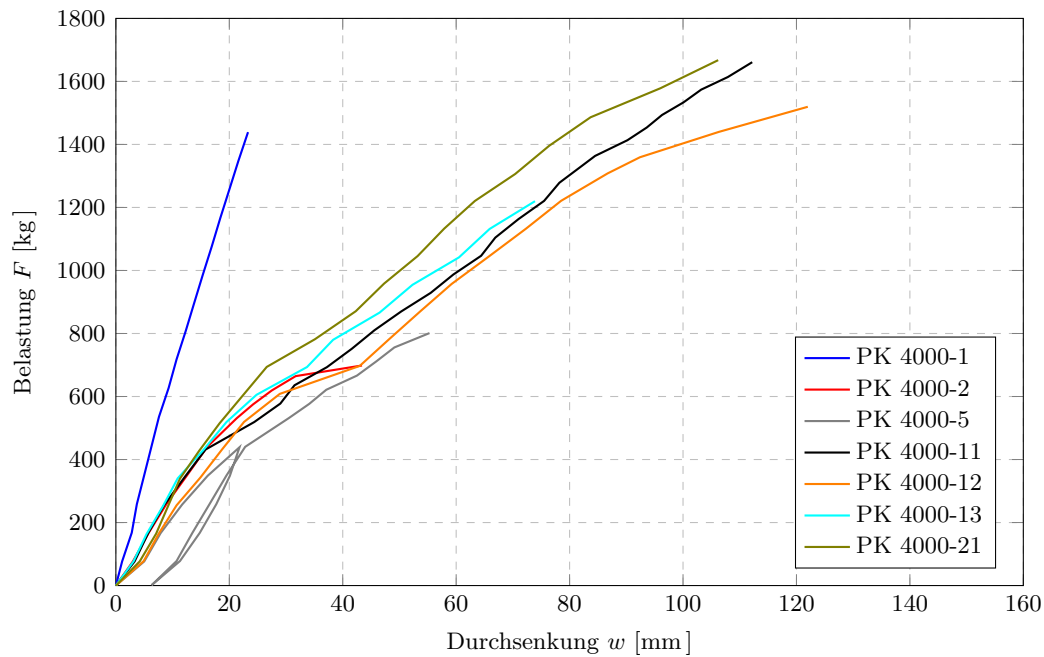


Abb. 6.2: Last-Verformungskurven für Wegaufnehmer WA-4

**Abb. 6.3:** Last-Verformungskurven für Wegaufnehmer WA-5**Abb. 6.4:** Last-Verformungskurven für Wegaufnehmer WA-6

Anhang A3 - Spannungs-Last-Kurven beim GSP-Rahmentest

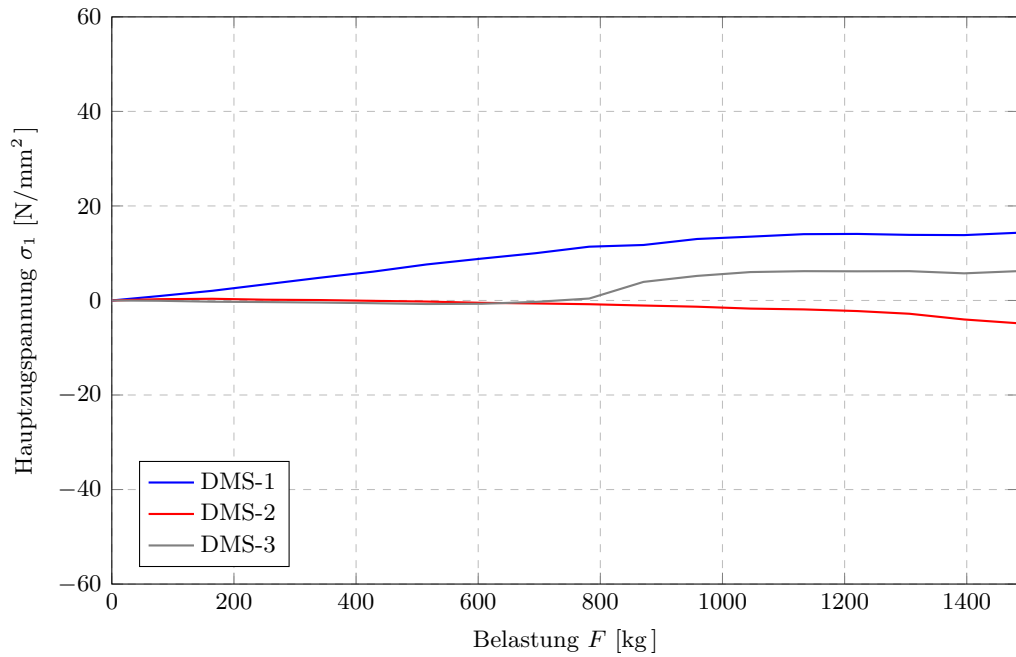


Abb. 6.5: Spannungs-Last-Kurven für σ_1 (Probekörper 4021, Einschubling Typ 3)

