



Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energieaufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schweißverbindungen für ETFE-Folien im Bauwesen: Standardisierung von Ausführung, Prüfung und Bemessung

Fachlicher Abschlussbericht

Förderkennzeichen: 03TN0011A – F

Bearbeitungszeitraum: 01.01.2021 bis 30.06.2023

Autoren: Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner
Dr.-Ing. Jörg Uhlemann
Dominik Runge, M.Sc.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Projektübersicht	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Motivation und Zielsetzung	4
1.4	Konsortium des Verbundprojektes	6
2	Stand der Technik zu Beginn des Projektes	8
2.1	Schweißtechnologie	8
2.2	Bisherige Arbeiten der Antragsteller	10
3	Standardisierung der Schweißnahtprüfung (AP 1)	11
3.1	Allgemeines	11
3.2	Vorgehensweise	11
3.3	Optimierung der Probekörpergeometrie (AP 1.2 und 1.3)	13
3.3.1	Allgemein	13
3.3.2	Untersuchte Probekörpergeometrien	13
3.3.3	Experimentelle Untersuchungen (AP 1.2)	15
3.3.4	Numerische Untersuchungen (AP 1.3)	23
3.3.5	Ermittlung einer optimierten Probekörpergeometrie	25
3.4	Optimierung der Herstellmethode (AP 1.4)	27
3.4.1	Allgemein	27
3.4.2	Untersuchte Herstellmethoden	27
3.4.3	Mikroskopische Untersuchung des Einflusses der Herstellmethode	28
3.4.4	Einfluss der Herstellmethode auf die Zugfestigkeit von ETFE-Grundmaterial	29
3.4.5	Einfluss der Herstellmethode auf die Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähte	30
3.4.6	Ermittlung einer optimierten Herstellmethode	31
3.5	Optimierung der Prüfgeschwindigkeit (AP 1.5)	32
3.5.1	Allgemeines	32
3.5.2	Ermittlung der optimierten Prüfgeschwindigkeit	32
3.6	Optimierung der Klemmtechnik (AP 1.6)	34
3.6.1	Allgemeines	34
3.6.2	Untersuchte Klemmtechniken	35
3.6.3	Ermittlung der optimierten Klemmtechnik	36
3.7	Konsensfindung der optimierten Prüfparameter (AP 1.7)	37
3.8	Verifizierung der vereinheitlichten Prüfmethode (AP 1.8)	38
4	Entwicklung von Konzepten und normativen Richtlinien zur Qualitätssicherung geschweißter ETFE-Folien (AP 2 und AP 3)	39
4.1	Vorgehensweise	39
4.2	Identifizierung von Schweißnahtdetails von ETFE-Konstruktionen	41

4.3	Erstellung vereinheitlichter Ablaufpläne der vorherrschenden Schweißverfahren und Ermittlung der Einflussgrößen	43
4.3.1	Allgemeines	43
4.3.2	Heizelement-Rollbandschweißen (HR)	45
4.3.3	Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI)	46
4.4	Qualifizierung der Schweißverfahren (AP 2.3)	48
4.4.1	Vorgehensweise	48
4.4.2	Entwicklung von Schweißanweisungen für die Ausführung geschweißter ETFE-Folien	48
4.4.3	Entwicklung eines Qualifizierungsverfahren für das Schweißverfahren in der Ausführung geschweißter ETFE-Folien	49
4.5	Qualifizierung des Schweißpersonals (AP 2.4)	56
4.5.1	Allgemeines	56
4.5.2	Schweißaufsicht und Schweißaufsichtspersonal	56
4.5.3	Bediener und Einrichter	57
4.6	Entwicklung einer Methodik zur Erstellung eines für ETFE-Schweißnähte geeigneten Schweißplans (AP 2.5)	59
5	Experimentelle Festigkeitsuntersuchungen geschweißter ETFE-Folien (AP 4)	60
5.1	Allgemeines	60
5.2	Monoaxiale Festigkeitsuntersuchungen (AP 4.1)	62
5.3	Biaxiale Festigkeitsuntersuchungen (AP 4.2)	69
6	Zusammenfassung und Ausblick	73
7	Literatur	75

Anlagen

Anlage A	Mikroskopische Aufnahmen zur Optimierung der Herstellmethode
Anlage B	Vordruck eines Schweißplan für die Ausführung geschweißter ETFE-Folien
Anlage C	E DIN 18229-1, Schweißen von ETFE-Folien für die Anwendung im Bauwesen - Teil 1: Schweißaufsicht – Aufgaben und Verantwortung
Anlage D	E DIN 18229-2, Schweißen von ETFE-Folien für die Anwendung im Bauwesen – Teil2: Schweißpersonal – Prüfung von Bedienern und Einrichtern zum vollautomatischen und automatischen Schweißen von ETFE-Folien
Anlage E	E DIN 18229-3, Schweißen von ETFE-Folien für die Anwendung im Bauwesen – Teil 3: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für ETFE-Folien – Schweißanweisung
Anlage F	E DIN 18229-4, Schweißen von ETFE-Folien für die Anwendung im Bauwesen – Teil 4: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für ETFE-Folien – Schweißverfahrensprüfung
Anlage G	Auswertung und Prüfergebnisse biaxialer Hysterese-Zugprüfungen an ETFE-Flächenschweißnähten

1 Projektübersicht

1.1 Allgemeines

Gesamtziel des Forschungsvorhabens war die Standardisierung von Prozessen und Bemessungsverfahren für das Schweißen bzw. von geschweißten ETFE-Folienkonstruktionen. Direktes Ziel dieses Vorhabens war die Entwicklung von DIN-Normenentwürfen, die die Ausführung und Prüfung von ETFE-Folienschweißnähten standardisieren. Fernziel war die Implementierung der entwickelten Normenentwürfe in die Normungsarbeit auf nationaler und europäischer Ebene und auf dieser Basis die Entwicklung einer harmonisierten europäischen Norm zur Ausführung und Prüfung von Folienschweißnähten. Des Weiteren soll die Bemessung von ETFE-Folienschweißnähten standardisiert werden. Die in diesem Vorhaben geschaffenen Regeln sollen im Verlauf und Anschluss an das Vorhaben direkt auf europäischer Ebene in die gerade in der Entwicklung befindliche CEN Technical Specification „Design of Tensioned Membrane Structures“ und den anschließend daraus zu entwickelnden Eurocode für Membrantragwerke eingebracht werden.

Konkret wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Verfahren, Konzepte und normative Richtlinien zur Standardisierung der Ausführung, Prüfung und Bemessung von ETFE-Flächenschweißnähten für die architektonische Anwendung entwickelt. Die entwickelten normativen Richtlinien umfassen fünf DIN-Normenentwürfe, von denen vier innerhalb dieses Vorhabens finalisiert wurden. Die entwickelten Normenentwürfe bilden die neue Normenreihe DIN 18229-1 bis -5. Der Teil 5 wurde im Rahmen dieses Vorhabens nur konzeptualisiert.

Der Arbeitsplan bestand in der Summe aus fünf Arbeitspaketen (AP) und setzte sich aus experimentellen und theoretischen (Teil-)Arbeitspaketen zusammen, siehe Bild 1. Die experimentellen Untersuchungen wurden an ETFE-Folien verschiedener Hersteller, Dicken und Schweißnahtausführungen durchgeführt, die im Folgenden näher spezifiziert werden.

