

Jörn P. Lass, Florian Heß, Andreas Schweiger
Ralf Späth, Andreas Kaufmann

Tragverhalten von Haften in Doppelfalzdächern

F 3199

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0471-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht IL 003/2019/000

Abschlussbericht Tragverhalten von Haften in Doppelfalzdächern

Durchgeführt im Auftrag

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BBSR

Der Bericht umfasst

141 Seiten Text

35 Tabellen

93 Abbildungen

Prof. Jörn P. Lass

Florian Heß

Andreas Schweiger

Prof. Dr. Ralf Späth

Andreas Kaufmann

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraun-
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Holzkirchen, 11.10.2019

Institutsleiter



Prof. Dr.

Klaus Peter Sedlbauer

Projektleiter



M.Eng.

Andreas Kaufmann

Bearbeiter



Florian Hess

Projektpartner

Drittmittelgeber / wirtschaftlicher Partner

Zentralverband Sanitär Heizung Klima (ZVSHK)

Rathausallee 6
53757 St. Augustin

Wissenschaftlicher Partner

Hochschule Rosenheim

Prof. Jörn Lass
Hochschulstraße 1
83024 Rosenheim

Förderung

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-17.05

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Inhalt

1	Projektaufbau	5
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	5
1.1.1	Problemstellung, Nachweislücken, Schäden	5
1.1.2	Ziele und Planung der Untersuchung	6
1.2	Grundlagen	8
1.2.1	Metalldacheindeckungen	8
1.2.2	Aufbauten	9
1.3	Projektbeschreibung	10
1.3.1	Versuchsplan	10
1.3.2	Krafteinleitung bei Versuchsdurchführung	10
1.3.3	Probekörper	12
1.4	Projektstand und Bearbeitung	14
2	Untersuchungen und Versuche	16
2.1	Grundlagen	16
2.1.1	Grundlagen zu Biegeversuchen	16
2.1.2	Grundlagen zu Schub- und Zugversuchen	23
2.2	Zug- und Schubversuche	37
2.2.1	Vorversuche	37
2.2.2	Auszugsverhalten von Haften	39
2.2.3	Auszugsverhalten von Haften mit Deckungsmaterial	40
2.2.4	Schubversuche	41
2.3	Windsog- und Druckversuche	44
2.3.1	Vorversuche	44
2.3.2	Vorlast	45
2.3.3	Winddruckversuche	45
2.3.4	Windsogversuche	46
2.4	Dynamischen Zugversuche	47
2.4.1	Vorversuch im Resonanzpulsator	47
2.4.2	Testablauf	47
2.5	Dauerschwingversuche	50
2.5.1	Testablauf	51
2.5.2	Zusammenfassung der Schwingungsversuche	56
3	Auswertung und Versuchsergebnisse	60
3.1	Zugversuche	62
3.1.1	Vorversuche	69
3.1.2	Auszugsverhalten von Haften	70
3.1.3	Auszugsverhalten von Haften mit Deckungsmaterial	73
3.2	Schubversuche	74
3.3	Biegeversuche	81

4	Entwicklung einer Bemessung von Doppelstehfalzdächern	86
4.1	Ablauf der Bemessung	86
4.2	Einwirkungen	87
4.2.1	Eigenlasten	88
4.3	Bemessungssituationen	97
4.4	Nachweis	98
4.5	Lastfälle nach Eurocode 1 (EC 1)	98
4.6	Ermittlung der Querschnittswiderstände	101
4.7	Bemessung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit	108
5	Zusammenfassung	117
5.1	Schub-und Zugversuche	117
5.2	Biegeversuche	118
5.3	Dauerschwingversuche	119
6	Ausblick	120
	Abkürzungsverzeichnis	121
	Bildverzeichnis	124
	Tabellenverzeichnis	126
	Literaturverzeichnis	127

1 Projektaufbau

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Metallbedachungen in Doppelstehfalzausbildung werden in Neigungen von $\geq 3^\circ$ verbaut (bis 7° mit Sondermaßnahmen). Dabei werden die Scharen (Blechbahnen für die Dacheindeckung) mit Metallverbindungsmitteln an der Unterkonstruktion befestigt, welche als „Haften“ bezeichnet werden. Je nach Stehfalzausbildung kommen unterschiedliche Haften zum Einsatz. Es werden Fest- und Lospunkte ausgebildet, um die Dilatation der Scharen nicht zu behindern. Haften haben die Aufgabe, die in die Dachhaut eingeleiteten Lasten in die Unterkonstruktion weiterzuleiten und die Metalleindeckung auf dem Dach zu befestigen.

In der Regel werden Haften aus nichtrostendem Stahl hergestellt, damit sie mit verschiedenen Deckungsmaterialien kombinierbar sind und auf unterschiedlichen Untergründen befestigt werden können. Die Festpunktausbildung der Haften erfolgt durch Vernieten oder Einschneiden mit nachfolgender Verkrallung im Stehfalz.

1.1.1 Problemstellung, Nachweislücken, Schäden

Haften dienen der Lagesicherung sowie dem Lastabtrag der kompletten Dachhaut - inklusive der daran befestigten Dachaufbauten - und stellen Bauteilkomponenten dar, die der Erfüllung erheblicher Anforderungen an die Sicherheit der baulichen Anlage dienen. Im Versagensfall besteht Gefahr für Leib und Leben.

Das bisherige Vorgehen bei der Verwendung von Haften orientiert sich an den folgenden Regelwerken. Die Richtlinien für die Ausführung von Klempnerarbeiten an Dach und Fassade (Klempnerfachregeln) [25] fordern für die zulässige dynamische Belastbarkeit von industriell hergestellten, mit zwei Nägeln befestigten Haften eine Tragfähigkeit von 400 N pro Haft. Die Fachregeln für Bauspenglerarbeiten [25] aus Österreich verlangen eine Tragfähigkeit von 350 N pro Haft. Es ist zu vermuten, dass diese Angaben sich auf die Zugfestigkeit der Haften beziehen. Angaben zur Tragfähigkeit parallel zur Dachfläche (Eigengewicht, Schneelast, Absturzsicherung, ...) sind nicht zu finden. Somit ist offen, welche Bemessungswerte für sicherheitsrelevante Bauteile wie z.B. die Befestigung von Absturzsicherungen herangezogen werden dürfen. Die Befestigung der Haften ist für Nagel- und Schraubbefestigungen auf Holz- und Holzwerkstoffschalungen geregelt [25]. Die Befestigung auf anderen Untergründen müssen nachweisbar ausgeführt werden und sind nicht Bestandteil dieses Forschungsvorhabens. Für einen planenden und/oder ausführenden Betrieb ist es nicht möglich, die Tragfähigkeit der Befestigung einer Dachkonstruktion auf Wind-, Eigen-, Schneelasten usw. nachweisbar auszulegen. In der Schweiz allerdings erfolgt die Berechnung der Anzahl Haften für die unterschiedlichen Beanspruchungen gemäß Wegleitung und die kostenpflichtige Web-Applikation

«Haften- und Schneefangberechnung“ von suissetec. Zudem berechnet die Web-Applikation auch die erforderliche Anzahl Schneefangreihen. Der tiefste Minimalwert des Tragwiderstandes der Hafte wurde in der Schweiz auf 300 N festgelegt. Die Eingabe des Tragwiderstandes der Fest- und Schiebehaften kann in der Web-Applikation selbst definiert werden. Höhere Tragwiderstandswerte können in der Web-Applikation variabel eingesetzt werden. Der Prüfnachweis für höhere Auszugswerte muss durch den Haften-Hersteller erbracht werden.

Für Deutschland werden pro Jahr ca. 80 Mio m² Dachfläche, davon 20 % bis 30 % als Metallbedachung in Systembauweise bzw. in Doppelstehfalzausführung, erstellt. Der erhöhte Sanierungsbedarf, welcher zusätzlich für die kommenden Jahre im Baubestand zu erwarten ist, macht eine nachvollziehbare Bemessung der Halte- und Tragfähigkeit von Haften notwendig, da zunehmend Aufbauten (PV-Anlagen, Solarthermie, etc.) an den Stehfalzen befestigt werden. Insbesondere vor diesem Hintergrund kann künftig auf eine gesicherte und festgelegte Bemessung von Haften nicht mehr verzichtet werden, um für diesen Branchenbereich ein sicheres Planen und Umsetzen für die Betriebe zu ermöglichen.

1.1.2 Ziele und Planung der Untersuchung

Aufgrund der geänderten normativen Randbedingungen in der Normenreihe DIN EN 1991 (Eurocode 1) sowie bisher offiziell noch nicht unabhängig durchgeführter Untersuchungen, besteht Handlungsbedarf, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit der bewährten Falzdachkonstruktionen nachweisbar zu belegen. Der vermehrte Einsatz von Dachaufbauten auf Metaldachkonstruktionen erfordert die bauaufsichtlich durchgängige Nachweisbarkeit der Befestigungen. Diese Lücke soll mit diesem Projekt geschlossen werden. Ziel ist neben der Untersuchung der tatsächlichen Halteeigenschaften von Haften auch die Entwicklung geeigneter Prüfverfahren, die die reproduzierbare Untersuchung der Festigkeiten ermöglichen. Die erarbeiteten Randbedingungen und Prüfverfahren bieten im Weiteren eine fundierte Basis für die Überarbeitung von Normen und Fachregeln. Zudem ist eine Erweiterung des Einsatzbereichs von Stehfalzdächern z.B. die Verlegung ohne Schalung auf harter Dämmung denkbar, wenn die Befestigungssituation geklärt ist (z.Zt. gibt es eine Limitierung auf einen Befestigungsabstand $\leq 0,5$ m).

Die Untersuchungen der Dachkonstruktion erfolgten im Rahmen des Projekts an typischen Ausführungsvarianten aus unterschiedlichen Materialien im Maßstab 1:1. Es wurden Zug-, Druck-, Scher- und Biegeversuche durchgeführt und statistisch ausgewertet. Zudem wurden Dauerschwingversuche durchgeführt, um eine Lockerung der Verbindungen im Falzbereich auszuschließen, die z.B. durch Dilatation oder Windbelastungen hervorgerufen werden kann.

Im Detail sind folgende Untersuchungsvarianten geplant:

- Untersuchung der Tragfähigkeit von Haften in Stehfalzen verschiedener Ausführung (statische und dynamische Versuche für unterschiedliche Lastarten: abhebend (Zug) und abtreibend (Schub) zur Dachfläche).

- Untersuchung der Tragfähigkeit von Haften in Abhängigkeit des Befestigungsbildes und der Kopfform des Befestigungsmittels (Stichwort – Lasteinleitung in die Unterkonstruktion, Versatzmomente, Durchknöpfen, Anzahl der Befestigungsmittel usw.) (statische Versuche). Der Nachweis der verwendeten Befestigungsmittel im Untergrund sowie die entsprechende Materialverträglichkeit sind nicht Gegenstand der Untersuchung.
- Biegetragfähigkeit der Scharen in Abhängigkeit der Falzungsgeometrie mit dem Ziel, Aussagen zu theoretischen Modellen für die Bemessung und Lastverteilung abzuleiten.
 - Untersuchungen an kompletten Bauteilgruppen (theoretisch und versuchstechnisch) zur Validierung der Lastverteilung auf der Dachfläche und Tragfähigkeit der Haften bei Flächen- und Punktbelastungen. Die Ergebnisse dieses Arbeitspunktes dienen der Erstellung eines belastbaren Berechnungssystems, an dem weiterführende Parameterstudien erfolgen können.
 - Abstimmung des Prüfprogramms mit der Bauaufsichtsbehörde bzw. dem DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik).

Durch die versuchstechnischen und rechnerischen Untersuchungen sollen nachfolgende Ergebnisse für die Anwendung von Haften in Metallbedachungen und weiterführende Arbeiten abgeleitet werden:

1. **Vorgehensweise / Verfahren** für ein Prüfprogramm zur Beurteilung der Tragfähigkeit von Haften in Doppelstehfalzdächern. Im Forschungsvorhaben werden unterschiedliche Varianten beurteilt. Die ermittelte Datenbasis dient nicht der Erwirkung einer AbZ (allgemeine bauaufsichtliche Zulassung) / ETA (European Technical Assessment Europäische Technische Bewertung) für alle Untersuchungsvarianten, sondern soll zu einer allgemeingültigen europäischen Bewertungsdokument (EAD) führen, dem Hersteller von Haften und/oder Deckungsmaterialien folgen können, um eine eigene Zulassung zu erwirken.
2. **Vorschlag** für ein Berechnungskonzept zur Bestimmung der auftretenden Lasten an Haften in Doppelstehfalzdächern unter verschiedenen Einwirkungen. Auf Basis dieses Berechnungskonzeptes kann gegebenenfalls eine Bemessung der Konstruktion erfolgen, unter Berücksichtigung der relevanten technischen Regeln.
3. **Validierung**, Ableitung und Festlegung von konstruktiven und ausführungstechnischen Regeln für die Einarbeitung in:
 - Fachregeln
 - ggf. Normungsarbeit
 - Montageleitfaden für den Handwerker („Kurzversion der Fachregel für den Monteur“)

1.2 Grundlagen

1.2.1 Metaldacheindeckungen

Metaldacheindeckungen gibt es in den unterschiedlichsten Ausführungsformen und Materialien. Die Auswahl des verwendeten Systems und Materials wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Hauptaugenmerk liegt dabei auf den zu erwartenden Anforderungen, die an das Metaldach gestellt werden. Dabei spielen z.B. Standort, Dachform, Dachneigung und weitere Einflüsse eine Rolle. Aber auch der gestalterische Aspekt wird berücksichtigt, denn je nach System und Material können die unterschiedlichsten Formen und Farben verwirklicht werden.

Die gängigsten Materialien für Metaldacheindeckungen sind Aluminium, schmelztauchveredelter, elektrolytisch verzinkter oder organisch beschichteter Stahl, Kupfer, legiertes Zink und nicht rostender Stahl. Dabei variieren aber die zu verwendenden Materialstärken der einzelnen Materialien. Diese ist abhängig von der verwendeten Deckungsart, Scharenbreite und -länge, Dachneigung und der Gebäude- und Bezugshöhe.

Laut Klempnerfachregeln werden die Deckungsarten folgendermaßen unterschieden [25]:

- Banddeckung,
- Tafeldeckung,
- Leistendeckung,
- Schnappfalz,
- industriell vorgefertigte Stehfalze,
- Trapezprofile und Metallschindeln.

Bei diesem Forschungsvorhaben geht es in erster Linie um die Banddeckung, die sich unterteilt in Winkelstehfalz-, Doppelstehfalz- und Schnappfalzdeckung.

Dabei unterscheiden sich die Winkelstehfalz- und Doppelstehfalzdeckung insofern, dass es sich bei einem Winkelstehfalz um einen nicht geschlossenen Doppelstehfalz handelt. Dies hat zur Folge, dass die Winkelstehfalzdeckung erst ab größeren Dachneigungen von $\geq 25^\circ$ einsetzbar ist. Die Systemanforderungen für die Schnappfalzdeckung unterscheiden sich je nach Hersteller. Die hierfür notwendigen Unterlagen sind vom Hersteller der verwendeten Profilier-Maschine anzufordern.

Die Befestigung der Winkelstehfalz- und Doppelstehfalzdeckung erfolgt grundsätzlich über Haften auf der Unterkonstruktion, dabei sind die Befestigungssysteme bei beiden Deckungsarten gleich. Die Haften können je nach Deckungsmaterial aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Jedoch wird meistens

nicht rostender Stahl verwendet, da dieser mit allen Deckungsmaterialien kombinierbar ist. Es wird grundsätzlich zwischen Fest- und Schiebehafthen (oder Los-hafthen) bzw. zwischen einem Fest- und Schiebehafthbereich unterschieden.

Der Festhaftbereich dient zur Fixierung der Schar und zur Sicherung gegen Ab-rutschen. Dessen Position und Ausführung ist je nach Baustellensituation unter-schiedlich und an die örtlichen Gegebenheiten anzupassen. Dabei spielen, wie bei der Materialstärke, der Standort, die Deckungsart, die Scharenbreite und -länge, die Dachneigung, die Gebäude- und Bezugshöhe und Einbauteile (Kamine, Dachfenster, Dunstrohre) eine Rolle.

Der Schiebehafthbereich dient auch zur Fixierung der Schar, aber muss gleichzei-tig die Dilatation gewährleisten. Die komplette Dachfläche ist dabei so in Fest- und Lospunkte zu unterteilen, dass die thermische Längenänderung der Scha-ren jeder Zeit störungsfrei gewährleistet ist. Gegebenenfalls sind einzelne Dach-bereiche durch den Einsatz von Leistensystemen zu unterteilen, um unter-schiedliche Fest- und Lospunkte voneinander zu trennen.

1.2.2 **Aufbauten**

Es gibt diverse Aufbauten, die auf Metalldächern montiert werden können bzw. müssen. Die wohl häufigsten Aufbauten sind Schneefangeinrichtungen, Solaranlagen und Standflächen / Verkehrswege für Dacharbeiten.

Zur Befestigung von Aufbauten auf Metalldächern gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Die eleganteste bzw. anstrebenswerte Lösung ist eine Befesti-gung mit Falzklemmen, da es sich hierbei um ein durchdringungsfreies Befesti-gungssystem handelt. Die Falzklemmen werden dabei nur am Doppelstehfalz festgeklemmt und die Dachhaut somit nicht beschädigt. Allerdings ist auch bei diesem System Vorsicht und Sorgfalt geboten, denn die störungsfreie thermi-sche Längenänderung der Scharen muss weiterhin gewährleistet sein und darf durch den Aufbau nicht beeinträchtigt werden. Wird dies nicht beachtet ist mit erheblichen Schäden durch Spannungsrisse am Metalldach zu rechnen.

Außerdem ist dieses Befestigungssystem eher für den Neubau und nicht für den Bestand geeignet. Bei Bestandsbauten ist es schwer nachzuvollziehen mit welchem Haftenbild das Metalldach befestigt wurde und die bestehende Kon-struktion ist mit großer Wahrscheinlichkeit auch nicht auf die statische Zusatz-last eines Aufbaus ausgelegt.

Speziell für Bestandsdächer eignet sich die Befestigung auf Leisten. Die Leisten können nachträglich in das Dach integriert werden und ermöglichen einen nachweisbaren Lastabtrag in den Untergrund. Aber auch für den Neubau ist die Befestigung auf Leisten durchaus sinnvoll, da sich die Aufbauten und das Me-talldach unabhängig voneinander bewegen können. Dadurch werden Span-nungsrisse so gut wie ausgeschlossen.

Außerdem gibt es die Möglichkeit, Aufbauten über Gleitplatten, abgedeckte Haken oder Stockschrauben zu befestigen. Bei allen drei Varianten wird jedoch die Dachhaut in der wasserführenden Ebene durchdrungen, wodurch in diesem Bereich Schwachstellen geschaffen werden.

1.3 Projektbeschreibung

1.3.1 Versuchsplan

Die Konfiguration der Probekörper erfolgte iterativ. In den Vorversuchen wurden verschiedene Haften, Befestigungsarten und Obermaterialien untersucht. Die ermittelten Kräfte sowie die Schadensbilder sind die Grundlagen zur Ausarbeitung der weiteren Probekörper in Bezug auf die Art der Haften sowie des Obermaterials.

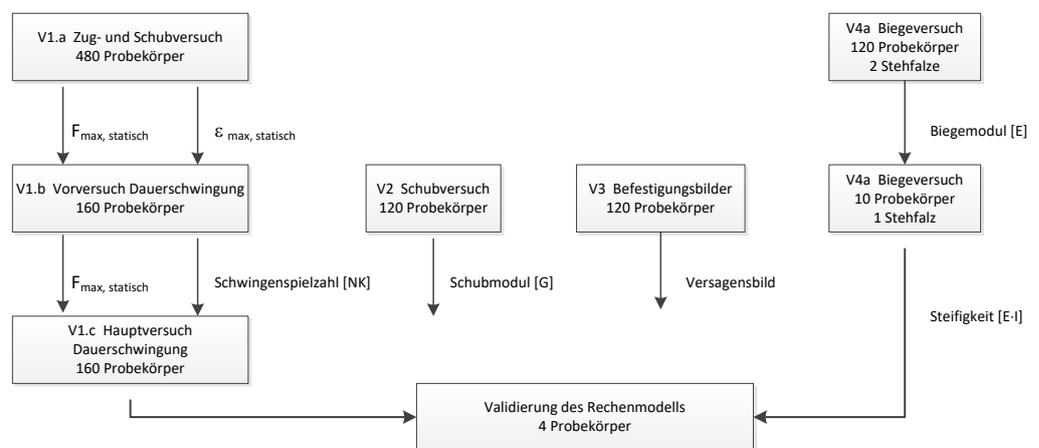


Bild 1:
Schematische Darstellung der Einflüsse der Vorversuche.

1.3.2 Krafteinleitung bei Versuchsdurchführung

Für Festhaften ergeben sich mehrachsige Beanspruchungen (Bild 2). Die maximale vertikale Beanspruchung wurde bei Zug- und Dauerschwingversuchen an den hierfür konzipierten Probekörpern getestet (Bild 4). Reine Schubkräfte entlang der horizontalen Achse wurden an den kurzen Probekörpern (Bild 5 und Bild 6) ermittelt.

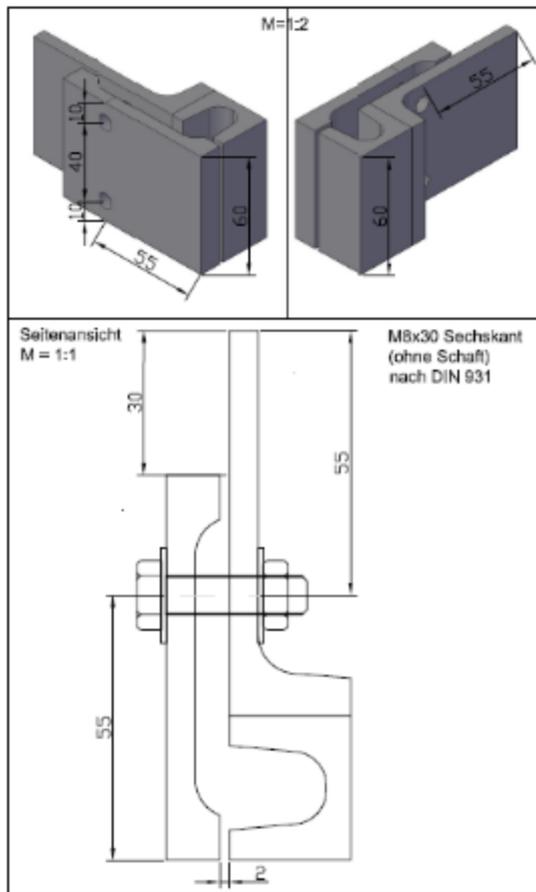


Bild 4:
Klammer zur Krafteinleitung bei Zug- und Dauerschwingversuchen.

1.3.3 Probekörper

Insgesamt werden drei Ausführungen von Probekörpern für die Versuchsreihe verwendet. Nachfolgend sind diese Probekörper sowie der jeweilige Verwendungszweck beschrieben.

1.3.3.1 Zug-, Schub- und Dauerschwingversuch

Die Unterkonstruktion dieses Probekörpers besteht aus einem Schalungsbrett mit den Maßen 200 x 24 x 600 mm. Darauf wird das jeweilige Deckungsmaterial montiert. Der Achsabstand der Haften zueinander beträgt unabhängig von Art und Ausführung bei allen Probekörpern 500 mm. Der Überstand des Schalungsbrettes zum Deckungsmaterial ist wegen der Einspannung in die Prüfmaschinen notwendig.

Dieser Probekörper dient in erster Linie zur Ermittlung der maximalen Zugkräfte. Die Zugkräfte, statisch wie dynamisch, werden über die Klemmung (Bild 4) mittig in das jeweilige Deckungsmaterial (Bild 5) eingeleitet, um den ungünstigsten Fall darzustellen. Die Einleitung der Schubkräfte mit Hilfe der Schneefangflasche erfolgt in der gleichen Position.

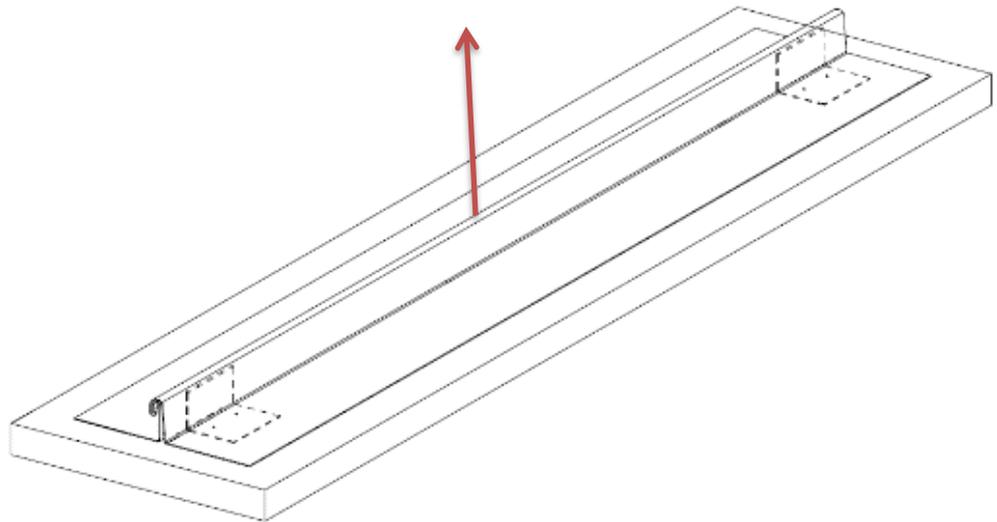


Bild 5:
Probekörper für Zug-, Schub und Dauerschwingversuche. Der rote Pfeil stellt die Krafteinleitung dar.

1.3.3.2 Schubversuch

Zur Ermittlung der reinen Schubkräfte wird eine kürzere Version der Probekörper (Bild 6) verwendet. Hierbei leitet der Stempel der Prüfmaschine die Schubkraft unmittelbar an der Stirnseite des Falzes ein. Dieser Versuch macht entsprechend der Funktion der Haften nur bei Festhaften Sinn, da Lohaften keine Schubkräfte übertragen sollen bzw. können.

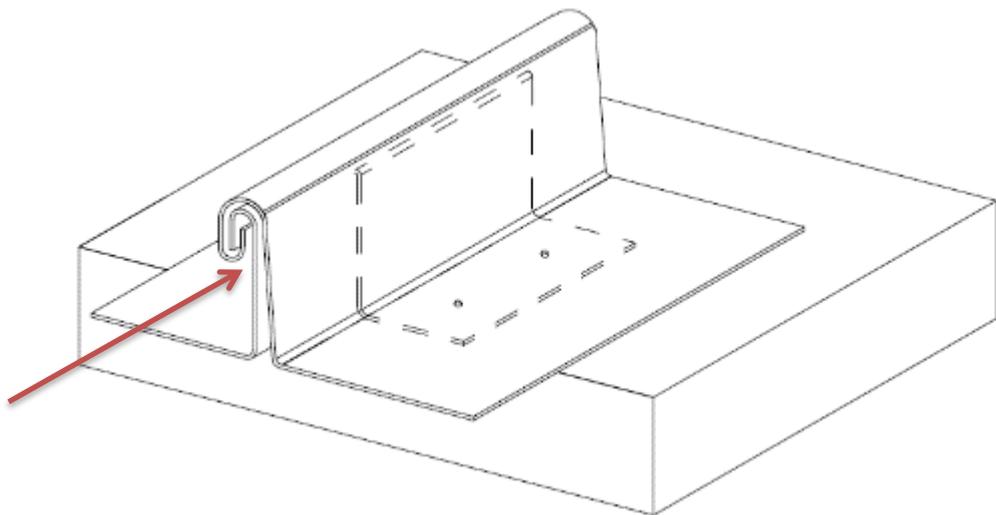


Bild 6:
Probekörper für Schubversuche. Die Richtung der Krafteinleitung wird mit dem roten Pfeil dargestellt.

1.3.3.3 Biegeversuch

In den durchgeführten Biegeversuchen wurde das Verhalten von verfalzten Blechscharen (Bild 7) unter Lasteinwirkung untersucht und mit den rechnerischen Vorhersagen der technischen Biegetheorie verglichen. Dadurch kann das theoretische Berechnungsmodell von gefalzten Metalldächern validiert werden. Anhand der Biegesteifigkeit ($E \cdot I$) der verschiedenen Falz-Geometrien in Abhängigkeit des Deckungsmaterials wurde das Berechnungsmodell angepasst.

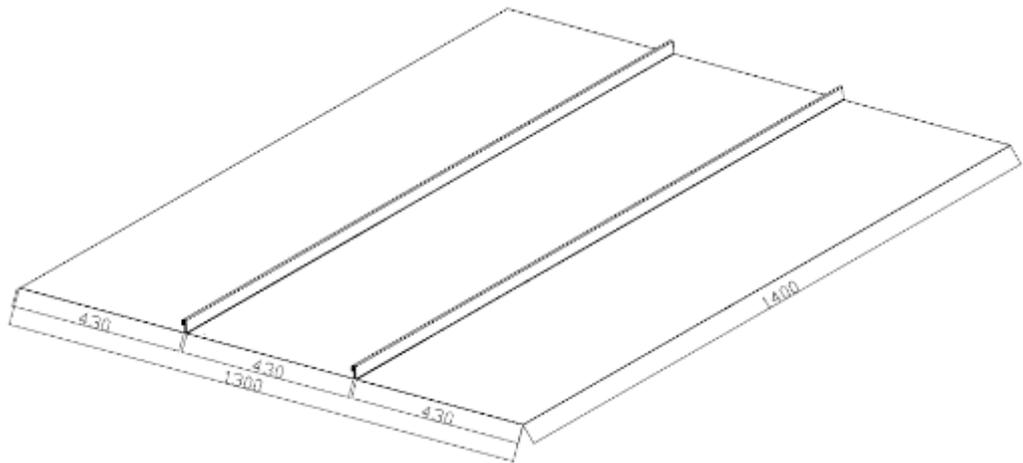


Bild 7:
Probekörper für Biegeversuche, bestehend aus drei Scharen mit zwei Falzen.

1.4 Projektstand und Bearbeitung

Das Projekt konnte insgesamt erfolgreich abgeschlossen werden. Allerdings musste aufgrund zeitlich deutlich aufwändigerer Dauerschwingversuche als geplant, eine Laufzeitverlängerung bis Jahresende 2018 beantragt werden, um alle erforderlichen Untersuchungen abzuschließen und im Anschluss daran ein probates Bemessungsverfahren zu entwickeln.

Ein wesentlicher Punkt der Untersuchungen, war die Betrachtung der Dauerhaftigkeit der Befestigungspunkte zum Bauwerk. Für die Beurteilung der Belastbarkeit von Haften ist deshalb nicht nur wesentlich, welche Zugkräfte zu einer plastischen Verformung führen und welche noch im elastischen Bereich liegen, sondern auch, welchen Einfluss schwingende Belastungen auf das Tragverhalten haben. Für diesen Zweck wurden im Projekt Untersuchungen mit einem so genannten „Pulser“ angesetzt, der mittels gepulster Lasteinleitung in die Probekörper 1 Million Lastwechselzyklen in einem überschaubaren Zeitrahmen abbilden sollte. Diese hohen Zyklenzahlen sind für Belastungsuntersuchungen im Maschinenbau üblich. Übersteht ein Material oder eine Konstruktion diese hohe Zahl an Lastwechsel zerstörungsfrei, ist davon auszugehen, dass es diesen dauerhaft standhält [14].

In anfänglich durchgeführten Tast-Versuchen mit dem Pulser war allerdings festzustellen, dass die niederfrequente Lasteinleitung mit ca. 100 Hz das Material nicht in geeigneter Weise beansprucht bzw. sich in der Prüfmaschine aufgrund der Weichheit des Systems nicht die erforderliche Resonanzfrequenz einstellt. Erst bei deutlich niedrigeren Lastzyklen ab ca. 1 Hz (1 Schwingung pro Sekunde) werden die Haften einer geeigneten und realitätsnahen Belastungssituation ausgesetzt. Das war so zum Zeitpunkt der Projektplanung nicht vorherzusehen. Es war deshalb erforderlich, ein alternatives Mess- und Prüfverfahren zu definieren, das den Anforderungen genügt. Eine Verlängerung der Versuche um den Faktor 100 hätte nämlich bedeutet, dass sich der für den Projektplan angesetzte Prüfzeitraum auf diese Weise um den Faktor 100 verlängert hätte. Aus den ursprünglich kalkulierten rund 3 Stunden Prüfdauer pro Prüfkörper wären so rund 300 Stunden geworden. Bei den ursprünglich angesetzten 160 Probekörpern wäre eine hinreichende Untersuchung im Projektzeitraum nicht möglich gewesen. Auch im Hinblick auf künftige Messungen und Untersuchungen im Rahmen möglicher Materialprüfungen oder Zulassungsuntersuchungen wäre das nicht praktikabel.

Aus diesem Grund wurde zum einen ein geeignetes alternatives Prüfverfahren auf Basis der ETAG 006 gewählt und bedarfsgerecht angepasst, so dass die Prüfdauer je Probekörper nun auf maximal einen Tag verkürzt wurde. Zum anderen wurde die Anzahl der erforderlichen Prüfungen in Abstimmung mit den Projektpartnern in vertretbarer Weise reduziert, so dass unter diesen neuen Bedingungen das Projekt bis zum Jahresende erfolgreich abgeschlossen und zudem der Branche ein geeignetes und valides Prüfverfahren vorgeschlagen werden konnte. Die messtechnischen Untersuchungen wurden bis zum Projektende vollumfänglich abgeschlossen.

In der nachfolgenden Tabelle ist der Projektplan und dessen Erfüllungsstand zum Projektende aufgeführt.

Tabelle 1:
Arbeitspakete des Projekts und Erfüllungsgrad.

Arbeitspaket	Bearbeitungszeitraum	Bearbeitet
Projektkoordination	01.05.2017 - 01.05.2018	✓
AP 1 Grundlagenermittlung	01.05.2017 - 30.06.2017	✓
AP 2 Untersuchungen	01.07.2017 - 01.12.2018	✓
2.1 Vorversuche	01.07.2017 – 30.09.2017	✓
2.2 Zug- und Schubversuche	01.10.2017 -30.11.2017	✓
2.3 Dauerschwingversuche	01.11.2017 - 01.10.2018	✓
2.4 Biegeversuche	01.10.2017 - 31.10.2017	✓
2.5 Validierung	01.12.2017 - 31.01.2018	✓
2.6 Abstimmung des Prüfprogramms	01.01.2018 - 01.04.2019	✓
AP 3 Ergebnisauswertung	01.03.2018 - 01.12.2018	✓
	23 Monate	

2 Untersuchungen und Versuche

2.1 Grundlagen

2.1.1 Grundlagen zu Biegeversuchen

Für die theoretische Betrachtung der Durchbiegung werden die Scharen als Biegebalken angesehen. Als statisches System wird ein zwischen zwei Auflagern liegender Teilbereich der verfalzten Blechscharen als Einfeldträger betrachtet, der orthogonal zur Verlegefläche belastet wird. Dieser entspricht auf einem Metalldach dem Bereich zwischen zwei Befestigungshafte. Dabei werden Strecken- und Einzellasten unterschieden und resultierende Biegemomente und Durchbiegungen auf Grundlage der technischen Biegetheorie berechnet. Für die Verformung wird nach dem Hook'schen Gesetz ein linear-elastisches Verhalten der Deckwerkstoffe angenommen.

2.1.1.1 Biegesteifigkeit eines Querschnitts

Die Biegesteifigkeit EI eines Körpers ist in der Balkentheorie ein Maß für den Widerstand gegen eine Verformung durch auf ihn wirkende Kräfte oder Momente. Diese setzt sich als Produkt aus dem axialen Flächenträgheitsmoment (FTM) I und dem Elastizitätsmodul (E-Modul) E zusammen.

Während der E-Modul als materialspezifischer Parameter feststeht und den Datenblättern der Werkstoffhersteller bzw. den spezifischen Werkstoffnormen entnommen werden kann, ist das FTM eines Körpers von dessen Querschnittsgeometrie abhängig. Zur Ermittlung des FTM und der Lage des Massenschwerpunkts des Querschnitts gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie beispielsweise die tabellarische Bestimmung des FTM sowie eine softwaregestützte Berechnung mittels Computer-Aided Design (CAD).

Tabellarische Bestimmung des FTM

Dazu wird der Querschnitt in einzelne Teilflächen wie zum Beispiel Rechtecke und Dreiecke zerlegt, von denen die notwendigen Formeln zur Berechnung des FTM bekannt sind ([24] 4.28). Aus dem FTM der einzelnen Teilflächen, der Fläche der Teilfläche und dem Abstand des Teilflächenschwerpunkts zum Bezugskordinatensystem lässt sich an Hand des Steiner'schen Verschiebesatzes das Gesamtflächenträgheitsmoment des Querschnitts und die Schwerpunktlage über ein Tabellenverfahren errechnen. Allerdings kann diese Methode schnell sehr komplex werden, wenn Biegeradien und aus der vertikalen oder horizontalen Achse abweichende Teilflächen, wie sie in Falzquerschnitten vorkommen, in der Berechnung berücksichtigt werden sollen. Bei vereinfachter Annahme der Teilflächen des Falzes als horizontal und vertikal stehende Rechtecke kann das errechnete FTM vom wahren Wert abweichen.

Für das FTM I_x in cm^4 für zusammengesetzte Flächen bei Biegungen um die Bezugs-x-Achse gilt: (vgl. [20], S. 99)

$$I_x = \sum_{i=1}^n I_{xi} + \sum_{i=1}^n y_{Si}^2 A_i \quad (2.1)$$

Dabei ist I_{xi} das FTM der Teilfläche bei Biegung um die Teilflächenschwerachse x in cm^4 , y_{Si} der Abstand des Teilflächenschwerpunkts zur Bezugs- x -Achse in cm , A_i die Fläche der Teilfläche in cm^2 . Für das FTM I_y in cm^4 für zusammengesetzte Flächen bei Biegungen um die Bezugs- y -Achse gilt: (vgl. [20], S. 99)

$$I_y = \sum_{i=1}^n I_{yi} + \sum_{i=1}^n x_{Si}^2 A_i \quad (2.2)$$

Dabei ist I_{yi} das FTM der Teilfläche bei Biegung um die Teilflächenschwerachse y in cm^4 , x_{Si} der Abstand des Teilflächenschwerpunkts zur Bezugs- y -Achse in cm , A_i die Fläche der Teilfläche in cm^2 . Für das FTM I_x und I_y in cm^4 von gegenüber dem Bezugskordinatensystem gedrehten Teilflächen bezogen auf das Bezugskordinatensystem x - y gilt: (vgl. S. [20], 101)

$$I_x = \frac{1}{2}(I_\eta + I_\zeta) + \frac{1}{2}(I_\eta - I_\zeta) \cos 2\varphi + I_{\eta\zeta} \sin 2\varphi \quad (2.3)$$

und

$$I_y = \frac{1}{2}(I_\eta + I_\zeta) - \frac{1}{2}(I_\eta - I_\zeta) \cos 2\varphi - I_{\eta\zeta} \sin 2\varphi \quad (2.4)$$

Dabei ist I_η das FTM der Teilfläche bei Biegung um die Teilflächenschwerachse η in cm^4 , I_ζ das FTM der Teilfläche bei Biegung um die Teilflächenschwerachse ζ in cm^4 , φ der Winkel zwischen dem Teilflächenschwerachsenkoordinatensystem η - ζ und dem Bezugskordinatensystem x - y in Grad mit dem Deviationsmoment $I_{\eta\zeta}$ in cm^4 (vgl. [20], S. 99)

$$I_{\eta\zeta} = \sum_{i=1}^n I_{\eta\zeta i} - \sum_{i=1}^n \eta_{Si} \cdot \zeta_{Si} \cdot A_i \quad (2.5)$$

Dabei ist η_{Si} der Abstand des Teilflächenschwerpunkts zur ζ -Achse in cm , ζ_{Si} der Abstand des Teilflächenschwerpunkts zur η -Achse in cm , A_i die Fläche der Teilfläche in cm^2 .

Computer-aided design (CAD)

CAD-Software bietet die Möglichkeit, das FTM, die Querschnittsfläche und die Schwerpunktlage auch von komplizierten Querschnitten sehr genau zu bestimmen. (Siehe dazu zum Beispiel das mit Autodesk AutoCAD erstellte Bild 8)

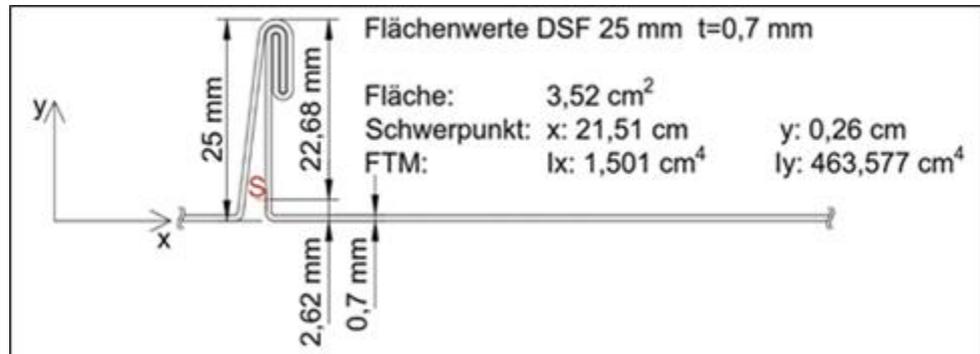


Bild 8:
Flächenwerte eines 25 mm Doppelstehfalzes.