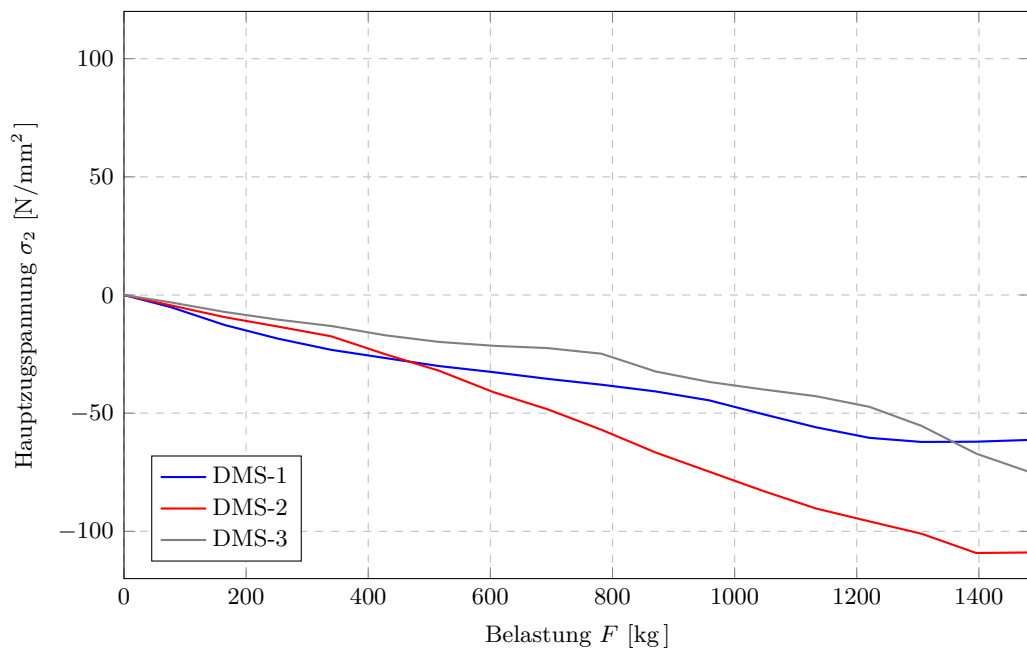


Abb. 6.6: Spannungs-Last-Kurven für σ_2 (Probekörper 4021, Einschubling Typ 3)

Anhang A4 - Parameterstudie am System Sandwichpaneel-Fensterband

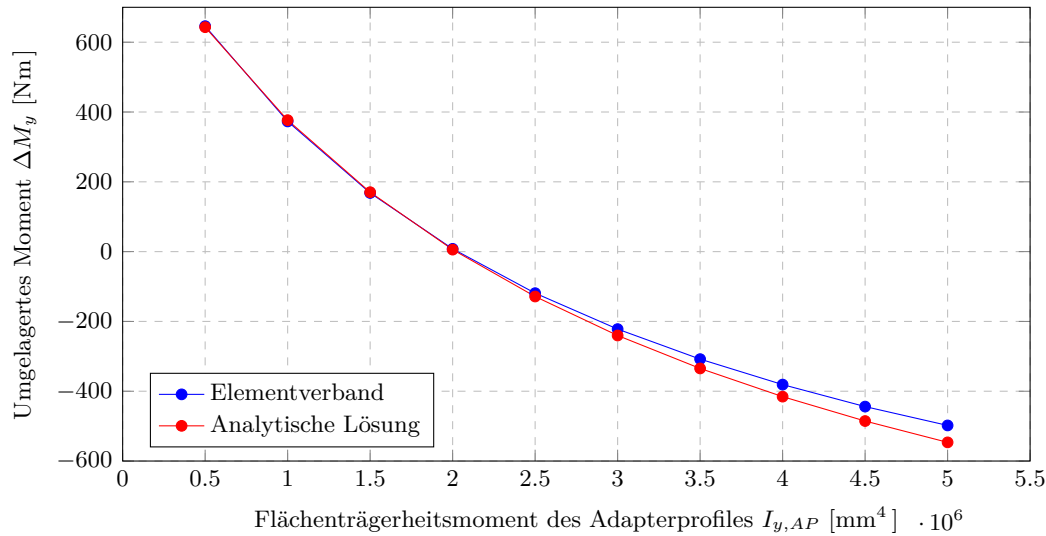


Abb. 6.7: Umlagerungsmoment in Feldmitte beim System Sandwichpaneel-Adapterprofil in Abhängigkeit der Adapterprofil-Steifigkeit; Vergleich Elementverband und analytische Lösung für Paneeltyp FP-P 100 ($D = 100$ mm), Spannweite $L = 4.0$ m, Belastung $q = 1.0$ kN/m²