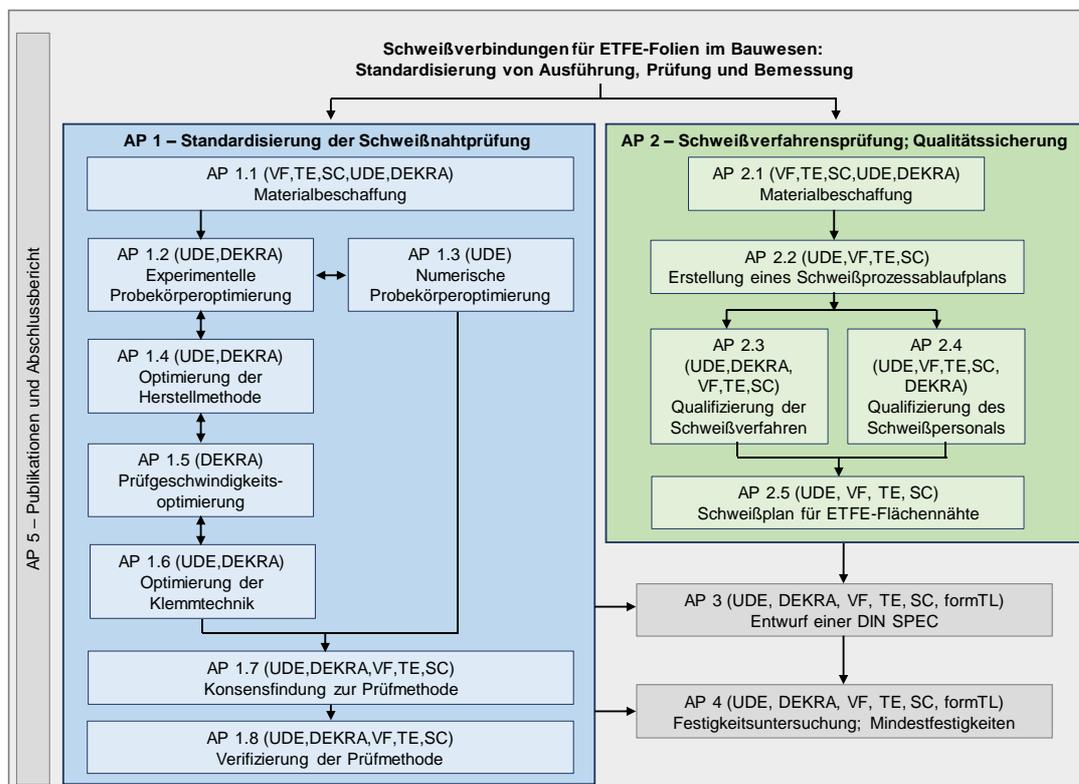


Bild 1 Methodisches Vorgehen und Ablaufplan der Arbeitspakete bzw. Teilarbeitspakete

Die Bearbeitungszeit des Vorhabens begann am 01.01.2021 mit einer zweijährigen Laufzeit. Aufgrund von Lieferverzögerungen des benötigten Grundmaterials und daraus resultierenden Verzögerungen in der inhaltlichen Bearbeitung wurde eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis zum 30.06.2023 erwirkt.

Nr.	Verbundpartner	Ansprechpartner	Abk.
1	Universität Duisburg-Essen Institut für Metall- und Leichtbau Universitätsstraße 15 45141 Essen	Prof. Dr.-Ing. habil Natalie Stranghöner <i>(Projektleitung und -koordination, Technische Bearbeitung)</i> Dr.-Ing. Jörg Uhlemann <i>(Projektkoordination und technische Bearbeitung)</i> Dominik Runge, M. Sc. dominik.runge@uni-due.de <i>(Technische Bearbeitung)</i>	UDE
2	DEKRA Automobil GmbH Labor für Technische Textilien und Folien Handwerkstr. 17 70565 Stuttgart	Dipl.-Ing. Jochen Köhnlein	DEKRA
3	Vector Foiltec GmbH Steinacker 3 28717 Bremen	Dr. rer. nat Carl Maywald Dr. rer. nat. Torsten Balster	VF
4	Taiyo Europe GmbH Muehlweg 2 82054 Sauerlach	Prof. Dr.-Ing. Karsten Moritz	TE
5	seele cover GmbH Bahnhofstraße 28 83119 Obing	Dipl.-Ing. Gabriele Müller	SC
6	formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh Güttinger Straße 37 78315 Radolfzell	Dipl.-Ing. Bernd Stimpfle	formTL

1.2 Problemstellung

Im Bereich des Membranbaus sind architektonische und bauingenieurtechnische Anforderungen eng miteinander verknüpft. Meist werden die auf Zug beanspruchten Flächengebilde an repräsentativen Gebäuden eingesetzt. Der Membranbau umfasst als Überbegriff Konstruktionen sowohl aus technischen Textilien (Gewebe-membranen) als auch aus den im vorliegenden Antrag behandelten Folien. Beide weisen ein sehr geringes Eigengewicht auf, wodurch sie bei weiten, stützenlosen Überspannungen von Flächen im Dachbereich und in der Fassade verwendet werden, siehe exemplarisch Bild 2. Sie sind Tragwerk und Dach- oder Fassadenabschluss in einem. Diese „leichten Flächentragwerke“ sparen durch ihr geringes Eigengewicht viel Material für den Gebäudeabschluss und die tragende Unterkonstruktion (Primärkonstruktion) ein. Sie lassen sich zusätzlich gut mit Photovoltaik-Anlagen verbinden, siehe Bild 2 (a). Diese Eigenschaften verleihen dieser Konstruktionsweise eine sehr gute Nachhaltigkeit, wodurch sie ein hohes Marktpotenzial aufweisen.

Für Membranstrukturen aus Folien wird bisher nur ein Folientyp eingesetzt: Folien aus Ethylen-Tetrafluorethylen, kurz ETFE. ETFE-Folienkonstruktionen sind eine vergleichsweise junge Bauart. Folienkonstruktionen bestechen häufig durch ihre hohe Transparenz. ETFE-Folien sind für das gesamte Sonnenspektrum (UV-, sichtbare und IR-Strahlung) transparent und können beliebig bedruckt und pigmentiert werden. Daher werden ETFE-Folien für ein weites Anwendungsspektrum eingesetzt.



(a) AWM Carport, München (Quelle, ©: Taiyo Europe GmbH)



(b) Hudson Yards Project, New York City, USA (Quelle, ©: Vector Foiltec GmbH)

Bild 2 Weitgespannte Folienkonstruktionen aus ETFE

ETFE-Folien werden für die Anwendung in der Architektur in Folienstärken zwischen 80 μm und 350 μm in ca. 1,5 m breiten Rollwaren hergestellt. Der Konfektionär eines Folientragwerks stellt aus den ebenen Rollwaren 2D-Zuschnittsflächen her. Diese werden anschließend entsprechend der geplanten dreidimensionalen Formgebung zu einer ein- oder mehrlagigen Folienstruktur miteinander verschweißt. Hinsichtlich der Tragfähigkeit des Membranbauteils sind die Schweißnähte maßgebend: auf Grund der „Störstelle“ weisen sie eine deutlich geringere Tragfähigkeit auf als das Grundmaterial. Um eine hohe Qualität des Bauwerks sicherzustellen, die sich in hohen Festigkeiten und einer langen Lebensdauer ausdrückt, muss daher besonderes Augenmerk auf die mechanischen Eigenschaften der Schweißnähte gelegt werden, da sie maßgeblich tragsicherheitsrelevant sind.

Schweißnähte treten sowohl in der Fläche (Flächennähte) als auch an den Rändern der Membranbauteile (Randschweißnähte) auf, wo mittels Schweißnähten üblicherweise eine Kedertasche ausgebildet wird, in die Kederschnüre eingelegt werden. Keder- oder Klemmschienen, die um die Kederschnüre greifen, verbinden das Membranbauteil mit der Primärstruktur.