2.1.1.2 Aufbau der Probekörper

Die Probekörper für die Biegeversuche bestanden aus drei miteinander verfalzten Blechscharen, jeweils mit einer Breite von 430 mm und einer Länge von 1,4 m, wodurch sich zwei durchgängige Längsfalze ergeben (Bild 9). Die Scharen wurden aufgrund der höheren Reproduzierbarkeit maschinell hergestellt.

Dieser Probekörperaufbau wurde gewählt, weil davon auszugehen war, dass sich eine beidseitig eingefalzte Mittelschare unter Biegebeanspruchung anders verhält als ein aus nur zwei Scharen bestehender Probekörper. Da dieser Aufbau auch einem Blechdach sehr nahekommt, war mit einem realistischen Biegeverhalten zu rechnen.

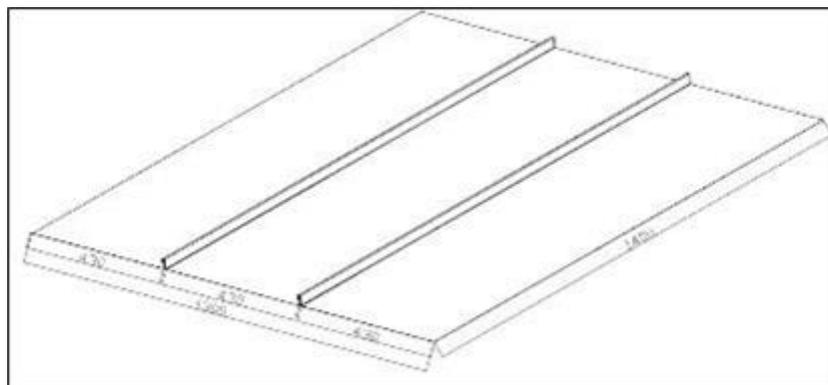


Bild 9:
Probekörper mit Doppelstehfalz für Biegeversuche.

Bei Blechdächern kommen verschiedene Falzvarianten zum Einsatz. Am meisten verbreitet sind sogenannte Doppelstehfalze (DSF) und Winkelstehfalze (WSF). Daneben existieren unterschiedliche Schnappfalzvarianten (SNAP), die ein schnelleres Verlegen von Metallbedachungen ermöglichen. Die verwendeten Falzvariationen sind in Bild 10, Bild 11 und Bild 11 dargestellt. Abgebildet ist jeweils nur das Deckmaterial ohne eingefalzte Befestigungshaften, die auch bei den Probekörpern nicht vorhanden waren.

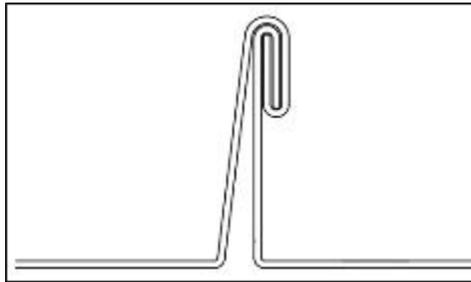


Bild 10:
Doppelstehfalz.

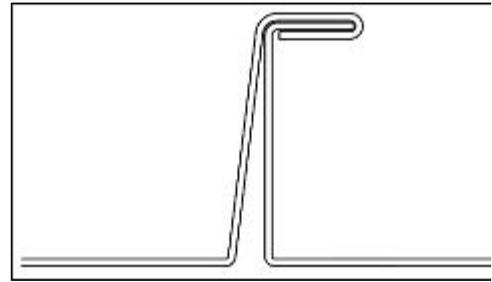


Bild 12:
Winkelstehfalz.

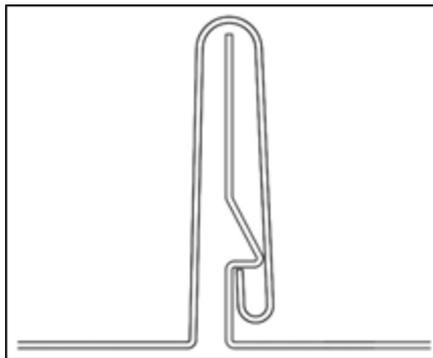


Bild 11:
Schnappfalz.

Doppelstehfalze wurden mit den Höhen 25 mm und 38 mm, Winkelstehfalze mit einer Höhe von 25 mm und Schnappfalze mit einer Höhe von 38 mm geprüft.

Als Materialien kamen zum Einsatz:

- Kupfer (nach DIN EN 504), Dicke 0,6 mm
- Titanzink (nach DIN EN 501 und DIN EN 988), Dicke 0,7 mm
- farbbeschichtetes Aluminium (nach DIN EN 507), Dicke 0,7 mm
- nichtrostender Stahl der Werkstoffnummer 1.4301 (nach DIN EN 10088-4 und DIN EN 505), Dicke 0,5 mm

Mit Aluminium und nichtrostendem Stahl wurden alle Falzvarianten, mit Titanzink beide Doppelstehfalzhöhen und Winkelstehfalze und mit Kupfer beide Doppelstehfalzhöhen geprüft. Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen eine Übersicht der Versuchsart Winddruck oder Windsog und der jeweiligen Probekörperanzahl pro Material und Falzvariante.

Tabelle 2:
Probekörperanzahl Winddruckversuche.

Material	Probekörperanzahl pro Falzvariante			
	DSF 25 mm	DSF 38 mm	WSF 25 mm	SNAP 38 mm
Kupfer	-	-	-	-
Aluminium	5	5	5	-
Stahl nichtrostend	-	-	-	5
Titanzink	10	5	9	nicht zulässig

Tabelle 3:
Probekörperanzahl Windsogversuche.

Material	Probekörperanzahl pro Falzvariante			
	DSF 25 mm	DSF 38 mm	WSF 25 mm	SNAP 38 mm
Kupfer	5	5	-	-
Aluminium	8	5	20	5
Stahl nichtrostend	5	5	5	5
Titanzink	10	5	11	nicht zulässig

2.1.1.3 Versuchsaufbau

Für eine praxisnahe Simulation der Lasteinwirkungen durch Windsog und Winddruck wurde ein Vierpunkt-Biegeversuch ausgewählt (siehe z. B. DIN EN 14509:2013-12 und DIN 53293:1982-02). Bei Vierpunkt-Biegeversuchen entsteht zwischen den zwei Lasteinleitungspunkten ein konstantes Biegemoment auf den Prüfkörper. Als Auflager dienten, wie in Bild 13 dargestellt, zwei gelenkig auf Stahlbrücken aufgesetzte Bauteile aus mitteldichten Holzfaserverplatten (MDF) mit einer Stützweite von einem Meter. Diese Auflagerbedingung sollten sicherstellen, dass eine Drehung der Probekörper um die Auflagerpunkte während der Versuchsdurchführung nicht behindert wird (vgl. [13] S. 56).



Bild 13:
Gelenkiges Auflager.



Bild 14:
Falzaussparung.

Um bei den Windsogversuchen die Falze freizuhalten und ein flächiges Aufliegen der Probekörper auf den Auflagern zu ermöglichen, wurden in diesen Aussparungen für die Längsfalze vorgesehen (Bild 14). Innerhalb der Aussparungen hatten die Falze beidseitig jeweils 15 mm Abstand zur MDF-Auflage um Verformungen der Falze zu ermöglichen [21].

Die Last des Prüfzylinders wurde über Quertraversen aus Stahl auf zwei Lasteinleitungsbereiche aufgeteilt. Dabei betrug der Abstand der Lasteinleitungspunkte untereinander 50 cm, mit einem Abstand zwischen Auflager und Lasteinleitung von jeweils 25 cm (Bild 15). In Bild 16 ist der gesamte Prüfaufbau zu sehen.

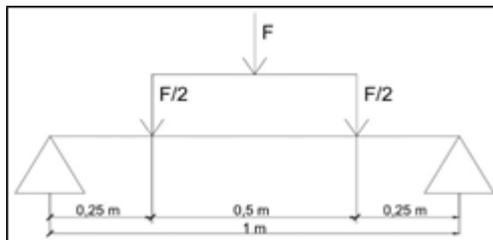


Bild 15:
Schema Vierpunkt-Biegeversuch.



Bild 16:
Gesamter Prüfaufbau.

Um eine gute Anpassung der Lasteinleitungsbereiche an den Probekörper zu ermöglichen, erfolgte die Lasteinleitung auf die Scharen über Unterlagen aus expandiertem Polystyrol (EPS) mit darauf aufgeklebten MDF-Brettern (siehe dazu auch Bild A.12 in [13], S. 57). Die Lastübertragung von den Traversen auf die MDF-Bretter erfolgte über gegen wegrollen gesicherte Aluminiumrundstäbe (Bild 17).

Um eine Verformung der Falze bei Winddruckversuchen nicht zu behindern und die Last nicht konzentriert auf die Falze einzuleiten, wurden die EPS-Unterlagen auf jede Schar mit seitlichem Abstand zum Falz aufgelegt (Bild 18).

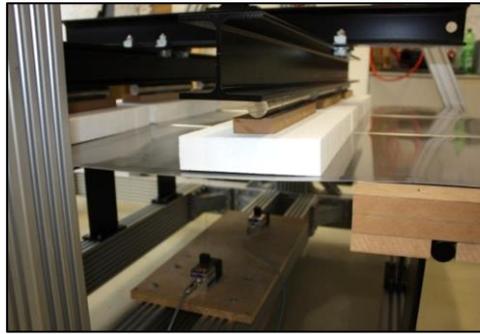


Bild 17:
Unterlage mit Aluminiumrundstab.



Bild 18:
Unterlagen bei Winddruckversuch.



Bild 19:
Versuchsaufbau mit eingelegtem
Probekörper.



Bild 20:
Seilzugwegaufnehmer.

Die Durchbiegung der Scharen wurde mittig zwischen den Auflagern über Seilzugwegaufnehmer (Bild 20) gemessen. Bei Windsogversuchen konnten diese in die nach unten zeigenden Falze eingehakt werden (Bild 21), bei Winddruckversuchen wurden auf Höhe der Falze Haken aus Lochband mittig zwischen den Auflagern festgeklebt und die Seilzugwegaufnehmer in diese eingehakt (Bild 22). In Bild 19 ist der komplette Prüfaufbau mit eingelegtem Probekörper und positionierten Unterlagen dargestellt.



Bild 21:
Wegaufnehmer Windsogversuch.

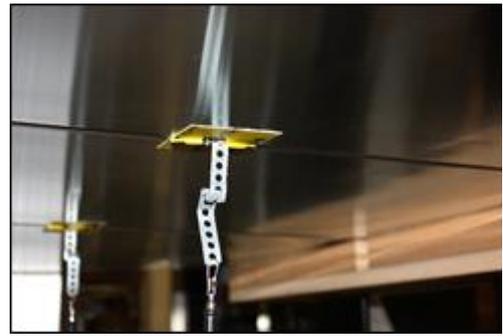


Bild 22:
Wegaufnehmer Winddruckversuch.

2.1.1.4 Versuchsdurchführung

Die in den Prüfaufbau eingelegten Probekörper wurden anhand der Falze rechtwinklig zu den Auflagern ausgerichtet. Durch beidseitiges Messen des Überstands über die Auflagern hinaus und entsprechendes Ausrichten der Probekörper wurde die mittige Belastung sichergestellt. Nachfolgend wurden die EPS-Unterlagen auf die einzelnen Scharen aufgelegt und ebenfalls entsprechend des geplanten Abstands der Lasteinleitung zu den Auflagern eingemessen. Abschließend erfolgte das Einhängen der Seilzugwegaufnehmer mittig zwischen den Auflagern.

Nach dem Absenken der Stahltraversen auf die Auflagern wurde durch den Prüfzylinder eine Vorlast von 0,04 kN aufgebracht. Anschließend erfolgte der Start der Lasteinleitung und Messwertaufzeichnung.

Um eine schnelle Versuchsdurchführung zu gewährleisten und den normativen Forderungen zu entsprechen, belastete der Prüfzylinder den Probekörper mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,2 mm/s, so dass die Maximalkraft in ein bis drei Minuten erreicht wurde (vgl. [2], S. 3). Das Messintervall betrug vier Messwerte pro Sekunde mit einer ausreichend hohen Messauflösung. Der Versuch wurde abgebrochen, nachdem die Maximalkraft erreicht wurde und ein starker Abfall der eingeleiteten Kraft festgestellt werden konnte (vgl. [21], S. 24).

2.1.2 Grundlagen zu Schub- und Zugversuchen

2.1.2.1 Randbedingungen und Prüfparameter

Die Definition der Prüfparameter orientiert sich an der „DIN EN ISO 6892-1: 2017-02-00: Metallische Werkstoffe-Zugversuche-Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur“ [16]. Hierbei handelt es sich allerdings um eine Norm für die Material- und nicht für die Bauteilprüfung, weshalb es nicht möglich war alle Prüfbedingungen auf die vorliegende Situation zu übertragen.

Nach der Rücksprache mit dem Zentrallabor für Werkstoffprüfung der Technischen Hochschule Rosenheim, wurden basierend auf deren Erfahrungswerten folgendes festgelegt:

- Testdurchführung im Labor unter Raumtemperatur
- Für die Vorversuche wurde eine Vorkraft von 10 N festgelegt, diese wurde nach den Vorversuchen auf 15 N korrigiert
- Als Prüfgeschwindigkeit wurde für alle Versuche eine kontinuierliche Geschwindigkeit von 10 mm/min festgelegt
- Für den Abbruch der Versuche wurden zwei Kriterien festgelegt. Diese gelten sowohl bei den Zug-, als auch Schubversuchen. Dabei wurde folgendes definiert:
 - Erreichung einer max. Längenänderung / Dehnung von 50 mm
 - 50 % Kraftabfall von der erreichten Höchstkraft in diesem Versuch

2.1.2.2 Prüfmaschine

Die nachfolgend aufgeführten Probekörper wurden allesamt an derselben Prüfmaschine getestet. Dabei handelt es um ein Modell der Firma Zwick/Roell mit der Bezeichnung „Zwick Z100 TEW“. Die Prüfmaschine weist dabei folgende technische Daten auf:

Tabelle 4:
Technische Daten Zwick Z100 TEW.

Kraftmessdosen:	0-2 kN / 0-10 kN / 0-100 kN
Genauigkeit:	Klasse 1 ab 0,2 % F _{nom} (ISO 7500-1) Klasse 0,5 ab 1,0 % F _{nom} (ISO 7500-1)
Spannsystem:	Keilschraub- und Keil-Probehalter symmetrisches / asymmetrisches Spannen Temperaturbereich: -40 ... +250 °C
Wegaufnehmer:	Längenänderungsaufnehmer multiXtens Einsetzbar für Zug-, Druck-, Biegeprüfungen Messweg 700 mm (-Anfangsmesslänge) Messfühler für Zugversuche Genauigkeitsklasse 0,5 (EN ISO 9513)
Prüfraumhöhe:	1755 mm
Prüfraumbreite:	640 mm
Max. Prüfungsgeschwindigkeit:	750 mm/min

Dabei unterscheidet sich der Aufbau jeweils für die Zug- und die Schubversuche an der Maschine. Hierbei war es notwendig die Einspann-Vorrichtungen jeweils an die Geometrie und Richtung der Krafteinleitung an die Probekörper anzupassen.

Aufbau Zugversuche

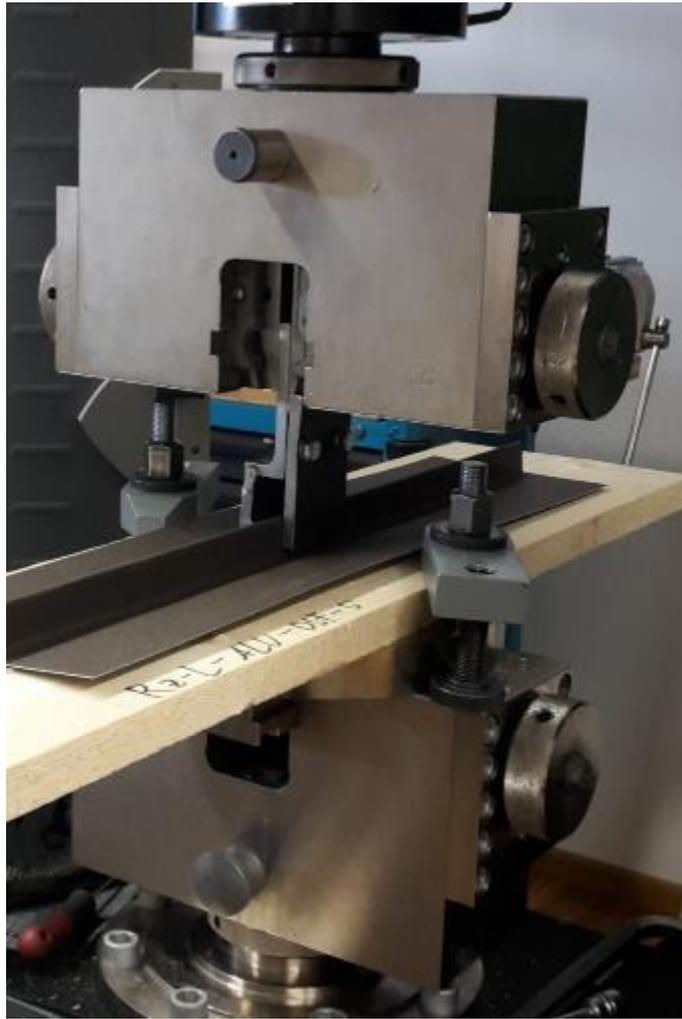


Bild 23:
Aufbau der Prüfmaschine bei Zugversuchen.

Bild 23 zeigt den Prüfaufbau sowohl für die reinen Haftauszugsversuche, als auch für die Haftauszugsversuche mit Deckungsmaterial. Dabei werden die Prüfkörper an der Unterkonstruktion mit jeweils zwei Spannbacken auf der Grundplatte der Prüfmaschine fixiert. Die Klammer für die Krafteinleitung (siehe Bild 24) wird in den oberen Keilschraub-Probehalter eingespannt.

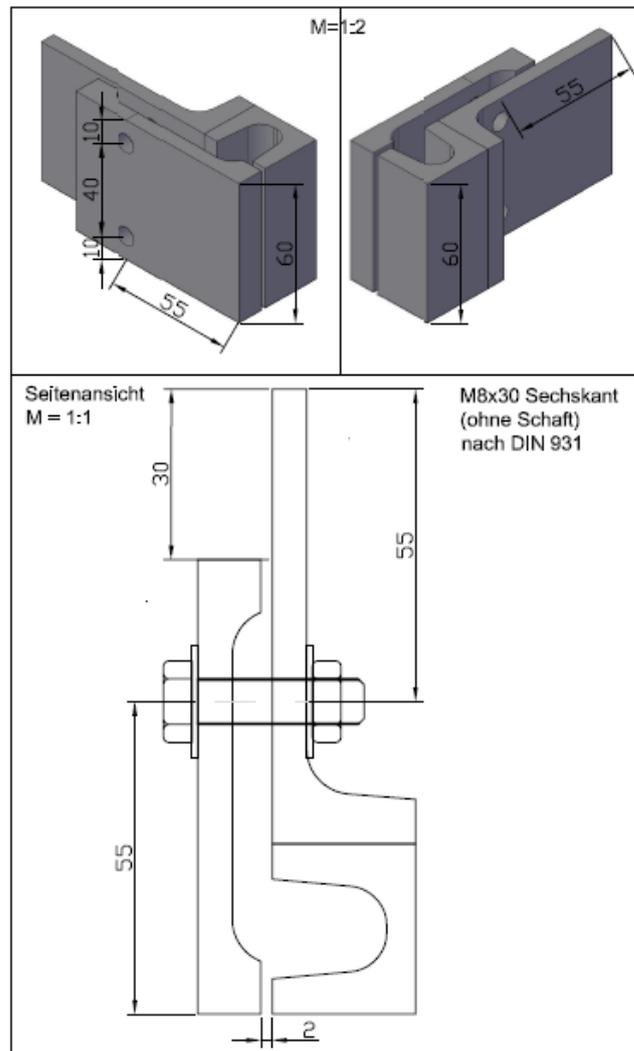


Bild 24:
Klammer zur Krafteinleitung bei Zugversuchen.

Diese Klammer wurde speziell für diese Versuchsreihen entworfen. Das Design orientiert sich an Schneefanghaltern für DSF-Systeme, die auf dem Markt erhältlich sind.

Aufbau Schubversuche

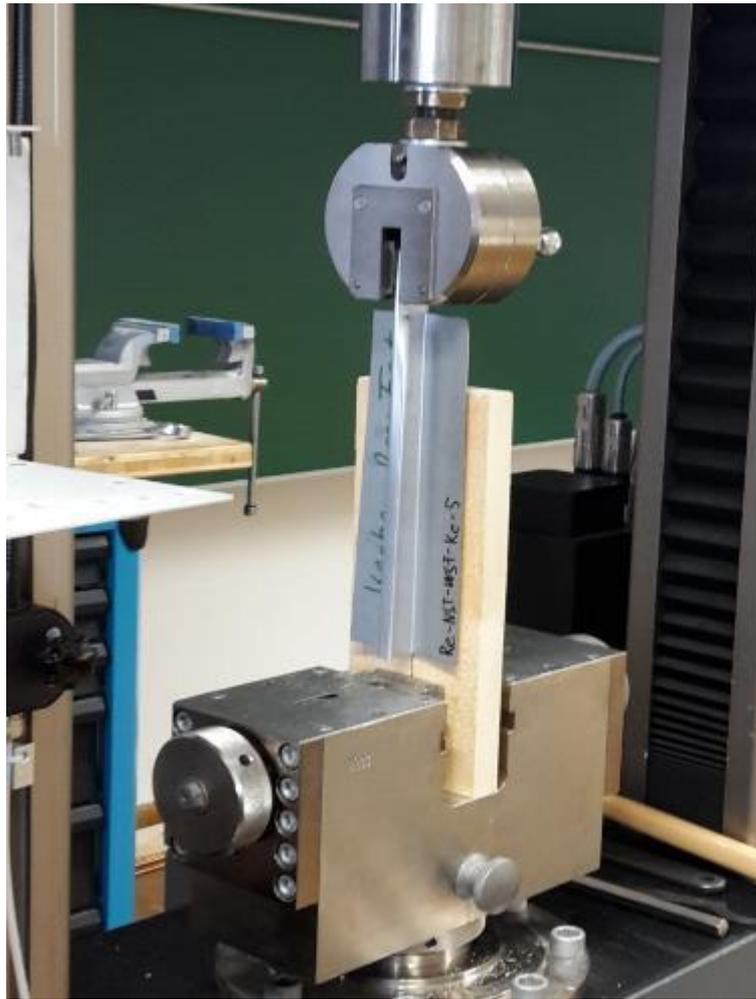


Bild 25:
Aufbau der Prüfmaschine bei Schubversuchen.

Bild 25 zeigt den Prüfaufbau für die Schubversuche mit Deckungsmaterial. Dabei werden die Prüfkörper mit der Unterkonstruktion in den unteren Keilschraub-Probenhalter eingespannt. Im oberen Bereich wird der dafür modifizierte Teil des Deckungsmaterials zur Kräfteinleitung direkt in einen Keil-Probenhalter eingespannt.

2.1.2.3 Probekörper

In den folgenden Unterpunkten wird näher auf die verwendeten Probekörper eingegangen. Es wird der genaue Aufbau und die wichtigsten Eigenschaften der Probekörper beschrieben. Dabei wird grundsätzlich zwischen den Haften für die reinen Auszugsversuche, Auszugsversuche mit Deckungsmaterial und Schubversuche mit Deckungsmaterial unterschieden.

Haften

Für die Durchführung dieses Projekts musste die Anzahl der zu testenden Haften eingegrenzt werden. Die Produktauswahl in diesem Bereich ist vielfältig, so dass Produkte mit „besonderen“ Konstruktionsmerkmalen ausgewählt werden mussten. Die Auswahl fiel auf drei weitverbreitete Befestigungssysteme verschiedener Hersteller (Tabelle 5). Um den Anschein einer eventuellen Wertung von Haften-Herstellern im Rahmen dieses Projekts zu vermeiden, werden die verwendeten Haften produkt-neutral beschrieben. Die Auswahl der untersuchten Haften basiert auf folgenden Kriterien:

Tabelle 5:
Übersicht über die untersuchten Haften (produktneutral).

Typ	Auswahlkriterium
Haft-Typ 1	Sehr hoher Marktanteil in der Branche und relativ einfach konstruiert.
Haft-Typ 2	Weist verschiedene Aussteifungssicken auf und besitzt bereits eine AbZ.
Haft-Typ 3	Wird von Kennern der Branche als eines der am aufwendigsten gestalteten und stabilsten Systeme angesehen.
Haft-Typ 4	Besitzt eine zweite Lochreihe für Befestigung auf der Schalung. Wurde im Projekt lediglich für den Vergleich des Einflusses einer doppelten Lochreihung im Vergleich zu einer Lochreihung betrachtet (vgl. Kap. 2.2.1.2), ansonsten aber nicht weiter untersucht.

Im folgenden Teil werden diese drei Befestigungssysteme bzgl. Aufbau und Geometrie genau beschrieben.

Tabelle 6:
Technische Daten Haft-Typ 1.

Technische Daten Haft-Typ 1						
	Breite	Höhe	Länge	Versatz Lasteinleitung / Befestigung	Material- stärke	Befesti- gungsbild
Festhafte	26 mm	26 mm	30 mm	10 mm	0,39 mm	2 Punkt, einreihig
Loshafte	25 mm	27 mm	90 mm	9 mm	0,42 mm	3 Punkt, zweireihig diagonal

Die Haftn des Haft-Typs 1 (Bild26 und Bild 27) bestehen aus nichtrostendem Stahl (1.4301). Bei dem Loshaft ist das mittlere der drei Montagelöcher um ca. 5 mm nach außen versetzt. Außerdem sind am Rand der waagrechten Auflagefläche vier kleine Sicken zur Erhöhung der Steifigkeit. Des Weiteren sind die Ecken abgerundet. Im Übergang vom waagrechten zum senkrechten Teil besitzt sie eine Schlitzung, in der ein Schlitten eingehängt ist um die Dilatation der Scharen aufzunehmen. Der Schlitten wird für die Montage mittels einer Körnung mittig fixiert (Bild 27).



Bild26:
Haft-Typ 1-Festhafte.



Bild 27:
Haft-Typ 1-Loshafte.

Tabelle 7:
Technische Daten Haft-Typ 2-Hafte.

Technische Daten Haft-Typ 2-Hafte						
	Breite	Höhe	Länge	Versatz Lasteinleitung / Befestigung	Material- stärke	Befesti- gungsbild
Festhafte	24 mm	26 mm	50 mm	15 mm	0,38 mm	2 Punkt, einreihig
Loshafte	24 mm	26 mm	110 mm	15 mm	0,6 mm	3 Punkt, einreihig

Die Hafte des Haft-Typs 2 (Bild 28 und Bild 29) bestehen aus nichtrostendem Stahl (1.4301). Die Montagelöcher sind durch Blechumformung mit Senkungen versehen, in denen der Kopf des Befestigungsmittels flächenbündig montiert werden kann. Außerdem besitzen sie am Rand der waagrechten Auflagefläche rundherum eine Sicking, die einen umlaufenden Wulst bildet zur Erhöhung der Steifigkeit. Die Ecken sind abgerundet. Die Loshafte (Bild 29) verfügt im senkrechten Teil über eine Schlitzung, in der ein Schlitten eingehängt ist um die Dilatation der Scharen aufzunehmen. Der Schlitten wird für die Montage mittels zweier Erhöhungen mittig fixiert (Bild 29).



Bild 28:
Haft-Typ 2-Festhafte.



Bild 29:
Haft-Typ 2-Loshafte.

Tabelle 8:
Technische Daten Haft-Typ 3-Hafte.

Technische Daten Haft-Typ 3-Hafte						
	Breite	Höhe	Länge	Versatz Lasteinlei- tung / Befes- tigung	Material- stärke	Befesti- gungsbild
Festhafte	25 mm	27 mm	70 mm	10 mm	0,4 mm	3 Punkt, ein- reihig
Loshafte	27 mm	27 mm	85 mm	11 mm	O. 0,3 mm U. 0,6 mm	3 Punkt, ein- reihig

Die Haft-Typen 3 (Bild 30 und Bild 31) bestehen aus nichtrostendem Stahl (1.4301). Die Montagelöcher sind durch Blechumformung mit Senkungen versehen, in denen der Kopf des Befestigungsmittels flächenbündig montiert werden kann. Am Rand der waagrechten Auflagefläche ist rundherum eine Sicke und jeweils zwei Sicken zwischen den Montagelöchern zur Erhöhung der Steifigkeit ausgebildet. Die Ecken sind abgerundet. Die Loshafte haben im Übergang zwischen dem waag- und senkrechten Teil eine gefalzte Führungsschiene. Dieser verbindet die beiden Einzelteile und nimmt die Dilatation der Scharen auf (Bild 31).



Bild 30:
Haft-Typ 3-Festhafte.



Bild 31:
Haft-Typ 3-Loshafte.

Für die Unterkonstruktion wird der in den Klempnerfachregeln als üblich bezeichnete Aufbau verwendet. Dieser entspricht einer Vollholzschalung mit einer

Nennstärke von 24 mm und einer relativen Holzrestfeuchte von $\varphi \leq 20\%$. Befestigt werden die Haften mit Senkkopfschrauben aus nicht rostendem Stahl 4,0 x 25 mm. Für die Haften des Haft-Typs 2 werden Holzschrauben aus korrosionsgeschütztem Stahl mit 4,0 x 30 mm gemäß der AbZ verwendet.

Haftenauszug mit Deckungsmaterial

Für den Haftenauszug mit Deckungsmaterial wird als Unterkonstruktion der gleiche Aufbau wie bei den zuvor genannten Versuchen verwendet. Auf diesen Unterbau wird, je nach Probekörper, aus dem entsprechendem Deckungsmaterial ein Doppelstehfalz ausgebildet. Dieser Doppelstehfalz ist mit jeweils zwei, der im Kapitel zuvor beschriebenen Haften, befestigt.

Dabei beträgt der Haftenabstand den nach Klempnerfachregeln aktuell ungünstigsten zulässigen Wert von 500 mm. Dieser wird gemessen von Haftemittelpunkt zu Haftemittelpunkt (siehe Bild 32) [25].

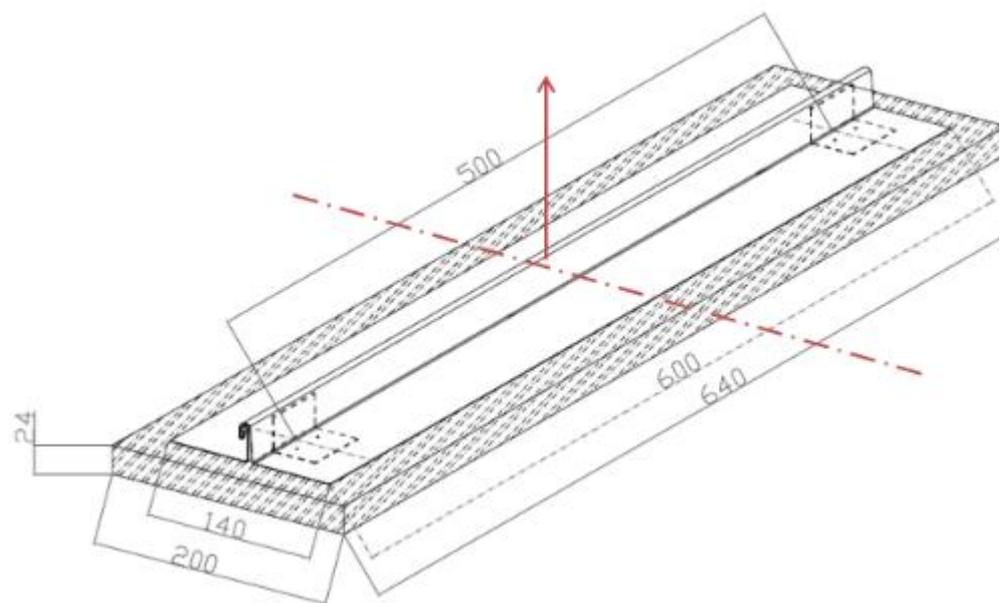


Bild 32:
Probekörperaufbau für Haftenauszug mit Deckungsmaterial.

Die Doppelstehfalze an den Probekörpern wurden alle maschinell verfalzt, um die Schließung des Falzes bzgl. des Anpressdrucks möglichst einheitlich zu gestalten.

Schubversuch mit Deckungsmaterial

Für die Schubversuche mit Deckungsmaterial ist die gleiche Unterkonstruktion, wie bei den zuvor genannten Versuchen verwendet worden. Auf diesen Unterbau wird, je nach Probekörper, aus dem entsprechendem Deckungsmaterial ein Doppelstehfalz oder Winkelstehfalz ausgebildet. Das Deckungsmaterial ist über

eine Hafte an der Unterkonstruktion befestigt. Diese Probekörper werden nur mit Festhaften getestet, da nur diese Schubkräfte aufnehmen können. Außerdem wird sich hierbei auf den Hersteller des Haft-Typs 1 beschränkt, da hier eine Vielzahl von Probekörper-Typen notwendig ist, um das Verhalten eines Haftens-Typs zu beurteilen.

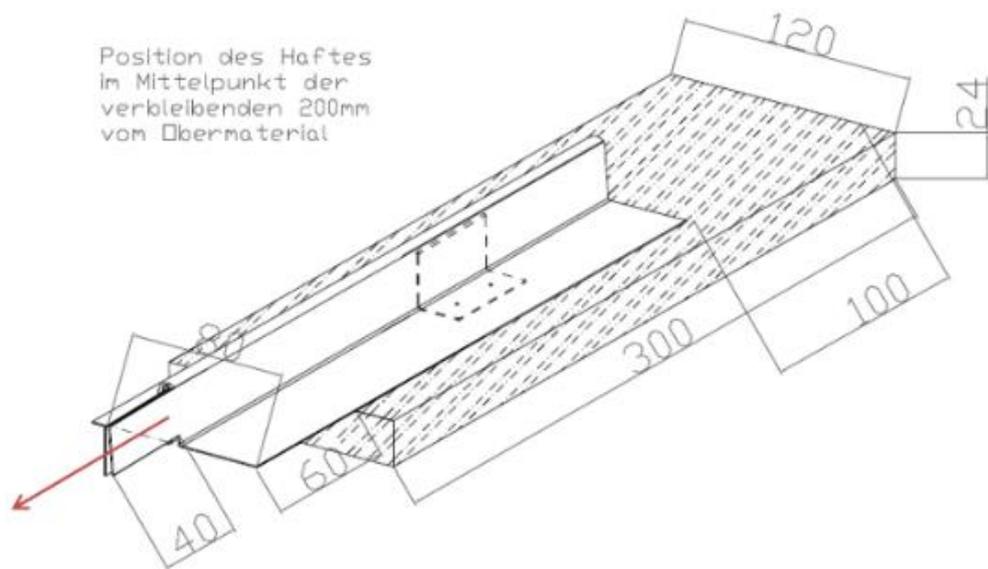


Bild 33:
Probekörperaufbau für Schubversuch mit Deckungsmaterial.

Wie in Bild 33 zu sehen, werden die obersten 40 mm des Deckungsmaterials ausgenommen. Dabei wird nur der senkrechte Teil des Obermaterials, ohne Falz, stehen gelassen. Dies ist notwendig um bei der Einspannung des Probekörpers eine exakte Lasteinleitung zu gewährleisten (vgl. Bild 25). Aus Gründen der Fixierung wird auch die Unterkonstruktion im unteren Bereich länger gelassen.

2.1.2.4 Versuchsmatrix

Nachfolgend sind die durchgeführten Probereihen, durch deren Auswertung Erkenntnisse zur gestellten Forschungsfrage erwartet werden aufgelistet. Es wurden nur getesteten Proben dokumentiert, durch die sich nach den Vorversuchen für die Ergebnisfindung relevante Aussagen ableiten lassen.

Um eine statistische Auswertung zu ermöglichen, wurde die Probenanzahl auf mindestens 5 Stück je Probekörpervariante festgelegt. Dies begründet sich durch die Ermittlung der Quantile bei Normalverteilungen und unbekannter Standardabweichung [3].

In Tabelle 9 bis Tabelle 12 sind folgend die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale der Probekörper für die jeweilige Versuchsreihe aufgeführt.

Vorversuche

Tabelle 9:
Versuchsmatrix Vorversuche.

Versuchsmatrix Vorversuche						
	Befestigungsbild	Anzahl Befestiger		Befestigungsmittel	Rillennagel 2,5 x 25 mm	Edelstahlschraube 4,0 x 25 mm
Haft-Typ 1 Festhafte	einreihig	2		-	5	5
Haft-Typ 4 Festhafte	zweireihig diagonal	3		-	5	5
Probekörpersumme					10	10
Gesamtsumme					20	

Haftenauszug

Tabelle 10:
Versuchsmatrix Haftenauszug.

Versuchsmatrix Haftenauszug			
	Haft-Typ 1	Haft-Typ 2	Haft-Typ 3
Festhafte	5	5	5
Loshafte	5	5	5
Probekörpersumme	10	10	10
Gesamtsumme	30		

Haftenauszug mit Deckungsmaterial

Tabelle 11:
Versuchsmatrix Haftenauszug mit Deckungsmaterial.

Versuchsmatrix Haftenauszug mit Deckungsmaterial						
	Festhafte			Loshafte		
	Haft-Typ 1	Haft-Typ 2	Haft-Typ 3	Haft-Typ 1	Haft-Typ 2	Haft-Typ 3
Aluminium	5	5	5	5	5	5
nichtrostender Stahl	5	5	5	5	5	5
Probekörpersumme	10	10	10	10	10	10
Gesamtsumme	60					

Schubversuch mit Deckungsmaterial

Tabelle 12:
Versuchsmatrix Schubversuch mit Deckungsmaterial.

Versuchsmatrix Schubversuch mit Deckungsmaterial		
	Haft-Typ 1 Festhafte	
	Doppelstehfalz	Winkelstehfalz
Aluminium	5	5
Kupfer	5	5
nichtrostender Stahl	5	5
nichtrostender Stahl mit Kerbe	5	5
nichtrostender Stahl mit Lasche	5	5
Titanzink	5	5
Probekörpersumme	30	30
Gesamtsumme	60	

2.2 Zug- und Schubversuche

Nachfolgend wird auf die durchgeführten Versuche näher eingegangen und diese im Detail erläutert. Neben den Zielen der Versuche werden außerdem die Probleme aufgezeigt, die bei der Durchführung aufgetreten sind und gelöst werden mussten. Neben den ermittelten Kräften werden auch die Verformungen und die Versagensbilder bei den Versuchen dokumentiert und bewertet.

2.2.1 Vorversuche

Die Durchführung der Vorversuche hatte mehrere Gründe. Um sich ein allgemeines Bild davon zu machen, wie sich die Hafte verhalten werden, ob die Versuchsgrafen einen auswertbaren homogenen Verlauf zeigen oder ob der gewählte Versuchsaufbau dahingehend etwaige Schwächen aufweist. Zum anderen sollte untersucht werden, inwiefern die unterschiedlichen Befestigungsbilder der einzelnen Haften-Typen und das gewählte Befestigungsmittel, auf die zu ermittelnden Kräfte Einfluss nehmen.

Dabei war bereits am ersten Prüfkörper ein Problem festzustellen. Die Hafte rutschte im Laufe des Versuchs aus der in Bild 24 beschriebenen Klammer (siehe Bild 34). Die Anpresskraft der Klammer war nicht ausreichend, um die Position an der Hafte zu halten. Durch das Rutschen der Hafte bildeten sich Peaks in den Versuchsgrafen, was zu verfälschten Ergebnissen führte.

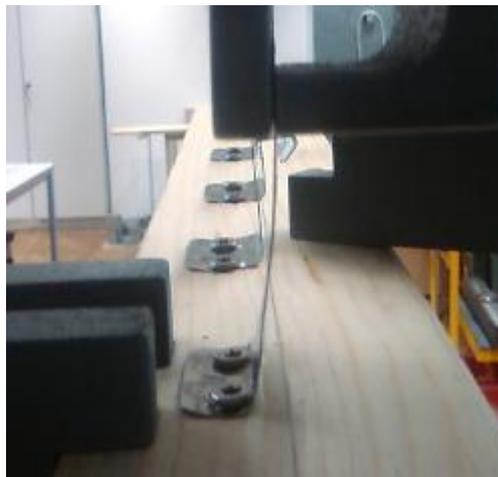


Bild 34:
Festhafte ohne Drahteinlage.



Bild 35:
Festhafte mit Drahteinlage.

Zur Behebung dieses Problems wurden in den oberen Teil der Hafte, der normal auf dem unterdeckenden Falz liegt, ein 3 mm starker Draht eingefalzt (siehe Bild 35). Hierfür wurde sich an der Befestigung von Schneefanglaschen orientiert. Diese sind oft mit einer Klemmung unterhalb des geschlossenen DSF fixiert. Dieses Prinzip wurde hier auch umgesetzt, nur dass die Klammer unter dem eingefalzten Draht form- und kraftschlüssig fixiert wurde.