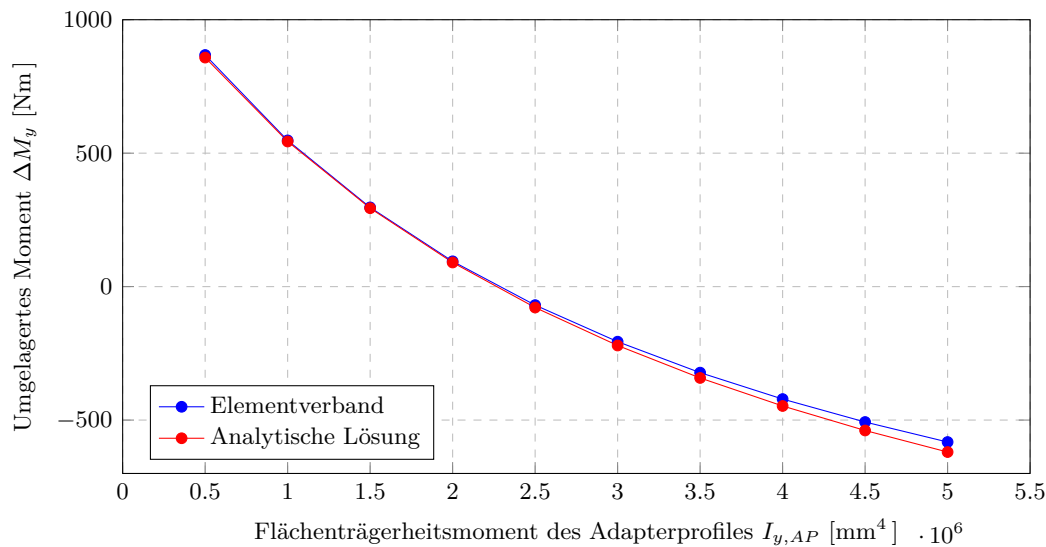


Abb. 6.8: Umlagerungsmoment in Feldmitte beim System Sandwichpaneel-Adapterprofil in Abhängigkeit der Adapterprofil-Steifigkeit; Vergleich Elementverband und analytische Lösung für Paneeltyp FP-P 100 ($D = 100$ mm), Spannweite $L = 4.5$ m, Belastung $q = 1.0$ kN/m²

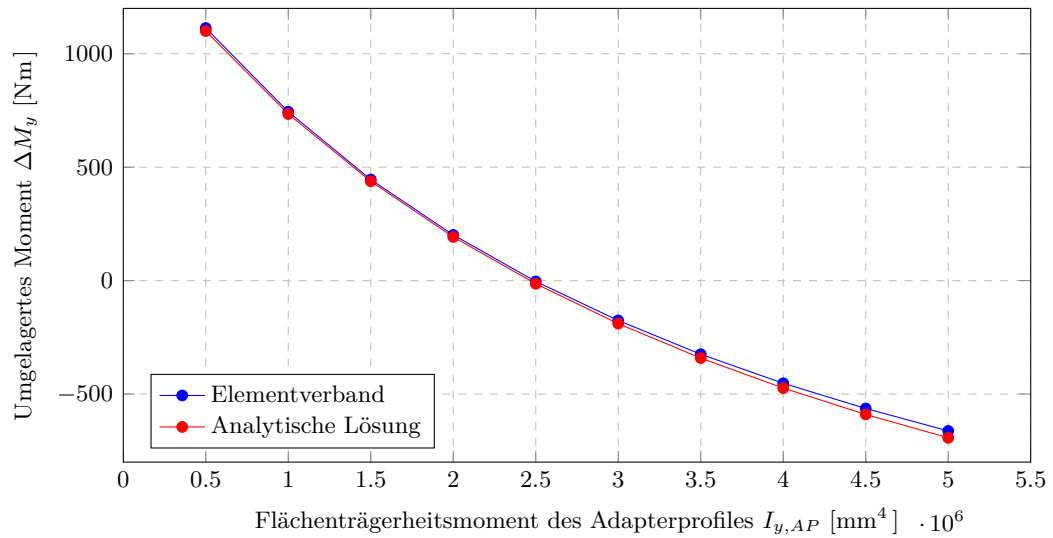


Abb. 6.9: Umlagerungsmoment in Feldmitte beim System Sandwichpaneel-Adapterprofil in Abhängigkeit der Adapterprofil-Steifigkeit; Vergleich Elementverband und analytische Lösung für Paneeltyp FP-P 100 ($D = 100$ mm), Spannweite $L = 5.0$ m, Belastung $q = 1.0$ kN/m²