Bild 3 Verschweißung von ETFE-Folien mittels einer Verfahrerschweißmaschine (Quelle, ©: Vector Foiltec GmbH)

Derzeit fehlt zur Sicherstellung nicht nur der Qualität von ETFE-Folienschweißnähten eine Standardisierung der Schweißprozesse, der werkseigenen Produktionskontrollen, der mechanischen Prüfung, der Qualitätsbeurteilung sowie der Bemessung derselben. Generell sind Bemessungs- und Produktnormen für Folientragwerke noch nicht vorhanden, weshalb ETFE-Konstruktionen derzeit nur mit einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bzw. vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBG) durch die oberste Bauaufsicht realisiert werden können. Die Erarbeitung von Bemessungs- und Produktnormen finden derzeit – unter anderem unter reger Beteiligung aller Partner des vorliegenden Forschungsvorhabens – auf nationaler und europäischer Ebene statt. Hinsichtlich der mechanischen Prüfung von Schweißnähten wird sich in der Praxis an DIN EN ISO 527-3 „Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln“ [1] angelehnt. Diese gilt aber nur für die Prüfung des Grundmaterials, gleichzeitig gilt sie für eine große Bandbreite von Kunststofffolien und Tafeln. Ferner existieren in DVS 2203-1 [2] allgemeine Regelungen zu Prüfverfahren von Schweißverbindungen an thermoplastischen Kunststoffen. In DVS 2203-2 [3] werden Regelungen zu monoaxialen Zugversuchen an Tafeln und Rohren aus Thermoplasten aufgeführt, die u. a. die Form und Herstellung der Probekörper definieren, die jedoch nicht auf ETFE-Folien ausgelegt sind. Die in

DVS 2203-2 spezifizierten Zugversuche werden in Anlehnung an die Normenreihe DIN EN ISO 527 [2] durchgeführt. Obwohl es sich bei den Schweißnähten bei Folienkonstruktionen um die schwächste und empfindlichste Stelle der Folienflächen handelt, sind damit bisher für eine vergleichbare und reproduzierbare Prüfung von ETFE-Folienschweißnähten keine Spezifizierungen gegeben. Hier besteht somit eine Regelungslücke, die mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben bezüglich der Flächenschweißnähte geschlossen werden soll.

1.3 Motivation und Zielsetzung

Ziele dieses Forschungsvorhabens waren sowohl die Entwicklung und Standardisierung der Prozesse, die mit der Herstellung, Prüfung und Beurteilung von ETFE-Flächenschweißnähten einhergehen als auch die Erarbeitung eines Bemessungskonzeptes. Dies wird zu einer gleichmäßigen und hohen Schweißnaht- und damit Bauwerksqualität sowie zu gleichen und fairen Marktbedingungen führen, da alle Marktteilnehmer gleiche und hohe Qualitätsanforderungen zu erfüllen haben. Ferner war ein Ziel, tragsicherheitsrelevante Mindestwerte für die Schweißnahtfestigkeit zur Implementierung in den in der Entwicklung befindlichen Bemessungsnormen auf Basis einer breiten Versuchsdatenbasis zu definieren. Hiervon profitieren insbesondere die Firmen, die mit ETFE-Konstruktionen in der Auslegung, Konfektionierung und Fertigung betraut sind und zumeist kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) sind.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Verfahren zur Harmonisierung und Standardisierung der Ausführung von ETFE-Schweißnähten entwickelt. Auf dieser Grundlage wurden Schweißnähte experimentell untersucht, die von den Konfektionären unter den Verbundpartnern in verschiedenen Konfigurationen (Folienhersteller, Foliendicken, Schweißnahtbreiten, Schweißparameter wie Temperatur und Anpressdruck, Prüftemperatur etc.) hergestellt wurden. Auf diese Weise ließen sich die Schweißmethoden herausfiltern, die zu besonders guten mechanischen Eigenschaften führen. Gleichzeitig ließ sich ein Festigkeitsniveau ableiten, das einerseits zu ausreichend tragfähigen und langlebigen Schweißnähten führt und andererseits von den Marktteilnehmern ohne unzumutbar hohen Aufwand realisiert werden kann.

Das Forschungsvorhaben und seine dem Projektverlauf entsprechenden Bearbeitungsstände wurden regelmäßig in dem zuständigen DIN Normenausschuss NA 005-51-08AA „Eurocode für Membrantragwerke DIN 18204-1 sowie DIN 4134, Spiegelausschuss zu CEN/TC 250/WG 5“ vorgestellt und konstruktiv diskutiert. Ferner wurden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens dem zuständigen europäischen Normenausschuss CEN/TC 250 WG5 „Membrane Structures“ vorgestellt, in dem zurzeit an einer Technical Specification (TS) „Design of Tensioned Membrane Structures“ gearbeitet wird, in der optimalerweise die Ergebnisse dieses Vorhabens implementiert werden sollen.

Arbeitsziele

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des Vorhabens lassen sich in mehrere Teilziele untergliedern, die den Verbundpartnern direkt zugeordnet werden können, wobei durchaus mehrere Verbundpartner die gleichen Teilziele haben können. Im Nachfolgenden sind die Teilziele aufgeführt, wobei die Verbundpartner ihnen direkt zugeordnet werden.

Technische Arbeitsziele

- (1) Optimierung der Schweißprozesse für die Erstellung von Flächenschweißnähten von ETFE-Folien (**VF, TE, SC**)

- (2) Erzielung einer hohen und verlässlichen Schweißnahtqualität auf Basis zu entwickelnder Prozeduren zur Sicherstellung der Qualität der Flächenschweißnähte, die sich in hohen Tragfähigkeiten und langen Haltbarkeiten ausdrückt. **(VF, TE, SC, formTL)**
- (3) Entwurf eines nationalen Standardisierungsdokumentes, z. B. einer DIN SPEC, die die Ausführung und Prüfung von ETFE-Folienschweißnähten standardisiert. **(UDE, DEKRA, VF, TE, SC, formTL)**
- (4) Nach Abschluss des Vorhabens: Übertragung der in diesem Vorhaben geschaffenen Regeln in die gerade in der Entwicklung befindliche CEN Technical Specification „Design of Tensioned Membrane Structures“ und den anschließend daraus zu entwickelnden Eurocode für Membrantragwerke. **(UDE, DEKRA, VF, TE, SC, formTL)**

Wissenschaftliche Arbeitsziele

- (1) Grundsätzlicher Erkenntnisgewinn zum Tragverhalten von Flächenschweißnähten von ETFE-Folien unter Berücksichtigung variierender Einflussparameter, wie Probekörperform, Schweißnahtbreite, Schweißverfahren, Klemmung etc. **(UDE, DEKRA)**

Technische und Wissenschaftliches Arbeitsziele

- (1) Ermittlung der verlässlich von den Marktteilnehmern derzeit erreichbaren Schweißnahtfestigkeiten, um einen möglichst anspruchsvollen, hohe Qualität sichernden Mindestfestigkeitswert (oder gegebenenfalls verschiedene Werte in verschiedenen Klassen, anwendbar für Bauprojekte mit verschiedenen Qualitätsanforderungen) festzulegen, der auf der einen Seite als Grundlage eines Standardisierungsprozesses herangezogen werden kann, der aber auf der anderen Seite nicht in unvertretbarer Weise einzelne deutsche und europäische Marktteilnehmer ausschließt. **(UDE, DEKRA, VF, TE, SC, formTL)**
- (2) Entwicklung einer einheitlichen Prüfmethodik für die Prüfung von Flächenschweißnähten, die eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. **(UDE, DEKRA)**
- (3) Entwicklung einer standardisierten Prozedur, die die Qualifizierung der Schweißverfahren und des Schweißpersonals regelt und den Schweißprozess vereinheitlicht. Dies beinhaltet:
 - a. Entwicklung einer Schweißverfahrensprüfung **(UDE, VF, TE, SC)**
 - b. Erarbeitung von Kriterien für die Qualifizierung des Schweißpersonals und der Schweißaufsicht in den produzierenden Betrieben **(UDE, VF, TE, SC)**
 - c. Entwicklung von allgemeinen Regeln, z. B. zur Erstellung eines projektspezifischen Schweißplans inklusive Schweißanweisung, zur Festlegung von Maßnahmen zur Vermeidung von Verzug und Schrumpf, Schweißfolgen etc., die geeignet sind, eine hohe Schweißnahtqualität in ETFE-Folientragwerken sicherzustellen. **(UDE, VF, TE, SC)**

Die Schweißparameter selbst können nicht standardisiert werden. Sie müssen individuell für jedes Projekt bzw. für jede Materialcharge vom Konfektionär ermittelt werden. Die Rahmenbedingungen für dieses Prozedere können und sollten allerdings vereinheitlicht werden, um allen Marktteilnehmern gleich hohe Anforderungen aufzuerlegen.