2.2.1.1 Vergleich Nagel- und Schraubenbefestigung

Für den Vergleich zwischen den Befestigungsmitteln wurden Haften des gleichen Typs zum einen mit Senkkopfschrauben aus nicht rostendem Stahl 4,0 x 25 mm (Bild 37), zum anderen mit gerillten Nägeln aus feuerverzinktem Stahl nach DIN 1052 gemäß Tragfähigkeitsklasse 3/C 2 2,5 x 25 mm (Bild 36) befestigt.

Dabei geht es allerdings nicht darum die Auszugswerte der beiden Befestigungsmittel zu vergleichen. Dass die Auszugswerte einer Schraube, gegenüber einem Nagel in Holz signifikant höher sind, ist bekannt. Es geht darum, die Verformung der Hafte zu beobachten und zu entscheiden, ob die für das System relevanten Verformungs-/Kraftbereiche von beiden Kombinationen gleichermaßen erfüllt werden.

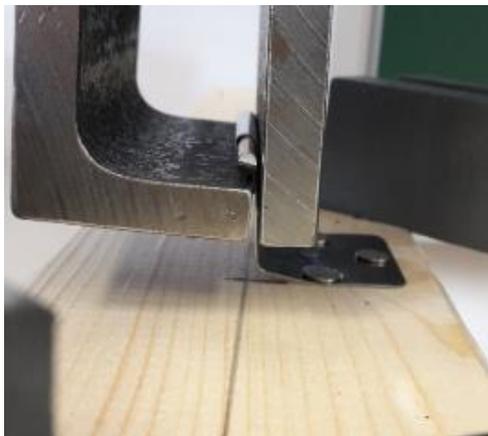


Bild 36:
Nagelbefestigung.



Bild 37:
Schraubenbefestigung.

Anhand der Versuchsgrafiken muss beurteilt werden, ob beide Systeme die gleichen Kräfte für eine bestimmte Dehnung aufnehmen können.

2.2.1.2 Vergleich von Befestigungsbildern

Je nach Produkthersteller besitzen die Haften unterschiedliche Befestigungsbilder. Dabei sind einreihig und zweireihig diagonal versetzt angeordnete Befestigungspunkte die wohl am häufigsten auftauchenden Varianten (Bild 38 und Bild 39).

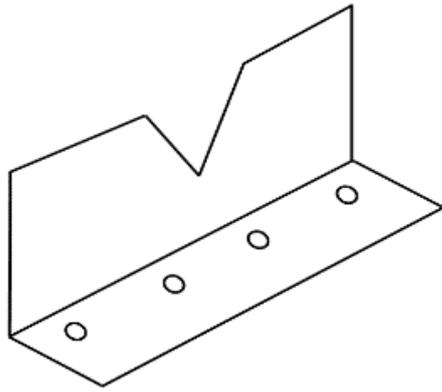


Bild 38:
Befestigung einreihig.

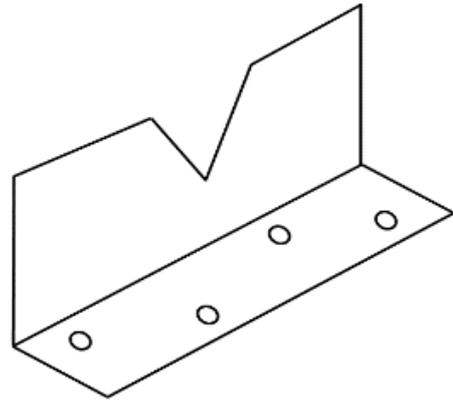


Bild 39:
Befestigung zweireihig versetzt.

Dies wirft die Frage auf, ob die Position der Befestigungsmittel auf das Verhalten der Hafte Einfluss nimmt. Dafür wurden zwei Hafte-Typen mit fast identische Ausbildung aber unterschiedlichem Befestigungsbild miteinander verglichen. Schraub- und Nagelbefestigung wurden dabei wieder gegenübergestellt.



Bild 40:
Hafte mit einreihiger Befestigung.



Bild 41:
Hafte mit zweireihiger Befestigung.

Die Festhafte des Haft-Typs 1 und die Festhafte des Haft-Typs 4 sind von der Bauart fast identisch, den einzigen markanten Unterschied bildet das zusätzliche Befestigungsmittel in der zweiten Reihe der Hafte des Haft-Typs 4 (Bild 40 und Bild 41).

2.2.2 Auszugsverhalten von Haften

Das Ziel dieser Versuchsreihe war es, das reine Auszugsverhalten der Haften zu beobachten. Dabei sollten die Versuche reproduzierbare Ergebnisse liefern, die es erlauben die verschiedenen Hersteller und Haften-Typen untereinander zu vergleichen.

Nach den Erkenntnissen der Vorversuche, wurde bei dieser Versuchsreihe ebenfalls wieder mit einem eingefalzten Draht zur Fixierung der krafteinleitenden Klammer gearbeitet. Bis auf ein paar Risse in der Unterkonstruktion (Schalungsbretter) waren keine weiteren Probleme bei der Versuchsdurchführung feststellbar. Die Versuche lieferten von allen Haften-Varianten gut auszuwertende homogene Messkurven.

2.2.3 Auszugsverhalten von Haften mit Deckungsmaterial

Das Auszugsverhalten von Haften mit Deckungsmaterial spiegelt die reelle Belastungssituation des Bauteils wieder. Da die verwendeten Deckungsmaterialien und ihre Eigenschaften stark variieren, muss untersucht werden, inwiefern die Art des Deckungsmaterials das Auszugsverhalten beeinflusst bzw. ob es das Auszugsverhalten überhaupt beeinflusst.

Untersuchung der ungünstigsten Lastsituation bei maximalem Haftabstand (500mm)

Für die Lasteinleitung wurde die Klammer wie in Bild 32 gezeigt, mittig am Probekörper positioniert. Dabei wurde die Klammer direkt unter dem geschlossenen DSF fixiert, um ein Herausrutschen des Probekörpers zu verhindern. Dabei kam es zu keiner Deformation oder Aufbiegung des DSF durch die Krafteinleitung (siehe Bild 42). Erst bei größeren Verformungen kam es zu Knicken in der Probekörpermitte (Bild 43). Dieses Versagen liegt weit über der im GZG tolerierten Verformung.

Bei der Auswertung der Versuchsreihen wurde nun untersucht, ob bei dieser Konstellation (größter zulässiger Haften Abstand) die Haften oder das Deckungsmaterial den Schwachpunkt darstellen.

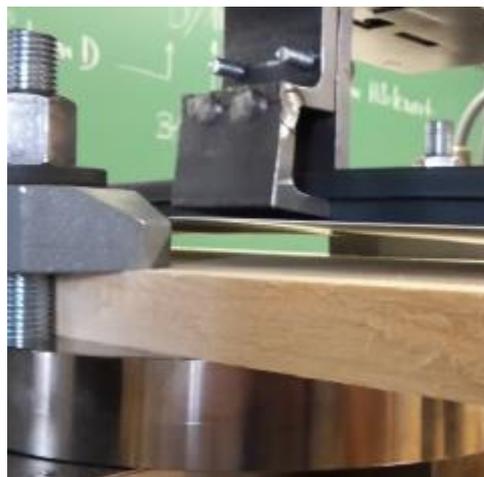


Bild 42:
Position der Klammer.



Bild 43:
Verformung der Probekörper.

Untersuchung des Haftenauszugs aus dem Doppelstehfalz

Bei den getesteten Probevariationen und dem mittigen Lastangriff, konnte bei keinem Probekörper ein Auszug der Hafte aus dem DSF festgestellt werden. Allerdings konnte das Versagen der Hafte bei einer Probekörpervariante beobachtet werden.

Bei der Kombination von nichtrostendem Stahl als Deckungsmaterial und der Loshafte des Haft-Typs 1 als Fixierung an der Unterkonstruktion, kam es zum Versagen der Hafte. Dabei bog sich der Schlitten so weit auf, dass er aus der Schlitzung der Hafte rutschte und die Bauteile somit nicht mehr verbunden waren. Der Schlitten löste sich von der Befestigungsplatte ab und blieb im DSF hängen (Bild 44).

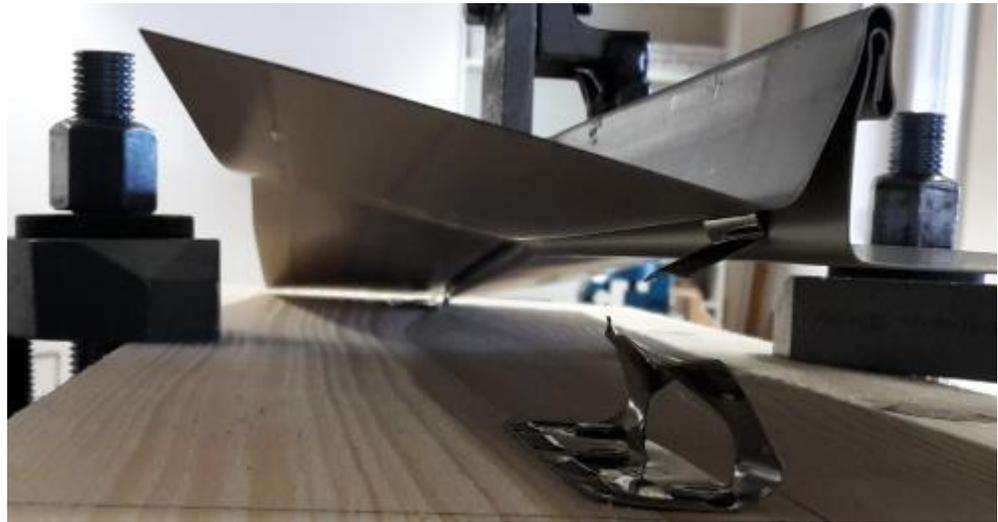


Bild 44:
Versagen einer Loshafte des Haft-Typs 1 mit Deckungsmaterial.

2.2.4 Schubversuche

Bei den Schubversuchen ging es in erster Linie darum festzustellen, welche Schubkräfte eine Festhafte aufnehmen kann und wie diese Schubkräfte von den unterschiedlichen Deckungsmaterialien übertragen werden. In den bisherigen Fachregeln ist diese Thematik völlig ausgeblendet und findet keinerlei Erwähnung. Außerdem wird der Unterschied zwischen DSF (Doppelstehfalz) und WSF (Winkelstehfalz) untersucht, da vermutet wird, dass der DSF deutlich höhere Schubkräfte übertragen kann.

Doppelstehfalz

Die Probekörper aller Deckungsmaterialien zeigten bei der Versuchsdurchführung in der Regel ein sehr ähnliches Verhalten. Das Deckungsmaterial bewegte sich in Richtung der Krafrichtung. Nach einer gewissen Zeit drückte sich der

DSF auf, da sich die Hafte im Inneren begann quer zu stellen. Dabei konnte beobachtet werden, dass sich bei den Probekörpern aus Aluminium und Zink, die Haften durch das Deckungsmaterial drückten (siehe Bild 45 und Bild 46). Dieses Verhalten zeigte sich bei Kupfer und nichtrostendem Stahl nicht.



Bild 45:
Aluminium von Haft durchgedrückt.

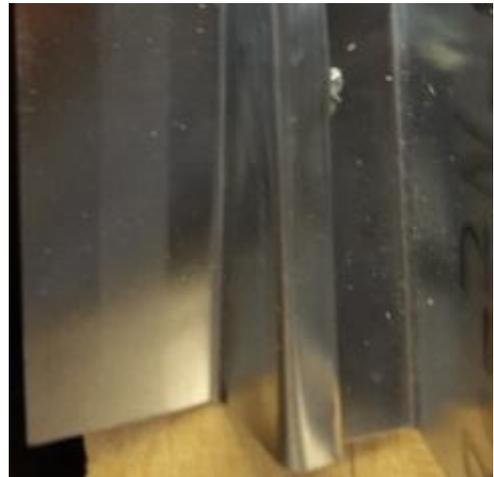


Bild 46:
Zink von Haft durchgedrückt.

Bis auf die Probekörper mit nichtrostendem Stahl als Deckungsmaterial lieferten die Versuchsreihen gut auswertbare Grafen. Der Graf der Versuchsreihe mit nichtrostendem Stahl wies leider nicht die nötige Homogenität für einen Vergleich mit den restlichen Materialien auf. Dies ist vermutlich auf die niedrigen Reibungskoeffizienten bei der Kombination von Stahl auf Stahl zurückzuführen. Erschwerend kommt hinzu, dass die verwendeten Feibleche in dieser Branche bei der Lieferung an die ausführenden Unternehmen oft Schmiermittelrückstände aufweisen. Diese Rückstände aus der Feiblechproduktion werden in der Regel vor der Endmontage des fertigen Produkts nicht beseitigt.

Um für diese Versuchsreihe doch noch ein brauchbares Ergebnis zu erzielen, wurde versucht auf eine alte Methode der Klempnertechnik zurückzugreifen. Bei der Montage von Dachbahnen wird oft eine Technik verwendet, die das Abrutschen der Dachbahn verhindert, bis diese mit der vorhergehenden Bahn verfalzt ist oder alle Haften montiert sind. Das bedeutet, dass diese Technik Schubkräfte aufnimmt, die durch das Eigengewicht der Eindeckung entstehen. Dabei wird an der ersten montierten Festhafte an der Dachbahn eine „Lasche“ (siehe Bild 47) oder „Kerbe“ (siehe Bild 48) ausgebildet, welche sie fixiert.

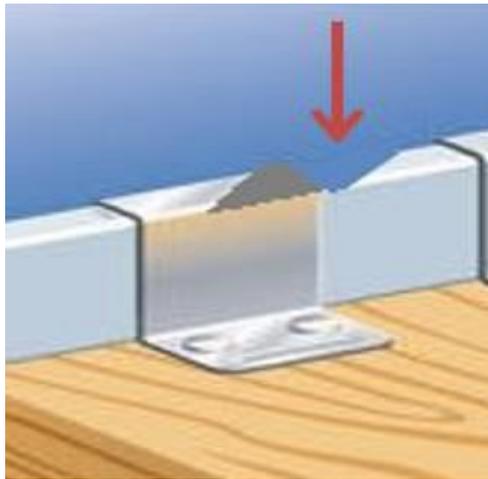


Bild 47:
Ausbildung einer Lasche.

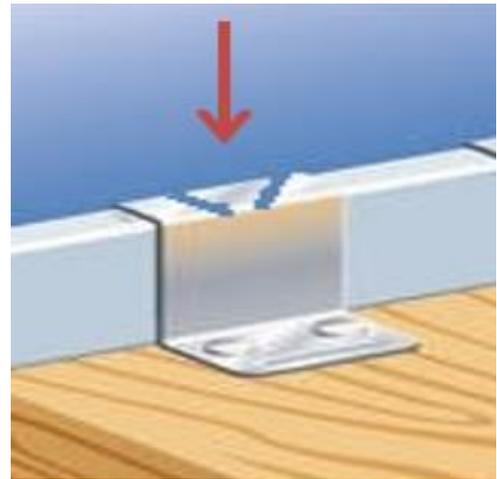


Bild 48:
Ausbildung einer Kerbe.

Bei der Ausbildung einer Lasche, wird der unterdeckende Falz nach der Hafte keilförmig eingeschnitten und nach unten zurück über die Hafte gebogen. Bei der Ausbildung einer Kerbe wird die montierte Hafte und der unterdeckende Falz eingeschnitten. Dadurch entsteht ein Versatz zwischen Haft und Schar, die dazu führt, dass Dachbahn und Hafte sich ineinander verhaken.

Durch die Ausführung zweier weiterer Versuchsreihen mit nichtrostendem Stahl und den zuvor genannten Modifikationen (einmal mit Laschen und einmal mit Kerbe), konnten auch für dieses Deckungsmaterial verwertbare Ergebnisse erzielt werden.

Winkelstehfalz

Die Probekörper aus Aluminium, Kupfer und Zink zeigten bei der Versuchsdurchführung wie beim DSF in der Regel ein sehr ähnliches Verhalten. Das Deckungsmaterial bewegte sich in Richtung der Krafrichtung. Nach einer gewissen Zeit begann der WSF sich aufzudrücken, da sich die Hafte im Inneren querstellt. Zu einem Durchdrücken der Hafte durch das Deckungsmaterial kam es hierbei jedoch nicht. Bei dieser Variante wurde der Falz soweit aufgebogen, dass die Hafte sich zwischen dem ober- und unterdeckenden Falz durchdrückte. Dies hatte zur Folge, dass in der Regel jeder Probekörper nach dem Lösen aus der Prüfmaschine in zwei Teile zerfiel (siehe Bild 49).



Bild 49:
Zerörter Aluminium WSF Probekörper nach dem Schubversuch.

Trotz dieses Verhaltens, ergaben die Versuche dieser drei Deckungsmaterialien sehr gute Ergebnisgrafiken für die Auswertung im Vergleich zur Probereihe mit nichtrostendem Stahl. Ein Testen des geplanten Probekörpers war hier nicht möglich. Das System erwies sich als so instabil, dass es nicht in der Lage war Schubkräfte aufzunehmen.

Wie schon bei den DSF Probekörpern wurde auch hier versucht, das System durch Zusatzmaßnahmen zu verbessern. Es wurden zwei weitere Probereihen getestet, jeweils wieder mit den Modifikationen nach Bild 47 und Bild 48. Dabei war wieder ein ähnliches Verhalten festzustellen wie bei den vorherigen Probereihen beschrieben, allerdings zeigten die Grafiken eine sehr starke Streuung.

2.3 Windsog- und Druckversuche

2.3.1 Vorversuche

In den Vorversuchen wurden verschiedene Ausführungen der Lasteinleitungsunterlagen getestet, um eine möglichst gute Anpassung an die flexiblen Blechscharen während der Versuchsdurchführung sicherzustellen.

Bei der Lasteinleitung über aufgelegte Spanplatten wurde eine direkte Lasteinleitung in die Falze beobachtet. Das dazwischenliegende Blech hatte aufgrund seiner Flexibilität keinen Kontakt mehr zu den Spanplatten (vgl. [21] S. 22).

Versuche mit unter einer MDF-Unterlage unterschiedlicher Abmessung angebrachten EPS-Dämmungsquadern verschiedener Abmessungen und Dicken führte zu dem in Kapitel 2.1.1.3 beschriebenen endgültigen Aufbau der

Lasteinleitungsunterlagen. Dieser stellte sicher, dass die Falze während des Versuchs an keiner Stelle direkt belastet wurden und ein Aufspreizen des Falzfußes unter Belastung im Bereich der Lasteinleitungspunkte gewährleistet war. (vgl. [21], S. 23)

2.3.2 Vorlast

Durch den in 2.1.1.3 dargestellten Probekörperaufbau mit drei verfalzten Blechscharen ergibt sich für die jeweils äußere Schare eine einseitige Instabilität. Um beide Falze von Beginn der Messwertaufzeichnung an gleichmäßig zu belasten, wurde eine Vorlast von 0,04 kN notwendig. (vgl. [21] S. 24)

Die HEA Stahltraversen mit einer Gesamtlänge von 2,8 m erzeugten einen systematischen Fehler von 0,5 kN der als negative Last angezeigt wurde und kompensiert werden musste.

2.3.3 Winddruckversuche

Für die Winddruckversuche wurden die Probekörper mit den Falzen nach oben in den Versuchsaufbau eingelegt und von oben belastet.

Mit zunehmender Last und Verformung war das Verlassen des elastischen Bereichs durch leichte Verformungen der im Druckspannungsbereich liegenden Falze erkennbar (siehe Bild 50). Im Bereich der Auflager war ein Aufspreizen des Falzfußes und eine deutliche Wölbung der Scharen sichtbar (siehe Bild 51). Das Versagen der Probekörper und das damit verbundene Erreichen des Lastmaximums trat durch lokales seitliches Ausknicken einer der beiden Falze auf (siehe Bild 52). Mit daraufhin abnehmender aufzuwendender Last folgte das Ausknicken des zweiten Falzes wenig später. Die Durchbiegung bei Erreichen der Maximalkraft ist in Bild 53 am Beispiel eines Probekörpers aus Titanzink mit 25 mm Doppelstehfalz dargestellt.



Bild 50:
Verformungen des Falzes.



Bild 51:
Aufspreizen des Falzfußes.



Bild 52:
Seitliches Ausknicken eines Falzes.



Bild 53:
Durchbiegung im Lastmaximum.

2.3.4 Windsogversuche

Für die Windsogversuche wurden die Probekörper mit den Falzen nach unten in den Versuchsaufbau eingelegt und von oben belastet.

Mit zunehmender Last und Verformung bildeten sich auf den Scharen zwischen den Falzen Beulen und Verwerfungen, die mit steigender Last zu Verformungen im Bereich des Falzfußes führten (siehe Bild 54). Dies war begleitet von Knackgeräuschen, die sich auch teilweise in den Messdaten durch kleine Sprünge in den Last- und Verformungskurven zeigten. Das Verlassen des elastischen Bereichs und das Erreichen der Maximalkraft war nur anhand der Messkurven erkennbar. Das Versagen der Probekörper trat durch Verformungen der Falzfüße beider Falze verteilt über den Bereich zwischen den Lastangriffspunkten auf. Ein Versagen des Falzkopfes in der Zugspannungszone war augenscheinlich nicht erkennbar. Bild 55 zeigt die Durchbiegung im Lastmaximum.

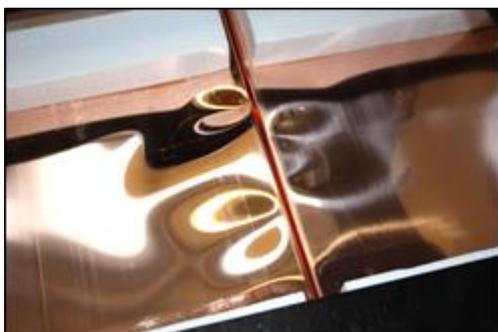


Bild 54:
Verwerfungen und Beulen am Falzfuß.



Bild 55:
Durchbiegung im Lastmaximum.

2.4 Dynamischen Zugversuche

2.4.1 Vorversuch im Resonanzpulsator

In einem ersten Vorversuch wurde eruiert, mit welcher Prüfmaschine die gewünschte Prüfung durchgeführt werden kann. Aufgrund der Vielzahl der Prüflinge wurde in einem ersten Schritt versucht, die Prüfung möglichst mit einem Resonanzpulsator durchzuführen.

Prüfaufbau

Montage des Holzbretts auf dem Schwingungserreger mittels 4 Schlossschrauben. Lastabstützung nach oben mittels der kleinen Klammer auf Klemmung und über eine Schraube in ein Bohrspannfutter. Die Schlossschrauben halten nur das Holzbrett. Das Blech ist entsprechend ausgeschnitten (Bild 56).



Bild 56:
Prüfaufbau auf Resonanzprüfmaschine: Erreger unten, Lastabstützung über Klammer oben.

2.4.2 Testablauf

Das Starten und Hochfahren des Schwingversuchs erfolgte mit einer Kraftamplitude von 600 N bei einem Lastverhältnis R (= Unterlast/Oberlast) von 0,1. Damit ergäbe sich theoretisch eine Oberlast von 1333 N und eine Unterlast von 133 N.

Die Maschine erhöht nach dem Starten die Kraftamplitude, bis die Zielwerte (oben) erreicht werden. Dies wurde bei den durchgeführten Versuchen nicht sicher erreicht. Aufgrund des nachgiebigen Aufbaus sind relativ große Wege

nötig und die Regelung der Maschine findet keinen stabilen Zustand. Es gab immer wieder Abbrüche (schon während des Hochlaufens), da Weg- oder Kraftgrenzwerte nicht eingehalten wurden. Die sich kurzzeitig ergebende Prüffrequenz lag bei ca. 12 Hz.

Die Schwankungen der Ober- und Unterlasten beim letzten Versuch sind in Bild 57 dargestellt. Man sieht deutlich, dass die Regelung nicht stabil arbeitet, da die jeweiligen Maximalwerte etwa konstant sein sollten.

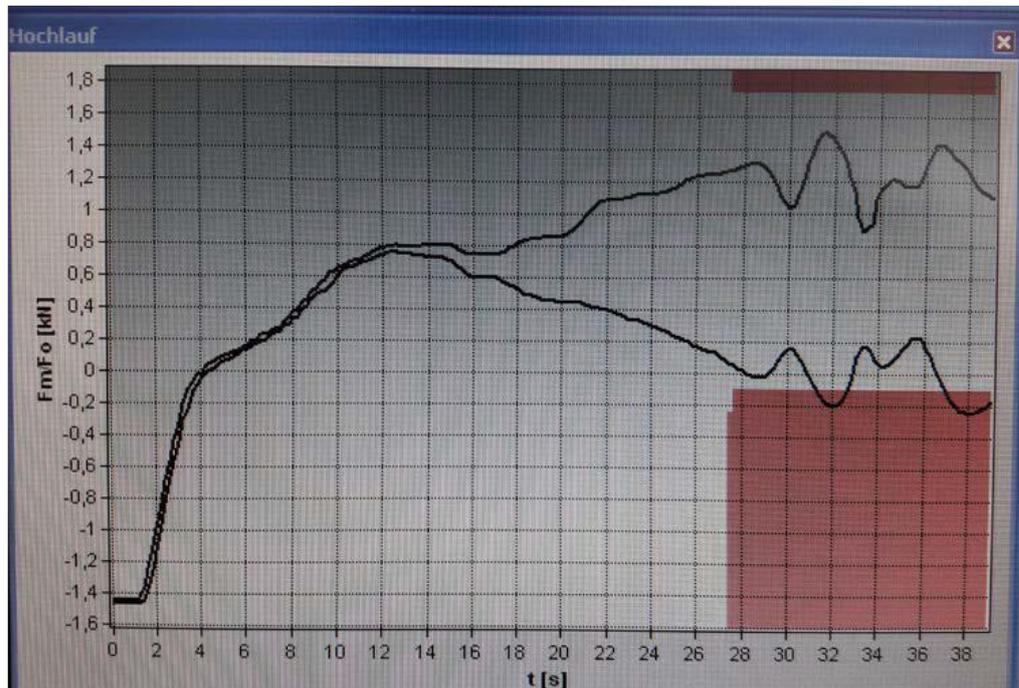


Bild 57:
Screenshot des Verlaufs von maximaler Ober- und Unterlast beim letzten Versuch.

Am Ende des Versuchs, nach ca. 200 Lastspielen, löste sich eine Hafte zum Teil vom Holzbrett (Bild 58 und Bild 59). Damit wurde der Versuch abgebrochen.

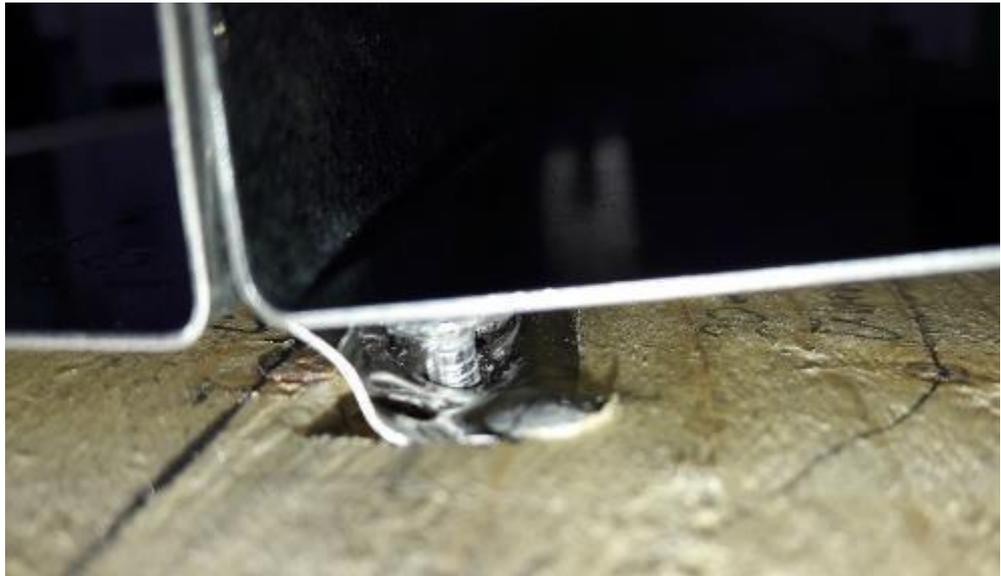


Bild 58:
Verformte Hafte sowie gelockerter Nagel auf der rechten Seite.



Bild 59:
Verformte Hafte sowie gelockerter Nagel auf der rechten Seite.

Die Hafte auf der linken Seite zeigt keine oder nur geringe Verformungen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei einer schwingenden Beanspruchung mit einer Kraftamplitude von 600 N und einer Oberlast von ca. 1350 N sich die erste Hafte nach ca. 200 Lastspielen löst.

Des Weiteren ist ein stabiler und reproduzierbarer Versuch mit diesem Aufbau und dieser Art Prüfmaschine kaum möglich. Grund sind unter anderem die relativ hohen Verformungen der Kombination aus Haftungen und Blech.

Aus den Vorversuch wurde die Erkenntnis abgeleitet, dass ein Test auf einer servo-hydraulischen Prüfmaschine zielführender ist, da hier größere Wege gefahren werden können.

2.5 Dauerschwingversuche

Auf dem Holzbrett wird unten mittels vier Holzschrauben mittig ein Halter montiert (in Bild 60 nicht sichtbar), der vom unteren Spannhalter der Prüfmaschine aufgenommen wird. Die Lastabstützung nach oben erfolgt mittels der kleinen Klammer auf Klemmung und über eine Schraube in ein zweites hydraulisches Spannhalter (siehe Bild 60). Das Blech muss hierzu – im Gegensatz zum ersten Prüfaufbau – nicht ausgeschnitten werden. Die Haftungen sind links und rechts jeweils am Ende des Blechs angebracht. Das bedeutet, dass das Holzbrett und das Blech stark auf Biegung beansprucht werden. Die daraus resultierende Biegeverformung des Blechs führt zu relativ großen Wegen beim Test. Diese großen Wege sind jedoch für die servo-hydraulische Prüfmaschine kein Problem. Sie kann auch deutlich größere Wege ausführen.

Für den geplanten Test standen zwei Prüflinge zur Verfügung. Der erste Prüfling wurde leider beim Einrichten des Versuchs beschädigt. Durch eine auftretende Überlast wurde der Prüfling soweit gezogen (ca. 10 bis 15 cm), dass das Blech ausknickte. Die Haftungen hielten der Belastung stand. Versuchsergebnisse gibt es hierzu nicht, da im Einrichtbetrieb keine Daten gespeichert werden.

Nach Prüfung und Instandsetzen der Maschine wurde der Test mit dem zweiten Prüfling gefahren. Der nachfolgende Absatz bezieht sich ausschließlich auf diesen zweiten Prüfling.

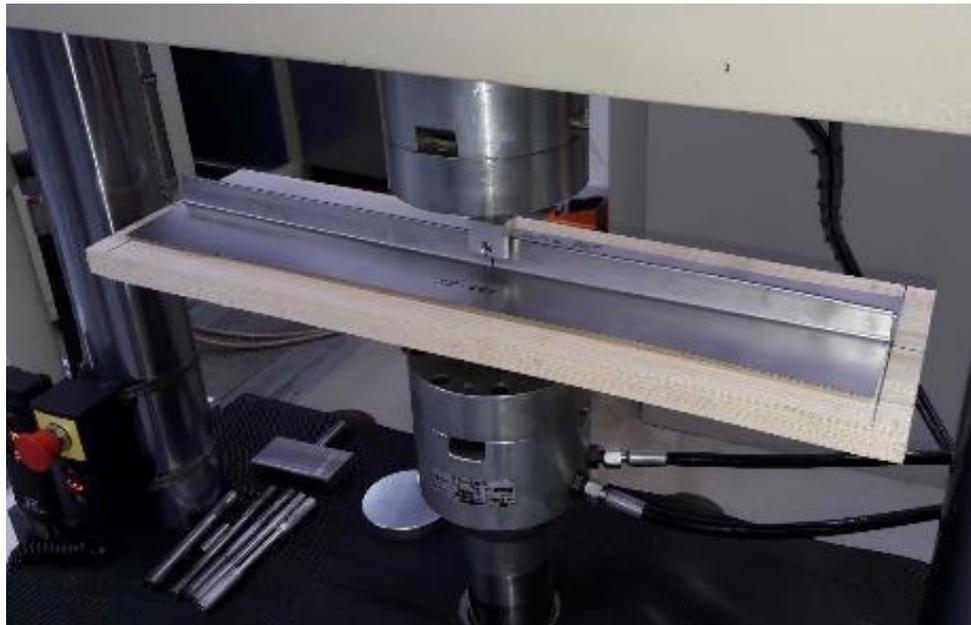


Bild 60:
Prüfaufbau auf servo-hydraulischer Prüfmaschine: Lastzylinder unten, Lastabstützung über Klammer oben.

2.5.1 Testablauf

Der Schwingversuch erfolgt mit einer Kraftamplitude von 360 N bei einem Lastverhältnis R (= Unterlast/Oberlast) von 0,05. Damit ergibt sich eine Oberlast von 800 N, eine Unterlast von 40 N sowie eine Mittellast von 440 N. Die Testfrequenz wird mit 1 Hz vorgegeben. Höhere Frequenzen führen dazu, dass die Schwingbelastung nicht voll von den Haften aufgenommen werden muss, da die Massenkräfte von Blech und Holzbrett diese überlagern. Für eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche empfiehlt sich daher dringend, die Belastungsfrequenz in der hier gewählten Größenordnung zu belassen.

Die servo-hydraulische Ansteuerung erlaubt der Maschine die Lastspiele zuverlässig und reproduzierbar aufzubringen. Einzig die Auslastung der Maschine ist recht gering (sie kann Maximalkräfte bis 100 kN aufbringen). Damit ist man am unteren Ende des Messbereichs, mit einer gerade noch akzeptablen Auflösung.

Insgesamt wurden mit den genannten Belastungsparametern 181.609 Lastspiele bis zum Abbruch des Tests aufgebracht. Als Abbruchkriterium wurde eine statische Wegzunahme von 6 mm angesetzt. Dieses Abbruchkriterium erwies sich als sinnvoll, da der Test bis zum Abbruch stabil lief, obwohl sich ein Riss im rechten Haften bildete. Dieser Riss wurde erstmals bei ca. 71.000 Zyklen festgestellt. Zu diesem Zeitpunkt hatte er eine Länge von ca. 11 bis 12 mm. Der Riss wuchs immer weiter und hatte bei etwa 98.000 Zyklen schließlich eine Länge von ca. 18 mm (siehe Bild 61)

Das Risswachstum setzte sich bis zum Versuchsabbruch fort. Ein kompletter Durchriss durch die rechte Hafte erfolgte nicht. Die linke Hafte sowie die

Schraubverbindungen beider Haften schienen auch bei Versuchsende unverändert.

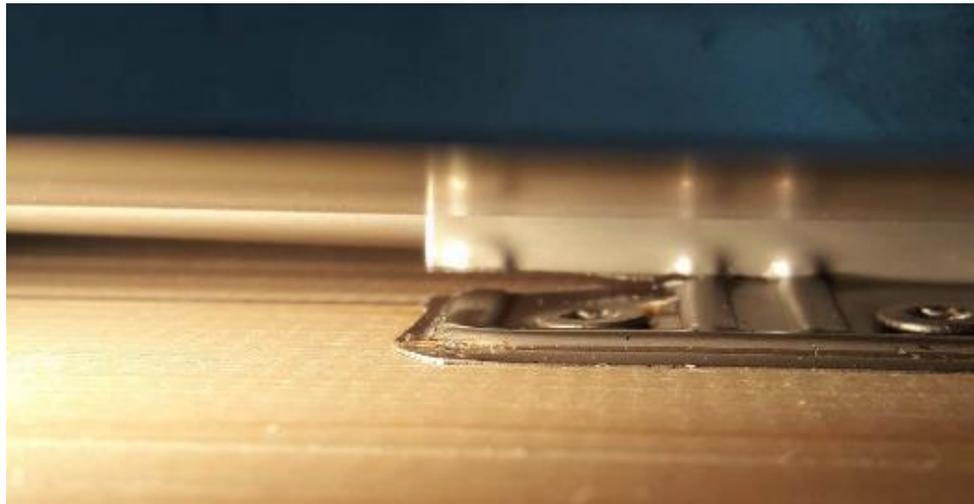


Bild 61:
Riss im rechten Haften bei ca. 98.000 Lastspielen.

Bild 62 zeigt, dass sich am Ende des Versuches (181.609 Lastspiele) sich der Riss durch die rechte Hafte fast komplett durchgearbeitet hatte.

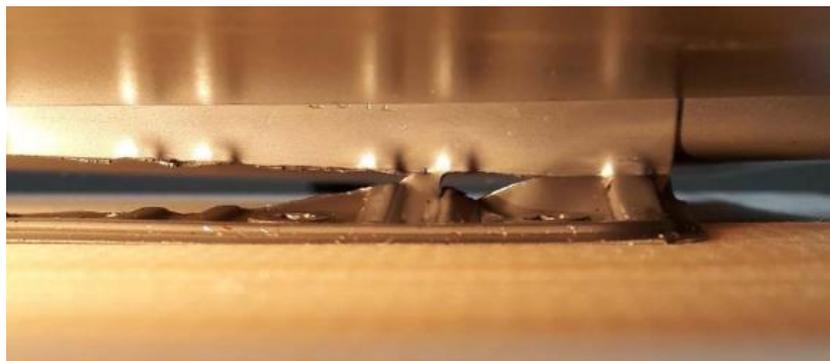


Bild 62:
Riss im rechten Haften bei Testende.

Die Hafte auf der linken Seite zeigte keine oder nur geringe Verformungen. Beide Prüflinge wurden für weiteren visuellen Untersuchungen im Labor unterzogen. Bild 63 zeigt die gesamte Prüfmaschine.

Als Fazit des Vorversuchs ist festzustellen, dass der Schwingversuch der bereitgestellten Prüflinge auf dieser Maschine mit einer Prüffrequenz von 1 Hz reproduzierbar durchführbar ist. Höhere Prüffrequenzen erscheinen aufgrund der sich dann überlagernden Massenkräfte nicht zielführend.

Bei einer schwingenden Beanspruchung mit einer Kraftamplitude von 360 N und einer Oberlast von 800 N ($R=0,1$) konnten bis Abbruch 181.609 Zyklen gefahren werden. Im Verlauf hat sich in einer Hafte ein Riss gebildet. Der weitere Verlauf des Versuchs war vom Risswachstum dieser beschädigten Hafte geprägt. Die andere Hafte sowie die Verschraubungen schienen (ohne nähere Prüfung) unverändert.

Aufgrund der geringen Prüffrequenz von 1 Hz dauerte die reine Prüfung über 50 Stunden. Bei einer Zyklenzahl von 1 Mio. ergäbe sich eine Prüfdauer von etwa 11,5 Tagen (ohne Rüsten, Spannen etc.).

Das gewählte Kollektiv führte zu einer völlig anderen Versagensform als aus der Praxis erwartet wird. Daher wurde für die Prüfung ein neues Kollektiv verwendet, welches sich aus einer ähnlichen Prüfvorschrift ableitet (ETAG 006).



Bild 63:
Servo-hydraulische Prüfmaschine.

Die Einspannung und die Prüfmaschine der nachfolgenden Versuche (Hauptteil der Dauerschwingversuche) gleicht dem in Bild 60 beschriebenen Aufbau. Verändert wurde nur das Kollektiv, mit dem Ziel, hier möglichst realitätsnahe Lasten und Schadensbilder zu erreichen.

Das Kollektiv nach ETAG 006 [19] ist ein an- und abschwelliges Kollektiv, welches eine Verteilung von Windlasten simuliert. Einen qualitativen Überblick gibt das folgende Bild 64. Die jeweiligen Maximallasten (100 %) wurden von Durchlauf zu Durchlauf gesteigert. Die Steigerung ist Bild 65 zu entnehmen.

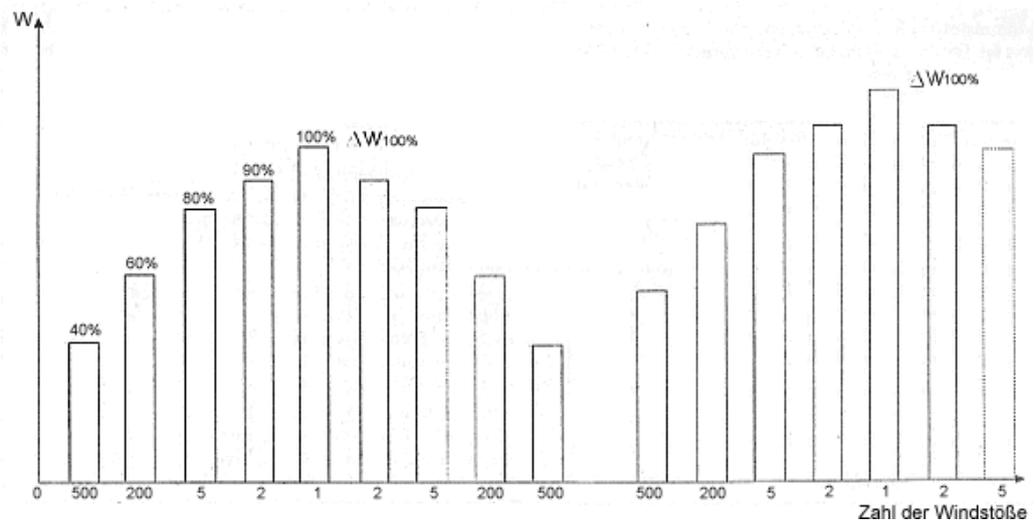


Bild 64:
Qualitative Darstellung des Kollektivs nach ETAG 006.