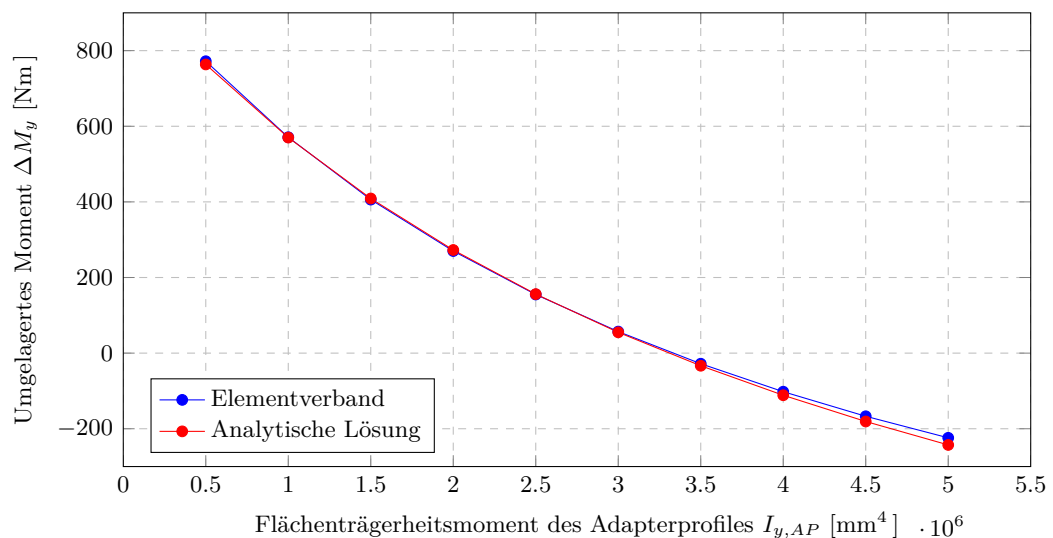


Abb. 6.10: Umlagerungsmoment in Feldmitte beim System Sandwichpaneel-Adapterprofil in Abhängigkeit der Adapterprofil-Steifigkeit; Vergleich Elementverband und analytische Lösung für Paneeltyp FP-P 140 ($D = 140$ mm), Spannweite $L = 4.0$ m, Belastung $q = 1.0$ kN/m²

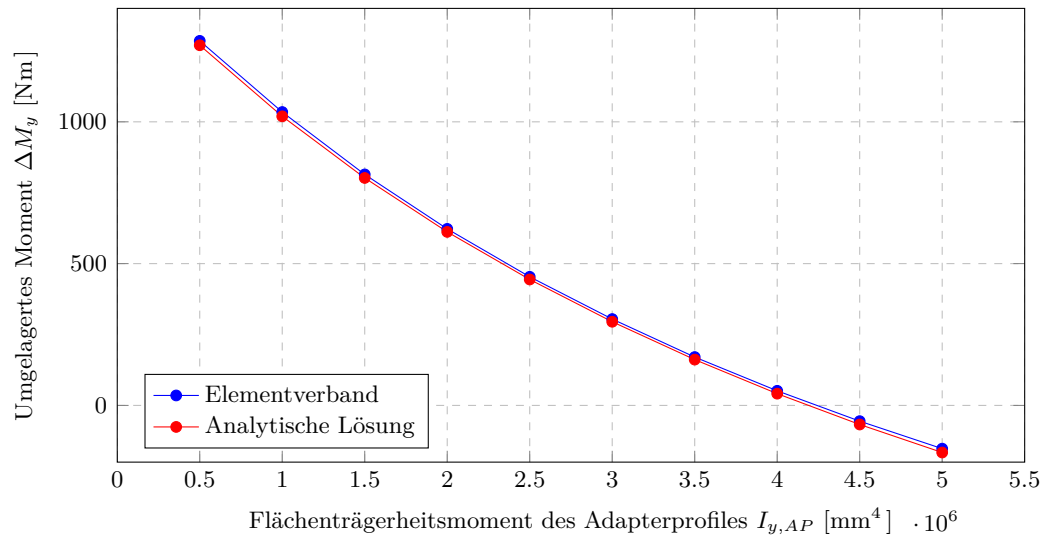


Abb. 6.11: Umlagerungsmoment in Feldmitte beim System Sandwichpaneel-Adapterprofil in Abhängigkeit der Adapterprofil-Steifigkeit; Vergleich Elementverband und analytische Lösung für Paneeltyp FP-P 140 ($D = 140$ mm), Spannweite $L = 5.0$ m, Belastung $q = 1.0$ kN/m²