1.4 Konsortium des Verbundprojektes

Das zum **Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen (UDE)** gehörige Essener Labor für Leichte Flächentragwerke (ELLF) hat jahrzehntelange Erfahrung bei der Untersuchung mechanischer Eigenschaften von technischen Textilien und Folien. Kernarbeiten sind monoaxiale Zugversuche am Basismaterial und an Verbindungen (Schweißen, Nähen etc.), Weiterreißversuche, Haftfestigkeitsversuche der Beschichtung am Gewebe sowie biaxiale Zugprüfungen zu den Spannungs-Dehnungs-Eigenschaften technischer Textilien und Folien. Weitere Kompetenzen sind einachsige Zeitstandversuche und Zug-Kriechversuche. Das ELLF führt weltweit anerkannte Materialprüfungen für zahlreiche internationale Membranbauprojekte durch. Die Erkenntnisse aus dem vorliegenden Vorhaben sowie weiterer bearbeiteter Forschungsarbeiten zur Bemessung von nichtlinearen Membrantragwerken sowie die Ermittlung von Materialsteifigkeitsparametern anisotroper und transversal isotroper Gewebemembranen wurden zur Entwicklung der europäischen Technical Specification für Membrantragwerke und begleitende Normen genutzt und werden in Zukunft zur Entwicklung des Eurocodes für Membrantragwerks verwendet. UDE ist vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) bauaufsichtlich anerkannt als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle) nach Landesbauordnung (LBO) für die Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Bauprodukten aus dem Bereich der beschichteten Gewebe und der technischen Folien sowie akkreditiertes Prüflabor nach DIN EN ISO/IEC 17025. Die Leiterin der Forschungseinrichtung UDE, Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner, ist nicht nur in den bereits erwähnten Normenausschüssen des Membranbaus, siehe oben, als Expertin und Obfrau des NA 005-51-08AA „Eurocode für Membrantragwerke DIN 18204-1 sowie DIN 4134, Spiegelausschuss zu CEN/TC 250/WG 5“ tätig, sondern auch in anderen diversen nationalen sowie europäischen Normenausschüssen, u. a. NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung (Spiegelausschuss (SpA zu CEN/TC 250/SC 3 und ISO/TC1 167/SC 1)“, NA 005-08-14 AA „Stahlbau, Herstellung (SpA zu CEN/TC 135 und ISO/TC 167)“, CEN/TC 135/WG2 für „EN 1090-2“, NA 067-00-07AA „Verbindungselemente für den Metallbau (SpA zu CEN/TC 185)“. Durch die aktive Mitarbeit in diversen Normungsgremien ist sie mit der Normungsarbeit bestens vertraut, nicht nur in der Bemessung und Auslegung von Tragwerken, sondern auch in deren Ausführung. Des Weiteren ist sie Mitglied in den Sachverständigenausschüssen des DIBt A-400 Kunststoffbaubau und B3-400c Kunststoffbaubau, Beschichtetes Gewebe und sonstige Kunststoffe. Dr.-Ing. Jörg Uhlemann ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungseinrichtung UDE und Leiter des ELLF aktiver Experte im nationalen sowie europäischen Normenausschuss NA 054-04-04 AA „Kunststoff-Folien und kunststoffbeschichtete Flächengebilde (Kunstleder), allgemeine Eigenschaften“ und CEN/TC 248/WG 4 „Coated Fabrics“, in denen unter anderem die einschlägigen Prüfverfahren behandelt werden. Ferner war Dr. Uhlemann Project Team Member von CEN/TC 250/WG5.T2 und damit verantwortlich für die Erarbeitung der TS „Design of Tensioned Membrane Structures“.

Das **DEKRA Labor für Technische Textilien und Folien** (ehemals Labor Blum) unterstützt sowohl Hersteller und Planer im Membran- und Leichtbau bei der Entwicklung und Qualitätssicherung als auch bauausführende Firmen bei dem anschließenden Einsatz der Produkte. Seit fast vier Jahrzehnten bietet DEKRA Expertise in der Entwicklung in neuen und projektspezifische Prüfungs- und Messvorrichtungen sowie Materialentwicklungen. Zu den Haupttätigkeiten zählen Qualitätskontrolle, Überwachung des Herstellungsverfahrens, monoaxiale und biaxiale Material- und Detailprüfung sowie Vor-Ort-Inspektionen für nationale und internationale Bauprojekte. Als unabhängiges Prüflabor werden Erstprüfungen sowie Werks- und Produktionsinspektionen durchgeführt und Produktzertifikate ausgestellt. DEKRA ist anerkannt vom DIBt als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ) für Folien und beschichtete Gewebe nach Landesbauordnung (LBO) und akkreditiert

nach DIN EN ISO/IEC 17025. Zu den abgeschlossenen oder laufenden Forschungsprojekten gehören die EU-Projekte ISIMEM (CRAFT-Programm), Tensinet (Ausarbeitung von Gestaltungsrichtlinien und Aufbau eines weltweiten Netzwerks von Spezialisten und Unternehmen, die sich mit allen Aspekten der Membranarchitektur vom Architekten bis zum Lieferanten befassen), Contex-T (Entwicklung neuer Konzepte und Kompetenzen bei multifunktionalen technischen Textilmaterialien unter Einsatz von Nanotechnologie und nanostrukturierten Materialien) sowie ein AiF-Programm (transparente Isolierung) und ein Projekt des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung mit besonderem Schwerpunkt auf der Bauphysik („Eisbär“ biomimetischer Ansatz zur Energiegewinnung).

Vector Foiltec GmbH: Mit transparenten Dächern und Fassaden aus Texlon® ETFE hat das Unternehmen Vector Foiltec maßgeblich dazu beigetragen, neue Maßstäbe in der Architektur des 20. und 21. Jahrhunderts zu setzen. Als Weltmarktführer im architektonischen Folienbau und Erfinder des Texlon® ETFE-Systems hat es bereits über 1.500 internationale Projekte in den Bereichen Stadionbau, Atrien, Shoppingcenter, Zoos und Gartenparks, öffentliche Gebäude, Schwimmbäder, Schulen und Universitäten realisiert. Dr. rer. nat. Carl Maywald ist Experte im NA 005-51-08.