Dieses Kollektiv wird für die Verwendung im vorliegenden Fall übernommen.

Number of cycles	Load per fastener in N ($\Delta W_{100\%}$)
1	300
1	300
1	300
1	300
1	400
1	500
1	600
1	700
.	.
.	.
1	2000
1	2100

Bild 65:
Steigerung der Maximallast mit jedem Durchlauf nach ETAG 006.

Das hier verwendete Kollektiv ist nicht explizit für Versuche an Haften bestimmt, ist aber hinsichtlich der Abbildung der realen Belastungsverläufe besser geeignet als ein einstufiges Kollektiv. Die Verwendung des hier vorliegenden Kollektivs war auf Grundlage theoretischer Überlegungen und in Ermangelung besser geeigneter Verfahren naheliegend und konnte nach ersten Tests für die Versuchsdurchführung freigegeben werden.

Bei der Auswertung interessiert neben der Zyklenzahl vor allem die Maximallast, da diese durch das ansteigende Kollektiv eine indirekte Aussage zur Zyklenzahl zulässt. Die Maximallast ist bei den Schwingversuchen nicht wesentlich niedriger als die Maximallast im statischen Zugversuch.

Die größten aufgezeichneten Kräfte ergaben sich bei einem reduzierten Haften Abstand von 300 mm. Hier wurden Maximalkräfte bis 1,8 kN ermittelt bei einer Gesamtlastspielzahl von ca. 12.000. Diese liegen nicht weit von den Maximalkräften bei den statischen Versuchen entfernt.

Für einige Typen mit einem Haften Abstand von 500 mm ist nachfolgend der Vergleich aus statischem und dynamischem Versuch gegenübergestellt. Eine sehr gute Übersicht findet sich auch im Anhang.

stat. – dyn. Versuch, Haftenabst. 500 mm RE-F-NST-DSF 1,350 kN – 1,320 kN
RE-L-NST-DSF 1,050 kN – 1,280 kN
RE-F-ALU-DSF 1,030 kN – 0,860 kN
RE-L-ALU-DSF 0,779 kN – 0,840 kN

Große Bedeutung in der Prüfsteuerung hat das Abbruchkriterium. Nach einigen Versuchen wurde als bestes Abbruchkriterium eine Prüfwegzunahme von 12 mm definiert und damit kein Kraftabfall oder Ähnliches.

Beim Start des Versuchs wurde der maximale Weg der Prüfung festgehalten. Wenn dieser Prüfweg sich um 12 mm vergrößerte, wurde die Prüfung beendet. Meist lag in diesem Fall eine deutliche Verformung der Hafte vor, bzw. des Blechs oder ein Ausziehen der Hafte aus dem Holzbrett.

2.5.2 Zusammenfassung der Schwingungsversuche

In diesem Versuch wurde das Schwingfestigkeitsverhalten von Haften geprüft. Für das Schwingfestigkeitsverhalten lagen zu Beginn des Projekts keinerlei Erfahrungen vor. Diese mussten in ersten Vorversuchen an verschiedenen Prüfmaschinen mit unterschiedlichen Kollektiven gewonnen werden. Eine höherfrequente Prüfung war nicht praktikabel durchführbar, da es aufgrund der geringen Steifigkeit der Prüflinge und der nicht unerheblichen Masse zu einem unkontrollierten Schwingverhalten des Prüflings kam, welches in der Praxis so niemals auftritt. Bei einer langsameren Durchführung der Prüfung und höheren Lastzyklen ergab sich ein Schadensbild, das sich nicht mit dem Schadensbild aus Erfahrungen deckt. Daher musste neben einer Prüfung mit langsameren Schwingungen auch ein Last-Kollektiv gefunden werden, das einerseits eine

praktikable Prüfung, aber andererseits auch realistische Belastungen und Schadensbilder erzeugt. Nach theoretischen Überlegungen wurde ein Kollektiv in Anlehnung an die ETAG 006 – Mechanisch befestigte Dachabdichtungssysteme [19] getestet und für geeignet befunden. Mit diesem Kollektiv wurde die Hauptversuchsreihe mit insgesamt 64 Prüflingen mit einer Vielzahl von Variationen an Werkstoff, Haftensystem, Falzart, Haften Abstand etc. durchgeführt.

Die hierbei ermittelten Maximallasten (z. B. ca. 1,8 kN bei einem Haften Abstand von 300 mm) im Schwingversuch liegen grob im Bereich der maximalen statischen Lasten (siehe Bild 66 und Gesamtlastspielzahl Bild 67).

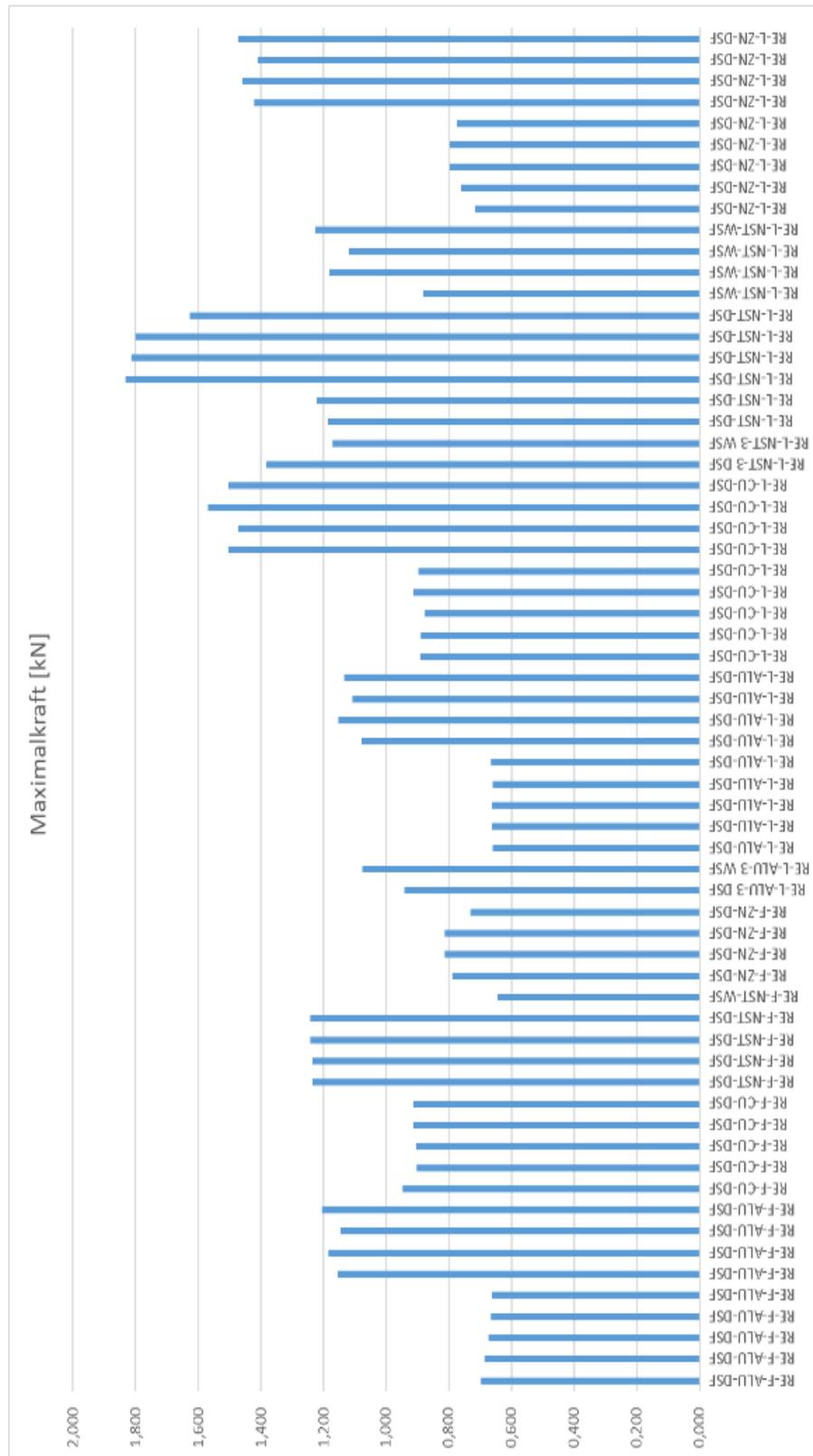


Bild 66:
Maximalkraft der Probekörper.

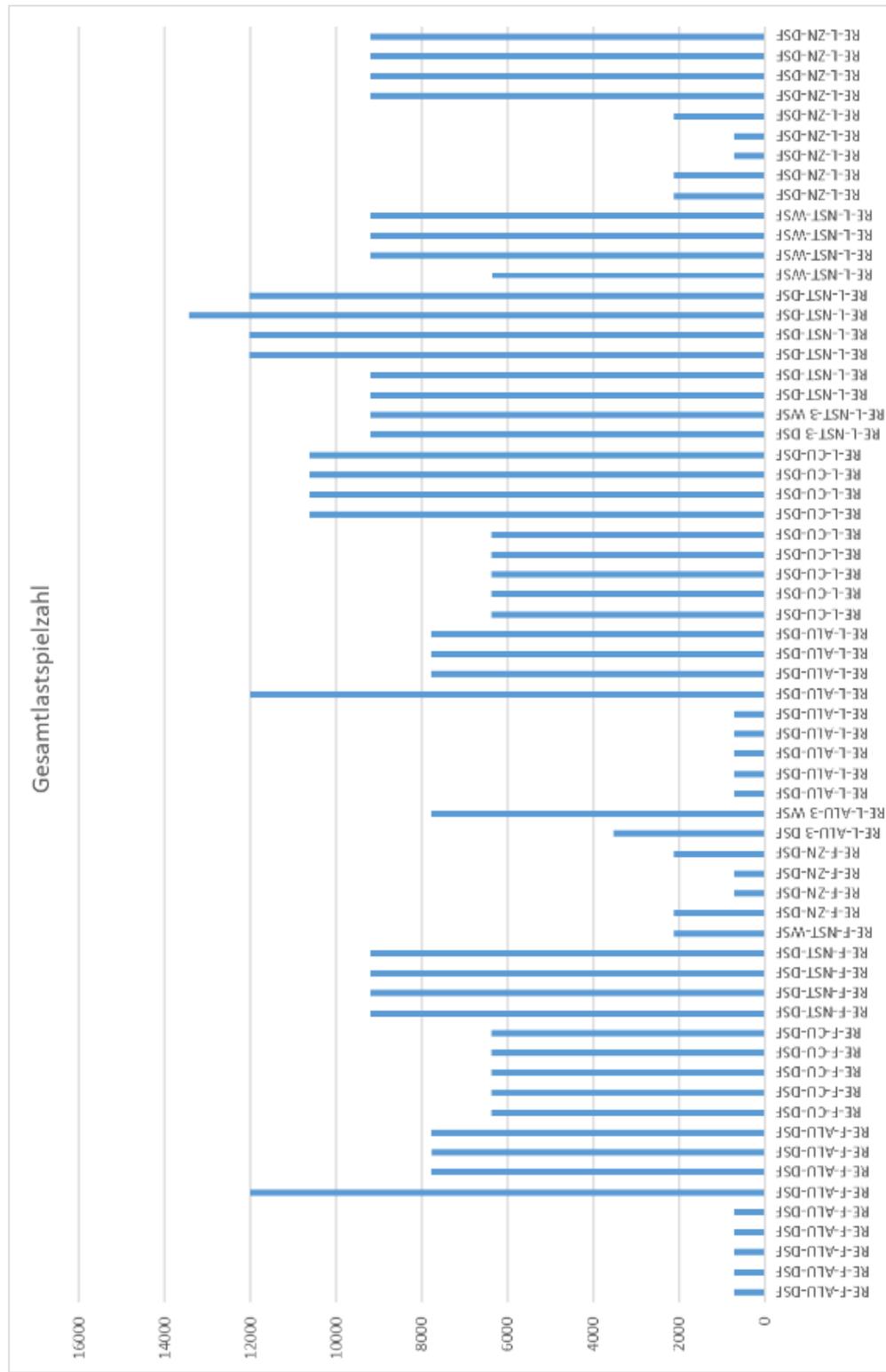


Bild 67:
Gesamtlastspielzahl der Probekörper.

3 Auswertung und Versuchsergebnisse

Wie einleitend erwähnt, handelt es sich hier um Bauteile, bei denen im Versagensfall Gefahr für Leib und Leben besteht. Außerdem wird durch die vermehrte Befestigung von Dachaufbauten die statische Relevanz des Bauteils verändert. Da es nicht mehr nur sich selbst tragen und den allgemeinen Einwirkungen widerstehen muss, wird die statische Tragfähigkeit noch relevanter.

Laut DIN EN 1990 - Grundlagen der Tragwerksplanung (Eurocode 0) gelten folgende Grundlegende Anforderungen [3].

„Ein Tragwerk ist so zu planen und auszuführen, dass es während der Errichtung und in der vorgesehenen Nutzungszeit mit angemessener Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit, den möglichen Einwirkungen und Einflüssen standhält und die geforderten Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks oder eines Bauteils erfüllt. Bei der Planung und der Berechnung des Tragwerks sind ausreichende *Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit* zu beachten“ ([3], Seite 22)

Dabei wird grundsätzlich zwischen den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit unterschieden.

„Dabei sind die Grenzzustände der Tragfähigkeit, diejenigen Grenzzustände, die **die Sicherheit von Personen** und/oder die **Sicherheit des Tragwerks** betreffen.“ ([3], Seite 27)

„Dabei sind die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit, diejenigen Grenzzustände, die **die Funktion des Tragwerks** oder eines seiner Teile unter normalen Gebrauchsbedingungen, **das Wohlbefinden der Nutzer, das Erscheinungsbild des Bauwerks** betreffen, sind als Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit einzustufen.“ ([3], Seite 27)

Für die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ist das semiprobabilistische Bemessungsverfahren anzuwenden. Hierbei ist es üblich, die Eigenschaften von Baustoffen, Bauprodukten und Bauteilen als charakteristische Werte anzugeben. Dabei wird für die charakteristischen Werte das 5%-Quantil angegeben. [3]

Für die folgenden Auswertungen der Versuchsreihen wird es hinsichtlich einer zukünftigen bauaufsichtlich korrekten Nachweisbarkeit der Haften als zwingend notwendig erachtet, sich an den Vorgaben des Eurocodes 0 [3] zu orientieren. Dabei wird versucht, die Versuchsreihen einmal nach der Tragfähigkeit und einmal nach der Gebrauchstauglichkeit zu beurteilen.

Da ein rechnerischer Nachweis nach technischen Regelwerken durch die verwendeten Bauteile auch zukünftig eher unwahrscheinlich ist, wird sich für die statistische Auswertung der Messergebnisse an „Grundlagen zur Beurteilung

von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren“ des Deutschen Institut für Bautechnik (IfBt) [22] orientiert. Diese Richtlinie enthält Vorgehensweisen zur experimentalen Bestimmung der Eigenschaften von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten.

Fraktile werden in der Regel für eine Aussagewahrscheinlichkeit von 75 % geschätzt. Daraus folgt für den 5 %-Quantilwert für den Fall „ σ unbekannt“ (bei unbekannter Standardabweichung) bei Normalverteilung [3]:

$$\hat{x}_{0,05} = \hat{x} - K_s * s_x \quad (3.1)$$

Dabei ist:

$\hat{x}_{0,05}$ statistischer Schätzwert für das 5 %-Quantil

\hat{x} Stichprobenmittelwert siehe Gleichung (3.2)

K_s Quantilfaktoren unter Beachtung der festgelegten Aussagewahrscheinlichkeit $W = 0,75$ mit $V = n - 1$ ($n =$ Anzahl der Stichproben)

s_x Standardabweichung siehe Gleichung (3.3)

Tabelle 13:
Quantilfaktoren K_s ([22], Tabelle A2.1).

$V = n - 1$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$K_s - \text{Wert}$	3,15	2,68	2,46	2,34	2,25	2,19	2,14	2,10	2,07	2,05	2,03	2,01	1,99

$$\hat{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.2)$$

Dabei ist:

x_i Stichprobe mit $i = (1; 2; 3; \dots)$

n Anzahl der Stichproben

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2} \quad (3.3)$$

In den folgenden Unterpunkten werden die ermittelten Versuchsgrafen der einzelnen Probereihen genau untersucht. Dabei wird versucht, für jeden Probentyp (Zug- oder Schubversuche) eine Auswertemethode zu finden. Diese Methode soll die Prinzipien des Eurocodes 0 berücksichtigen und einen Grenzzustand für Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit liefern.

Anschließend werden die Datenreihen mit den erarbeiteten Methoden ausgewertet und mit der oben erläuterten Methode charakteristische Werte gebildet. Für die grafischen Auswertungen der Messdaten, wurde das zugehörige Programm der verwendeten Prüfmaschine (Hersteller *Zwick/Roel*) in der Version „*testXpert II Version 3.3*“ verwendet. Die dabei erzielten Ergebnisse werden untereinander verglichen und der Kurvenverlauf sowie die Versagensbilder interpretiert.

3.1 Zugversuche

Betrachtet man die Messdaten aller Zugversuche, also sowohl die der Fest- und als auch der Schiebepfaste, lässt sich feststellen, dass es im Prinzip zwei Arten von Kurvenverläufen gibt. Diese zwei Kurvenverläufe werden nachfolgend anhand eines jeweiligen exemplarischen Beispiels beurteilt und miteinander verglichen. Das Ziel ist ein einheitliches Auswerteverfahren, dass auf beide Kurven anwendbar ist.

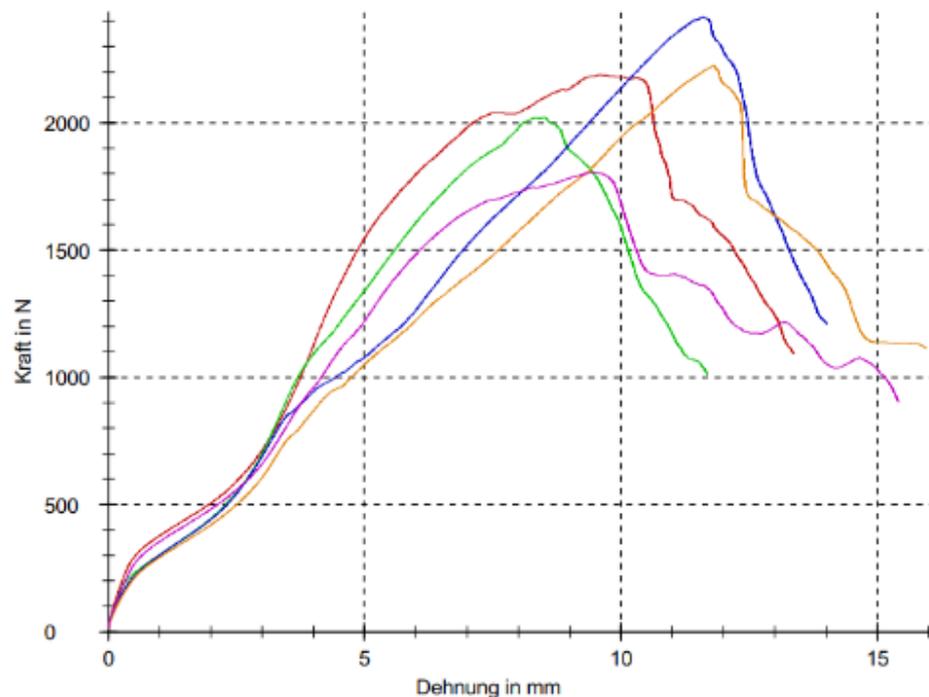


Bild 68:
Haftenauszug der Festhafte des Haft-Typs 1 mit 2-Punkte-Verschraubung.

In Bild 68 ist die erste Variante der Kurvenverläufe zu sehen, hier exemplarisch von einer Festhafte des Haft-Typs 1. Betrachtet man den Kurvenverlauf, lassen sich folgende Dinge feststellen:

- Am Kurven Anfang ist ein kleiner linearer Anstieg zu erkennen
- Es folgt ein erster Wendepunkt, nachdem eine Art Terrasse mit linearem Verlauf erkennbar ist
- Nach der Terrasse folgt ein zweiter Wendepunkt, nachdem wieder ein stärkerer linearer Anstieg erkennbar ist
- Bis zu einer Kraft von ca. 800 N bzw. einer Dehnung von 3 - 4 mm laufen die Kurven sehr homogen
- Im weiteren Verlauf der Messkurve wird die Streuung größer und es folgt ein Kraftmaximum mit anschließendem Kraftabfall

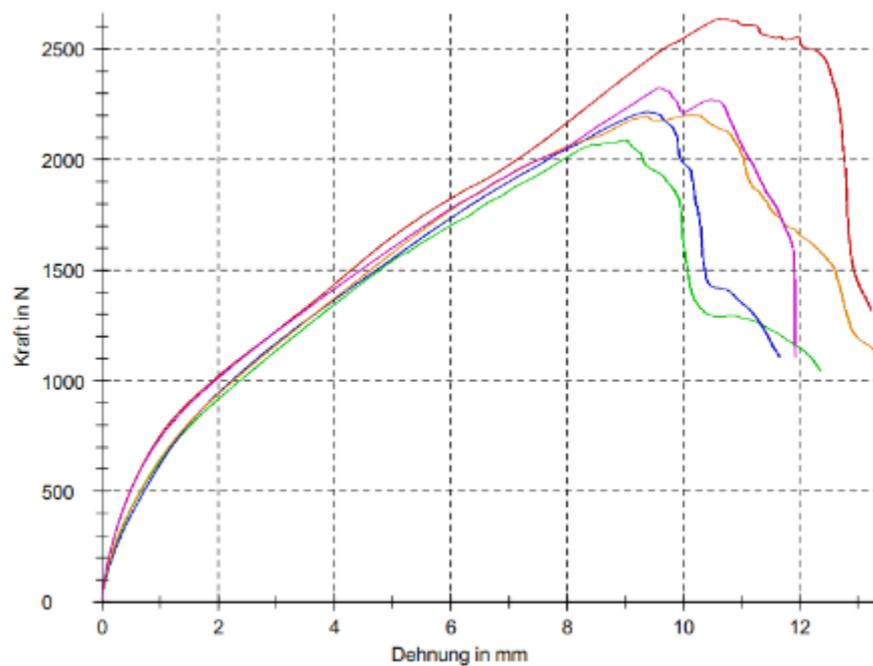


Bild 69:
Haftenauszug der Festhafte des Haft-Typs 3 mit 3-Punkte-Verschraubung.

In Bild 69 ist die zweite Variante der Kurvenverläufe zu sehen, hier exemplarisch von einer Festhafte des Haft-Typs 3. Betrachtet man den Kurvenverlauf, lassen sich folgende Dinge feststellen:

- Am Kurven Anfang ist ein kleiner linearer Anstieg zu erkennen
- Es folgt ein fließender Übergang in einen linearen Bereich mit geringerer Steigung
- Bis zu einer Kraft von ca. 2000 N oder einer Dehnung von 7 - 8 mm laufen die Kurven sehr homogen

- Im weiteren Verlauf des Anstiegs wird die Streuung der Kurven größer und es folgt ein Kraftmaximum mit anschließendem Kraftabfall

Vergleicht man diese beiden Kurvenverläufe, sind sie rein optisch sehr unterschiedlich. Allerdings lassen sich zwei Gemeinsamkeiten feststellen. Beide Kurven zeigen anfangs einen kleinen linearen Anstieg und erreichen an einem bestimmten Punkt ihre Kraftmaxima, nachdem es zu einem Kraftabfall kommt.

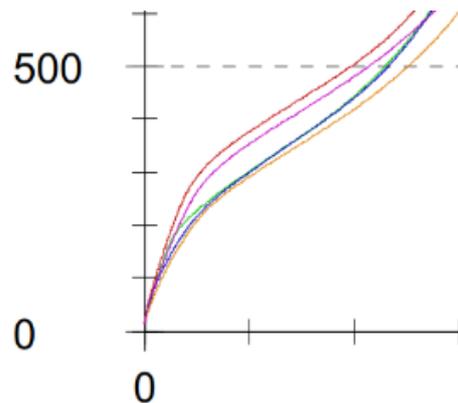


Bild 70:
Linearer Bereich Kurvenverlauf 1.

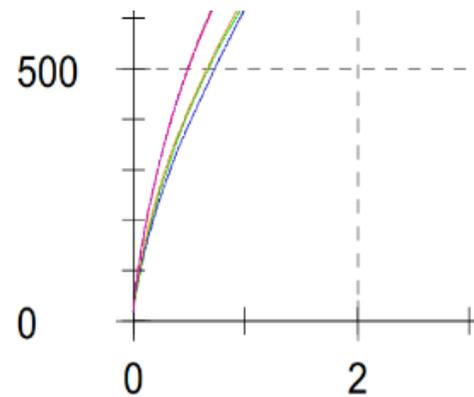


Bild 71:
Linearer Bereich Kurvenverlauf 2.

Betrachtet man nun die beiden Ausschnitte in Bild 70 und Bild 71 stellt man fest, dass die linearen Bereiche beider Kurven unter 400 N Kraft enden. Dies war bei allen untersuchten Proben festzustellen.

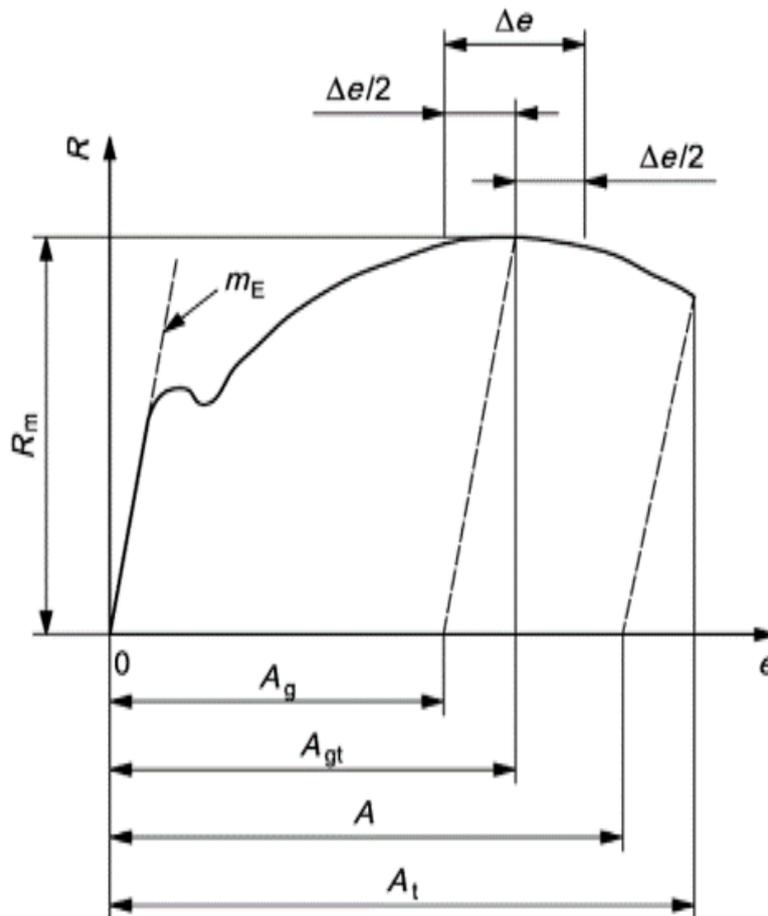


Bild 72:
Definition der Extensometer-Dehnung.

Tabelle 14:
Legende zu Bild 72

A	Bruchdehnung
A_g	Plastische Extensometer-Dehnung bei Höchstkraft
A_{gt}	Gesamte Extensometer-Dehnung bei Höchstkraft
A_t	Gesamte Extensometer-Dehnung beim Bruch
e	Extensometer-Dehnung
m_E	Steigung des elastischen Teils der Spannung/Extensometer-Dehnung-Kurve
R	Spannung
R_m	Zugfestigkeit
Δe	Plateaubereich

Beurteilt man den linearen Bereich aus Bild 70 und Bild 71 der Messkurven nach Bild 72 der „DIN EN ISO 6892-1: 2017-02-00: Metallische Werkstoffe-Zugversuche-Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur“ [16], handelt es bei diesem linearen Bereich um den elastischen Anteil der Dehnung.

Daraus kann geschlussfolgert werden, dass der elastische Teil der Dehnung bereits unter 400 N Zugkraft überschritten wird. Das bedeutet, dass die Haften bei den aktuell angesetzten 400 N Zugkraft laut den Klempnerfachregeln [25] bereits im plastischen Dehnungsbereich belastet werden. Bei der statischen Auslegung von Bauteilen, ist es normalerweise nicht üblich Kräfte zuzulassen, die zu plastischen Verformungen der Bauteile führen. Allerdings handelt es sich bei diesen untersuchten Bauteilen um Konstruktionen, die sich bereits über Jahrzehnte bewährt haben. Betrachtet man die Dehnung im elastischen Bereich der Grafen stellt man fest, dass der Übergang in die plastische Dehnung bereits unter 1 mm Dehnung stattfindet.

Da bei der Durchführung der Versuche im unteren Dehnungsbereich rein optisch keine Einschränkung der Funktionalität der Haften festzustellen waren, kann davon ausgegangen werden, dass die Gesamtkonstruktion bis zu einem gewissen Grad mit plastischen Verformungen der Bauteile umgehen kann.

Um nun auf den Gedanken des Eurocodes 0 mit den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT) und der Gebrauchstauglichkeit (GZG) zurück zu kommen, müssen diese festgelegt werden.

1. Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit lässt sich einfach an den maximalen Auszugskräften der Haften festlegen. Aus den statistisch ausgewerteten Maximalwerten resultieren die charakteristischen Werte der Bauteile.

2. Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Da das System allem Anschein nach in der Lage ist plastische Verformungen im unteren Dehnungsbereich ohne Störung der Gebrauchstauglichkeit aufzunehmen und der elastische Dehnungsbereich unter den aktuellen Bemessungswert von 400 N liegt, erscheint es sinnvoll eine gewisse plastische Restverformung zu tolerieren und die unter diesen Bedingungen der Gebrauchstauglichkeit resultierenden Kräfte als charakteristischen Wert festzulegen.

Für die Entwicklung des Auswerteverfahrens für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird das Verfahren aus DIN EN ISO 6892-1 Punkt 13.1 [16] zur Bestimmung der Dehngrenze bei plastischer Extensometer-Dehnung zu Grunde gelegt (siehe Bild 73).

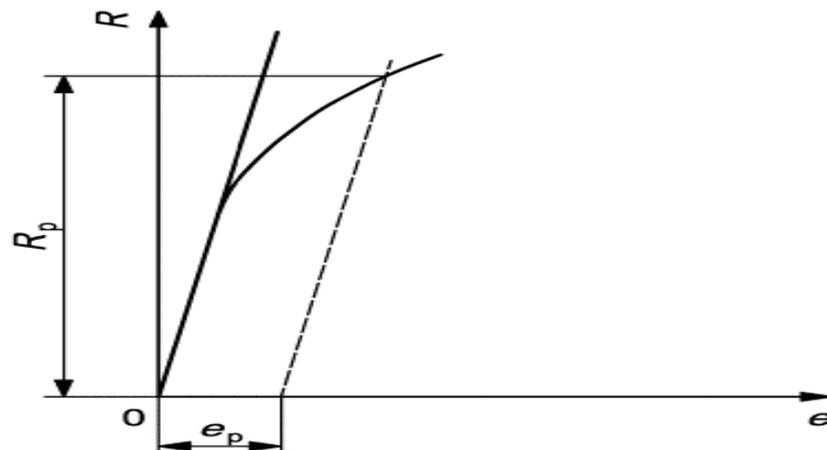


Bild 73:
Dehngrenze bei plastischer Extensometer-Dehnung R_p .

Tabelle 15:
Legende zu Bild 73.

e	Extensometer-Dehnung
e_p	Vorgegebene plastische Extensometer-Dehnung
R	Spannung
R_p	Dehngrenze bei plastischer Extensometer-Dehnung

„Rp wird aus der Kraft/Extensometer-Dehnung-Kurve bestimmt, indem eine Parallele zum geraden Teil der Kurve in einem Abstand gezeichnet wird, der der vorgeschriebenen plastischen Dehnung entspricht, z. B. 0,2 %. Die Ordinate des Schnittpunktes dieser Parallelen mit der Kurve ergibt die der gewünschten Dehngrenze bei plastischer Extensometer-Dehnung entsprechende Kraft. Die Dehngrenze wird durch Dividieren dieser Kraft durch den Anfangsquerschnitt der Probe S_0 errechnet.“ [16]

Da nicht klar war, wie sich die Bauteile verhalten und welche Dehnungen bzw. Restverformungen für welchen Haftentyp zugelassen werden können, wurde das oben genannte Verfahren auf die in der vorliegenden Arbeit notwendigen Ansprüche angepasst. Als erstes wurde, wie oben beschrieben, eine Regressionsgerade für den linearen Bereich gebildet. Dabei wurde für alle Proben der Startpunkt bei einer Kraft von 50 N gesetzt und als Abbruchkriterium ein Regressionskoeffizient von 95% gewählt. Anschließend wurde die Regressionsgerade entlang der Dehnungsachse auf Werte einer gewissen Restverformung parallel verschoben. Es wurden dafür Werte von 1 - 5 mm in 0,5 mm Schritten gewählt. Die Ordinate des Schnittpunktes dieser Parallelen mit der Kurve ergibt die maximale Kraft, die bei der gewählten Restverformung eingeleitet werden kann. Eine exemplarische Auswertung hierfür ist in Bild 74 zu sehen. Bei einigen Probekörpern lag ein Teil der Schnittpunkte bereits im Bereich nach dem Kraftmaximum der Kurve, diese Werte wurden nicht berücksichtigt.

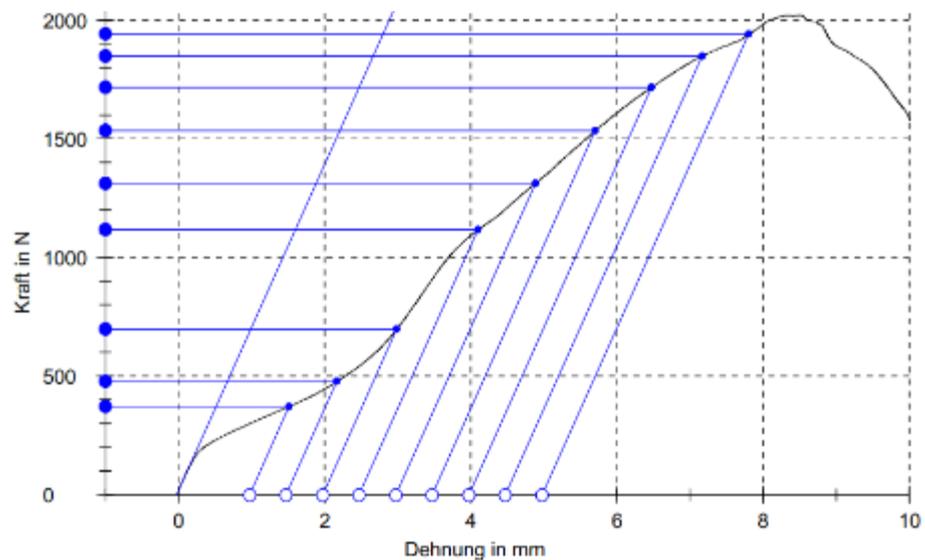


Bild 74:
Exemplarische Auswertung für die Gebrauchstauglichkeit einer Festhafter des Haft-Typs 1 mit 2-Punkt-Verschraubung.

Die hier erhaltenen Kraftwerte der Einzelproben können statistisch ausgewertet werden und die einzelnen Hersteller untereinander verglichen werden. Danach gilt es zu diskutieren, welche Restverformungen für die Haften hinsichtlich der Funktion des Tragwerks, des Wohlbefindens der Nutzer und dem Erscheinungsbild des Bauwerks akzeptabel sind.

In den folgenden Unterpunkten werden die Ergebnisse der ausgewerteten Versuchsdaten präsentiert und mit Bezug auf die übergeordnete Zielsetzung beurteilt.

3.1.1 Vorversuche

Die Vorversuche dienen nicht zur Ermittlung expliziter Werte, sondern nur zur Untersuchung des Einflusses bestimmter Parameter auf die Auszugswerte. Deshalb werden hier nur reine Mittelwerte ohne statistische Auswertung dargestellt. In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der Vorversuche aufgelistet.

Tabelle 16:
Ergebnisse Vorversuche ohne statistische Auswertung.

Ergebnisse Vorversuche in N				
	Haft-Typ 1-Festhafte		Haft-Typ 4-Festhafte	
Befestigung	Einreihig 2 Punkt		Zweireihig diagonal 3 Punkt	
Befestigungsmittel	Edelstahlschraube 4,0 x 25 mm	Rillennagel 2,5 x 25 mm	Edelstahlschraube 4,0 x 25 mm	Rillennagel 2,5 x 25 mm
F_{max}	2323 N	1064 N	2490 N	1120 N
$F (1,0mm)$	409 N	292 N	205 N	200 N
$F (2,0mm)$	1587 N	436 N	275 N	299 N

a. Vergleich Nagel- und Schraubbefestigung

Vergleicht man die Auszugswerte für jeden Haft-Typ bzgl. der gewählten Befestigungsmittel, lässt sich Folgendes feststellen:

- Die maximalen Auszugswerte bei Schraubbefestigungen sind deutlich höher, als bei Nagelbefestigungen. Dies war zu erwarten, da bei großer Dehnung der Versatz an der Grundplatte des Haft aufgebogen wird, so dass die eingeleiteten Kräfte direkt in das Befestigungsmittel weitergeleitet werden und nur noch an den Befestigungsmitteln gezogen wird.
- Vergleicht man die Auszugswerte der Festhafte des Haft-Typs 1 bei einer bleibenden Restverformung von 1,0 mm und 2,0 mm, stellt man fest, dass die Kraftwerte der Schraubbefestigung auch hier deutlich höher sind.

Wie die Ergebnisse zeigen, kann die Art des Befestigungsmittels auch schon im niedrigen Dehnungsbereich eine Rolle spielen und die vorhandenen Auszugskräfte beeinflussen. Die Beeinflussung der maximalen Auszugswerte war zu erwarten.

b. Vergleich von Befestigungsbildern

Vergleicht man die Auszugswerte der Festhafte des Haft-Typs 1 und der Festhafte des Haft-Typs 4 lässt sich folgendes feststellen:

- Die maximalen Auszugswerte für beide Haften liegen relativ nahe beieinander. Dabei sind die Auszugswerte der Hafte des Haft-Typs 4 etwas höher. Es lässt sich keine Aussage darüber treffen, ob dieser Unterschied durch das zusätzliche Befestigungsmittel kommt oder durch die Eigenschaften der Hafte selbst. Kommt der Unterschied durch das zusätzliche Befestigungsmittel, ist dieser im Hinblick auf den Wert der Maximalkraft äußerst gering.
- Ob das Befestigungsbild auf die Werte im unteren Dehnungsbereich einen Einfluss nimmt, lässt sich nicht eindeutig beurteilen.

Um den Einfluss des Befestigungsbildes auf die Auszugswerte wirklich aussagekräftig beurteilen zu können, müsste die Hafte eines Herstellers mit unterschiedlichen Befestigungsbildern getestet werden. Vergleicht man unterschiedliche Hersteller, ist der Einfluss anderer Parameter nicht auszuschließen.

3.1.2 Auszugsverhalten von Haften

Die Probereihen für den Haftenauszug wurden nach den oben erläuterten Methoden ausgewertet. Die charakteristischen Werte für die Festhaften sind in Tabelle 17 aufgeführt und die charakteristischen Werte für die Loshaften in Tabelle 18. Dabei steht der Wert von F_{\max} jeweils für den Grenzzustand der Tragfähigkeit. Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wurden, wie oben beschrieben, mehrere Werte pro Haftentyp für eine gewisse Restverformung angegeben.

Für die Festhafte des Haft-Typs 2 war ab $F(4,0\text{mm})$ auf Grund von zu großen Standardabweichungen keine Wertermittlung mehr möglich. Für die Loshafte des Haft-Typs 1 war ab $F(3,0\text{mm})$ aufgrund des Versagens des Bauteils keine Wertermittlung mehr möglich.

Vergleicht man die Werte der Standardabweichung untereinander, lässt sich feststellen, dass die Modelle der Haft-Typen 2 und 3 über den gesamten Dehnungsbereich eine kleine Standardabweichung aufweisen (Ausnahme: die Festhafte des Haft-Typs 2 im hohen Bereich). Bei den Modellen vom Haft-Typ 1 lässt sich feststellen, dass die Standardabweichung mit der Steigerung der Dehnung zunimmt. Das zeigt, dass die Modelle der Haft-Typen 2 und 3 auch im hohen Dehnungsbereich einen homogenen Verlauf bilden und wenig Streuung aufweisen.

Tabelle 17:
Charakteristische Auszugswerte für Festhafte in N.

Charakteristische Auszugswerte für Festhafte in N			
	Haft-Typ 1- Festhafte	Haft-Typ 2- Festhafte	Haft-Typ 3- Festhafte
Befestigung	Einreihig 2 Punkt	Einreihig 2 Punkt	Einreihig 3 Punkt
F_{max}	1565	2115	1779
Standardabweichung von F_{max}	230	142	209
$F (1,0mm)$	318	199	768
Standardabweichung von $F (1,0mm)$	33	34	36
$F (1,5mm)$	441	249	935
Standardabweichung von $F (1,5mm)$	21	36	28
$F (2,0mm)$	580	294	1080
Standardabweichung von $F (2,0mm)$	42	36	21
$F (2,5mm)$	757	332	1207
Standardabweichung von $F (2,5mm)$	85	39	18
$F (3,0mm)$	723	353	1329
Standardabweichung von $F (3,0mm)$	193	54	16
$F (3,5mm)$	779	413	1432
Standardabweichung von $F (3,5mm)$	243	47	22
$F (4,0mm)$	909	-	1534
Standardabweichung von $F (4,0mm)$	253	322	25
$F (4,5mm)$	1105	-	1638
Standardabweichung von $F (4,5mm)$	230	434	25
$F (5,0mm)$	1282	-	1740
Standardabweichung von $F (5,0mm)$	201	602	23

Tabelle 18:
Charakteristische Auszugswerte für Loshafte in N.

Charakteristische Auszugswerte für Loshafte in N			
	Haft-Typ 1- Loshafte	Haft-Typ 2- Loshafte	Haft-Typ 3- Loshafte
Befestigung	Zweireihig diagonal 3 Punkt	Einreihig 3 Punkt	Einreihig 3 Punkt
F_{max}	551	1620	1977
Standardabweichung von F_{max}	140	186	125
$F (1,0mm)$	234	444	743
Standardabweichung von $F (1,0mm)$	46	19	199
$F (1,5mm)$	312	536	954
Standardabweichung von $F (1,5mm)$	64	13	157
$F (2,0mm)$	401	595	1147
Standardabweichung von $F (2,0mm)$	102	15	137
$F (2,5mm)$	550	629	1416
Standardabweichung von $F (2,5mm)$	106	21	93
$F (3,0mm)$	-	669	1630
Standardabweichung von $F (3,0mm)$	-	22	61
$F (3,5mm)$	-	709	1792
Standardabweichung von $F (3,5mm)$	-	21	43
$F (4,0mm)$	-	732	1909
Standardabweichung von $F (4,0mm)$	-	27	34
$F (4,5mm)$	-	750	1984
Standardabweichung von $F (4,5mm)$	-	36	37
$F (5,0mm)$	-	772	2038
Standardabweichung von $F (5,0mm)$	-	43	43

Vergleicht man die Werte der Grenzzustände, stellt man als einzige Unregelmäßigkeit das Verhalten der Festhaften des Haft-Typs 2 fest. Obwohl diese den größten Wert für die Tragfähigkeit liefern, hat er die kleinsten Werte für die Gebrauchstauglichkeit. Sieht man sich dazu den Kurvenverlauf in Bild 75 an und vergleicht diesen mit Bild 68 und Bild 69, ist erkennbar das die Festhafte des Haft-Typs 2 in den ersten 5 mm Dehnung einen sehr flachen Kraftanstieg aufweist. Es kommt bei geringen Kräften zu einer starken Verformung. Der Grund für dieses Verhalten liegt vermutlich in dem relativ großen Versatz zwischen Lasteinleitungspunkt und Befestigung. Durch diesen langen und flachen Anstieg weisen die Festhafte des Haft-Typs 2, im Vergleich zu den anderen Grafen, geringe Werte für die Gebrauchstauglichkeit auf.

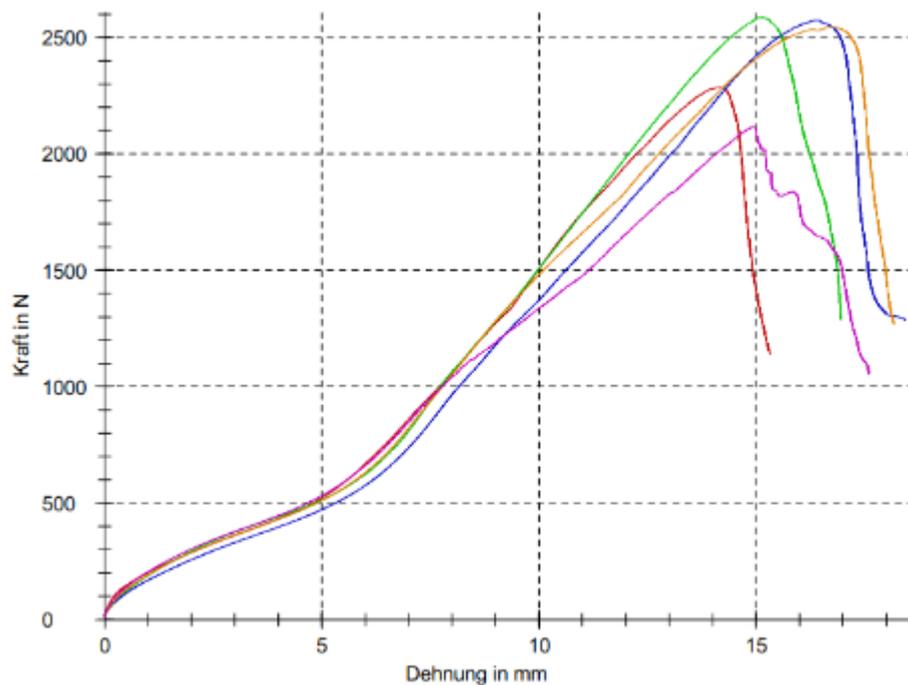


Bild 75:
Haftenauszug Haft-Typ 2-Festhafte mit 2-Punkt-Verschraubung.

3.1.3 Auszugsverhalten von Haften mit Deckungsmaterial

Die Versuche zum Auszugsverhalten von Haften mit Deckungsmaterial dienen nicht zur Ermittlung expliziter Werte, sondern lediglich zur Untersuchung des Einflusses bestimmter Parameter auf die Auszugswerte. Aufgrund dessen werden nur reine Mittelwerte ohne statistische Auswertung dargestellt. Tabelle 19 zeigt die Ergebnisse des Haftauszugs mit Deckungsmaterial. Für die Festhafte des Haft-Typs 3 mit nichtrostendem Stahl als Deckungsmaterial, konnte kein repräsentativer Wert ermittelt werden, da die zur Verfügung gestellten Proben ein uneinheitliches Auszugsverhalten aufgrund qualitativer Mängel der Grundplatten lieferten. Aufgrund eines engen Zeitplans für die Durchführung aller Versuche und da die Prüfanlage nur begrenzte Zeit zur Verfügung stand, konnten die Versuche nicht mit anderem Material in besserer Qualität wiederholt werden.

Tabelle 19:
Ergebnisse Haftenauszug mit Deckungsmaterial.

Ergebnisse Haftenauszug mit Deckungsmaterial in N						
Haftenhersteller	Haft-Typ 1		Haft-Typ 2		Haft-Typ 3	
	Fest	Los	Fest	Los	Fest	Los
F_{max} mit Aluminium	1050	779	1074	926	1378	1224
F_{max} mit nichtrostendem Stahl	1350	1048	1220	1196	-	1360

Vergleicht man die Auszugswerte für die ungünstigste Lastsituation bei maximalem Haften Abstand (500 mm) mit den charakteristischen Werten des reinen Haftenauszugs, zeigt sich, dass das Deckungsmaterial, bis auf einen Fall, immer das schwächste Glied bildet. Ausschließlich die Werte der Loshafte des Haft-Typs 1 sind niedriger als die Werte mit Deckungsmaterial. Dies ist eine Folge des Verlustes der Verbindung zwischen Gleitschlitten und Grundplatte durch aufbiegen der Führung.

Außerdem lässt sich beim Vergleich von Aluminium und nichtrostendem Stahl feststellen, dass die höhere Steifigkeit ($E \cdot I$) des verwendeten Deckungsmaterials einen positiven Einfluss hat.

Daraus lässt sich ableiten, dass auch an das Deckungsmaterial Anforderungen bezüglich der Gebrauchstauglichkeit (Durchbiegung) gestellt werden müssen, um eine gleichmäßige Lasteinleitung in die Haften zu ermöglichen.

3.2 Schubversuche

Betrachtet man die Messdaten aller Schubversuche, sowohl für WSF als auch für DSF, lässt sich feststellen, dass es im Prinzip nur eine A Kurvenverlauf gibt. Dieser Kurvenverlauf wird nun anhand eines exemplarischen Beispiels beurteilt. Das Ziel ist ein einheitliches Auswerteverfahren festzulegen.

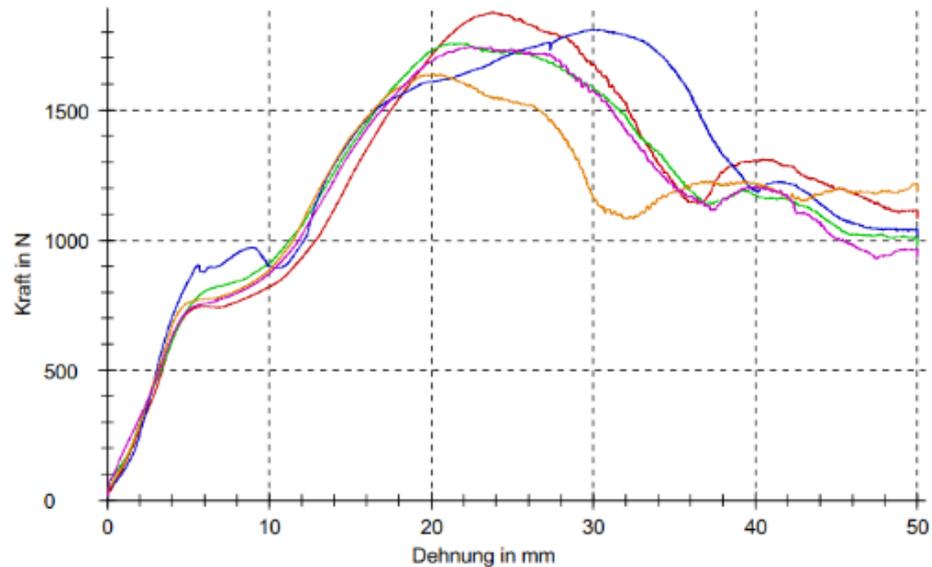


Bild 76:
Schubversuch mit Haft-Typ 1 Doppelstehfalz.

In Bild 76 ist der Kurvenverlauf der Schubversuche mit Deckungsmaterial abgebildet, hier exemplarisch mit Zink als Deckungsmaterial. Betrachtet man den Kurvenverlauf, lassen sich folgende Dinge feststellen:

- Am Kurvenanfang ist ein linearer Anstieg zu erkennen
- Es folgt ein erster Wendepunkt, worauf bereits der Übergang zum nächsten Wendepunkt folgt
- Nach dem zweiten Wendepunkt ist erneut ein linearer Anstieg erkennbar
- Im weiteren Verlauf des Anstiegs wird die Streuung der Kurven größer und es folgt ein Kraftmaximum mit anschließendem Kraftabfall

Auch bei der Bewertung der Schubfestigkeit werden die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit gemäß Eurocode 0 (DIN EN 1990) [3] betrachtet. Hierzu werden die folgenden Definitionen getroffen:

Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit entspricht den maximalen Schubkräften der Systeme. Die statistisch ausgewerteten Messwerte bilden die charakteristischen Bemessungswerte der Schubkraft parallel zur Dacheindeckung $F_{k,II}$.

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Da bei der Versuchsdurchführung festgestellt wurde, dass es zu starken Verformungen der Hafte zwischen den Scharen kommt, wird es als sinnvoll erachtet nur sehr geringe Verformungen der Hafte zu zulassen. Deshalb werden nur die Kräfte im elastischen Verformungsbereich für die Gebrauchstauglichkeit herangezogen.

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird wie bei den Zugversuchen das Verfahren aus DIN EN ISO 6892-1 Punkt 13.1 [16] zur Bestimmung der Dehngrenze bei plastischer Extensometer-Dehnung (siehe Bild 73) zu Grunde gelegt. Als Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird die Kraft $F_{k,II}$ bei 0,2 % plastischer Dehnung definiert. Aufgrund der, in den Versuchen beobachteten starke Deformationen der Hafte, ist eine plastische Verformung der Hafte nicht zulässig. Für die Bestimmung der Regressionsgerade wurde bei den Schubversuchen für alle Proben der Startpunkt bei einer Kraft von 150 N gesetzt und als Abbruchkriterium ein Regressionskoeffizient von 95% gewählt. Der Basiskraftwert wurde hier erhöht, um die Setzungen der Verbindung zu Beginn der Messungen nicht in die Bewertung einfließen zu lassen. Eine exemplarische Auswertung ist in Bild 77 zu sehen.

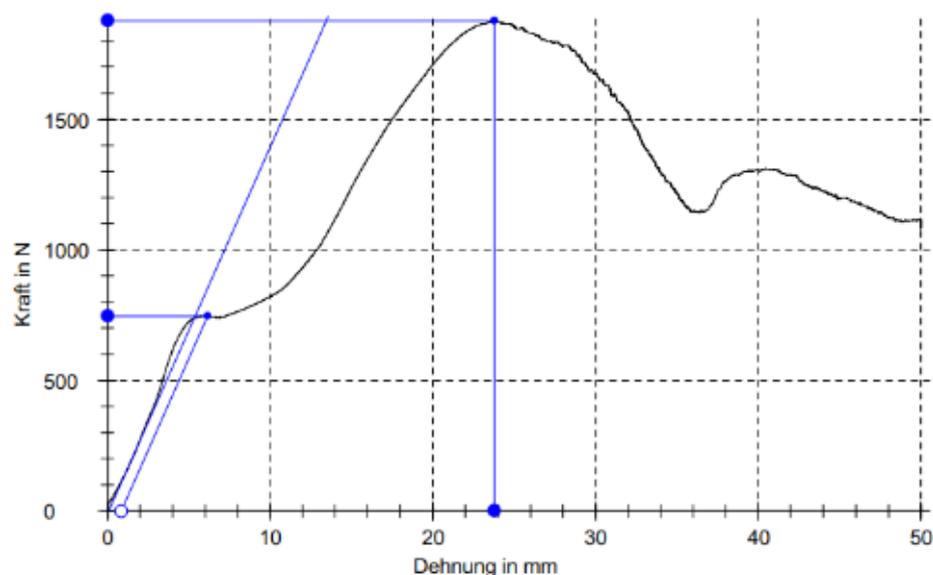


Bild 77:
Exemplarische Auswertung für die Gebrauchstauglichkeit für einen Schubversuch Haft-Typ 1 mit Deckungsmaterial, ZN und DSF.

Verwendete Abkürzungen:

DSF	Doppelstehfalz	CU	Kupfer
WSF	Winkelstehfalz	NST	Nicht rostender Stahl
ALU	Aluminium	Ke	Kerbe
ZN	Zink	La	Lasche

Tabelle 20:
Charakteristische Schubkräfte (DSF) für eine Festhafte des Haft-Typs 1 in Abhängigkeit des Deckungsmaterials.

Charakteristische Schubkräfte (DSF) für eine Festhafte des Haft-Typs 1 in Abhängigkeit des Deckungsmaterials in N						
Haft-Typ	Haft-Typ 1-Festhafte					
Falz-Art	DSF					
Deckungsmaterial	ALU	CU	NST	NST mit Ke	NST mit La	ZN
F_{max}	-	1854	1512	1588	978	1550
Standardabweichung von F_{max}	-	62	152	61	218	88
F bei 0,2% plastischer Dehnung	-	716	-	625	-	620
Standardabweichung von $F(0,2\%)$	-	39	-	62	-	70

Ke = Kerbe

La = Lasche

Für den DSF mit Aluminium als Deckungsmaterial konnte kein Wert ermittelt werden, da die qualitative Schwankungsbreite der Grundplatten zu keinen reproduzierbaren Ergebnissen geführt hat. Leider ließ sich das erst nach Durchführung aller Versuche feststellen. Eine Wiederholung war aus zeitlichen Gründen im eng getakteten Projektplan nicht möglich.

Wie unter Kapitel 2.2.4 bereits erläutert, konnte für nichtrostenden Stahl als DSF ohne Zusatzmaßnahmen keine Auswertung durchgeführt werden. In den folgenden Grafen wird verdeutlicht, wie sich das Schubverhalten durch das Einbringen einer Kerbe (siehe Bild 48) oder Lasche (Bild 47) verändert.

Wie zu erwarten, haben sowohl die Kerbe als auch die Lasche einen positiven Effekt auf die Messkurven. Bei der Kerbe ist ein homogenerer Kurvenverlauf sichtbar, weshalb die Versuchsreihe aus Bild 80 zur Bildung der charakteristischen Werte verwendet wurde.

Wie ebenfalls unter Kapitel 2.2.4 erläutert konnten für nichtrostenden Stahl als WSF ohne Zusatzmaßnahmen keine Versuche durchgeführt werden. In den folgenden Grafen Bild 78 bis Bild 82 wird dargestellt, wie sich die Systeme durch das Einbringen einer Kerbe oder Lasche verhalten haben. Eine Auswertung im Sinne der Gebrauchstauglichkeit war trotz der Sicherungsmaßnahmen nicht möglich.

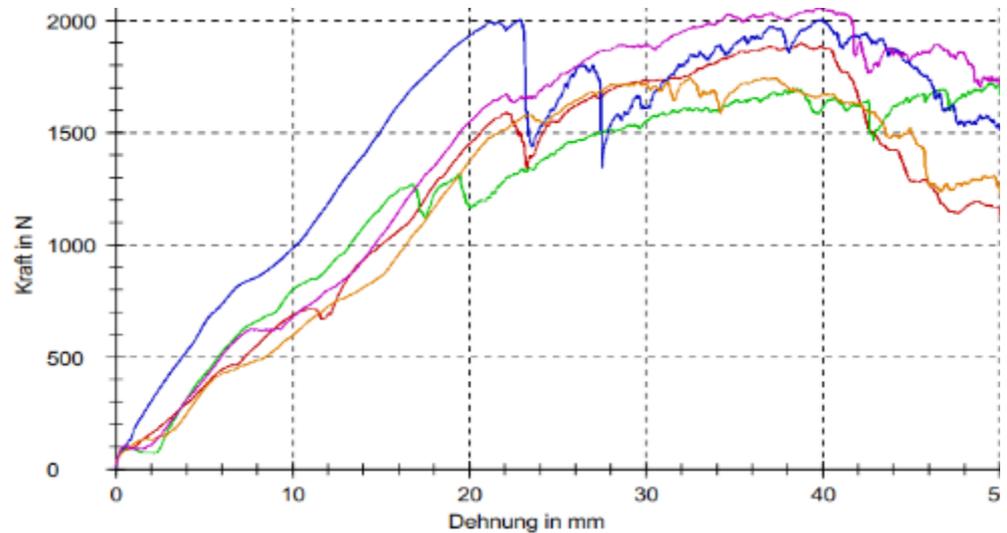


Bild 78:
Schubversuch Haft-Typ 1 mit Deckungsmaterial, NST und DSF.

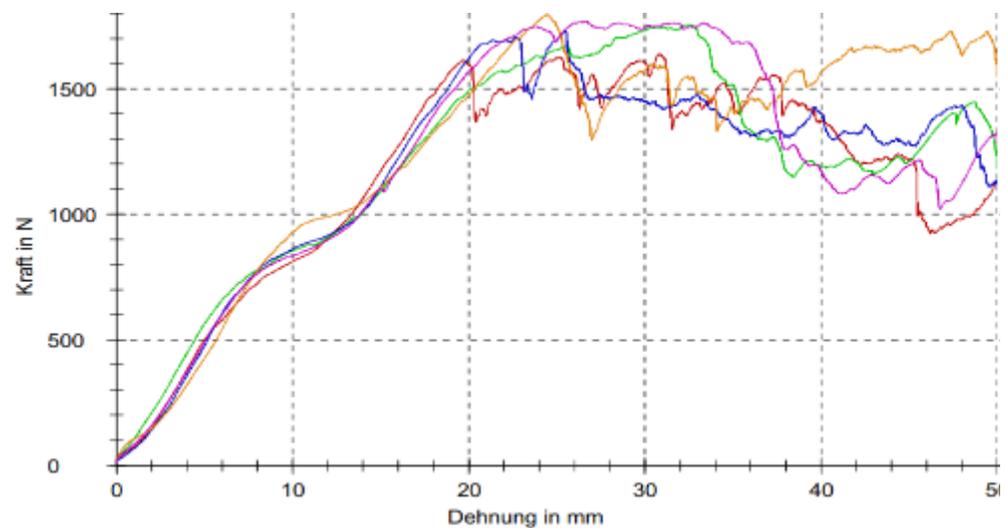


Bild 79:
Schubversuch Haft-Typ 1 mit Deckungsmaterial, NST mit Ke und DSF.

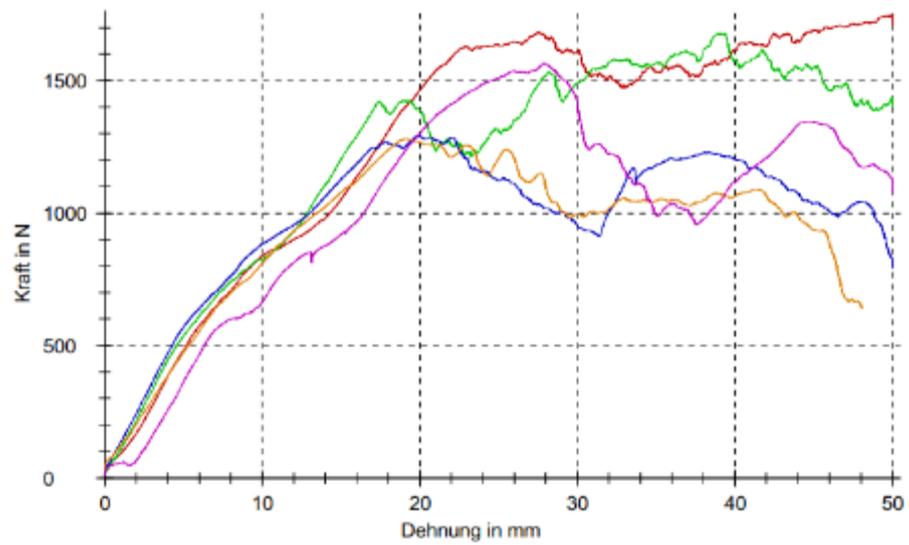


Bild 80:
Schubversuch Haft-Typ 1 mit Deckungsmaterial, NST mit La und DSF.

Tabelle 21:
Charakteristische Schubkräfte (WSF) für eine Festhafte des Haft-Typs 1 in Abhängigkeit des Deckungsmaterials.

Charakteristische Schubkräfte (WSF) für eine Festhafte des Haft-Typs 1 in Abhängigkeit des Deckungsmaterials in N						
Haften-Typ	Haft-Typ 1-Festhafte					
Falz-Art	WSF					
Deckungsmaterial	ALU	CU	NST	NST mit Ke	NST mit La	ZN
F_{max}	847	812	-	349	515	726
Standardabweichung von F_{max}	36	119	-	110	74	21
F bei 0,2% plastischer Dehnung	526	286	-	-	-	413
Standardabweichung von F (0,2%)	11	44	-	-	-	60

Ke = Kerbe

La = Lasche

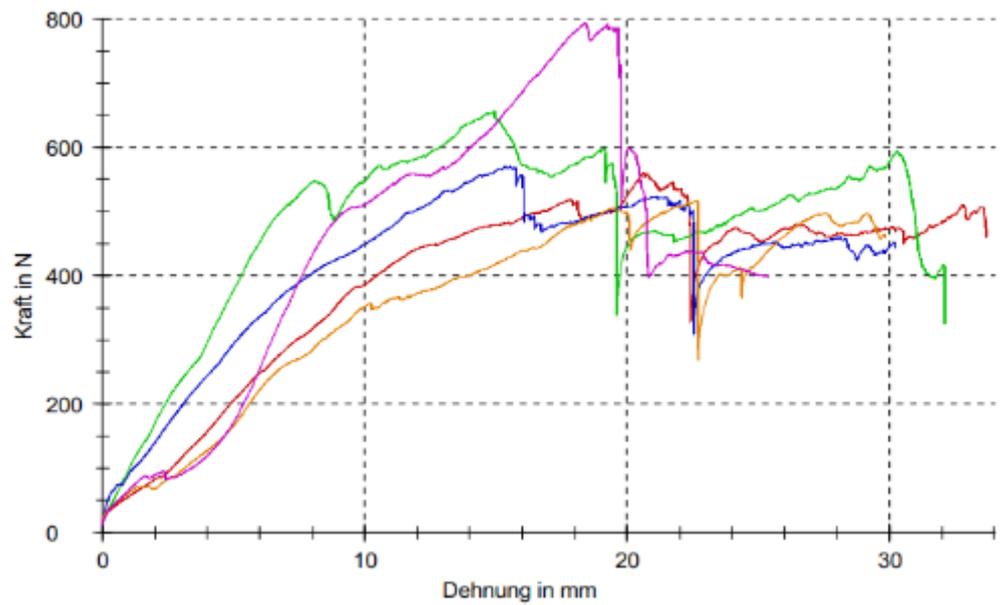


Bild 81:
Schubversuch Haft-Typ 1 mit Deckungsmaterial, NST mit Ke und WSF.

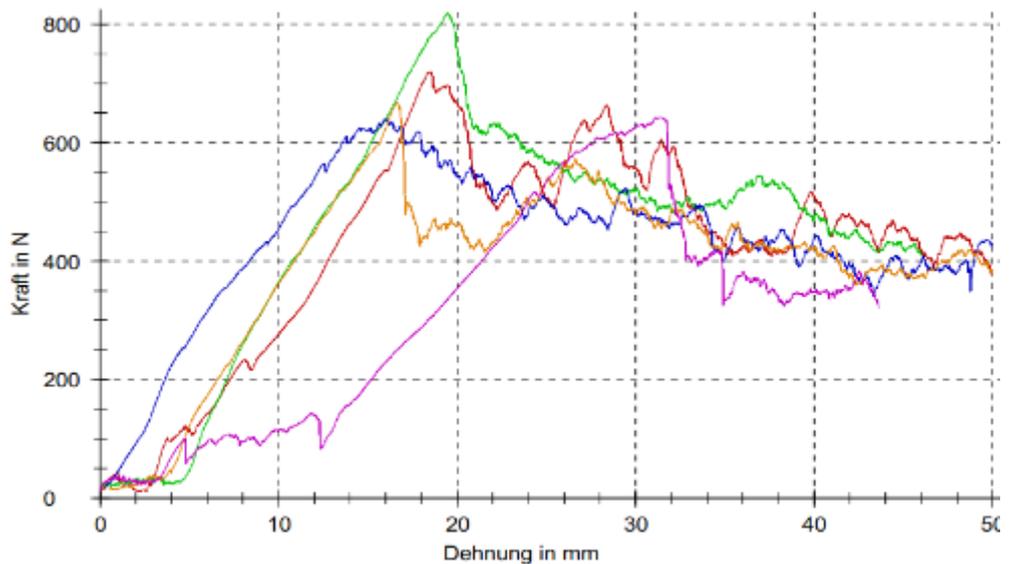


Bild 82:
Schubversuch Haft-Typ 1 mit Deckungsmaterial, NST mit La und WSF.

Vergleicht man die Ergebnisse der Schubversuche, lassen sich einige Aussagen über das Verhalten der Bauteile ableiten. Der DSF ist in der Lage deutlich mehr Schubkräfte auf die Haften zu übertragen als der WSF. Dies hat auf die Montage von Dachaufbauten, welche Schubkräfte verursachen, erhebliche Auswirkungen und muss bei einer statischen Dimensionierung berücksichtigt werden.

Auch die Art des verwendeten Deckungsmaterials hat einen signifikanten Einfluss auf die Kraftübertragung an der Hafte. Nichtrostendem Stahl als Deckungsmaterial kann ohne Zusatzmaßnahmen Schubkräfte nicht zuverlässig auf die Hafte übertragen. Die Verwendung einer Kerbe als zusätzliche Maßnahme schafft hier teilweise Besserung. Dadurch kann beim DSF eine statisch abgesicherte Aussage über den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit getroffen werden. Beim WSF führt die Zusatzmaßnahme auch zu einer Übertragbarkeit von Schubkräfte. Eine statistisch abgesicherte Auswertung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit war trotz der Sicherungsmaßnahmen nicht möglich.

3.3 Biegeversuche

Zur Auswertung wurden die gewonnen Messdaten pro Falzvariante und Material gemittelt und den theoretischen Vorhersagen der technischen Biegetheorie gegenübergestellt. Die Ermittlung der Flächenträgheitsmomente I_y zur Berechnung der zu erwartenden Durchbiegung der verschiedenen Querschnitte, erfolgte mit der Software AutoCAD der Firma Autodesk. Aus den Messdaten wurden für die jeweiligen Kombinationen aus Material und Falzvariante Kraft-Verformungsdiagramme erstellt (siehe exemplarisch Bild 83).

In den Diagrammen ist zu Anfang jeweils ein annähernd linearer Anstieg der Verformung im elastischen Bereich erkennbar, die mit zunehmender Last in den plastischen Bereich übergeht. Da eine dauerhafte plastische Verformung der Scharen nicht akzeptabel ist, wird der Bemessungswert für das Gebrauchstauglichkeitskriterium l_0/x anhand des Verlassens des linearen Bereichs festgelegt (siehe Bild 84). Die Kraft-Verformungsdiagramme aller Versuche, mit ausreichend hoher Darstellungsgenauigkeit, befinden sich im Anhang. Die erreichten Maximalkräfte sind Tabelle 22 und Tabelle 23 zu entnehmen.

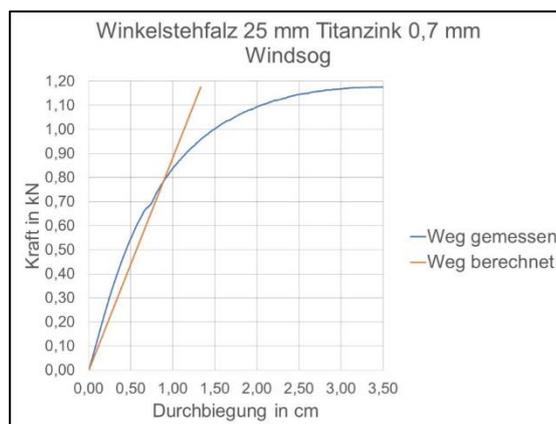


Bild 83:
Kraft-Verformungsdiagramm

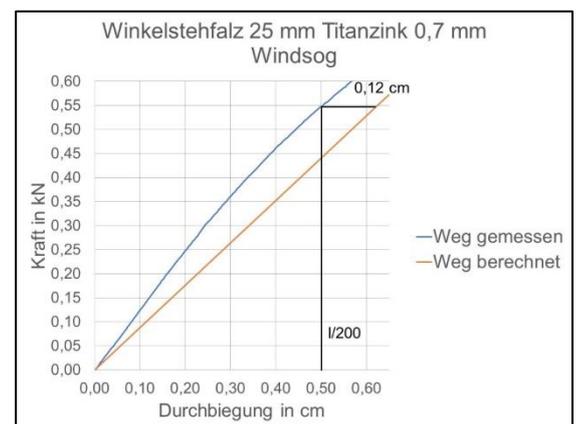


Bild 84:
Kriterium $l/200$ im elastischen Bereich

Tabelle 22:
Maximalkräfte Winddruckversuche

Winddruckversuche				
Material	Erreichte Maximalkraft pro Falzvariante			
	DSF 25 mm	DSF 38 mm	WSF 25 mm	SNAP 38 mm
Kupfer	-	-	-	-
Aluminium	1,10	1,81	1,65	-
Stahl nichtrostend	-	-	-	2,82
Titanzink	1,24	1,69	1,40	nicht zulässig

Tabelle 23:
Maximalkräfte Windsogversuche

Windsogversuche				
Material	Erreichte Maximalkraft pro Falzvariante			
	DSF 25 mm	DSF 38 mm	WSF 25 mm	SNAP 38 mm
Kupfer	1,57	2,37	-	-
Aluminium	1,23	2,04	1,01	2,15
Stahl nichtrostend	1,92	3,07	1,80	3,00
Titanzink	1,07	1,84	1,18	nicht zulässig

Beim Vergleich der verschiedenen Kombinationen aus Material und Falzvariante, zeigten sich Unterschiede im Verhalten der gleichen Kombination bei den Windsog- und Winddruckversuchen. Dies ist mit der jeweiligen Lage des Bereichs der größten Zug- oder Druckspannung im Falzkopf oder im Falzfuß und der sich am Falzfuß anschließenden nächsten Schare zu erklären. In Bild 85 werden die im elastischen Bereich gemessenen Biegesteifigkeiten von den sowohl in Windsog- und Winddruckversuchen getesteten Kombinationen aus Material und Falzvariante verglichen. Auffällig ist, dass die Unterschiede bei den 38 mm hohen Falzen deutlich größer sind, als bei den 25 mm hohen Falzen. Dies könnte mit den im Falle der Winddruckversuche im Zugspannungsbereich liegenden Scharenbereichen zwischen den Falzen zusammenhängen.

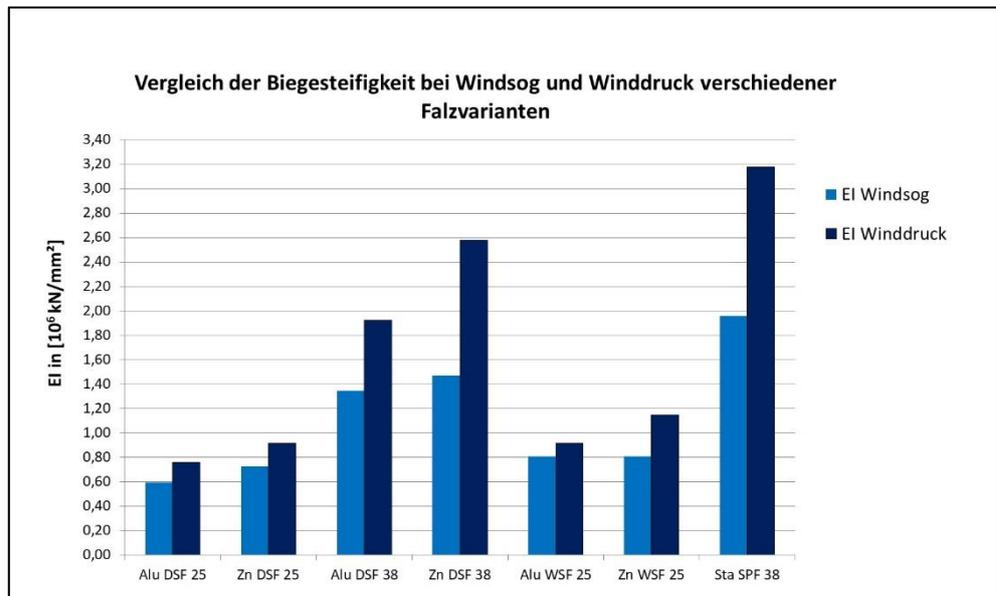


Bild 85:
Vergleich der gemessenen Biegesteifigkeiten

Auch die Unterschiede zwischen den Falzvarianten sind deutlich und auf das unterschiedliche Flächenträgheitsmoment der Querschnitte zurückführbar. Die E-Moduln der verwendeten Materialien haben ebenfalls den erwarteten Einfluss auf das elastische Verhalten der Probekörper gezeigt. Ein Vergleich der gemessenen Biegesteifigkeiten ($I \cdot E$) der Material-Falzkombinationen ist für die Windsogversuche in Bild 86 und für die Winddruckversuche in Bild 87 dargestellt.

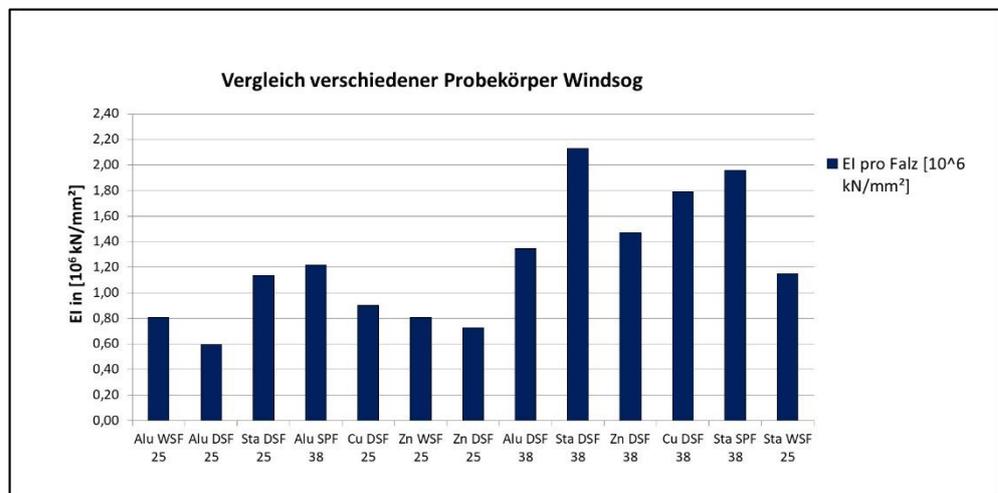


Bild 86:
Vergleich der Windsogversuche.

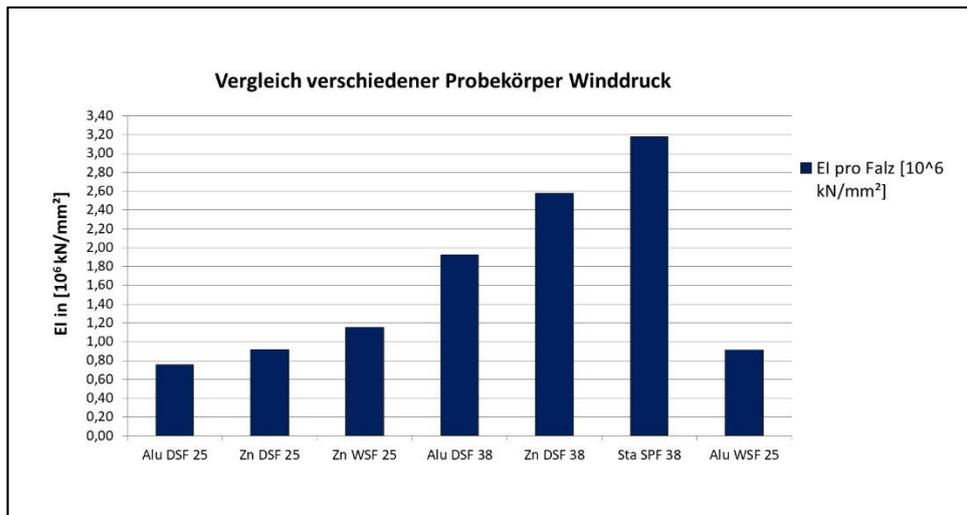


Bild 87:
Vergleich der Winddruckversuche.

Bei einer Durchbiegung von $l/200$, was bei der verwendeten Stützweite von 1 m einer Durchbiegung von 5 mm entspricht, liegen alle untersuchten Kombinationen innerhalb des elastischen Bereichs. Bei einem nach den Klempnerfachregeln derzeit zulässigen Haftabstand von 500 mm entspricht das einer max. Durchbiegung von 2,5 mm (vgl. [25], S. 106) zwischen den Haften. In den Diagrammen im Anhang ist das Kriterium $l/200$ jeweils markiert und die Abweichung zur theoretischen Vorhersage der Durchbiegung angegeben. Die Abweichungen der gemessenen Durchbiegung zur berechneten sind für die Winddruckversuche der Tabelle 24 und für die Windsogversuche der

Tabelle 25 zu entnehmen. Dabei bedeuten negative Werte eine geringere und positive Werte eine größere gemessene Durchbiegung, verglichen mit der Vorhersage.