Taiyo Europe GmbH ist ein Unternehmen mit jahrzehntelanger Tradition für hochwertige Membranarchitektur. Eine Vielzahl von markanten und populären Projekten mit internationaler Ausstrahlung, wie beispielsweise der Millennium Dome in London oder die WM-Stadien in Kapstadt und Durban, wurden erfolgreich realisiert. Von der Formfindung über das Tragverhalten der Membranen, die Bauphysik und die spezifischen Materialeigenschaften etc. sowie eigener Forschung und Entwicklung werden von den weltweit 1300 langjährigen Mitarbeitern alle relevanten Bereiche abgedeckt. Prof. Dr.-Ing. Karsten Moritz ist Experte im NA 005-51-08.

se-cover GmbH mit Sitz in Rosenheim/Deutschland steht für innovative, nachhaltige Membranarchitektur sowie leichte Flächentragwerke für neuartige Dach- und Fassadenlösungen. Neben Forschung und Entwicklung ist hier auch die Statik, Planung sowie Konstruktion für Membrantragwerks angesiedelt. Zusätzlich bietet der Standort auch das gesamte Leistungsspektrum der Membranarchitektur von Beratung bis hin zu Logistik und Montage an. Auch nach Ende der Bauphase steht se-cover mit einem professionellen Wartungsteam für die nachhaltige Betreuung der Gebäudehülle zur Verfügung. Dipl.-Ing. Gabriele Müller ist Expertin im NA 005-51-08.

formTL zählt zu den führenden Planungsbüros für formweiche und temporäre Tragwerke. formTL bearbeitet deutschlandweit und international anspruchsvolle Projekte. Die Kompetenzen des Unternehmens sind bezogen auf den konstruktiven Membran- und Folienbau sehr weitreichend. Neben der statischen Berechnung und Auslegung textiler und polymerer Membranhüllen werden auch bauphysikalische Fragestellungen bearbeitet. In zahlreichen nationalen und internationalen Membranbau-Projekten hat formTL mitgewirkt. Dipl.-Ing. Bernd Stimpfle ist Experte im NA 005-51-08, in CEN/TC 250 WG5 sowie als Project Team Leader CEN/TC 250/WG5.T2 verantwortlich für die Erarbeitung der TS „Design of Tensioned Membrane Structures“.

Im Folgenden werden die drei ausführenden und planenden Betriebe Taiyo Europe GmbH, se-cover GmbH und Vector Foiltec GmbH als Konfektionäre A bis C anonymisiert. Die Taiyo Europe GmbH hat die Herstellung der Schweißnahtproben an NOVUM MEMBRANES GmbH, Edersleben, untervergeben. Es sei hiermit ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Betriebe neben der Ausführung teilweise sogar im höheren Maße in planerische Aktivitäten involviert sind. Die Ansprechpartner dieser Betriebe haben im großen Maße zu wissenschaftlichen Themen dieses Forschungsvorhabens beigetragen.

2 Stand der Technik zu Beginn des Projektes

2.1 Schweißtechnologie

Der Werkstoff ETFE gehört unter den Kunststoffen zur Gruppe der Thermoplaste. Neben den thermoplastischen Elastomeren gehören die Thermoplaste zu den Kunststoffen, die schweißgeeignet sind. Der Schweißprozess ist dabei von mehreren Parametern abhängig, da sich durch das Schweißen die strukturellen und mechanischen Eigenschaften ändern. Die morphologischen Strukturen der zu verschweißenden Kunststoffe sind dabei entscheidend. Verbindungen zwischen Kunststoffen mit amorphen und teilkristallinen Strukturen sind nicht möglich – z. B. Verbindungen aus PVC und ETFE –, da sich die unregelmäßig angeordneten Makromoleküle der amorphen Strukturen nicht mit den teilweise geregelt angeordneten Strukturen der kristallinen Strukturen verbinden. Beim Verbinden ungleicher Strukturtypen plastizieren und verschmelzen die Kontaktflächen der Fügepartner nicht. Die Verbindungen ungleicher Fügepartner entstehen in der Regel durch Vibration und/oder Druck und bilden sich durch Verklammerungen der Makromoleküle. Um Schweißverbindungen herstellen zu können, sind Fügepartner von gleicher Morphologie zu wählen. Durch eine Wärmezufuhr beim Schweißprozess werden die Fügepartner, hier ETFE-Folien, zum viskosen Fließen gebracht, unter Druck miteinander verbunden und anschließend unter bestehendem Druck abgekühlt, sodass die verschmolzenen Folien im verbundenen Zustand erstarren, [8] und [9].

ETFE wird als unpolarer Kunststoff in Folienform mit Heizbalken verschweißt. Bei den verschiedenen Heizbalkenschweißmaschinen werden die zu fügenden Zuschnitte übereinandergelegt, mit dem Heizbalken aufgeschmolzen und mit definiertem Druck aneinandergespreßt. Der Druck wird für eine definierte Zeit aufrecht gehalten. Anschließend wird die Naht über einen gewissen Zeitraum heruntergekühlt. Die Schweißnahtqualität hängt von der Qualität der Ausgangsmaterialien sowie in besonderem Maße von den projektspezifischen und materialchargenabhängigen Parametern für Schweißzeit, Schweißtemperatur, Arbeitsdruck, Kühlzeit und Kühltemperatur ab. Die letztgenannten Parameter werden von Konfektionären mit hohen werkeigenen Qualitätsstandards für jedes Projekt individuell durch Probeschweißungen und anschließende hausinterne Zugversuche ermittelt.

Für die Anfertigung der Flächenschweißnähte im Werk werden grundsätzlich drei Schweißmaschinentypen unterschieden:

- stationäre Heizbalkenschweißmaschinen mit langem Heizbalken (1),
- verfahrbare Heizbalkenschweißmaschinen mit kurzen Heizbalken (2) und
- Verfahrschweißmaschinen mit kurzen Heizbalken (3).

Bei Heizbalkenschweißmaschinen wird über die Heizbalkenlänge die Abschnittslänge der Schweißnaht festgelegt. Die in Bild 4 (a) dargestellte Heizbalkenschweißmaschine verfügt über einen langen Heizbalken, der durch die konstruktionsbedingt limitierte Arbeitsfläche die maximale Länge der Schweißnaht begrenzt. Mithilfe der stationären Heizbalkenschweißmaschine mit kurzen Heizbalken lassen sich flexible Schweißnahtlängen durch überlagernde Einzelnähte herstellen. An den überlappenden Stellen wird somit das Material zweimal aufgeschmolzen. Generell führt das mehrmalige Aufschmelzen zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften an dieser Stelle, wodurch die Attraktivität und Rationalität langer Heizbalken begründet ist.

Eine Schweißmaschine mit kurzen Heizbalken ermöglicht neben der Anfertigung von Schweißnähten mit beliebiger Länge ebenfalls die Anfertigung gekrümmter Schweißnähte. Die Krümmung der Flächenschweißnähte resultiert aus der Zuschnittsberechnung, die ein 3D-Folienkissen auf eine ebene Folienbahn projiziert. Je nach Grundrissgeometrie und gewähltem Stich der Kissenpneu besitzen die Kanten der zu schweißenden Zuschnitte einen unterschiedlich starken Krümmungsgrad. Der kurze Heizbalken ermöglicht die Herstellung kurzer, gerader Schweißnähte, die schräg zueinander angeordnet eine gekrümmte Schweißnaht assemblieren.



Bild 4 Von Vector Foiltec entwickelte Heizbalkenschweißmaschine mit fester Schweißnahtlänge
(Quelle, ©: Vector Foiltec GmbH)

Als weitere Alternative ist die Herstellung von Flächenschweißnähten mithilfe des Verfahrschweißens zu nennen. Bei dieser Schweißmethode werden die Fügepartner über einen verfahrbaren Heizbalkenkopf kontinuierlich miteinander verschweißt, siehe Bild 3. Mit diesem Verfahren sind sowohl beliebig lange wie auch gekrümmte Schweißnähte ohne Mehrfachaufschmelzung herstellbar. Allerdings weist das Verfahren durch den deutlich zeitaufwendigeren Schweißprozess ein geringeres wirtschaftliches Potential auf. Die Breite der Flächenschweißnähte – unabhängig vom Schweißverfahren – wird durch die Heizbalkenbreite bestimmt.