Tabelle 24:
Abweichung Messung zu Vorhersage Winddruck

Winddruckversuche mit einer Stützweite von 1000 mm				
Material	Abweichung zur Berechnung bei $l/200$ in mm			
	DSF 25 mm	DSF 38 mm	WSF 25 mm	SNAP 38 mm
Kupfer	-	-	-	-
Aluminium	-2,90	-0,12	-3,30	-
Stahl nichtrostend	-	-	-	-0,70
Titanzink	-0,31	-1,40	-3,40	nicht zulässig

Tabelle 25:
Abweichung Messung zu Vorhersage Windsog

Windsogversuche mit einer Stützweite von 1000 mm				
Material	Abweichung zur Berechnung bei l/200 in mm			
	DSF 25 mm	DSF 38 mm	WSF 25 mm	SNAP 38 mm
Kupfer	-3,40	-0,20	-	-
Aluminium	-1,40	0,40	-1,50	0,20
Stahl nichtrostend	-0,70	1,60	0,30	1,20
Titanzink	-1,40	0,80	-1,20	nicht zulässig

4 Entwicklung einer Bemessung von Doppelstehfalzdächern

4.1 Ablauf der Bemessung

Die Bemessung von Haften in Doppelstehfalzdächern und der Scharen läuft nachfolgendem Schema ab:

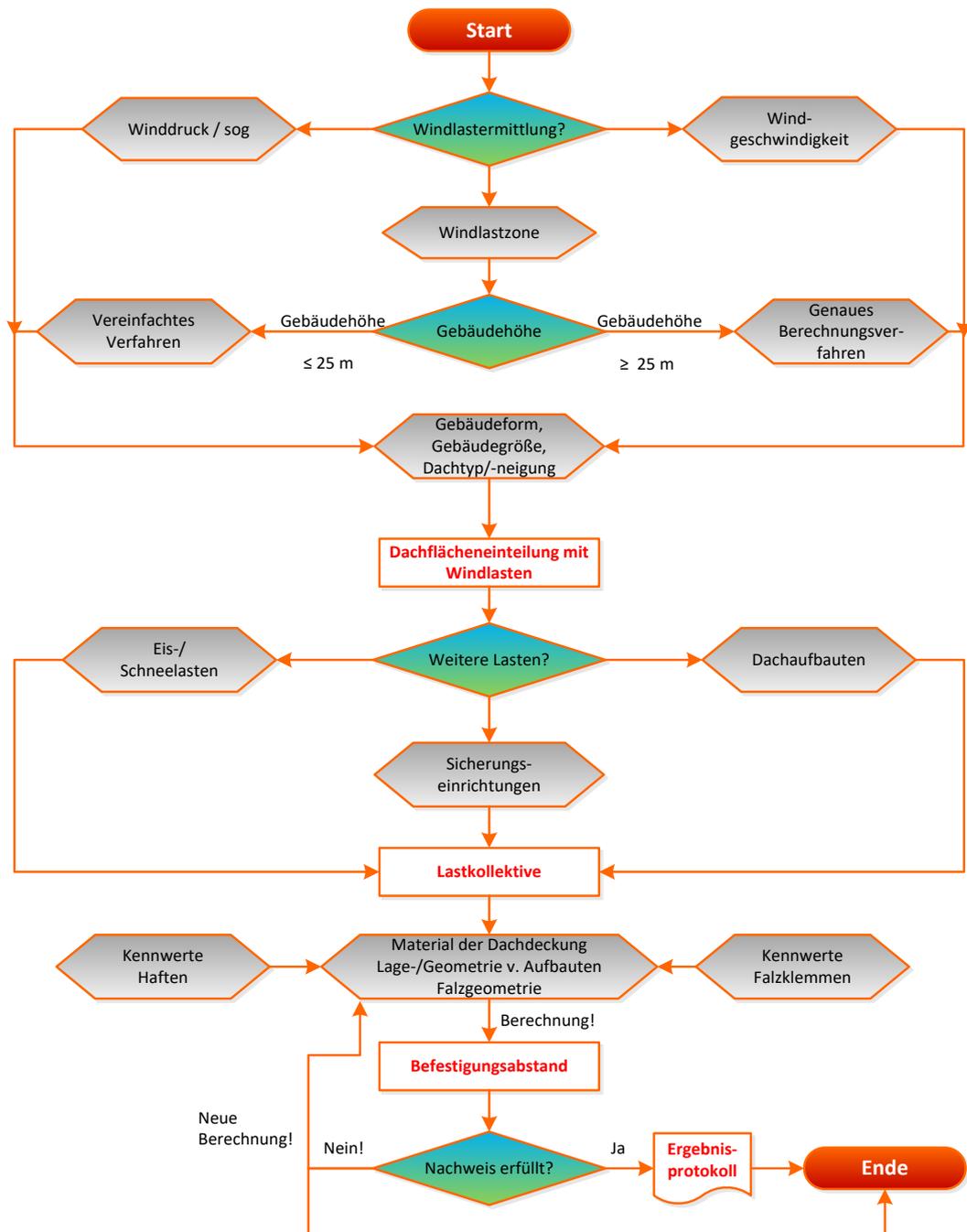


Bild 88:
Schema der Bemessung.

4.2 Einwirkungen

Die Einwirkungen auf die Befestigungen von Doppelstehfalzdächern setzen sich zusammen aus:

- ständigen Lasten,
- veränderlichen Lasten und
- außergewöhnlichen Lasten.

Zu den ständigen Lasten zählen:

- Eigenlast
 - aus der Konstruktion
 - ggf. Zusatzlasten aus Anbauteilen (Eigengewicht) wie z.B.
 - * Schneefangeinrichtungen,
 - * Sicherheitseinrichtung zur Personensicherung (z.B. Sicherungspunkte, Umwehungen usw.)
 - * Trittstufen, Podeste und Leitern
 - * Technische Gebäudeausrüstung (z.B. PV-Module, Warmwasserkollektoren usw.)

Zu den veränderlichen Lasten zählen:

- Windlasten
- Schnee- und Eislasten
- Zusatzlasten z.B. aus Sicherungspunkten, Werbeschildern, Umwehungen
- Vertikale und horizontale Nutzlasten (Mannlasten)
- Lasten aus Temperatureinwirkungen
- Dynamische Lasten z.B. aus Fahrwegen von Fassadenbefahranlagen oder anderen beweglichen Dachaufbauten
- Lasten durch schwingungsanfällige Bauteile oder Bauwerke

Zu den außergewöhnlichen Lasten zählen:

- Lasten durch Brandeinwirkung
- Lasten durch Erdbebeneinwirkungen
- Einwirkungen aus Anprall, Einbruchversuchen, Beschuss, Sprengwirkung, etc.

Die zu berücksichtigenden Lasten ergeben sich aus:

- Eurocode 1 – DIN EN 1991-1-1 – Eigenlasten, Nutzlasten
- Eurocode 1 – DIN EN 1991-1-3 – Schneelasten
- Eurocode 1 – DIN EN 1991-1-4 – Windlasten
- Eurocode 1 – DIN EN 1991-1-5 – Temperatureinwirkungen (wurde bislang in Deutschland noch nicht bauaufsichtlich eingeführt)

und deren nationale Anhängen

Sondereinwirkungen ergeben sich aus:

- ETB-Richtlinie „Bauteile, die gegen Absturz sichern“
- Eurocode 8 – DIN EN 1998-1 – seismische Lasten (und nationaler Anhang)

4.2.1 Eigenlasten

Eigenlasten der Dachkonstruktion setzen sich zusammen aus der Flächenlast der Dacheindeckung, etwaigen Vordeckungen und der Tragkonstruktion selbst. Des Weiteren kann es zu einer Erhöhung der Eigenlast durch Auflasten von z.B. Kiesschüttungen, Gehwegplatten, Ausgleichs-/Schutzschichten oder Substraten für die Dachbegrünung inkl. der Bepflanzung kommen. Für die Bemessung der Haften dürfen lediglich die Lasten oberhalb der Hafte angesetzt werden, da nur diese entlastend wirken können.

Daneben sind bei der Eigenlast unter Umständen auch noch Lasten aus Dachaufbauten wie z.B. Solaranlagen zu beachten, die in der Regel als punktuelle Einzellasten über die Aufständereien in die Dachkonstruktion eingeleitet werden und daher nicht auf der gesamten Dachfläche zur Lagesicherung beitragen können.

Das Eigengewicht der Dachhaut ist abhängig vom verwendeten Deckungsmaterial und der Materialdicke. Die Eigengewichte sind als ständige Einwirkung zu berücksichtigen. Die hierfür ansetzbaren Lasten ergeben sich aus DIN EN 1991-1-1:2010-12, Tab. A.4 [4], und sind in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26:
Übersicht Deckungsmaterial

Deckungsmaterial	Wichte γ in kN/m ³
Aluminium	27,0
Kupfer	87,0 bis 89,0
Stahl (auch nichtrostender Stahl)	77,0 bis 78,5
Titanzink	72,0 ¹⁾
Blei	112,0 bis 114,0

¹⁾ Herstellerangabe

Weitere Flächenlasten können aus DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12; Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Tab. NA.A.18 und NA.A.27 [5] entnommen werden und sind in Tabelle 27 zu sehen.

Tabelle 27:
Weitere Flächenlasten.

Gegenstand	Flächenlast kN/m ²
Gummi, lose verlegt, je cm Dicke	0,15
Bautenschutzmatte, PU-Kautschuk, lose verlegt, je cm Dicke	0,072 ²⁾
Kiesschüttung, Dicke 5 cm	1,0
Betonwerksteinplatte je cm Dicke	0,24
Dünnschichtige Extensivbegrünung mit Sedum	0,5 bis 1,0 ²⁾
Extensivbegrünung mit Stauden und Gräsern	1,0 bis 1,5 ²⁾
Einfache Intensivbegrünung	1,5 bis 3,0 ²⁾
Intensivbegrünung mit Rasen und Stauden	3,0 bis 5,0 ²⁾
Intensivbegrünung mit Sträuchern und Bäumen	5,0 bis >10 ²⁾

²⁾ Herstellerangaben

Windlasten

Eine der Haupteinwirkungen auf Metaldächer und deren Befestigung sind die Windlasten. Die tatsächliche, am Bauwerk wirkende Windlast wird durch verschiedene Faktoren bestimmt:

- Geographische Lage (Standort, Höhe über dem Meeresspiegel (Höhe über Normalhöhenull (ü. NHN))
- Gebäudegeometrie (Länge, Breite, Tiefe, Höhe und Dachneigung/-form)
- Geländeart/-kategorie

In den Bereichen von Giebel, Traufe und First, den sogenannte Randzonen, ist die Belastung durch Windlasten i.d.R. höher als auf den innen liegenden Flächen eines Daches. Die relevanten Normen zur Berechnung von Windlasten sind zu berücksichtigen. [8]

In Europa ist hierfür die DIN EN 1991-1-4:2010-12 [8] maßgebend, in Deutschland ist zusätzlich die DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 [7] zu berücksichtigen.

I. Windlastzonen

Gemäß der DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 [7] ist Deutschland in vier Windlastzonen eingeteilt. Aus der Windlastzonenkarte ist die Einteilung der Zonen in Deutschland ersichtlich.

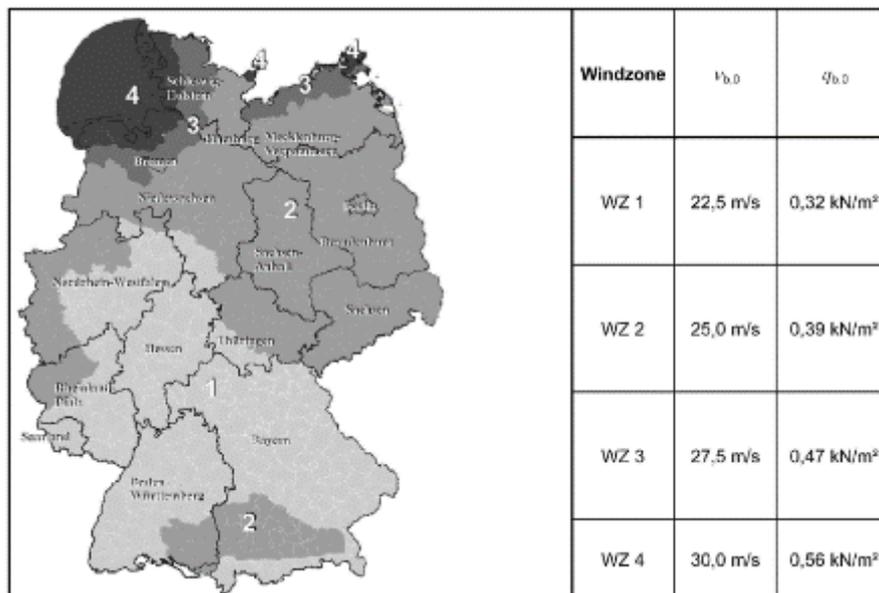


Bild 89:
Windlastkarte für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland

Aus der Legende der Windlastzonenkarte in Bild 89 kann die Basisgeschwindigkeit $v_{b,0}$, und der Basisgeschwindigkeitsdruck $q_{b,0}$ für das betreffende Gebiet entnommen werden.

II. Aerodynamischer Beiwert

Windlasten wirken nicht gleichmäßig auf alle Bereiche der Dachfläche ein. Je nach Dachform entstehen an Gebäudekanten Luftströmungen, die insbesondere in Rand- und Eckbereichen des Daches zu Sogwirkungen führen. In anderen Teilbereichen des Daches können die Luftströmungen zu Staudrücken oder Sogwirkungen führen.

Entscheidend für die Sog- oder Druckwirkung der Luftströmung ist die Anströmrichtung des Windes und die Dachform sowie die Dachneigung. Während auf der windzugewandten Luvseite der Dachfläche sowohl Staudruck als auch Windsog entstehen kann, bildet sich an der windabgewandten Leeseite der Dachfläche in der Regel ein Unterdruck aus. Für die Berechnung werden Dächer daher je nach Bauform in einzelne Bereiche eingeteilt und der Basisgeschwindigkeitsdruck $q_{b,0}$ mit einem aerodynamischen Beiwert für die jeweilige Teilfläche des Daches multipliziert. Die Windlast w_e in kN/m² berechnet sich nach:

$$w_e = q_{p,0} \cdot c_p \quad (4.1)$$

$q_{p,0}$ = Basisgeschwindigkeitsdruck in kN/m²
 c_p = aerodynamische Beiwert in 1

Die aerodynamischen Beiwerte können aus den Tabellen 7.2 bis 7.5 der DIN EN 1991-1-4:2010-12 [8] entnommen werden. Die Wirkrichtung der Windlasten ergibt sich aus den Vorzeichen. Positive Werte kennzeichnen Winddrucklasten und negative Werte entsprechen Windsoglasten. Hat ein Gebäude keine geschlossene Hüllfläche oder handelt es sich um ein freistehendes Dach, entsteht im Gebäude/unter dem Dach ein Innendruck, der von unten auf das Dach wirkt (vgl. [8], S. 52 ff.). Sofern keine geschlossene Unterlage vorhanden ist, die den Druckaufbau unter der Dachdeckung verhindert, ist der Innendruck bei der Dimensionierung der Haften zu berücksichtigen. Als geschlossene Unterlagen gelten:

- Holzschalungen mit Unterdeckungen/Unterdach
- Schalungen aus Holzwerkstoffplatten (z.B. OSB)
- Verfalzte Unterdeckplatten (z.B. aus WF, MDF oder PUR)
- Dachräume und Dachüberstände, die von der Unterseite mit verspachtelten Platten oder dichtschießenden Schalungen verkleidet sind (z.B. Gipskartonplatten oder Profilbrettschalungen)

Schneelasten

Schneelasten sind bezüglich der Bemessung von Haften insbesondere bezüglich ihrer parallel zur Dachfläche wirkenden Hangabtriebskraft (Normalkraft in der Schar) zu berücksichtigen, da die Festhaften diese Kräfte an die Unterkonstruktion weiterleiten müssen. In Europa ist für die Ermittlung der Schneelasten die DIN EN 1991-1-3:2010-12 [6] maßgebend, in Deutschland ist zusätzlich die DIN EN 1991-1-3/NA:2019-04 [17] zu berücksichtigen. Im Eurocode 1 wird zwischen ständigen und außergewöhnlichen Bemessungssituationen unterschieden, dabei sind Schneelasten als veränderliche, ortsfeste Einwirkungen zu behandeln (vgl. [17], S. 10). Die zu erwartende Schneelast hängt maßgeblich von der geografischen Lage und der Höhe über dem mittleren Meeresspiegel (Höhe über Normalhöhenull (ü. NHN)) ab. Die Schneelast wird abhängig vom Gebäudestandort über die Schneelastzonenkarte aus [17] ermittelt. Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) stellt auf seiner Website zudem eine Excel-Tabelle zur Verfügung, mit der die Schneelastzone für einen Standort in Deutschland ermittelt werden kann.

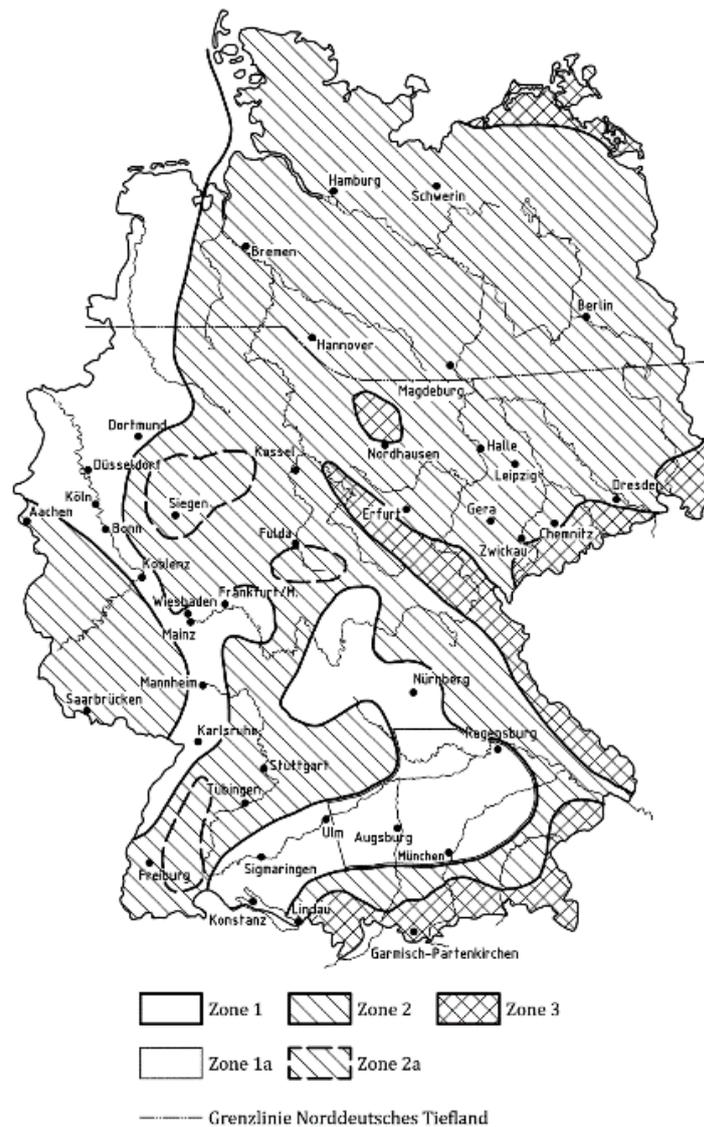


Bild 90:
Schneelastzonen aus der DIN EN 1991-1-3/NA:2019-04 [17].

Bis zu den jeweils angegebenen Höhen über Normalhöhenull (ü. NHN) werden die folgenden Schneelasten angesetzt:

- Zone 1 $s_k = 0,65 \text{ kN/m}^2$ (bis 400 m ü. NHN)
- Zone 1a $s_k = 0,81 \text{ kN/m}^2$ (bis 400 m ü. NHN)
- Zone 2 $s_k = 0,85 \text{ kN/m}^2$ (bis 285 m ü. NHN)
- Zone 2a $s_k = 1,06 \text{ kN/m}^2$ (bis 285 m ü. NHN)
- Zone 3 $s_k = 1,10 \text{ kN/m}^2$ (bis 255 m ü. NHN)

Für Gebäudestandorte oberhalb der angegebenen Höhe ü. NHN errechnet sich die charakteristischen Schneelast s_k in kN/m^2 nach EN 1991-1-3/NA:2019-04 [17] wie folgt:

$$\text{Zone 1 } s_k = 0,19 + 0,91 \cdot [(A + 140) / 760]^2 \geq 400 \text{ m ü. NHN} \quad (4-2)$$

$$\text{Zone 1a } s_k = 0,19 + 0,91 \cdot [(A + 140) / 760]^2 \cdot 1,25 \geq 400 \text{ m ü. NHN} \quad (4-3)$$

$$\text{Zone 2 } s_k = 0,25 + 1,91 \cdot [(A + 140) / 760]^2 \geq 285 \text{ m ü. NHN} \quad (4-4)$$

$$\text{Zone 2a } s_k = 0,25 + 1,91 \cdot [(A + 140) / 760]^2 \cdot 1,25 \geq 285 \text{ m ü. NHN} \quad (4-5)$$

$$\text{Zone 3 } s_k = 0,31 + 2,91 \cdot [(A + 140) / 760]^2 \geq 255 \text{ m ü. NHN} \quad (4-6)$$

A = Höhen (eng. Altitude) über Normalhöhenull (ü. NHN) in m

Die Schneelast s in kN/m^2 auf Dächern berechnet sich nach:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (4-7)$$

μ_i = Formbeiwert für Schneelasten

C_e = Umgebungskoeffizient (gem. DIN EN 1991-1-1/NA:2019-04 ist $C_e = 1,0$)

C_t = Temperaturbeiwert (gem. DIN EN 1991-1-1/NA:2019-04 ist $C_t = 1,0$)

s_k = charakteristischer Wert der Schneelast in kN/m^2

In außergewöhnlichen Bemessungssituationen ist zusätzlich der Beiwert C_{esi} zu berücksichtigen. Dieser ist gemäß DIN EN 1991-1-1/NA:2019-04 [17] für die norddeutsche Tiefebene mit $C_{esi} = 2,3$ anzusetzen.

Die Schneelast s in kN/m^2 auf Dächern berechnet sich dann nach:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot C_{esi} \cdot s_k \quad (4-8)$$

μ_i = Formbeiwert für Schneelasten

C_e = Umgebungskoeffizient (gem. DIN EN 1991-1-1/NA:2019-04 ist $C_e = 1,0$)

C_t = Temperaturbeiwert (gem. DIN EN 1991-1-1/NA:2019-04 ist $C_t = 1,0$)

C_{esi} = außergewöhnliche Bemessungssituation/Schneelasten
(gem. DIN EN 1991-1-1/NA:2019-04 ist $C_{esi} = 2,3$)

s_k = charakteristischer Wert der Schneelast in kN/m^2

Die Dachform, die Dachneigung und die Verteilung des Schnees auf dem Dach fließen über den Formbeiwert μ_i in die Schneelastbemessung ein. Hierzu sind die Kapitel 5 der DIN EN 1991-1-3 [6] und DIN EN 1991-1-3/NA [17] zu beachten. Bei Vorhandensein von Schneefangsystemen oder Dachaufbauten, die ein Abrutschen des Schnees verhindern, sollte der Formbeiwert aber nicht unter 0,8 liegen (vgl. DIN EN 1991-1-3 Kap. 5.3.2 Abs. 2 [6]). Für statische Berechnungen sind zwei Lastanordnungen gemäß DIN EN 1991-1-3 Kap. 5.2 [6] zu berücksichtigen. Dies sind:

- unverwehte Schneelast auf dem Dach
- verwehte Schneelast auf dem Dach

Nutzlasten

I. Mannlasten

Nutzlasten auf Dächern werden in der DIN EN 1991-1-1:2010-12 [4] sowie im nationalen Anhang DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12 [5] geregelt. Die Lasten richten sich dabei nach den Nutzungsmerkmalen der Dächer. Hierbei werden Dächer in zugängliche (Kategorie H) und nicht zugängliche Dächer (Kategorie I) eingeteilt (siehe Tabelle 28). Außerdem gibt es noch die Kategorie K für zugängliche Dächer mit besonderer Nutzung wie z.B. Hubschrauberlandeplätze. Diese wird hier nicht weiter betrachtet.

Tabelle 28:
Nutzlasten

Kategorie	Nutzung	Q_k in kN
H	nicht begehbare Dächer, außer für übliche Erhaltungsmaßnahmen, Reparaturen	1,0 ³⁾
I	zugängliche Dächer mit Nutzung nach den Nutzungskategorien A bis G	abhängig von der Nutzung ⁴⁾

³⁾ Eine Überlagerung der Einwirkungen mit den Schneelasten ist nicht erforderlich, unabhängig davon, ob die Schneelast oder die Last der Kategorie H die Leiteinwirkung ist.

⁴⁾ DIN EN 1991-1-1:2010-12 [4] Tabelle 6.2

Flächen von Begehungsstegen, die ausschließlich Rettungswege darstellen, sind mit $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$ zu belasten.

II. Umwehrungen

Bei Verkehrswegen auf Dächern (zugängliche Dächer mit Nutzung (Kategorie I)), die mehr als einen Meter über dem angrenzenden Gelände liegen (in Bayern 0,5 m) sind Umwehrungen zu montieren, die ein Abstürzen von Personen verhindern und die Verkehrssicherheit gewährleisten. Diese müssen so am Dach befestigt werden, dass die horizontalen Nutzlasten (Holmlasten) in Abhängigkeit von der Nutzung abgetragen werden können. Die statischen Ersatzlasten ergeben sich aus DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12, Tabelle 6.12DE [5].

- Bereiche mit geringer Menschenansammlung (A, B1, H, ...) 0,5 kN/m (z.B. Wohnhäuser, Schlafräume, Abteilungen in Krankenhäusern)
- Öffentl. Gebäude, Versammlungsstätten (B2, B3, C1-C4, ...) 1,0 kN/m (z.B. Versammlungs-, Schul-, Ausstellungs-, Verkaufsräume)

- Große Menschenansammlungen (C5, C6, T3) 2,0 kN/m
(z.B. Stadien, Theater, Veranstaltungshallen)

Diese Lasten sind in Absturzrichtung in voller Höhe und in der Gegenrichtung mit 50% jedoch mindestens 0,5 kN/m anzusetzen. Kräfte aus Wind und horizontalen Nutzlasten sind für den Nachweis der Tragsicherheit mit Kombinationsbeiwerten zu überlagern. Über die Geländer Konstruktion und die Verankerungsmittel sind die Einwirkungen sicher in den Baukörper abzuführen.

III. Sicherungspunkte

Für Arbeiten auf dem Dach, bei denen ein Abstürzen von Personen aus mehr als 3 m Absturzhöhe möglich ist, sind Sicherheitsvorrichtungen zu installieren, die einen kollektiven (z.B. Geländer) oder einen individuellen Schutz (z.B. Sicherungspunkte für eine persönliche Schutzvorrichtung gegen Absturz (PSAgA)) bieten. Die Verpflichtung zur Bereitstellung von derartigen Einrichtungen ergibt sich aus dem Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) § 3 Grundpflichten des Arbeitgebers (Abs. 1) „Der Arbeitgeber ist verpflichtet, die erforderlichen Maßnahmen des Arbeitsschutzes unter Berücksichtigung der Umstände zu treffen, die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten bei der Arbeit beeinflussen. ...“ [1]

Die Anforderungen an die Anschlagpunkte ergeben sich aus der DIN 4426:2017-01 - Einrichtungen zur Instandhaltung baulicher Anlagen – Sicherheitstechnische Anforderungen an Arbeitsplätze- und Verkehrswege Planung und Ausführung, Kap. 4.5 [15].

Hier werden Anforderungen an Anschlag-/Befestigungspunkte definiert. Danach müssen Anschlagpunkte und deren Befestigungen dauerhaft am Bauwerk befestigt sein. Der Nachweis muss erfolgen auf Basis von:

- harmonisierten Europäischen Normen oder
- europäischen technischen Zulassungen oder
- allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen oder
- technischen Baubestimmungen.

Hieraus ergibt sich eine Nachweiskette, die bei einem Anschlag-/Befestigungspunkt auf einem Doppelstehfalzdach wie folgt aussieht:

- Dachstuhl (Sparren/Pfette)
- Schalung inkl. Befestigungsmittel
- Haften inkl. Befestigungsmittel

- Dacheindeckung/Doppelstehfalzdach
- Falzklemme/Grundplatte/Traverse inkl. Befestigungsmittel
- Anschlag-/Befestigungspunkt inkl. Befestigungsmittel

Alle Glieder dieser Nachweiskette sind entweder geregelte Bauprodukte mit definierten statischen Eigenschaften oder besitzen einen anderen Verwendbarkeitsnachweis.

In DIN 4426:2017-01, Kap. 4.5 [15] heißt es: „Für das Anschlagen bzw. Befestigen von PSAgA an einer baulichen Anlage (Bauwerk oder Teile einer baulichen Anlage, z. B. Geländer oder Balken) ist für deren Nachweis und die Weiterleitung der Lasten in das Bauwerk, eine charakteristische Last $N_{F,k}$ für Einzelanschlagpunkte von mindestens 6 kN (statische Ersatzlast mit Berücksichtigung dynamischer Effekte) für eine Person planmäßig anzusetzen. Für jede weitere Person ist eine Erhöhung um 1 kN pro Person anzusetzen. Dabei ist ein Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_F = 1,5$ zu berücksichtigen.“

Der Bemessungswert der Einwirkung $N_{F,d}$ in kN berechnet sich danach wie folgt:

$$\text{für eine Person} \quad N_{F,d} = N_{F,k} \cdot \gamma_F = 6 \text{ kN} \cdot 1,5 = 9 \text{ kN} \quad (4-9)$$

$$\text{für zwei Personen} \quad N_{F,d} = N_{F,k} \cdot \gamma_F = (6 + 1) \text{ kN} \cdot 1,5 = 10,5 \text{ kN} \quad (4-10)$$

$$\text{für drei Personen} \quad N_{F,d} = N_{F,k} \cdot \gamma_F = (6 + 2) \text{ kN} \cdot 1,5 = 12 \text{ kN} \quad (4-11)$$

usw.

In DIN 4426:2017-01, Kap. 4.5 [15] heißt es weiter: „Für Seil- und Schienensysteme gelten abweichend die entsprechenden systembedingten Endverankerungskräfte an der baulichen Anlage, die im Einzelfall zu ermitteln sind.“ Hierzu ist unter anderem die folgende Norm zu beachten: DIN EN 795:2012-10; Persönliche Absturzschnitzrüstung - Anschlagleinrichtungen; Deutsche Fassung EN 795:2012 [12].

4.3 Bemessungssituationen

Bei der Bemessung von Dachkonstruktionen wird zwischen den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT) und den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (GZG) unterschieden:

Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT)

Die Grenzzustände der Tragfähigkeit beinhalten alle Grenzzustände, die die Sicherheit von Personen und/oder die Sicherheit des Tragwerks betreffen. Dies sind beispielsweise:

- Verlust der Lagesicherheit des Daches oder eines Teils (z.B. Dacheindeckung)
- Bruch durch Überlastung eines Bauteils oder eine instabile Lage des Daches durch übermäßige Verformung oder Ermüdung eines Teils

Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit beinhalten die Grenzzustände, die die Funktion des Daches oder eines seiner Teile unter normalen Gebrauchsbedingungen sowie das Erscheinungsbild oder das Wohlbefinden der Nutzer betreffen. Dies sind beispielsweise:

- Verformungen
- Verschiebungen
- Schwingungen

Bei Überschreiten der definierten zulässigen Veränderungen kann dies bei der Dachkonstruktion zu Leistungseinbußen bzw. optischen Mängeln führen oder bei den Nutzern Unbehagen hervorrufen.

Die Untersuchungen in diesem Bericht haben gezeigt, dass Verformungen der Dachdeckung und der Befestigungspunkte bis zu den folgenden Grenzen als unkritisch angesehen werden können:

Durchbiegungen der Stehfälze
zwischen den Auflagerpunkten (Mitte Hafte) $f \leq l_0/200$

Anmerkung:

Die Verformung des Scharbodens zwischen den Stehfälzen ist nicht limitiert.

Bleibende plastische Verformungen

der Auflager (Haften)

$$f \leq 3\text{mm}$$

Anmerkung:

Bei den plastischen Verformungen der Haften in verbautem Zustand (in Schar eingefalzt) muss die Funktion (z.B. Gleiten der Schiebehaften) voll erhalten bleiben. Dies ist über einen Schiebeversuch der verformten Haften inkl. Schar mit

einer Normalkraft von $N = 50 \text{ N}$ je Haftpunkte (Axial in Richtung des Stehfalzes) in beide Richtungen an drei Probekörpern nachzuweisen. Dabei darf der Arbeitsweg des Gleitpunktes gegenüber dem unverformten Neuzustand nicht eingeschränkt sein. Hierzu wird ein Probekörper gemäß Kap. 2.1.2.3 Bild 32 mit der ermittelten max. charakteristischen Last F (3,0 mm) je Haftpunkte senkrecht zur Dachendeckung mittig belastet und wieder entlastet. Anschließend wird die Funktion (Gleiten der Schiebehafte) mit einer Federwaage in Gleitrichtung überprüft ($F \leq 100 \text{ N}$ (50 N je Haftpunkte)).

4.4 Nachweis

Die Nachweisverfahren der Eurocodes beruhen auf dem Konzept der Gegenüberstellung von Einwirkungen E zu Widerständen R . Hierbei wird im Falle des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit (GZG) ohne und im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) mit Teilsicherheitsbeiwerten γ bei den Einwirkungen E und den Beanspruchbarkeiten R gearbeitet. Durch die Teilsicherheitsbeiwerte γ_M beim Material werden die Beanspruchbarkeit des Materials R_k abgemindert und durch die Teilsicherheitsbeiwerte γ_F die charakteristische Einwirkungen E_k erhöht. Bei Holz wird zusätzlich durch den Beiwert k_{mod} das Umgebungsklima und die Dauer der Lasteinwirkung beim Material berücksichtigt. Für die beiden Grenzzustände muss gelten:

$$E_d \leq \frac{R_k}{\gamma_m} \cdot k_{mod} \quad (4-12)$$

E_d = $E_k \cdot \gamma_F$ Bemessungswert der Einwirkung
 R_k charakteristischer Wert des Materialwiderstands
 γ_m Teilsicherheitsbeiwert des Materials
 k_{mod} Beiwert zur Berücksichtigung von Klimaeinflüssen und Dauer der Lasteinwirkung bei Holz

4.5 Lastfälle nach Eurocode 1 (EC 1)

Ständige Einwirkungen auf ein Tragwerk treten meistens in Kombinationen mit anderen veränderlichen Einwirkungen auf. Die verschiedenen Einwirkungen (Eigenlasten, Windlasten, Schneelasten, Temperatureinwirkungen, Nutzlasten, usw.) müssen in unterschiedlichen Kombinationen unter Berücksichtigung der Auftretenswahrscheinlichkeiten auf die Dachkonstruktion angesetzt werden.

Die gewählten Bemessungssituationen müssen alle Bedingungen, die während der Ausführung und Nutzung des Tragwerks zu erwarten sind, berücksichtigen. Da nicht alle Einwirkungen zur gleichen Zeit in voller Höhe zu erwarten sind, sofern diese nicht miteinander korrelieren, wird durch Kombinationsbeiwerte ψ_i die Wahrscheinlichkeit des Auftretens berücksichtigt. Die jeweils anzusetzenden Kombinationsbeiwerte sind DIN EN 1990 [3] und dem zugehörigen nationalen Anhang [11] zu entnehmen.

Unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte γ_F und der Kombinationsbeiwerte ψ_i ergibt sich für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) die folgende Grundkombination:

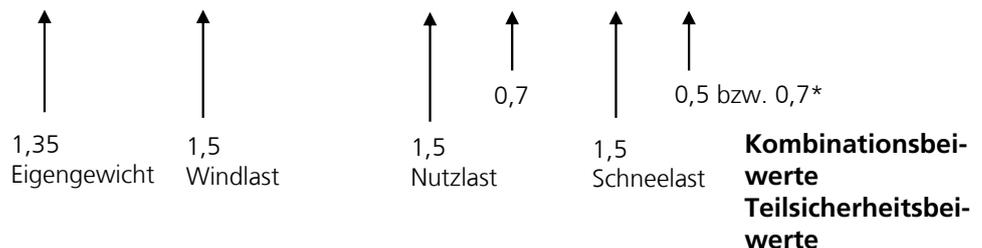
a. Grundkombination der Einwirkungen E_d

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_P \cdot P_k \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{Q,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (4-13)$$

- E Bemessungswert der Beanspruchung
- $\gamma_{G,j}$ Teilsicherheitsbeiwert der ständigen Einwirkung (Eigengewicht)
- $\gamma_{P,j}$ Teilsicherheitsbeiwert der ständigen Einwirkung (Vorspannung)
- $\gamma_{Q,1}$ Teilsicherheitsbeiwert der ersten unabhängigen veränderlichen Einwirkung
- $\gamma_{Q,i}$ Teilsicherheitsbeiwert der weiteren unabhängige veränderlichen Einwirkungen
- $G_{k,j}$ charakteristischerer Wert der ständigen Einwirkung
- P_k charakteristischerer Wert der Vorspannung
- $Q_{k,1}$ charakteristischerer Wert der ersten unabhängigen veränderlichen Einwirkung
- $Q_{k,i}$ charakteristischerer Wert der weiteren unabhängigen veränderlichen Einwirkungen
- ψ_0, ψ_1, ψ_2 Kombinationsbeiwert für seltene, häufige und quasi-ständige veränderliche Einwirkungen
- \oplus ist zu kombinieren mit

b. Lastfälle für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) für Haften

$$E_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \gamma_{Q,2} \cdot \psi_{1,Q,2} \cdot Q_{k,2} + \gamma_{Q,3} \cdot \psi_{1,Q,3} \cdot Q_k \quad (4-14)$$



* Orte über NHN +1000 m

Fall 1: Schubkräfte, Festhafte, Tragfähigkeit (GZT)

Tabelle 29:

Lastfallkombinationen – Schubkräfte – (GZT).

LF	kombinierte Einwirkungen	$\gamma_G \cdot G_k$	$\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,2} \cdot \psi_{0,Q,2} \cdot Q_{k,2}$	E_d
1	G II	$1,35 \cdot g_k$			
2	G II + S II	$1,35 \cdot g_k$	$1,5 \cdot s_k$		
3	G II + S II + N II	$1,35 \cdot g_k$	$1,5 \cdot s_k$	$1,5 \cdot 0,7 \cdot N_{F,k}$	
4a	G II + N II + S II	$1,35 \cdot g_k$	$1,5 \cdot N_{F,k}$	$1,5 \cdot 0,5 \cdot s_k$	
4b	G II + N II + S II*	$1,35 \cdot g_k$	$1,5 \cdot N_{F,k}$	$1,5 \cdot 0,7^* \cdot s_k$	

* Orte über NHN +1000 m

Fall 2: Abhebende Kräfte, Fest- und Loshafte sowie Schar Tragfähigkeit (GZT)

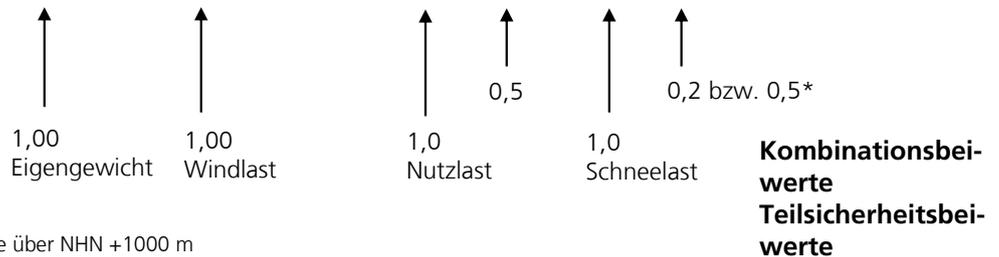
Tabelle 30:

Lastfallkombinationen – Abhebende Kräfte – (GZT).

LF	kombinierte Einwirkungen	$\gamma_G \cdot G_k$	$\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,2} \cdot \psi_{0,Q,2} \cdot Q_{k,2}$	E_d
5	G \perp + W(S)	$0,9 \cdot g_k$	$1,5 \cdot w_{S,k}$		
6a	G \perp + W(S) + N \perp	$0,9 \cdot g_k$	$1,5 \cdot w_{S,k}$	$1,5 \cdot 0,7 \cdot N_{F,k}$	
6b	G \perp + N \perp + W(S)	$0,9 \cdot g_k$	$1,5 \cdot N_{F,k}$	$1,5 \cdot 0,6 \cdot w_{S,k}$	

c. Lastfälle für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) für Haften

$$E_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \gamma_{Q,2} \cdot \psi_{1,Q,2} \cdot Q_{k,2} + \gamma_{Q,3} \cdot \psi_{1,Q,3} \cdot Q_{k,3} \quad (4-15)$$



Abhebende Kräfte, Dacheindeckung, Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Tabelle 31:
Lastfallkombinationen – Abhebende Kräfte – (GZG).

LF	kombinierte Einwirkungen	$\gamma_G \cdot G_k$	$\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,2} \cdot \psi_{0,Q,2} \cdot Q_{k,2}$	E_d
5	G \perp + W(S)	1,0 · g _k	1,0 · w _{S,k}		
6a	G \perp + W(S) + N \perp	1,0 · g _k	1,0 · w _{S,k}	1,0 · 0,5 · N _{F,k}	
6b	G \perp + N \perp + W(S)	1,0 · g _k	1,0 · N _{F,k}	1,0 · 0,2 · w _{S,k}	

4.6 Ermittlung der Querschnittswiderstände

Anschlagpunkte und deren Befestigungen müssen dauerhaft am Bauwerk befestigt sein. Sofern die Befestigung über Falzklemmen auf Stehfälzen erfolgen soll, welche mit Haften an der Unterkonstruktion der Dachkonstruktion befestigt sind, ist ein Nachweis erforderlich, der auf einem der folgenden Nachweisverfahren beruht:

- harmonisierten Europäischen Normen oder
- europäischen technischen Zulassungen oder
- allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen oder
- technischen Baubestimmungen

Hieraus ergibt sich eine Nachweiskette, die bei einem Anschlag-/Befestigungspunkt auf einem Doppelstehfalzdach wie folgt aussieht:

- Dachstuhl (Sparren/Pfette)
- Schalung inkl. Befestigungsmittel
- Haften inkl. Befestigungsmittel
- Dacheindeckung/Doppelstehfalzdach
- Falzklemme/Grundplatte/Traverse inkl. Befestigungsmittel
- Anschlag-/Befestigungspunkt inkl. Befestigungsmittel

Haften

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die Haften weit vor dem Erreichen der maximalen Tragfähigkeit erhebliche plastische Verformungen zeigen. Das Niveau der Verformungen ist von der Bauart der Haften abhängig. Die Verformungen stehen im Zusammenhang mit der Profilierung und Materialstärke sowie der Bauform (Los-/Festhafte). Um eine höhere Tragfähigkeit der Haften zu ermöglichen, ist eine plastische Verformung der Haften zu tolerieren. Das Gebrauchstauglichkeitskriterium für die zul. Verformung ist so festzulegen, dass die Funktion der Haften nicht beeinträchtigt ist und kein Materialversagen bei statischen oder schwingenden Belastungen während der zu erwartenden Nutzungsdauer auftritt. Aus den Versuchsergebnissen können folgende Anforderungen abgeleitet werden:

- zulässige plastische Verformung in Belastungsrichtung der Hafte nach Entlastung max. 3 mm. Auswertungsverfahren wie unter Kap. 3.1 beschrieben (Regressionsgerade im elastischen Bereich, parallel Verschiebung der Regressionsgerade zu einer bleibenden Verformung von 3 mm, Schnittpunkt mit Messkurve ist zul. Belastung, sofern die weiteren Bedingungen eingehalten werden).
- kein Materialversagen bei Erreichen der Verformung (rissfrei, kein Aufbiegen von Verbindungen, kein Durchziehen oder Lochleibungsversagen an Befestigungsmitteln, ...).
- Schnittpunkt mit Messkurve liegt vor dem Maximum.
- keine Einschränkung der Funktion (z.B. ungehindertes Gleiten der Loshaften).