Aus den bisherigen Beschreibungen zu den Schweißverfahren wird deutlich, in welchem Spannungsfeld die Konfektionäre agieren. Neben der geeigneten Wahl der Schweißparameter – Schweißzeit, Schweißtemperatur, Anpressdruck, Kühlzeit und Kühltemperatur – sind die konstruktiven Festlegungen der Heizbalkenabmessungen und Schweißtechnik sowie die Weiterentwicklungen der Schweißtechnologie nur durch ausreichend hoch qualifiziertes Schweißpersonal zu erreichen. Gleichzeitig muss eine regelmäßige werkseigene Produktionskontrolle stattfinden, um die geforderten Schweißnahtqualitäten stetig herstellen zu können.

In diesem Sinne herrscht bei den Unternehmen ein hoher Bedarf an Standardisierung und Normung, um eine hohe Qualität und Sicherheit zu gewährleisten und gleichzeitig gleiche Marktbedingungen für alle Marktteilnehmer zu schaffen. Für ETFE-Folientragwerke im Bauwesen existieren derzeit keine Produkt-, Ausführungs- und Bemessungsnormen. Daher wird es von den produzierenden und planenden Unternehmen als sehr dringlich eingestuft, hier Abhilfe zu schaffen. Dies schlägt sich seit einigen Jahren in verstärkten Normungsaktivitäten nieder. Wie bereits erwähnt, wurde zwischenzeitlich in CEN/TC 250/WG5 eine Technical Specification (TS) für Membrantragwerke FprCEN/TS 19102 [10] erarbeitet, die als Vorstufe zu einem zukünftigen Eurocode für Membrantragwerke dienen soll. Im Zuge dieses Harmonisierungsprozesses wurde bereits 2016 der JRC Science and Policy Report „Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures“ [14] erarbeitet, an dem die Antragsteller maßgeblich mitgewirkt haben. Aufgrund der bestehenden Regelungs- und Wissenslücken sind bisher allerdings keine Festlegungen hinsichtlich der Ausführung oder Prüfung von ETFE-Schweißnähten, deren erforderlichen Qualitätseigenschaften sowie geeigneter Bemessungsformate möglich. Hier besteht dringender Handlungsbedarf.

2.2 Bisherige Arbeiten der Antragsteller

Die Verbundpartner des vorliegenden Vorhabens sind zum einen forschende und prüfende Institutionen: das Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen, Essen (UDE) und das Labor für Technische Textilien und Folien der DEKRA Automobil GmbH, Stuttgart. Die beiden Partner bringen vor allem ihre hohen Kompetenzen im Bereich der Materialprüfung sowie der Produktionsüberwachung im Bereich der Membrantragwerke ein. Zum anderen sind die Verbundpartner in der Planung von ETFE-Konstruktionen involviert und ETFE-Folien verarbeitende Konfektionäre: Vector Foiltec (VF), Taiyo Europe (TE) und Seele Cover (SC). Sie bringen ihr Know-how bei der Konfektionierung von Folienkonstruktionen und damit auch beim Verschweißen von ETFE-Folien ein. Sie haben die Schweißnahtproben, Material inkl. Schweißarbeiten, für die experimentellen Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Des Weiteren bringt das Ingenieurbüro formTL als Verbundpartner seine hohe Kompetenz im Bereich der Planung und Ausführung von ETFE-Folientragwerken sowie in der Normungsarbeit auf diesem Gebiet ein und hat das Vorhaben beratend unterstützt.

Alle Beteiligten sind in der Normungsarbeit aktiv. Sie alle sind mindestens Experten im DIN Normenausschusses NA 005-51-08AA „Eurocode für Membrantragwerke DIN 18204-1 sowie DIN 4134“. Die Verbundpartner UDE, DEKRA, VF, TE sowie formTL stellen darüber hinaus gewählte nationale Vertreter im europäischen Normenausschuss CEN/TC 250 WG5 „Membrane Structures“. Die Leiterin der Forschungseinrichtung UDE, Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner, ist zudem nicht nur Obfrau des DIN Normenausschusses NA 005-51-08AA, sondern ist in NA 005-51 FBR "Fachbereichsbeirat KOA 01 - Mechanische Festigkeit und Standsicherheit" als Vertreterin für den Membranbau aktiv. Zum Teil sind die Partner dieses Vorhabens noch in vielen weiteren nationalen und europäischen Normenausschüssen und Arbeitsgruppen aktiv. Die vielfältige und hohe Expertise im Bereich der Normungsarbeit bildet die Grundlage für die erfolgreiche Erstellung der in diesem Vorhaben geplanten DIN-Normenentwürfe.

3 Standardisierung der Schweißnahtprüfung (AP 1)

3.1 Allgemeines

Monoaxiale Kurzzeit-Zugprüfung an ETFE-Folien und deren Verbindungen werden in der Regel gemäß DIN EN ISO 527-1 und -3 durchgeführt. Die Normenreihe DIN EN ISO 527 legt die Prüfparameter für die Bestimmung der Zugeigenschaften von Kunststoffen und Kunststoff-Verbundwerkstoffen unter festgelegten Bedingungen fest. ETFE-Flächen- und -Randschweißnähte hingegen sind Bauteile und daher nicht von dieser Normenreihe abgedeckt. Dies stellt eine Lücke in der Standardisierung dar. In Ermangelung einer passenden Norm oder Richtlinie wird die Bestimmung der Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten in Anlehnung DIN EN ISO 527-1 und -3 durchgeführt. FprCEN/TS 19102 enthält zusätzliche Regeln zur weiteren Harmonisierung für die Prüfung von Folien und deren Verbindungen für die architektonische Anwendung.

Es ist allgemein bekannt, dass die Ergebnisse von Zugprüfungen an Kunststoffen stark von den gewählten Prüfparametern abhängen, z. B. der Prüfgeschwindigkeit. Dies gilt insbesondere für Folien. DIN EN ISO 527-1 und -3 geben keine spezifischen Werte für die Prüfparameter an, sondern zeigen akzeptable Bereiche und zulässige Abweichungen auf, innerhalb derer die Parameter liegen sollten. Bei der Prüfung von ETFE-Folien führt dies zu einer erheblichen Anzahl unterschiedlicher Prüfspezifikationen, die vom jeweiligen Prüflabor festgelegt werden. Die Grundlage für ein auf Versuchen basierendes Bemessungskonzept ist jedoch die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse. Dies gilt auch für die empirische Bestimmung der Zugfestigkeit im Rahmen der Bauzulassung und der Qualitätskontrolle der Konfektionäre. Daher ist eine vereinheitlichte und standardisierte Prüfmethode zur Bestimmung der monoaxialen Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten unbedingt notwendig. In AP 1 wurde daher eine vereinheitlichte Prüfmethode für ETFE-Flächenschweißnähte entwickelt, die die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse sicherstellt.

3.2 Vorgehensweise

Für die Entwicklung einer vereinheitlichten Prüfmethode zur Prüfung von ETFE-Flächenschweißnähten wurde der Einfluss verschiedener Prüfparameter auf die Ergebnisse monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen von ETFE-Grundmaterial und -Flächenschweißnähten untersucht. Auf der Grundlage dieser Datenbasis wurden optimierte Prüfparameter sowie zulässige Toleranzen festgelegt, wobei die Praktikabilität und Handhabbarkeit im täglichen Einsatz für die Konfektionäre berücksichtigt wurde. Die untersuchten Prüfparameter umfassten:

- die Probegeometrie (AP 1.2 und 1.3),
- die Probenvorbereitung (AP 1.4),
- die Prüfgeschwindigkeit (AP 1.5) sowie
- die Klemmtechnik (AP 1.6).