Anmerkung:

Bei den plastischen Verformungen der Haften in verbautem Zustand (in Schar eingefalzt) muss die Funktion (z.B. Gleiten der Schiebehaften) voll erhalten bleiben. Dies ist über einen Schiebeversuch der verformten Haften inkl. Schar mit einer Normalkraft von $N = 50 \text{ N}$ je Haft (Axial in Richtung des Stehfalzes) in beide Richtungen nachzuweisen. Dabei darf der Arbeitsweg des Gleitpunktes gegenüber dem unverformten Neuzustand nicht eingeschränkt sein. (vgl. Kap. 4.3, GZG – Anmerkung)

- Bestätigung der ermittelten max. zulässigen Tragfähigkeit (nur Zugversuch) in Dauerschwingversuchen in Anlehnung an ETAG 006 [19], wie in diesem Bericht dargelegt an mindestens 5 Probekörpern (100% Annahmezahl/keine Rückweisung).

- Die in der Stichprobe ermittelten Werte der Zug- und Schubfestigkeit sind als 5%-Quantilwert mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 75% zu bestimmen und im Untersuchungsbericht anzugeben.

Die so ermittelten Kennwerte der Zug- und Schubfestigkeit können als charakteristische Tragfähigkeiten verwendet werden.

Scharen

Doppelstehfalzdächer werden i.d.R. auf Holzschalungen oder Holzwerkstoffplatten mit Haften in regelmäßigen Abständen befestigt. Durch die durchgängige Unterdeckung können sie sich nur nach oben verformen. Als statisches Modell für die Bemessung bietet sich ein Durchlaufträger bzw. eine einachsige gespannte Platte mit Unterzügen unter Gleichstreckenlast an. Die dünnen Bleche quer zum Stehfalz weisen nur eine sehr geringe mittragende Breite auf. Die Auflager werden durch die Haften gebildet. Die Stehfalze entsprechen den „Unterzügen“ bei einer Stahlbetondecke (Bemessungsmodell vgl. Schneider; Bautabellen für Ingenieure, 4.102, 2016 [23])) Daraus folgt, dass nach der klassischen Balkentheorie gerechnet werden kann. Die Tragfähigkeit wird durch den Doppelstehfalz bestimmt, der aus verfalzten Blechen gebildet wird. Neben den aus Eigengewicht, Wind- und Schneelasten resultierenden Flächenlasten, die sich in Gleichstreckenlasten umrechnen lassen, kommt es durch die auf den Doppelstehfalzen befestigten Klemmen auch noch zu einer Überlagerung mit Einzellasten. Hieraus resultierende Biegemomente und Durchbiegungen lassen sich auf Grundlage der technischen Biegetheorie berechnen. Für die Verformung wird nach dem Hook'schen Gesetz ein linear-elastisches Verhalten der Dacheindeckungswerkstoffe angenommen.

Flächenträgheitsmoment I_y Widerstandsmoment W_y von Doppelstehfalten

Die Tragfähigkeit von Doppelstehfalten wird durch die statischen Kenngrößen Flächenträgheitsmoment I_y , Widerstandsmoment W_y und das E -Modul des Werkstoffs beschrieben. Flächenträgheitsmoment und Widerstandsmoment sind materialunabhängige Größe, die nur von der Geometrie des Bauteils abhängen.

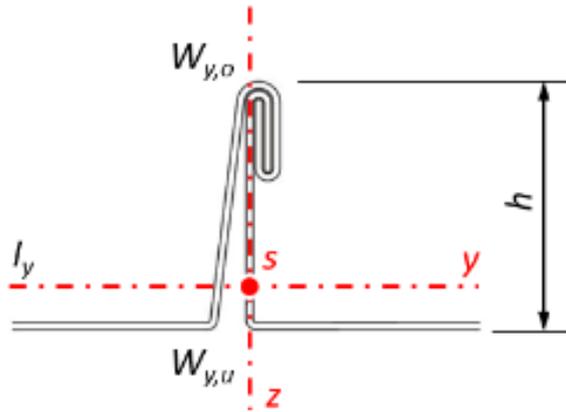


Bild 91:
Geometrie des Doppelstehfalzes mit Kennwerten.

Bei der Ermittlung der Flächenträgheitsmomente der Doppelstehfalze in den Bauhöhen 25 und 38 mm in unterschiedlichen Materialstärken wurde auch die mittragende Wirkung des Scharbodens in begrenztem Umfang mitberücksichtigt. Das Berechnungsmodell wurde durch 4-Punkt-Biegeversuche validiert und ist auch für andere Profilierungen anwendbar. Für die mittragende Wirkung des Scharbodens wurde das Bemessungsmodell an die Schnittgrößenermittlung nach EC2 DIN EN 1992-1-1:2010-01, 5.3.2.1 [10] für Rippendecken angelehnt. Die mittragende Breite b_{eff} (siehe Bild 92) für den Scharboden ergibt sich nach:

$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w = b_{eff,1} + b_w + b_{eff,2} \leq e \quad (4-16)$$

$$\text{mit } b_{eff,i} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,2 \cdot b_i + 0,1 \cdot l_0 \\ 0,2 \cdot l_0 \\ b_i \end{array} \right\} \quad (4-17)$$

- E Abstand der Stehfälze untereinander in *cm*
- b_i $\frac{1}{2}$ Breite des Scharbodens $b_i = (e - b_w) / 2$ in *cm*
- $b_{eff,i}$ effektiv mittragende Breite i in *cm*
- b_w Breite des Doppelstehfalzes in *cm*
- l_0 Stützweite der Haften in *cm*

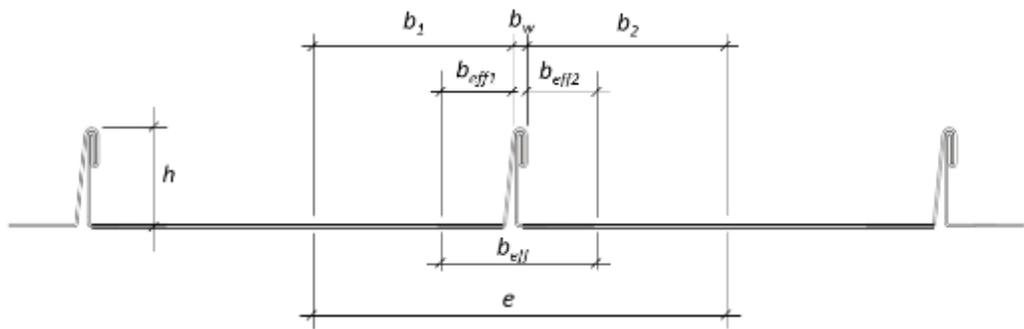


Bild 92:
Masse zur Bestimmung der mittragenden Wirkung des Scharbodens.

Aus dem Flächenträgheitsmoment I_y lässt sich über den Schwerpunktabstand s das Widerstandsmoment W_y bestimmen. Das Widerstandsmoment W_y ist ein Maß für den Widerstand, den ein Träger bei Belastung der Entstehung innerer Spannungen entgegensetzen kann. Das Widerstandsmoment W_y ist bei Doppelstehfälen aufgrund des asymmetrischen Querschnitts an der Ober- und Unterseite unterschiedlich und ergibt sich nach:

$$W_y = \frac{I_y}{s_z} \quad (4-18)$$

W_y Widerstandsmoment bei Biegung um die Y-Achse in cm^3
 I_y Flächenträgheitsmoment bei Biegung um die Y-Achse in cm^4
 s_z Abstand der belasteten Randfaser zur neutralen Faser in cm

Beispiel für eine Wertetabelle für einen Stehfalz:

$h = 25 \text{ mm}$ – Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$ – Stützweite $l_0 = 500 \text{ mm}$

Tabelle 32:
Flächenträgheitsmomente und andere Kennwerte bei verschiedenen Materialstärken.

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	0,73	0,90	1,06	1,21	1,36	1,50	1,63
S_z in mm	4,96	5,00	5,04	5,07	5,11	5,15	5,19
$W_{y,u}$ in cm^3	1,47	1,80	2,10	2,39	2,66	2,91	3,14
$W_{y,o}$ in cm^3	0,37	0,46	0,55	0,63	0,71	0,79	0,87
A in cm^2	1,13	1,41	1,69	1,96	2,23	2,51	2,78

Wertetabellen für weitere Stehfalzhöhen h , Scharbreiten e und Stützweiten l_0 sind im Anhang zu finden.

Elastizitätsmodul

Das Elastizitätsmodul E in N/mm^2 beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Belastung von festen Stoffen. Je geringer die Verformung eines Materials beim Auftreten einer Spannung ist, desto höher ist sein Elastizitätsmodul. Tabelle 33 zeigt die E-Module verschiedener Dacheindeckungswerkstoffe.

Tabelle 33:
Elastizitätsmodul E von verschiedenen Dachwerkstoffen

Werkstoff	E in N/mm^2	E in kN/cm^2
Baustahl	210.000	21.000
ferritischer nichtrostender Stahl (1.4521)	220.000	22.000
austenitischer und austenitisch-ferritischer nichtrostender Stahl (1.4301 / 1.4404)	200.000	20.000
Kupfer	90.000 ²⁾	9.000 ²⁾
Titanzink	80.000 ²⁾	8.000 ²⁾
Aluminium	70.000	7.000

²⁾ Herstellerangabe

Charakteristische Werte für Dehngrenze f_o und Zugfestigkeit f_u

Die Belastbarkeit eines Werkstoffs wird über die Zugfestigkeit f_o charakterisiert. Wird der Wert der Zugfestigkeit f_o überschritten, versagt der Werkstoff. Es kommt bereits vor dem Erreichen der Zugfestigkeit zu plastischen (bleibenden) Verformungen der Bauteile. Die Grenze, ab der es bei momentenfreier und einachsiger Zugbelastung zu plastischen Verformungen kommt, ist die Dehngrenze f_o . Unterhalb der Dehngrenze f_o weisen die Baustoffe ein *idealelastisches Verhalten auf*. Das bedeutet, dass sich das jeweilige Werkstück zwar verformt, bei Entlastung aber wieder in seinen Ursprungszustand bzw. in seine Ursprungsform zurückkehrt. Das Verhalten ist hier also idealelastisch und folgt dem Hook'schen Gesetz. Tabelle 34 zeigt die Dehngrenze f_o und Zugfestigkeit f_u verschiedener Dacheindeckungswerkstoffe. Im Bemessungsfall sind die Werkstoffkennwerte für die jeweilige Legierung und den jeweiligen Werkstoffzustand den einschlägigen Bemessungs- und Werkstoffnormen zu entnehmen.

Tabelle 34:
Charakteristische Werte der 0,2 %-Dehngrenze f_o und der Zugfestigkeit f_u .

Werkstoff	f_u in N/mm ²	f_o in N/mm ²
Baustahl (DX 51 D+Z, DX 52 D+Z)	300	420
ferritischer nichtrostender Stahl (1.4521)	275	550
austenitischer und austenitisch-ferritischer nichtrostender Stahl (1.4301 / 1.4404)	275	550
Kupfer	180	240
Titanzink	110	150
Aluminium (EN AW 3005, EN AW 3105)	160	195

a. Falzklemmen

Falzklemmen dienen zur Befestigung von Anbauteilen auf Doppelstehfalzdächern. Über diese können Zug- und Druckkräfte oder Schubkräfte in die Stehfalze eingeleitet werden. Zum Nachweis der übertragbaren Kräfte ist eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) oder eine Europäische Technische Zulassung (ETA) für die Klemmen erforderlich. Die Klemmen werden unter anderem für die Befestigung von Trittstufen, Schneefangsystemen, Solaranlagen und Anschlag-/Sicherungspunkten eingesetzt. Die Befestigung auf den Stehfalzen erfolgt als Einzel- aber vor allem als Mehrfachbefestigung unter Verwendung von lastverteilenden Platten und Traversen.

b. Befestigungsmittel

Es sind normativ geregelte oder bauaufsichtlich zugelassene Befestigungsmittel zu verwenden.

4.7 Bemessung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

Im Grenzzustand der Tragsicherheit ist nachzuweisen, dass sich das Tragwerk in einem stabilen Gleichgewicht befindet. Alle Bauteile und Verbindungen des Bauwerkes müssen den Beanspruchungen E_d mit ihren Beanspruchbarkeiten R_d widerstehen. Nachzuweisen sind auch die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit des Tragwerks. Hierbei sind die zulässigen Verformungen einzuhalten. Hierzu sind bei Doppelstehfalzdächern die folgenden Nachweise nach Tabelle 35 zu führen.

Anmerkung:

Der Nachweis für die an den Anschlagpunkten oder Falzklemmen befestigten Personen oder Konstruktionen ist nicht Bestandteil dieser Betrachtung und in jedem Einzelfall separat zu führen.

Tabelle 35:
Lastkombinationen und Nachweise bei Doppelstehfalzdächern.

Gegenstand des Nachweises	Eigengewicht EC 1-1-1/NA	Wind EC1-1-4/NA	Schnee EC1-1-3/NA	Nutzlast EC1-1-1/NA	Lastfallüberlagerung (mit Kombinationsbeiwerten nach EC0)	Nachweise
Anschlagpunkt / Befestigungspunkt inkl. Befestigungsmittel	-	-	-	N	$N_{ }^{***})$	Bruch ^{*)}
					$M^{***})$	Bruch ^{*)}
Falzklemme / Grundplatte / Traverse	-	-	-	N	$N_{ }^{***})$	Bruch ^{*)}
					$M^{***})$	Bruch ^{*)}
Dacheindeckung	G	W(S)	S	N	$G \oplus W \oplus N_{\perp}^{***})$	Bruch ^{*)}
					$G \oplus W$	Verformung (L/200) ^{**)}
	G	W(S)	S	N	$G \oplus W \oplus N_{\perp}^{***})$	Bruch ^{*)}
Haft inkl. Befestigungsmittel					$G_{ } \oplus S_{ } \oplus N_{ }^{***})$	Bruch ^{*)}
					Interaktion aus F_{\perp} und $F_{ }$	Bruch ^{*)}

^{*)} Die Nachweise der Tragfähigkeit werden mit Last- und Material Sicherheitsbeiwerten geführt (GZT)

^{**)} Die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit werden ohne Sicherheitsbeiwerte geführt (GZG)

^{***)} DIN 4426:2017-01, Kap. 4.5 [15] – abhängig von Anzahl der zu sichernden Personen

a. Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) für die Haften

Im GZT für Haften ist zwischen dem Grenzzustand unter Zuglast senkrecht zur Dachfläche und dem GZT parallel zur Dachfläche (Schub) zu unterscheiden. Bei den Festhaften kann es zudem zu einer Interaktion zwischen Schub- und Zugkraft kommen. Für den Grenzzustand der Zugtragfähigkeit muss gelten:

I. Zugtragfähigkeit im GZT für die Los- und Festhaften

Ein Versagen der Verfalzung zwischen Dacheindeckung und Haft wird durch die Dauerschwingversuche in Anlehnung an ETAG 006 bis zu den charakteristischen Werten der Zugtragfähigkeit der Haften, wie in diesem Bericht dargestellt, der im Rahmen der Ermittlung der charakteristischen Zuglasten der Haften durchgeführt werden muss, ausgeschlossen. Für die Tragfähigkeit der Haften muss daher gelten:

$$\frac{F_{d,\perp} \cdot \gamma_{m,2}}{R_{k,H,Z}} \leq 1,0 \quad (4-19)$$

- $F_{d,\perp}$ Bemessungswert der Zugkraft an einem Haft senkrecht zur Dacheindeckung in kN
 $R_{k,H,Z}$ charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit des Haft in kN
 $\gamma_{m,2}$ Teilsicherheitsbeiwert für den Haft bei Zugbeanspruchung (Durchknöpfen, $\gamma_{m,2} = 1,33$) in 1

Der Bemessungswert der Zugkraft $F_{d,\perp}$ an der Hafte senkrecht zur Dacheindeckung in kN ergibt sich nach:

$$F_{d,\perp} = \frac{E_{d,\perp}}{n} \quad (4-20)$$

- $E_{d,\perp}$ Bemessungswert der Einwirkung (GZT) senkrecht zur Dacheindeckung (vgl. Fall 2, Kap. 4.5 b) in kN/m²
 n Anzahl der Haften pro m² in 1/m²

Die erforderliche Anzahl n der Haften pro Quadratmeter Dacheindeckung lässt sich abschätzen nach:

$$n = \frac{E_{d,\perp} \cdot \gamma_{m,2}}{R_{k,H,Z}} \quad (4-21)$$

- $E_{d,\perp}$ Bemessungswert der Einwirkung (GZT) senkrecht zur Dacheindeckung (vgl. Fall 2, Kap. b) in kN/m²
 $\gamma_{m,2}$ Teilsicherheitsbeiwert für die Hafte bei Zugbeanspruchung (Durchknöpfen, $\gamma_{m,2} = 1,33$) in 1
 $R_{k,H,Z}$ charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit des Haft in kN

Anmerkung:

Aufgrund von Lastüberlagerungen ist es möglich, dass sich die Anzahl der Haften in Teilbereichen erhöht. Dies kann insbesondere im Bereich der Festhafte oder bei Einleitung von Einzellasten der Fall sein.

Der Abstand der Haften untereinander am Stehfalz l_0 in m ergibt sich nach:

$$l_0 = \frac{1}{e \cdot n} \leq 0,5 \text{ m} \quad (4-22)$$

e Abstand der Stehfälze untereinander in m
 n Anzahl der Haften pro m^2 in $1/m^2$

Anmerkung:

Entsprechend der Richtlinie für die Ausführung von Klempnerarbeiten an Dach und Fassade (Klempnerfachregeln) [25], darf ein Haftabstand von 500 mm nicht überschritten werden. Kann der Nachweis nach O.a.O. nicht geführt werden ist der Abstand der Festhafte den Belastungen anzupassen.

II. Schubtragfähigkeit im GZT für die Festhaften

$$\frac{F_{d,\parallel} \cdot \gamma_{m,2}}{R_{k,H,S} \cdot n_{Sf}} \leq 1,0 \quad (4-23)$$

$F_{d,\parallel}$ Bemessungswert der Schubkraft am Stehfalz parallel zur Dacheindeckung in kN
 $R_{k,H,S}$ charakteristischer Wert der Schubtragfähigkeit der Festhafte in kN
 $\gamma_{m,2}$ Teilsicherheitsbeiwert für die Festhafte bei Schubbeanspruchung (Gleiten im Falz, $\gamma_{m,2} = 1,33$) in 1
 n_{Sf} Anzahl der Festhaften an einem Stehfalz (S_f) in 1

Anmerkung:

Entsprechend der Richtlinie für die Ausführung von Klempnerarbeiten an Dach und Fassade (Klempnerfachregeln) [25], dürfen Festhaften maximal auf einer Länge von 3 m pro Stehfalz angebracht werden. Bei erhöhten Schublasten aus Anbauteilen und/oder Überlängen der Dachscharen ist die Anzahl der Festhafte den Belastungen anzupassen.

Der Bemessungswert der **Schubkraft** $F_{d,\parallel}$ an einem Stehfalz parallel zur Dacheindeckung in kN ergibt sich nach:

$$F_{d,\parallel} = e \cdot E_{d,\perp} \cdot L \cdot \tan \alpha \quad (4-24)$$

e	Abstand der Stehfalze untereinander	in m
$E_{d,\perp}$	Bemessungswert der Einwirkung (GZT) senkrecht zur Dacheindeckung (vgl. Fall 1, Kap. b)	in kN/m ²
L	Länge der Dachschar	in m
α	Dachneigung	in °

Die erforderliche Anzahl der Festhafte pro Stehfalz n_{sf} der Dacheindeckung lässt sich berechnen nach:

$$n_{sf} = \frac{F_{d,\parallel} \cdot \gamma_{m,2}}{R_{k,H,S}} \quad (4-25)$$

$F_{d,\parallel}$	Bemessungswert der Schubkraft am Stehfalz parallel zur Dacheindeckung	in kN
$\gamma_{m,2}$	Teilsicherheitsbeiwert für den Haft bei Schubbeanspruchung (Gleiten im Falz, $\gamma_{m,2} = 1,33$)	in 1
$R_{k,H,S}$	charakteristischer Wert der Schubtragfähigkeit der Hafte	in kN

Anmerkung:

Entsprechend der Richtlinie für die Ausführung von Klempnerarbeiten an Dach und Fassade (Klempnerfachregeln) [25], dürfen Festhafte maximal auf einer Länge von 3 m pro Stehfalz angebracht werden. Sofern es bei Anwendung des berechneten Befestigungsabstands l_0 gemäß der Berechnung nach Gleichung (4.1 bis 4.25) anhand der Windlast zu einer Überschreitung des Bereichs kommen würde, ist der Befestigungsabstand der Festhafte entsprechend zu verringern.

III. Kombinierte Belastung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) für die Festhaften

$$\frac{F_{d,\perp} \cdot \gamma_{m,2}}{R_{k,H,Z}} + \frac{F_{d,\parallel} \cdot \gamma_{m,2}}{R_{k,H,S} \cdot n} \leq 1,0 \quad (4-26)$$

$F_{d,\perp}$	Bemessungswert der Zugkraft an einem Haft senkrecht zur Dacheindeckung	in kN
$R_{k,H,Z}$	charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit der Hafte	in kN
$F_{d,\parallel}$	Bemessungswert der Schubkraft am Stehfalz parallel zur Dacheindeckung	in kN
$R_{k,H,S}$	charakteristischer Wert der Schubtragfähigkeit der Hafte	in kN
$\gamma_{m,2}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Hafte bei Schubbeanspruchung (Gleiten im Falz, $\gamma_{m,2} = 1,33$)	in 1
n_{sf}	Anzahl der Festhaften an einem Stehfalz	in 1

Anmerkung:

Wenn es bei der Überlagerung der Zugkräfte parallel und senkrecht zur Festhafte ($F_{d,\perp}$ und $F_{d,\parallel}$) zu einer Überschreitung der Tragfähigkeit kommt, ist die Anzahl n_{sf} entsprechend zu erhöhen und der Befestigungsabstand der Festhafte entsprechend zu verringern.

b. Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) für die Dacheindeckung

Beim GZG für die Dacheindeckung ist der Lastfall Zuglast/Soglast senkrecht zur Dachfläche maßgebend. Die Druckbelastung kann als unkritisch angesehen werden, da Doppelstehfalzdächer auf einer durchgehenden Unterlage (Schalung, Unterdeckung) verlegt werden. Die Unterkonstruktion ist für die Drucklasten zu bemessen. Die Untersuchungen in diesem Bericht haben gezeigt, dass Verformungen der Dachdeckung in Spannrichtung entlang der Stehfälze bis zu den folgenden Grenzen als unkritisch angesehen werden können.

Eine Durchbiegung der Stehfälze zwischen den Auflagerpunkten (Mitte Hafte – Mitte Hafte) von $f \leq l_0 / 200$ kann daher als Gebrauchstauglichkeitskriterium herangezogen werden. Die Verformung des Scharbodens zwischen den Stehfälzen quer zur Spannrichtung wird nicht limitiert. Die Gleitfähigkeit der Lospunkte darf durch die Verformungen nicht eingeschränkt werden.

Die Berechnungen der sich einstellenden Verformungen erfolgen nach der technischen Biegetheorie. Als Modell für den Biegeträger wird ein Durchlaufträger (mindestens 5 Felder) mit Gleichstreckenlast q gewählt (vgl. Bild 93).

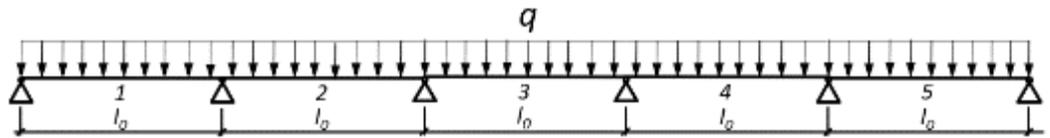


Bild 93:
Durchlaufträger mit gleicher Stützweite l_0 und Gleichstreckenlast q .

Anmerkung 1:

Die Verformung des Scharenbodens zwischen den Stehfälzen ist nicht limitiert.
Bleibende plastische Verformungen der Auflager (Haften) $f \leq 3\text{mm}$

Anmerkung 2:

Bei den Verformungen der Haften und der Stehfälze muss die Funktion (z.B. Gleiten der Schiebehafte) voll erhalten bleiben.

I. Verformung des Stehfalzes im GZG an einem Durchlaufträger (≥ 5 Felder)

$$\frac{f}{f_{zul}} \leq 1,0 \quad (4-27)$$

f Verformung am Stehfalz im GZG (Durchlaufträger) in cm senkrecht zur Dacheindeckung

f_{zul} zulässige Verformung zwischen den Auflagerpunkten in cm (Mitte Haft – Mitte Haft)

$$f_{zul} = l_0 / 200 \quad (4-28)$$

l_0 Stützweite der Haften in cm

An einem Durchlaufträger mit gleichen Stützweiten l_0 unter Gleichstreckenlast (Rechtecklast) ergibt sich die Verformung f in cm nach:

$$f = 65700 \cdot \frac{q_{Ed,\perp} \cdot l_0^4}{E \cdot I_y} \quad (4-29)$$

$q_{Ed,\perp}$ Gleichstreckenlast (Rechtecklast) am Stehfalz senkrecht zur Dacheindeckung in kN/m

l_0 Stützweite der Haften in m

E E-Modul der Dacheindeckung (Tabelle 33)

in N/mm²

I_y Flächenträgheitsmoment des Stehfalzes

in cm⁴

Das maximale Moment $M_{F,max}$ in kNm des Durchlaufträgers in den Feldern ergibt sich nach (vgl. Schneider; Bautabellen für Ingenieure, 4.15, 2016 [24]):

$$M_{F,max} = 0,078 \cdot q_{Ed,\perp} \cdot l_0^2 \quad (4-30)$$

$q_{Ed,\perp}$ Gleichstreckenlast (Rechtecklast) am Stehfalz senkrecht zur Dacheindeckung in kN/m
 l_0 Stützweite der Haften in m

Die Gleichstreckenlast (Rechtecklast) $q_{Ed,\perp}$ in kN/m am Stehfalz senkrecht zur Dacheindeckung errechnet sich nach:

$$q_{Ed,\perp} = E_{d,\perp} \cdot e \quad (4-31)$$

$E_{d,\perp}$ Bemessungswert der Einwirkung (GZG) senkrecht zur Dacheindeckung (vgl. Kap.4.2) in kN/m^2
 e Abstand der Stehfälze untereinander in m

c. Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) der Dacheindeckung

Beim GZT an der Dacheindeckung wird überprüft, ob es bei Zuglasten am Stehfalz zu einem Bruch durch Überlastung des Bauteils kommt. Ein Versagen der Verfalzung zwischen Dacheindeckung und Hafte wird durch die Dauerschwingversuche in Anlehnung an ETAG 006 bis zu den charakteristischen Werten der Zugtragfähigkeit der Haften, der im Rahmen der Ermittlung der charakteristischen Zuglasten der Haften durchgeführt werden muss, ausgeschlossen.

I. Nachweis des Stehfalz im GZT an einem Durchlaufträger (≥ 5 Felder)

Nachweis der Tragfähigkeit im Feld

$$\frac{M_{Ed,F} \cdot \gamma_m}{M_{Rk,o}} \leq 1,0 \quad (4-32)$$

$M_{Ed,F}$ maximaler Bemessungswert in den Feldern des Durchlaufträgers im GZT unter Soglast in kNm
 γ_m Teilsicherheitsbeiwert des Materials ($\gamma_m = 1,1$) in 1
 $M_{Rk,o}$ charakteristische Momententragfähigkeit des Durchlaufträgers an der Oberseite in kNm

An einem Durchlaufträger mit gleichen Stützweiten l_0 unter Gleichstreckenlast (Rechtecklast) ergibt sich das maximale Moment im Feld $M_{Ed,F}$ in kNm nach (vgl. Schneider; Bautabellen für Ingenieure, 4.15, 2016 [24]):

$$M_{Ed,F} = 0,078 \cdot q_{Ed,\perp} \cdot l_0^2 \quad (4-33)$$

$q_{Ed,\perp}$ Gleichstreckenlast (Rechtecklast) am Stehfalz senkrecht zur Dacheindeckung in kN/m
 l_0 Stützweite der Haften in m

Die Gleichstreckenlast (Rechtecklast) $q_{Ed,\perp}$ in kNm am Stehfalz senkrecht zur Dacheindeckung errechnet sich nach:

$$q_{Ed,\perp} = E_{d,\perp} \cdot e \quad (4-34)$$

$E_{d,\perp}$ Bemessungswert der Einwirkung (GZT) senkrecht zur Dacheindeckung (vgl. Fall 2, Kap.4.5) unter Soglast in kN/m^2
 e Abstand der Stehfälze untereinander in m

Die charakteristische Momententragfähigkeit $M_{Rk,o}$ in kNm an der Oberseite des Durchlaufträgers ergibt sich nach:

$$M_{Rk,o} = \frac{f_o \cdot W_{y,o}}{1000} \quad (4-35)$$

f_o Dehngrenze f_o des Materials der Dacheindeckung in N/mm^2
 $W_{y,o}$ Widerstandsmoment des Doppelstehfalzes an der Oberseite (vgl. Kap. 4.6, Scharen) in cm^3

Nachweis der Tragfähigkeit am Auflager

$$\frac{M_{Ed,A} \cdot \gamma_m}{M_{Rk,u}} \leq 1,0 \quad (4-36)$$

$M_{Ed,A}$ maximaler Bemessungswert an den Auflagern des Durchlaufträgers im GZT unter Soglast in kNm
 γ_m Teilsicherheitsbeiwert des Materials ($\gamma_m = 1,1$) in 1
 $M_{Rk,u}$ charakteristische Momententragfähigkeit des Durchlaufträgers an der Unterseite in kNm

An einem Durchlaufträger mit gleichen Stützweiten l_0 unter Gleichstreckenlast (Rechtecklast) ergibt sich das maximale Moment an den Auflagern $M_{Ed,A}$ in kNm nach (vgl. Schneider; Bautabellen für Ingenieure, 4.15, 2016 [24]):

$$M_{Ed,A} = -0,105 \cdot q_{Ed,\perp} \cdot l_0^2 \quad (4-37)$$

$q_{Ed,\perp}$	Gleichstreckenlast (Rechtecklast) am Stehfalz senkrecht zur Dacheindeckung	in kN/m
l_0	Stützweite der Haften	in m

Die Gleichstreckenlast (Rechtecklast) $q_{Ed,\perp}$ in kN/m am Stehfalz senkrecht zur Dacheindeckung errechnet sich nach:

$$q_{Ed,\perp} = E_{d,\perp} \cdot e \quad (4-38)$$

$E_{d,\perp}$	Bemessungswert der Einwirkung (GZT) senkrecht zur Dacheindeckung (vgl. Fall 2, Kap. b) unter Soglast	in kN/m ²
e	Abstand der Stehfälze untereinander	in m

Die charakteristische Momenten Tragfähigkeit $M_{Rk,u}$ in kNm an der Oberseite des Durchlaufträgers ergibt sich nach:

$$M_{Rk,u} = \frac{f_o \cdot W_{y,u}}{1000} \quad (4-39)$$

f_o	Dehngrenze f_o des Materials der Dacheindeckung	in N/mm ²
$W_{y,u}$	Widerstandsmoment des Doppelstehfalzes an der Unterseite (vgl. Kap.4.6, Scharen)	in cm ³

5 Zusammenfassung

5.1 Schub- und Zugversuche

Das verwendete Befestigungsmittel hat auf die Auszugswerte von Haften einen großen Einfluss. Bereits im niedrigen Dehnungsbereich von 1 – 2 mm ist bei den erzielten Auszugswerten ein deutlicher Unterschied zwischen einer Befestigung mit Schrauben oder gerillten Nägeln ersichtlich. Bei der Verwendung von gerillten Nägeln kommt es sehr schnell zu einem Herausziehen der Nagelung. Für die Befestigung von Dächern sind generell normativ geregelte oder bauaufsichtlich zugelassene Befestigungsmittel zu verwenden. Bei Dächern, die zusätzliche Lasten tragen sollen, ist eine Verschraubung der Haften zwingend erforderlich, da hier höhere Kräfte übertragen werden können. Bei Nagelungen ist in der Regel das Befestigungsmittel und nicht der Haft der limitierende Faktor. Welchen Einfluss das Befestigungsbild auf die Auszugswerte hat, lässt sich mit den vorliegenden Ergebnissen nicht hinreichend genau beurteilen. Hierfür müsste das gleiche Haftenmodell eines Herstellers mit variierenden Befestigungsbildern getestet werden. In diesem Projekt war nur die Untersuchung ähnlicher Hafte verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Befestigungsbildern möglich. Es zeigten sich keine signifikanten Verbesserungen durch eine zweireihige Befestigung bei den Zugversuchen. Dies erscheint auch realistisch, da bei einer Zugbelastung zunächst nur die näher am Kräfteeinleitungspunkt liegenden Schrauben belastet werden.

Bei der Untersuchung der charakteristischen Auszugswerte von Haften war festzustellen, dass bereits unter den aktuell geltenden Mindestanforderungen von 400 N bei allen Haften-Typen plastische Verformungen auftreten. Die erzielten maximalen Auszugskräfte der Haften lagen, mit Ausnahme der Loshafte des Haft-Typs 1, weit über den 400 N. Es ist davon auszugehen, dass die Haften bzw. das Gesamtsystem Metaldach bis zu einem gewissen Grad mit plastischen Verformungen umgehen kann. Diese Feststellung führte zur Entwicklung eines Auswertungsverfahrens, das eine plastische Verformung von bis zu 3 mm zulässt, sofern die Funktion und die Integrität des Bauteils nicht gefährdet ist.

Bei einem Haften Abstand von 500 mm und einem punktuellen Lastangriff im Mittelpunkt der Stützweite konnte bestätigt werden, dass es zu keinem Herausgleiten der Haften aus dem Falz kommt. Das größere Versagensrisiko liegt im Deckungsmaterial, das durch Ausknicken oder Beulen vor dem Haft versagt. Das Versagen des Deckungsmaterials tritt bei Verformungen auf, die deutlich über den in diesem Bericht als Gebrauchstauglichkeitskriterium festgelegten Verformung von $f \leq l_0 / 200$ liegen. Dies ist im Hinblick auf die Befestigung von Dachaufbauten auf Doppelstehfalzdächern eine äußerst wichtige Aussage, da die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Deckungsmaterials in den aktuellen Klempnerfachregeln nicht reglementiert ist. Ein Auszug der Hafte aus dem Falz konnte zu keinem Zeitpunkt beobachtet werden.

Bei der Ermittlung von charakteristischen Werten für die Aufnahme von Schubkräften, zeigten sich starke Unterschiede je nach verwendetem Falzsystem (DSF oder WSF). Dabei zeigte sich, dass ein DSF (Doppel-Stehfalz) wesentlich größere Schubkräfte überträgt als ein WSF (Winkel-Stehfalz). Auch das verwendete Deckungsmaterial hat einen signifikanten Einfluss auf die übertragenen Kräfte und muss berücksichtigt werden. Es stellte sich heraus, dass es ohne die Einbringung von Zusatzmaßnahmen nicht möglich ist, das Verhalten von nichtrostendem Stahl bei der Schubkraftübertragung zu beurteilen. Hier kommt es zu sehr großen Streuungen durch Gleiten des Hafts im Falz.

5.2 Biegeversuche

Die durchgeführten Biegeversuche haben gezeigt, dass sich Durchbiegungen von verfalzten Scharen, wie sie im Spengler Handwerk üblich sind, hinreichend genau durch die technische Biegetheorie beschreiben lassen. Die gemessenen Verformungen sind entweder kleinerer bzw. nur geringfügig größer als die durch Berechnung vorhergesagten. Eine Berechnung ist daher auf dieser Grundlage möglich.

Beobachtete Unterschiede der Biegesteifigkeit der verschiedenen Kombinationen aus Material und Falzvariante sind auf deren geometrische und material-spezifische Parameter rückführbar.

Ein möglichst genaues Bestimmen des Flächenträgheitsmoments ist entscheidend, um eine realistische Aussage über die zu erwartende Durchbiegung der Scharen treffen zu können. Dazu kann sowohl eine softwaregestützte Ermittlung des Flächenträgheitsmoments oder die Ermittlung über ein Tabellenverfahren verwendet werden. Es konnte gezeigt werden, dass beide Verfahren zu reproduzierbaren und durch die Messungen bestätigten Ergebnissen führen.

Eine Begrenzung der Durchbiegung auf $f \leq l_0 / 200$ stellt sicher, dass die Scharen nur im elastischen Bereich belastet werden und es nicht zu plastischen Verformungen der Scharen kommt. Die Biegeversuche haben gezeigt, dass Knicken und Beulen erst bei deutlich stärkeren Verformungen zu beobachten ist. Die sich hieraus bei einem derzeit maximal zulässigen Haften Abstand von 500 mm ergebende Durchbiegung von maximal 2,5 mm ist zudem ausreichend, die Funktion von unter dem Blech angeordneten strukturierten Trennlagen sicherzustellen und eine Berührung zwischen Dachhaut und Unterkonstruktion in Feldmitte zu vermeiden.

Die Ergebnisse ermöglichen den rechnerischen Nachweis der Konstruktion und der daran angeschlossenen Baugruppen. Da es sich bei den Haften in der Nachweiskette häufig um nicht geregelte Bauprodukte handelt, die keine definierten statischen Eigenschaften besitzen, ist ein Verwendbarkeitsnachweis erforderlich. Dieser kann geführt werden über europäisch technische Zulassungen oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (national). Bei weiteren Baugruppen wie den Befestigungselementen oder den Falzklemmen ist darauf zu achten,

das auch hier nur geregelte oder zugelassene statisch nachweisbare Elemente verwendet werden, um eine lückenlose Nachweiskette zu ermöglichen.

5.3 Dauerschwingversuche

Es konnte gezeigt werden, dass Metaldächer unter den üblichen schwingenden Belastungen keine Ermüdungen zeigen. Die in den statischen Versuchen ermittelten und statistisch ausgewerteten Ergebnisse konnten bei den dynamischen Versuchen bestätigt werden. Das Prüfverfahren in Anlehnung an die eingeführte europäische Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung mechanisch befestigte Dachabdichtungssysteme (ETAG 006) [19] hat sich als praktisches Verfahren zum Nachweis der Dauerhaftigkeit erwiesen. Hierbei erfolgt eine iterative Näherung an den Grenzwert der Gebrauchstauglichkeit. Eine Auswertungsproblematik wie bei statischen Versuchen entfällt. Konstruktive Schwachpunkte werden sichtbar und können optimiert werden. Durch die Anlehnung an ein eingeführtes europäisches Verfahren für Dachsysteme (Folien-dächer) sollte die Akzeptanz der Aufsichtsbehörden gegeben sein. Folgende Feststellungen können anhand der gemachten Versuche getroffen werden:

- Grundlast von 500 N pro Haft stellt kein Problem dar.
- Ein Materialversagen konnte bei den Versuchen nach der Leitlinie nicht beobachtet werden.
- In der Regel ist eine zu große Verformung der Systeme der Grund, warum die Versuche beendet werden. Hier ist jeweils zu klären, ob die statisch ermittelten charakteristischen Bemessungswerte erreicht wurden.

6 Ausblick

Bei Metaldächern handelt es sich um ein bewährtes System zur Dachabdichtung, das über Jahrhunderte seine Leistungsfähigkeit bewiesen hat. Durch die Weiterentwicklung der Gebäudetechnologie und die Adaption nachhaltiger Gebäudetechnik auf Dächern, aber auch durch die Forderungen bezüglich des Arbeitsschutzes und der Wartung von Einrichtungen auf Metaldächern ergeben sich neue Herausforderungen für die Nachweisführung der Befestigungen. Weiterhin müssen wir uns immer heftigerer Naturereignisse erwehren, die durch den Klimawandel hervorgerufen werden und zu stärkeren Belastungen der Dachkonstruktionen führen.

Die Regelwerke der Bauaufsicht fordern für den Einsatz von Bauprodukten neue Verwendbarkeitsnachweise, die die Leistungsfähigkeit der bewährten Baugruppen nachweisen. Die aktuell veröffentlichten Bemessungsrichtlinien laut Klempnerfachregeln, bedürfen einer Aktualisierung und für die Bemessung signifikante Einflüsse wie z.B. die Verformungen der Eindeckungen müssen zusätzlich berücksichtigt werden um die Konstruktionen zukunftsfähig zu machen.

Das Bemessungskonzept der Konstruktion muss an die Eurocodes angepasst werden. Speziell im Hinblick auf Dachaufbauten und Sicherheitseinrichtungen ist eine Berücksichtigung der verschiedenen Bemessungssituationen im semi-probabilistischen Bemessungskonzept unumgänglich.

Um zukünftig die Zulassung der Haften auf einer einheitlichen Basis durchführen zu können, ist ein europäisches Bewertungsdokument (EAD - European Assessment Document) erforderlich. Dieses kann nur von einer in Europa akkreditierten und notifizierten technischen Bewertungsstelle erstellt werden. Als Basis für dieses EAD kann der vorliegende Forschungsbericht dienen. Anhand dieser harmonisierten technischen Spezifikation kann dann jeder Hersteller von Haften für sein individuelles Produkt eine Zulassung beantragen. Diese europäische Technische Bewertung (ETA – European Technical Assessment) ist europaweit gültig und erfolgt anhand von Prüfungen, die durch eine notifizierte Prüfstelle durchgeführt wurden.

Abkürzungsverzeichnis

A	Höhe (eng. Altitude) über Normalhöhennull (ü. NHN)	in m
AbZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung	
b_j	½ Breite des Scharboden $b_i = (e - bw) / 2$	in cm
$b_{eff,i}$	effektiv mittragende Breite i	in cm
b_w	Breite des Doppelstehfalz	in cm
bzw.	beziehungsweise	
CAD	Computer-Aided Design	
C_e	Umgebungskoeffizient	in 1
C_p	aerodynamische Beiwert	in 1
C_t	Temperaturbeiwert	in 1
DSF	Doppelstehfalz	
e	Abstand der Stehfälze untereinander	in m
E	Bemessungswert der Beanspruchung	in kN
E	Elastizitätsmodul	in N/mm ²
EAD	European Assessment Document (Europäisches Bewertungsdokument)	
EC n	Eurocode n (europaweit vereinheitlichte Regeln für die Bemessung im Bauwesen)	
$E_{d,\perp}$	Bemessungswert der Einwirkung (GZT) senkrecht zur Dacheindeckung	in kN/m ²
ETA	European Technical Assessment (Europäische Technische Bewertung)	
f	Verformung am Stehfalz im GZG (Durchlaufträger) senkrecht zur Dacheindeckung	in cm
f_o	Dehngrenze f_o des Materials der Dacheindeckung	in N/mm ²
F (f mm)	max. charakteristischen Last bei Verformung f z.B. F (3,0 mm)	in kN
$F_{k,\parallel}$	charakteristischerer Wert der Schubkraft parallel zur Dacheindeckung	in kN
$F_{k,\perp}$	charakteristischerer Wert der Zugkraft an einem Haft senkrecht zur Dacheindeckung	in kN
$F_{d,\parallel}$	Bemessungswert der Schubkraft parallel zur Dacheindeckung	in kN
$F_{d,\perp}$	Bemessungswert der Zugkraft an einem Haft senkrecht zur Dacheindeckung	in kN
f_{zul}	zulässige Verformung zwischen den Auflagerpunkten (Mitte Haft – Mitte Haft)	in cm
FTM	Flächenträgheitsmoment	in cm ⁴
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit	
$G_{k,j}$	charakteristischerer Wert der ständigen Einwirkung	in kN/m ²
I_y	Flächenträgheitsmoment bei Biegung um die Y-Achse	in cm ⁴
Ke	Schubsicherung der Schar durch eine Kerbe	
k_{mod}	Beiwert zur Berücksichtigung von Klimaeinflüssen und Dauer der Lasteinwirkung bei Holz	
La	Schubsicherung der Schar durch eine Lasche	
l_o	Stützweite der Haften	in cm
$M_{Ed,F}$	Bemessungswert (Moment) im Feld im GZT	in kNm
$M_{Ed,A}$	Bemessungswert (Moment) an Auflager A	in kNm

$M_{F,max}$	maximales Moment im Feld	in kNcm
$M_{Rk,o}$	charakteristische Momententragfähigkeit an der Oberseite	in kNm
$M_{Rk,u}$	charakteristische Momententragfähigkeit an der Unterseite	in kNm
$M_{Ed,F}$	Bemessungswert (Moment) im Feld im GZT	in kNm
n	Anzahl der Haften pro m ²	in 1/m ²
n_{sf}	Anzahl der Festhaften an einem Stehfalz (S_i)	in 1
$N_{F,d}$	Bemessungswert der Einwirkung (Nutzlasten)	in kN
$N_{F,k}$	charakteristische Last an Einzelanschlagpunkt	in kN
P_k	charakteristischerer Wert der Vorspannung	in kN
$q_{Ed,\perp}$	Gleichstreckenlast (Rechtecklast) am Stehfalz	in kN/m
$Q_{k,1}$	charakteristischerer Wert der ersten unabhängigen veränderlichen Einwirkung	in kN/m ²
$Q_{k,i}$	charakteristischerer Wert der weiteren unabhängigen veränderlichen Einwirkungen	in kN/m ²
$q_{p,0}$	Basisgeschwindigkeitsdruck	in kN/m ²
PSAgA	persönliche Schutzvorrichtung gegen Absturz senkrecht zur Dacheindeckung	
R	Bemessungswert des Widerstands	in kN
R_k	charakteristischer Wert des Materialwiderstands	in kN
$R_{k,H,S}$	charakteristischer Wert der Schubtragfähigkeit des Haftes	in kN
$R_{k,H,Z}$	charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit des Haftes	in kN
s_k	charakteristischer Wert der Schneelast	in kN/m ²
s_z	Abstand der belasteten Randfaser zur neutralen Faser	in cm
ü. NHN	Höhe über Normalhöhennull (Höhe über dem mittleren Meeresspiegel)	
w_e	Windlast	in kN/m ²
WSF	Winkelstehfalz	
W_y	Widerstandsmoment bei Biegung um die Y-Achse	in cm ³
$W_{y,o}$	Widerstandsmoment um die Y-Achse an der Oberseite	in cm ³
$W_{y,u}$	Widerstandsmoment um die Y-Achse an der Unterseite	in cm ³
ZiE	Zustimmung im Einzelfall	
z.Zt.	zur Zeit	
α	Dachneigung	in °
φ	relative Holzfeuchte	in %
γ	Wichte	in kN/m ³
$\gamma_{G,j}$	Teilsicherheitsbeiwert der ständigen Einwirkung (Eigengewicht)	in 1
$\gamma_{P,j}$	Teilsicherheitsbeiwert der ständigen Einwirkung (Vorspannung)	in 1
$\gamma_{Q,1}$	Teilsicherheitsbeiwert der ersten unabhängigen veränderlichen Einwirkung	in 1
$\gamma_{Q,i}$	Teilsicherheitsbeiwert der weiteren unabhängige veränderlichen Einwirkungen	in 1
γ_m	Teilsicherheitsbeiwert des Materials	in 1
$\gamma_{m,2}$	Teilsicherheitsbeiwert für den Haft bei Schubbeanspruchung	in 1

μ_i	Formbeiwert für Schneelasten	in 1
\oplus	ist zu kombinieren mit	in 1
ψ_0, ψ_1, ψ_2	Kombinationsbeiwert für seltene, häufige und quasi-ständige veränderliche Einwirkungen	in 1

Bildverzeichnis

Bild 1:	Schematische Darstellung der Einflüsse der Vorversuche.	10
Bild 2:	Beanspruchungssituation an Festhaften.	11
Bild 3:	Schneefanglasche für Stehfalzdächer zur Einleitung von Schubkräften mit realem Momentenversatz.	11
Bild 4:	Klammer zur Krafteinleitung bei Zug- und Dauerschwingversuchen.	12
Bild 5:	Probekörper für Zug-, Schub und Dauerschwingversuche. Der rote Pfeil stellt die Krafteinleitung dar.	13
Bild 6:	Probekörper für Schubversuche. Die Richtung der Krafteinleitung wird mit dem roten Pfeil dargestellt.	13
Bild 7:	Probekörper für Biegeversuche, bestehend aus drei Scharen mit zwei Falzen.	14
Bild 8:	Flächenwerte eines 25 mm Doppelstehfalzes.	18
Bild 9:	Probekörper mit Doppelstehfalz für Biegeversuche.	18
Bild 10:	Doppelstehfalz.	19
Bild 11:	Schnappfalz.	19
Bild 12:	Winkelstehfalz.	19
Bild 13:	Gelenkiges Auflager.	21
Bild 14:	Falzaussparung.	21
Bild 15:	Schema Vierpunkt-Biegeversuch.	21
Bild 16:	Gesamter Prüfaufbau.	21
Bild 17:	Unterlage mit Aluminiumrundstab.	22
Bild 18:	Unterlagen bei Winddruckversuch.	22
Bild 19:	Versuchsaufbau mit eingelegtem Probekörper.	22
Bild 20:	Seilzugwegaufnehmer.	22
Bild 21:	Wegaufnehmer Windsogversuch.	23
Bild 22:	Wegaufnehmer Winddruckversuch.	23
Bild 23:	Aufbau der Prüfmaschine bei Zugversuchen.	26
Bild 24:	Klammer zur Krafteinleitung bei Zugversuchen.	27
Bild 25:	Aufbau der Prüfmaschine bei Schubversuchen.	28
Bild 26:	Haft-Typ 1-Festhafte.	30
Bild 27:	Haft-Typ 1-Loshafte.	30
Bild 28:	Haft-Typ 2-Festhafte.	31
Bild 29:	Haft-Typ 2-Loshafte.	31
Bild 30:	Haft-Typ 3-Festhafte.	32
Bild 31:	Haft-Typ 3-Loshafte.	32
Bild 32:	Probekörperaufbau für Haftenauszug mit Deckungsmaterial.	33
Bild 33:	Probekörperaufbau für Schubversuch mit Deckungsmaterial.	34
Bild 34:	Festhafte ohne Drahteinlage.	37
Bild 35:	Festhafte mit Drahteinlage.	37
Bild 36:	Nagelbefestigung.	38
Bild 37:	Schraubenbefestigung.	38
Bild 38:	Befestigung einreihig.	39
Bild 39:	Befestigung zweireihig versetzt.	39
Bild 40:	Haft mit einreihiger Befestigung.	39
Bild 41:	Haft mit zweireihiger Befestigung.	39
Bild 42:	Position der Klammer.	40
Bild 43:	Verformung der Probekörper.	40
Bild 44:	Versagen einer Loshafte des Haft-Typs 1 mit Deckungsmaterial.	41
Bild 45:	Aluminium von Haft durchgedrückt.	42
Bild 46:	Zink von Haft durchgedrückt.	42
Bild 47:	Ausbildung einer Lasche.	43
Bild 48:	Ausbildung einer Kerbe.	43
Bild 49:	Zerstörter Aluminium WSF Probekörper nach dem Schubversuch.	44
Bild 50:	Verformungen des Falzes.	45

Bild 51:	Aufspreizen des Falzfußes.....	45
Bild 52:	Seitliches Ausknicken eines Falzes.....	46
Bild 53:	Durchbiegung im Lastmaximum.....	46
Bild 54:	Verwerfungen und Beulen am Falzfuß.....	46
Bild 55:	Durchbiegung im Lastmaximum.....	46
Bild 56:	Prüfaufbau auf Resonanzprüfmaschine: Erreger unten, Lastabstützung über Klammer oben..	47
Bild 57:	Screenshot des Verlaufs von maximaler Ober- und Unterlast beim letzten Versuch.....	48
Bild 58:	Verformte Hafte sowie gelockerter Nagel auf der rechten Seite.....	49
Bild 59:	Verformte Hafte sowie gelockerter Nagel auf der rechten Seite.....	49
Bild 60:	Prüfaufbau auf servo-hydraulischer Prüfmaschine: Lastzylinder unten, Lastabstützung über Klammer oben.....	51
Bild 61:	Riss im rechten Haften bei ca. 98.000 Lastspielen.....	52
Bild 62:	Riss im rechten Haften bei Testende.....	52
Bild 63:	Servo-hydraulische Prüfmaschine.....	54
Bild 64:	Qualitative Darstellung des Kollektivs nach ETAG 006.....	55
Bild 65:	Steigerung der Maximallast mit jedem Durchlauf nach ETAG 006.....	55
Bild 66:	Maximalkraft der Probekörper.....	58
Bild 67:	Gesamtlastspielzahl der Probekörper.....	59
Bild 68:	Haftenauszug der Festhafte des Haft-Typs 1 mit 2-Punkte-Verschraubung.....	62
Bild 69:	Haftenauszug der Festhafte des Haft-Typs 3 mit 3-Punkte-Verschraubung.....	63
Bild 70:	Linearer Bereich Kurvenverlauf 1.....	64
Bild 71:	Linearer Bereich Kurvenverlauf 2.....	64
Bild 72:	Definition der Extensometer-Dehnung.....	65
Bild 73:	Dehngrenze bei plastischer Extensometer-Dehnung R_p	67
Bild 74:	Exemplarische Auswertung für die Gebrauchstauglichkeit einer Festhafte des Haft-Typs 1 mit 2-Punkt-Verschraubung.....	68
Bild 75:	Haftenauszug Haft-Typ 2-Festhafte mit 2-Punkt-Verschraubung.....	73
Bild 76:	Schubversuch mit Haft-Typ 1 Doppelstehfalz.....	75
Bild 77:	Exemplarische Auswertung für die Gebrauchstauglichkeit für einen Schubversuch mit Deckungsmaterial_RE_ZN_DSF.....	76
Bild 78:	Schubversuch Haft-Typ 1 mit Deckungsmaterial, NST und DSF.....	78
Bild 79:	Schubversuch Haft-Typ 1 mit Deckungsmaterial, NST mit Ke und DSF.....	78
Bild 80:	Schubversuch Haft-Typ 1 mit Deckungsmaterial, NST mit La und DSF.....	79
Bild 81:	Schubversuch Haft-Typ 1 mit Deckungsmaterial, NST mit Ke und WSF.....	80
Bild 82:	Schubversuch Haft-Typ 1 mit Deckungsmaterial, NST mit La und WSF.....	80
Bild 83:	Kraft-Verformungsdiagramm.....	81
Bild 84:	Kriterium $l/200$ im elastischen Bereich.....	81
Bild 85:	Vergleich der gemessenen Biegesteifigkeiten.....	83
Bild 86:	Vergleich der Windsogversuche.....	83
Bild 87:	Vergleich der Winddruckversuche.....	84
Bild 88:	Schema der Bemessung.....	86
Bild 89:	Windlastkarte für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland.....	90
Bild 90:	Schneelastzonen aus der DIN EN 1991-1-3/NA:2019-04 [17].....	92
Bild 91:	Geometrie des Doppelstehfalzes mit Kennwerten.....	104
Bild 92:	Masse zur Bestimmung der mittragenden Wirkung des Scharbodens.....	105
Bild 93:	Durchlaufräger mit gleicher Stützweite l_0 und Gleichstreckenlast q	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Arbeitspakete des Projekts und Erfüllungsgrad.	15
Tabelle 2:	Probekörperanzahl Winddruckversuche.	20
Tabelle 3:	Probekörperanzahl Windsogversuche.	20
Tabelle 4:	Technische Daten Zwick Z100 TEW.	25
Tabelle 5:	Übersicht über die untersuchten Hafte (produktneutral).	29
Tabelle 6:	Technische Daten Haft-Typ 1.	30
Tabelle 7:	Technische Daten Haft-Typ 2-Hafte.	31
Tabelle 8:	Technische Daten Haft-Typ 3-Hafte.	32
Tabelle 9:	Versuchsmatrix Vorversuche.	35
Tabelle 10:	Versuchsmatrix Haftenauszug.	35
Tabelle 11:	Versuchsmatrix Haftenauszug mit Deckungsmaterial.	36
Tabelle 12:	Versuchsmatrix Schubversuch mit Deckungsmaterial.	36
Tabelle 13:	Quantilfaktoren K_s ([22], Tabelle A2.1).	61
Tabelle 14:	Legende zu Bild 72.	65
Tabelle 15:	Legende zu Bild 73.	67
Tabelle 16:	Ergebnisse Vorversuche ohne statistische Auswertung.	69
Tabelle 17:	Charakteristische Auszugswerte für Festhafte in N.	71
Tabelle 18:	Charakteristische Auszugswerte für Loshafte in N.	72
Tabelle 19:	Ergebnisse Haftenauszug mit Deckungsmaterial.	74
Tabelle 20:	Charakteristische Schubkräfte (DSF) für eine Festhafte des Haft-Typs 1 in Abhängigkeit des Deckungsmaterials.	77
Tabelle 21:	Charakteristische Schubkräfte (WSF) für eine Festhafte des Haft-Typs 1 in Abhängigkeit des Deckungsmaterials.	79
Tabelle 22:	Maximalkräfte Winddruckversuche.	82
Tabelle 23:	Maximalkräfte Windsogversuche.	82
Tabelle 24:	Abweichung Messung zu Vorhersage Winddruck.	84
Tabelle 25:	Abweichung Messung zu Vorhersage Windsog.	85
Tabelle 26:	Übersicht Deckungsmaterial.	88
Tabelle 27:	Weitere Flächenlasten.	89
Tabelle 28:	Nutzlasten.	94
Tabelle 29:	Lastfallkombinationen – Schubkräfte – (GZT).	100
Tabelle 30:	Lastfallkombinationen – Abhebende Kräfte – (GZT).	100
Tabelle 31:	Lastfallkombinationen – Abhebende Kräfte – (GZG).	101
Tabelle 32:	Flächenträgheitsmomente und andere Kennwerte bei verschiedenen Materialstärken.	105
Tabelle 33:	Elastizitätsmodul E von verschiedenen Dachwerkstoffen.	106
Tabelle 34:	Charakteristische Werte der 0,2 %-Dehngrenze f_o und der Zugfestigkeit f_u	107
Tabelle 35:	Lastkombinationen und Nachweise bei Doppelstehfalzdächern.	108

Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG). (1996). *Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit. Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996, vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 427 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. Bundesministerium der Justiz (BMJ), , BGBl. I S. 1246.* Von <https://www.gesetze-im-internet.de/arbschg/ArbSchG.pdf> abgerufen
- [2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1982). DIN 53293:1982-02. *Prüfung von Kernverbunden; Biegeversuch.* Berlin: Beuth Verlag.
- [3] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2010). DIN EN 1990:2010-12. *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010 795:2012-10.* Berlin: Beuth Verlag.
- [4] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2010). DIN EN 1991-1-1:2010-12. *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau(Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002 + AC:2009).* Berlin: Beuth Verlag.
- [5] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2010). DIN EN 1991-1-1-1/NA:2010-12. *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.* Berlin: Beuth Verlag.
- [6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2010). DIN EN 1991-1-3:2010-12;. *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten, Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003 + AC:2009.* Berlin: Beuth Verlag.
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2010). DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12. *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten.* Berlin: Beuth Verlag.
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2010). DIN EN 1991-1-4:2010-12. *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten, Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010.* Berlin: Beuth Verlag.
- [9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2010). DIN EN 1991-1-7:2010-12. *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: All-gemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen.* Berlin: Beuth Verlag.
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2011). DIN EN 1992-1-1:2011-01. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.* Berlin: Beuth Verlag.

- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2012). DIN EN 1990/NA:2012-12. *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung - Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter*. Berlin: Beuth Verlag.
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2012). DIN EN 795:2012-10. *Persönliche Absturzschutzausrüstung - Anschlagleinrichtungen, Deutsche Fassung EN 795:2012*. Berlin: Beuth Verlag.
- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2013). DIN EN 14509:2013-12. *Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten - Werkmäßig hergestellte Produkte*. Berlin: Beuth Verlag.
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2016). DIN 50100:2016-12. *Schwingfestigkeitsversuch - Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile*. Berlin: Beuth Verlag.
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2017). DIN 4426:2017-01. *Einrichtungen zur Instandhaltung baulicher Anlagen - Sicherheitstechnische Anforderungen an Arbeitsplätze und Verkehrswege - Planung und Ausführung*. Berlin: Beuth Verlag.
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2017). DIN EN ISO 6892-1: 2017-02. *Metallische Werkstoffe-Zugversuche-Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2016), Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2016*. Berlin: Beuth Verlag.
- [17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2019). DIN EN 1991-1-3/NA:2019-04. *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten*. Berlin: Beuth Verlag.
- [18] DONAUER, C. (Mai 2018). *Ermittlung der Einflussfaktoren auf die Druck-, Zug- und Schubfestigkeit von Haften in Metall-Doppelstehfalzdächern*. Bachelor-Thesis, Technische Hochschule Rosenheim, Fraunhofer IBP, Rosenheim, Valley.
- [19] EOTA. (2000). ETAG 006. *Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung mechanisch befestigte Dachabdichtungssysteme, Bek: 2000-03; Ergänzt 2012*. (EOTA, Hrsg.) Brüssel.
- [20] GROSS, D., HAUGER, W., SCHRÖDER, J., & WALL, W. A. (2012). *Technische Mechanik 2: Elastostatik* (11., bearbeitete Ausg.). (Springer-Lehrbuch, Hrsg.) Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [21] Heß, F., Schweiger, A., & Späth, R. P.-I. (November 2017). *Zwischenbericht Projekt TraHaDo: Tragverhalten von Haften in Doppelstehfalzdächern*. FRAUNHOFER IBP, Valley.
- [22] Institut für Bautechnik (IfBt) (Hrsg.). (05 1986). *Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren*. Berlin.

- [23] Musterbauordnung (MBO). (11 2002). *Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 13.05.2016*. Von <https://www.bauministerkonferenz.de/Dokumente/42318979.pdf> abgerufen
- [24] Schneider, K.-J., & et.al. (2016). *SCHNEIDER: Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen* (22., überarbeitete Ausg.). (A. Albert, Hrsg.) Köln: Bundesanzeiger Verlag.
- [25] ZENTRALVERBAND SANITÄR HEIZUNG KLIMA (Hrsg.). (März 2016). *Richtlinien für die Ausführung von Klempnerarbeiten an Dach und Fassade (Klempnerfachregeln)*. St. Augustin.

Anhang A

Wertetabellen für Stehfälze mit unterschiedlichen Höhen h , Scharbreiten e und Stützweiten l_0

$h = 25 \text{ mm}$	Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$				Stützweite $l_0 = 500 \text{ mm}$		
Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	0,73	0,90	1,06	1,21	1,36	1,50	1,63
S_z in mm	4,96	5,00	5,04	5,07	5,11	5,15	5,19
$W_{y,u}$ in cm^3	1,47	1,80	2,10	2,39	2,66	2,91	3,14
$W_{y,o}$ in cm^3	0,37	0,46	0,55	0,63	0,71	0,79	0,87
A in cm^2	1,13	1,41	1,69	1,96	2,23	2,51	2,78

$h = 25 \text{ mm}$	Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$				Stützweite $l_0 \geq 400 - 499 \text{ mm}$		
Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	0,70	0,85	1,00	1,15	1,29	1,42	1,55
S_z in mm	5,71	5,74	5,77	5,80	5,83	5,86	5,90
$W_{y,u}$ in cm^3	1,22	1,49	1,74	1,98	2,21	2,42	2,62
$W_{y,o}$ in cm^3	0,37	0,45	0,54	0,62	0,70	0,78	0,85
A in cm^2	0,97	1,21	1,45	1,68	1,91	2,15	2,38

$h = 25 \text{ mm}$	Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$				Stützweite $l_0 \geq 300 - 399 \text{ mm}$		
Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	0,64	0,79	0,93	1,06	1,19	1,31	1,43
S_z in mm	6,76	6,78	6,80	6,82	6,84	6,87	6,89
$W_{y,u}$ in cm^3	0,95	1,16	1,36	1,55	1,74	1,91	2,08
$W_{y,o}$ in cm^3	0,36	0,44	0,53	0,61	0,69	0,76	0,84
A in cm^2	0,81	1,01	1,21	1,40	1,59	1,79	1,98

$h = 25 \text{ mm}$ $\text{Scharbreite } e \geq 500 \text{ mm}$ $\text{Stützweite } l_0 \geq 200 - 299 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	0,56	0,69	0,81	0,93	1,04	1,15	1,26
S_z in mm	8,32	8,33	8,34	8,35	8,36	8,37	8,38
$W_{y,u}$ in cm^3	0,67	0,83	0,97	1,11	1,25	1,38	1,50
$W_{y,o}$ in cm^3	0,34	0,43	0,51	0,58	0,66	0,73	0,80
A in cm^2	0,65	0,81	0,97	1,12	1,27	1,43	1,58

$h = 25 \text{ mm}$ $\text{Scharbreite } e = 400 - 499 \text{ mm}$ $\text{Stützweite } l_0 = 500 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	0,72	0,88	1,03	1,18	1,32	1,46	1,59
S_z in mm	5,31	5,34	5,38	5,41	5,45	5,48	5,52
$W_{y,u}$ in cm^3	1,35	1,64	1,92	2,19	2,43	2,67	2,88
$W_{y,o}$ in cm^3	0,37	0,46	0,54	0,63	0,71	0,78	0,86
A in cm^2	1,05	1,31	1,57	1,82	2,07	2,33	2,58

$h = 25 \text{ mm}$ $\text{Scharbreite } e = 400 - 499 \text{ mm}$ $\text{Stützweite } l_0 \geq 400 - 499 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	0,70	0,85	1,00	1,15	1,29	1,42	1,55
S_z in mm	5,71	5,74	5,77	5,80	5,83	5,86	5,90
$W_{y,u}$ in cm^3	1,22	1,49	1,74	1,98	2,21	2,42	2,62
$W_{y,o}$ in cm^3	0,37	0,45	0,54	0,62	0,70	0,78	0,85
A in cm^2	0,97	1,21	1,45	1,68	1,91	2,15	2,38

$h = 25 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 400 - 499 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 300 - 399 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	0,64	0,79	0,93	1,06	1,19	1,31	1,43
S_z in mm	6,76	6,78	6,80	6,82	6,84	6,87	6,89
$W_{y,u}$ in cm^3	0,95	1,16	1,36	1,55	1,74	1,91	2,08
$W_{y,o}$ in cm^3	0,36	0,44	0,53	0,61	0,69	0,76	0,84
A in cm^2	0,81	1,01	1,21	1,40	1,59	1,79	1,98

$h = 25 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 400 - 499 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 200 - 299 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	0,56	0,69	0,81	0,93	1,04	1,15	1,26
S_z in mm	8,32	8,33	8,34	8,35	8,36	8,37	8,38
$W_{y,u}$ in cm^3	0,67	0,83	0,97	1,11	1,25	1,38	1,50
$W_{y,o}$ in cm^3	0,34	0,43	0,51	0,58	0,66	0,73	0,80
A in cm^2	0,65	0,81	0,97	1,12	1,27	1,43	1,58

$h = 25 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 300 - 399 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 = 500 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	0,70	0,85	1,00	1,15	1,29	1,42	1,55
S_z in mm	5,71	5,74	5,77	5,80	5,83	5,86	5,90
$W_{y,u}$ in cm^3	1,22	1,49	1,74	1,98	2,21	2,42	2,62
$W_{y,o}$ in cm^3	0,37	0,45	0,54	0,62	0,70	0,78	0,85
A in cm^2	0,97	1,21	1,45	1,68	1,91	2,15	2,38

h = 25 mm Scharbreite e = 300 - 399 mm Stützweite l0 ≥ 400 - 499 mm

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
<i>I_y</i> in cm ⁴	0,67	0,82	0,97	1,11	1,24	1,37	1,49
<i>S_z</i> in mm	6,19	6,21	6,24	6,27	6,29	6,32	6,35
<i>W_{y,u}</i> in cm ³	1,08	1,32	1,55	1,77	1,98	2,17	2,35
<i>W_{y,o}</i> in cm ³	0,36	0,45	0,53	0,61	0,69	0,77	0,85
<i>A</i> in cm ²	0,89	1,11	1,33	1,54	1,75	1,97	2,18

h = 25 mm Scharbreite e = 300 - 399 mm Stützweite l0 ≥ 300 - 399 mm

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
<i>I_y</i> in cm ⁴	0,64	0,79	0,93	1,06	1,19	1,31	1,43
<i>S_z</i> in mm	6,76	6,78	6,80	6,82	6,84	6,87	6,89
<i>W_{y,u}</i> in cm ³	0,95	1,16	1,36	1,55	1,74	1,91	2,08
<i>W_{y,o}</i> in cm ³	0,36	0,44	0,53	0,61	0,69	0,76	0,84
<i>A</i> in cm ²	0,81	1,01	1,21	1,40	1,59	1,79	1,98

h = 25 mm Scharbreite e = 300 - 399 mm Stützweite l0 ≥ 200 - 299 mm

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
<i>I_y</i> in cm ⁴	0,56	0,69	0,81	0,93	1,04	1,15	1,26
<i>S_z</i> in mm	8,32	8,33	8,34	8,35	8,36	8,37	8,38
<i>W_{y,u}</i> in cm ³	0,67	0,83	0,97	1,11	1,25	1,38	1,50
<i>W_{y,o}</i> in cm ³	0,34	0,43	0,51	0,58	0,66	0,73	0,80
<i>A</i> in cm ²	0,65	0,81	0,97	1,12	1,27	1,43	1,58

$h = 38 \text{ mm}$	Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$				Stützweite $l_0 = 500 \text{ mm}$		
Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	2,10	2,58	3,05	3,51	3,95	4,38	4,79
S_z in mm	7,72	8,62	8,64	8,66	8,67	8,69	8,71
$W_{y,u}$ in cm^3	2,72	3,00	3,53	4,06	4,56	5,04	5,50
$W_{y,o}$ in cm^3	0,70	0,89	1,06	1,23	1,39	1,54	1,69
A in cm^2	1,23	1,54	1,84	2,14	2,44	2,74	3,04

$h = 38 \text{ mm}$	Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$				Stützweite $l_0 \geq 400 - 499 \text{ mm}$		
Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,97	2,43	2,87	3,31	3,72	4,13	4,52
S_z in mm	9,82	9,83	9,84	9,85	9,86	9,87	9,88
$W_{y,u}$ in cm^3	2,01	2,47	2,92	3,36	3,78	4,18	4,57
$W_{y,o}$ in cm^3	0,71	0,88	1,04	1,20	1,36	1,52	1,67
A in cm^2	1,07	1,34	1,60	1,86	2,12	2,38	2,64

$h = 38 \text{ mm}$	Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$				Stützweite $l_0 \geq 300 - 399 \text{ mm}$		
Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,80	2,23	2,63	3,03	3,41	3,79	4,15
S_z in mm	11,47	11,47	11,47	11,47	11,47	11,47	11,47
$W_{y,u}$ in cm^3	1,57	1,94	2,30	2,64	2,98	3,30	3,62
$W_{y,o}$ in cm^3	0,69	0,86	1,02	1,17	1,33	1,48	1,62
A in cm^2	0,91	1,14	1,36	1,58	1,80	2,02	2,24

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 200 - 299 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,57	1,93	2,29	2,63	2,97	3,30	3,61
S_z in mm	13,82	13,81	13,80	13,79	13,77	13,76	13,75
$W_{y,u}$ in cm^3	1,13	1,40	1,66	1,91	2,16	2,40	2,63
$W_{y,o}$ in cm^3	0,66	0,82	0,97	1,12	1,27	1,41	1,55
A in cm^2	0,75	0,94	1,12	1,30	1,48	1,66	1,84

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 400 - 499 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 = 500 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	2,04	2,51	2,97	3,41	3,85	4,26	4,66
S_z in mm	9,17	9,18	9,20	9,21	9,22	9,24	9,25
$W_{y,u}$ in cm^3	2,22	2,73	3,23	3,71	4,17	4,61	5,04
$W_{y,o}$ in cm^3	0,72	0,89	1,05	1,22	1,37	1,53	1,68
A in cm^2	1,15	1,44	1,72	2,00	2,28	2,56	2,84

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 400 - 499 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 400 - 499 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,97	2,43	2,87	3,31	3,72	4,13	4,52
S_z in mm	9,82	9,83	9,84	9,85	9,86	9,87	9,88
$W_{y,u}$ in cm^3	2,01	2,47	2,92	3,36	3,78	4,18	4,57
$W_{y,o}$ in cm^3	0,71	0,88	1,04	1,20	1,36	1,52	1,67
A in cm^2	1,07	1,34	1,60	1,86	2,12	2,38	2,64

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 400 - 499 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 300 - 399 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,80	2,23	2,63	3,03	3,41	3,79	4,15
S_z in mm	11,47	11,47	11,47	11,47	11,47	11,47	11,47
$W_{y,u}$ in cm^3	1,57	1,94	2,30	2,64	2,98	3,30	3,62
$W_{y,o}$ in cm^3	0,69	0,86	1,02	1,17	1,33	1,48	1,62
A in cm^2	0,91	1,14	1,36	1,58	1,80	2,02	2,24

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 400 - 499 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 200 - 299 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,57	1,93	2,29	2,63	2,97	3,30	3,61
S_z in mm	13,82	13,81	13,80	13,79	13,77	13,76	13,75
$W_{y,u}$ in cm^3	1,13	1,40	1,66	1,91	2,16	2,40	2,63
$W_{y,o}$ in cm^3	0,66	0,82	0,97	1,12	1,27	1,41	1,55
A in cm^2	0,75	0,94	1,12	1,30	1,48	1,66	1,84

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 300 - 399 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 = 500 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,97	2,43	2,87	3,31	3,72	4,13	4,52
S_z in mm	9,82	9,83	9,84	9,85	9,86	9,87	9,88
$W_{y,u}$ in cm^3	2,01	2,47	2,92	3,36	3,78	4,18	4,57
$W_{y,o}$ in cm^3	0,71	0,88	1,04	1,20	1,36	1,52	1,67
A in cm^2	1,07	1,34	1,60	1,86	2,12	2,38	2,64

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 300 - 399 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 400 - 499 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,90	2,34	2,76	3,18	3,58	3,97	4,35
S_z in mm	10,58	10,59	10,59	10,60	10,60	10,60	10,61
$W_{y,u}$ in cm^3	1,79	2,21	2,61	3,00	3,38	3,74	4,10
$W_{y,o}$ in cm^3	0,70	0,87	1,03	1,19	1,35	1,50	1,65
A in cm^2	0,99	1,24	1,48	1,72	1,96	2,20	2,44

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 300 - 399 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 300 - 399 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,80	2,23	2,63	3,03	3,41	3,79	4,15
S_z in mm	11,47	11,47	11,47	11,47	11,47	11,47	11,47
$W_{y,u}$ in cm^3	1,57	1,94	2,30	2,64	2,98	3,30	3,62
$W_{y,o}$ in cm^3	0,69	0,86	1,02	1,17	1,33	1,48	1,62
A in cm^2	0,91	1,14	1,36	1,58	1,80	2,02	2,24

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 300 - 399 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 200 - 299 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,57	1,93	2,29	2,63	2,97	3,30	3,61
S_z in mm	13,82	13,81	13,80	13,79	13,77	13,76	13,75
$W_{y,u}$ in cm^3	1,13	1,40	1,66	1,91	2,16	2,40	2,63
$W_{y,o}$ in cm^3	0,66	0,82	0,97	1,12	1,27	1,41	1,55
A in cm^2	0,75	0,94	1,12	1,30	1,48	1,66	1,84

Wertetabellen für Schnappfälze mit einer Höhe von $h = 38 \text{ mm}$,
mit unterschiedlichen Scharbreiten e und Stützweiten l_0

$h = 38 \text{ mm}$	Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$				Stützweite $l_0 = 500 \text{ mm}$		
Material- stärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,85	2,29	2,72	3,14	3,54	3,94	4,33
S_z in mm	8,05	8,09	8,14	8,18	8,22	8,26	8,30
$W_{y,u}$ in cm^3	2,30	2,83	3,34	3,84	4,31	4,77	5,21
$W_{y,o}$ in cm^3	0,63	0,78	0,93	1,08	1,22	1,37	1,51
A in cm^2	1,36	1,70	2,03	2,35	2,67	2,99	3,31

$h = 38 \text{ mm}$	Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$				Stützweite $l_0 \geq 400 - 499 \text{ mm}$		
Material- stärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,75	2,16	2,57	2,96	3,34	3,72	4,09
S_z in mm	9,07	9,11	9,15	9,19	9,23	9,27	9,31
$W_{y,u}$ in cm^3	1,93	2,37	2,80	3,22	3,62	4,01	4,39
$W_{y,o}$ in cm^3	0,61	0,76	0,91	1,05	1,20	1,34	1,48
A in cm^2	1,20	1,50	1,79	2,07	2,35	2,63	2,91

$h = 38 \text{ mm}$	Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$				Stützweite $l_0 \geq 300 - 399 \text{ mm}$		
Material- stärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,61	1,99	2,36	2,73	3,08	3,43	3,76
S_z in mm	10,39	10,44	10,48	10,52	10,56	10,59	10,63
$W_{y,u}$ in cm^3	1,55	1,91	2,25	2,59	2,92	3,23	3,54
$W_{y,o}$ in cm^3	0,59	0,74	0,88	1,02	1,16	1,29	1,43
A in cm^2	1,04	1,30	1,55	1,79	2,03	2,27	2,51

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e \geq 500 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 200 - 299 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,42	1,76	2,09	2,41	2,72	3,02	3,32
S_z in mm	12,20	12,25	12,29	12,33	12,38	12,42	12,46
$W_{y,u}$ in cm^3	1,16	1,43	1,70	1,95	2,20	2,44	2,67
$W_{y,o}$ in cm^3	0,56	0,70	0,83	0,96	1,10	1,23	1,35
A in cm^2	0,88	1,10	1,31	1,51	1,71	1,91	2,11

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 400 - 499 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 = 500 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,80	2,23	2,65	3,05	3,45	3,84	4,21
S_z in mm	8,53	8,57	8,61	8,65	8,69	8,73	8,77
$W_{y,u}$ in cm^3	2,12	2,60	3,07	3,53	3,97	4,39	4,80
$W_{y,o}$ in cm^3	0,62	0,77	0,92	1,07	1,21	1,35	1,49
A in cm^2	1,28	1,60	1,91	2,21	2,51	2,81	3,11

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 400 - 499 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 400 - 499 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,75	2,16	2,57	2,96	3,34	3,72	4,09
S_z in mm	9,07	9,11	9,15	9,19	9,23	9,27	9,31
$W_{y,u}$ in cm^3	1,93	2,37	2,80	3,22	3,62	4,01	4,39
$W_{y,o}$ in cm^3	0,61	0,76	0,91	1,05	1,20	1,34	1,48
A in cm^2	1,20	1,50	1,79	2,07	2,35	2,63	2,91

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 400 - 499 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 300 - 399 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,61	1,99	2,36	2,73	3,08	3,43	3,76
S_z in mm	10,39	10,44	10,48	10,52	10,56	10,59	10,63
$W_{y,u}$ in cm^3	1,55	1,91	2,25	2,59	2,92	3,23	3,54
$W_{y,o}$ in cm^3	0,59	0,74	0,88	1,02	1,16	1,29	1,43
A in cm^2	1,04	1,30	1,55	1,79	2,03	2,27	2,51

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 400 - 499 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 200 - 299 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,42	1,76	2,09	2,41	2,72	3,02	3,32
S_z in mm	12,20	12,25	12,29	12,33	12,38	12,42	12,46
$W_{y,u}$ in cm^3	1,16	1,43	1,70	1,95	2,20	2,44	2,67
$W_{y,o}$ in cm^3	0,56	0,70	0,83	0,96	1,10	1,23	1,35
A in cm^2	0,88	1,10	1,31	1,51	1,71	1,91	2,11

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 300 - 399 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 = 500 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,75	2,16	2,57	2,96	3,34	3,72	4,09
S_z in mm	9,07	9,11	9,15	9,19	9,23	9,27	9,31
$W_{y,u}$ in cm^3	1,93	2,37	2,80	3,22	3,62	4,01	4,39
$W_{y,o}$ in cm^3	0,61	0,76	0,91	1,05	1,20	1,34	1,48
A in cm^2	1,20	1,50	1,79	2,07	2,35	2,63	2,91

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 300 - 399 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 400 - 499 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,68	2,08	2,47	2,85	3,22	3,58	3,94
S_z in mm	9,68	9,72	9,76	9,80	9,84	9,88	9,92
$W_{y,u}$ in cm^3	1,74	2,14	2,53	2,91	3,27	3,63	3,97
$W_{y,o}$ in cm^3	0,60	0,75	0,89	1,04	1,18	1,32	1,45
A in cm^2	1,12	1,40	1,67	1,93	2,19	2,45	2,71

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 300 - 399 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 300 - 399 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,61	1,99	2,36	2,73	3,08	3,43	3,76
S_z in mm	10,39	10,44	10,48	10,52	10,56	10,59	10,63
$W_{y,u}$ in cm^3	1,55	1,91	2,25	2,59	2,92	3,23	3,54
$W_{y,o}$ in cm^3	0,59	0,74	0,88	1,02	1,16	1,29	1,43
A in cm^2	1,04	1,30	1,55	1,79	2,03	2,27	2,51

$h = 38 \text{ mm}$ Scharbreite $e = 300 - 399 \text{ mm}$ Stützweite $l_0 \geq 200 - 299 \text{ mm}$

Materialstärke t	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
I_y in cm^4	1,42	1,76	2,09	2,41	2,72	3,02	3,32
S_z in mm	12,20	12,25	12,29	12,33	12,38	12,42	12,46
$W_{y,u}$ in cm^3	1,16	1,43	1,70	1,95	2,20	2,44	2,67
$W_{y,o}$ in cm^3	0,56	0,70	0,83	0,96	1,10	1,23	1,35
A in cm^2	0,88	1,10	1,31	1,51	1,71	1,91	2,11