Die Reihenfolge, in der die Prüfparameter optimiert wurden, entspricht der o. g. Auflistung. Zunächst wurde die Probekörpergeometrie optimiert, während die übrigen Prüfparameter gemäß einer zuvor definierten vorläufigen Prüfmethode gewählt wurden. Diese Vorgehensweise bot eine konsistente Grundlage für die systematische und kontrollierte Bewertung und Optimierung der Prüfparameter. Im Anschluss an die Optimierung der Prüfparameter wurde auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse eine vorläufige vereinheitlichte Prüfmethode entwickelt (AP 1.7). Diese wurde abschließend durch einen Vergleich der Prüfergebnisse verifiziert, die in den beiden beteiligten Prüflaboren auf der Grundlage der entwickelten Prüfmethode ermittelt wurden (AP 1.8).

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei Schweißverbindungen aus ETFE-Folien um ein Bauteil, siehe Bild 5. Das Tragverhalten von Schweißnahtproben zeichnet sich im Gegensatz zu Grundmaterialproben nicht durch ein homogenes Materialverhalten aus, sodass sich Prüfergebnisse nicht als Spannungs-Dehnungs-Diagramme darstellen lassen, sondern stellen ein Bauteilverhalten bzw. ein Traglast-Verformungs-Verhalten dar.

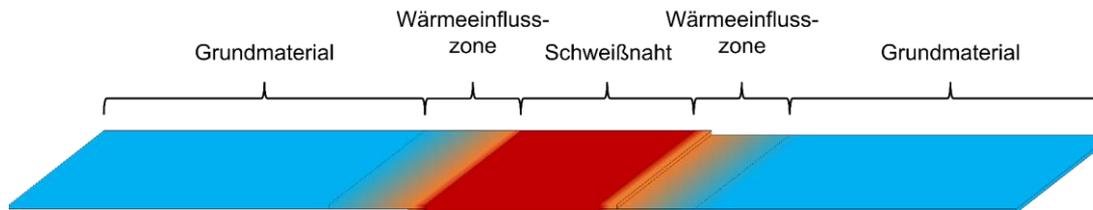


Bild 5 Das Bauteil Schweißnaht mit den verschiedenen Bereichen, in denen ein verändertes Materialverhalten vorliegt

In diesem Forschungsvorhaben wurden Proben des ETFE-Grundmaterials und von ETFE-Flächenschweißnähten in zwei verschiedenen Folienstärken, 100 µm und 250 µm, untersucht. Das Grundmaterial und die Flächenschweißnähte der gleichen Folienstärke stammen jeweils aus derselben Produktionscharge und dem gleichen Folienprodukt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Schweißnahtproben wurden von den beteiligten Konfektionären hergestellt. Lediglich ein Konfektionär hat die Herstellung der Schweißnahtproben untervergeben.

Es ist bekannt, dass ETFE-Folien ein orthotropes Materialverhalten besitzen. Aus diesem Grund müssen die monoaxialen Material- bzw. Bauteileigenschaften in beiden Materialrichtungen (Extrusionsrichtung (ED) und Transversalrichtung (TD)) bestimmt werden. ETFE-Flächenschweißnähte werden jedoch üblicherweise parallel zu ED hergestellt, sodass nur die Tragfähigkeit in TD für das Bauteil entscheidend ist. Daher wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nur die Materialeigenschaften des Grundmaterials und der ETFE-Flächenschweißnaht in TD bestimmt.

Die Qualität von ETFE-Schweißverbindungen wird anhand der Zug- und oder Abschlagtragfähigkeit quantifiziert. Demzufolge wurden bei der Aus- und Bewertung der Untersuchungsergebnisse hauptsächlich diese betrachtet. Als Darstellungsform der Tragfähigkeiten wurden Kastendiagramme gewählt, die den Streubereich der Ergebnisse anschaulich visualisieren. Analog wurden Kastendiagramme zur Darstellung der Zugfestigkeiten des ETFE-Grundmaterials genutzt. Letztendlich ist es stets das Ziel, eine möglichst hohe Tragfähigkeit bei gleichzeitig möglichst niedrigem Variationskoeffizienten anzustreben.

Zur Ermittlung von Abweichungen der Größe X (z. B. Zugfestigkeit f_u) der Konfiguration B (z. B. mit einer Foliendicke von 250 µm) bezogen auf die Konfiguration A (z. B. mit einer Foliendicke von 100 µm) wurde Gleichung (1) genutzt:

$$\Delta X_{A-B} = \frac{X_B - X_A}{X_A} [\%] \quad (1)$$

$$\text{Beispiel: } \Delta f_{u,100\mu\text{m}-250\mu\text{m}} = \frac{f_{u,250\mu\text{m}} - f_{u,100\mu\text{m}}}{f_{u,100\mu\text{m}}} [\%]$$

3.3 Optimierung der Probekörpergeometrie (AP 1.2 und 1.3)

3.3.1 Allgemein

Der Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Ergebnisse monoaxialer Zugprüfungen in Anlehnung an die DIN EN ISO 527-1 und -3 wurde in dem Prüflabor der UDE anhand der Foliendicke 100 µm und in dem Prüflabor der DEKRA anhand der Foliendicke 250 µm mit jeweils drei verschiedenen Probetypen und unterschiedlichen Längen-Breiten-Verhältnissen untersucht. Um die Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse beider Prüflabore sicherzustellen, wurden zunächst Voruntersuchungen durchgeführt. Die verschiedenen Probekörpertypen und Folienstärken wurden bei typischen Prüftemperaturen von 23 °C und 50 °C getestet.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden monoaxiale Kurzzeit-Zugprüfungen an Schweißnahtproben der drei beteiligten Konfektionäre durchgeführt. Als Referenz wurden zusätzlich experimentelle Untersuchungen am zugrundeliegenden Grundmaterial vorgenommen. Je Prüfserie wurden fünf Einzelprüfungen durchgeführt.

Parallel wurde mit Hilfe des Programmpakets Abaqus [11] ein numerisches Finite Elemente (FE-)Modell zur Simulation von monoaxialen Kurzzeit-Zugprüfungen an ETFE-Flächenschweißnähten und -Grundmaterial entwickelt, um das Tragverhalten numerisch abbilden zu können. An diesem FE-Modell wurden die Spannungsverteilungen innerhalb des Probekörpers und der Einfluss der Schweißnaht auf diese untersucht, siehe Kapitel 3.3.4.

3.3.2 Untersuchte Probekörpergeometrien

DIN EN ISO 527-3 stellt vier verschiedenen Arten von Probekörpergeometrien bereit: eine Streifenprobe (Probekörper Typ 2 (T2)) und drei Arten von Schulterproben (Probekörper Typ 1B, Typ 5 und Typ 4). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die Streifenprobe T2, eine modifizierte Version davon (MT2) und eine Schulterprobe (Probekörper Typ 5 (T5)) untersucht. In der Praxis werden in der Regel Streifenproben verwendet, deren Abmessungen von jedem Prüflabor individuell gewählt werden und nicht zwingend in Übereinstimmung mit der DIN EN ISO 527-3 stehen. Die Dehnungsaufnahme erfolgt dabei stets über den Verfahrensweg der Traverse.

DIN EN ISO 527-3, 6.1.2 empfiehlt die Verwendung der Streifenprobe T2 zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Folien und Tafeln, siehe Bild 6 (b). Auf diesem Probenkörpertyp werden zwei Messmarker an definierten Positionen für die Messung der Verlängerung des Probekörpers angebracht, die durch Video-Extensometer erfasst werden. Diese Art der Erfassung der Verformungen stellt sicher, dass nur monoaxiale Verformungen innerhalb des von den Messmarkern definierten Prüfbereich aufgenommen werden. Der empfohlene Anfangsabstand der Einspannklemmen (L) beträgt $100 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Die Markierungen sollten sich in einem Abstand (L_0) von $50 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ befinden. Dieser Probenkörpertyp (Streifenprobe T2) wurde von UDE für das 100 µm ETFE-Grundmaterial und -Flächenschweißnähte zusätzlich zum ursprünglich geplanten Prüfumfang untersucht.

Bei Werkstoffen mit sehr hohen Bruchdehnungen kann es abhängig von der Probenlänge L zum Überschreiten des Dehnungs- bzw. Verfahrenswegs der Prüfmaschine kommen. Daher darf gemäß DIN EN ISO 527-3, 6.1.1 die Probenlänge L für Folienwerkstoffe mit sehr hohen Bruchdehnungen auf 50 mm reduziert werden. Bereits bei Raumtemperatur besitzen ETFE-Folien eine sehr hohe Bruchdehnung von bis zu 400 %, während Probekörper von ETFE-Flächenschweißnähten eine Bruchdehnung von bis zu 300 % aufweisen. Bei erhöhten Prüftemperaturen liegen die Bruchdehnungen bei bis zu 500 % bzw. bis zu 400 %. ETFE-Folien besitzen damit eine sehr hohe Bruchdehnung. Besonders bei der erhöhten Prüftemperaturen stellt dies ein Problem dar, da Proben, die eine bestimmte Probenlänge L aufweisen, aufgrund

der hohen Bruchdehnungen regelmäßig aus den Temperierkammern herausgezogen werden. Diese Prüfungen müssen als ungültig bewertet werden, da dann die Probe keinem homogenen Temperatureinfluss unterliegt.

Die Modifikation gemäß DIN EN ISO 527-3, 6.1.1 muss daher für ETFE-Folien und deren Verbindungen auf den Probekörper Typ 2 angewandt werden, um vor allem Prüfungen bei erhöhten Prüftemperaturen zu ermöglichen. Die auf diese Weise alternierten Probekörper werden von den Autoren als modifizierte Probekörper Typ 2 (MT2) bezeichnet, siehe Bild 6 (a).

Aufgrund des reduzierten Anfangsabstands der Einspannklemmen kann die Markierung für die Messung der Verformung nur durch die Verschiebung des Oberhauptes (Traversenweg) der Prüfmaschine erfasst werden. Bei der auf dieser Weise ermittelten Verformung kann nicht sichergestellt werden, dass nur monoaxiale Verformungen aufgenommen werden, da im Bereich der Probenklemmung aufgrund der behinderten Querkontraktion biaxiale Spannungsverhältnisse vorherrschen. Der Traversenweg kann durch weitere Einflüsse des Klemmbereichs wie, z. B. zu vermeidender Schlupf der Probe, beeinträchtigt werden.

Die Schulterprobe des Probekörper Typ 5 (T5) gemäß DIN EN ISO 527-3, 6.1.2 ist in Bild 6 (c) dargestellt. Die Verformungen des Probekörpers T5 wurden durch ein Video-Extensometer gemessen. Die untersuchten Abmessungen des Prüfbereichs für die drei Probekörpertypen sind in Tabelle 1 dargestellt.

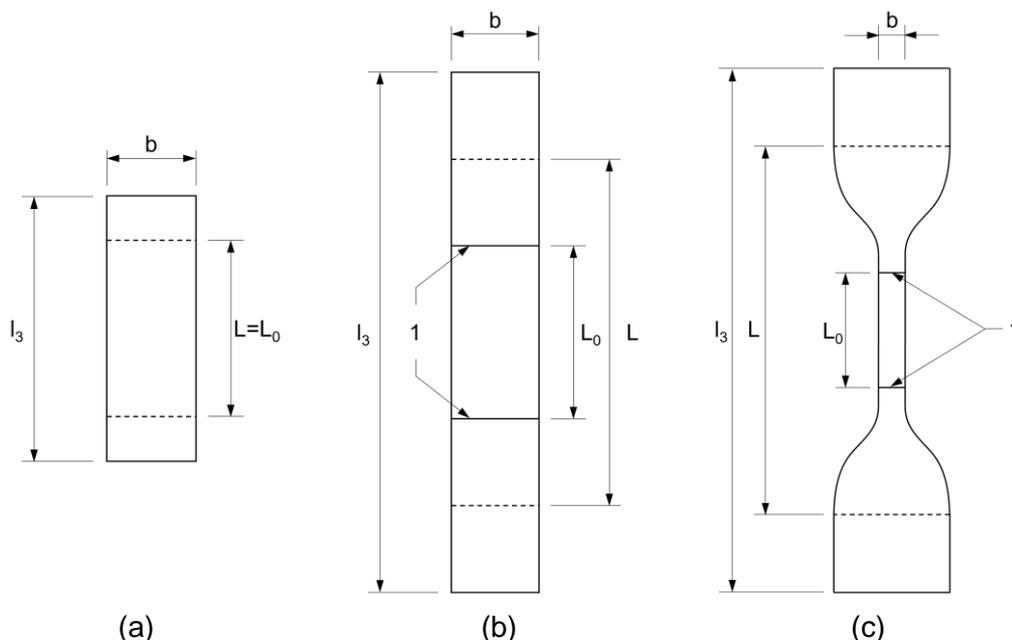


Bild 6 Untersuchte Probekörpertypen für die Optimierung der Probekörpergeometrie gemäß DIN EN ISO 527-3; (a) Probekörper Typ 2 modifiziert gemäß 6.1.1 (MT2), (b) Probekörper Typ 2, (c) Probekörper Typ 5

Tabelle 1 Untersuchte Abmessungen der verschiedenen Probekörpertypen

Probekörpertyp	$L_0 \times b$	L	l_3
	[mm] x [mm]	[mm]	[mm]
MT2	50 x 10; 50 x 20*; 50 x 50; 80 x 10; 80 x 20; 80 x 50*	$L = L_0$	≥ 70 für $L_0 = 50$ mm; ≥ 100 für $L_0 = 80$ mm;
T2*	50 x 10; 50 x 20; 50 x 50; 80 x 10; 80 x 20; 80 x 50	100 für $L_0 = 50$ mm; 100 für $L_0 = 80$ mm	≥ 120 für $L_0 = 50$ mm; ≥ 180 für $L_0 = 80$ mm;
T5	50 x 10; 50 x 50	160	230

*Nur für 100 μ m untersucht

Bei der Auswertung der Prüfergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die unterschiedlichen Klemmlängen (L_0) in Verbindung mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min zu unterschiedlichen Dehnraten führen. Diese verschiedenen Dehnraten reichen von 200 %/min für die 50 mm langen MT2-Proben bis zu 62,5 %/min für die 80 mm langen T2-Proben. Die Dehnraten der Schulterprobe werden unter Berücksichtigung der parallelen Längen (L_1) zwischen den verstärkten Bereichen (Schultern) auf 150 %/min geschätzt. Die unterschiedlichen Dehnraten beeinflussen die Ergebnisse der Zugprüfungen und werden in der folgenden Auswertung berücksichtigt.

3.3.3 Experimentelle Untersuchungen (AP 1.2)

3.3.3.1 Einfluss der Probekörpergeometrie auf die gemessene Zugfestigkeit von ETFE-Grundmaterial

Als Referenzprüfungen wurde der Einfluss der Probekörpergeometrie zunächst auf die gemessene Zugfestigkeit von ETFE-Grundmaterial in Transversalrichtung (engl. transversal direction, kurz TD) untersucht. Diese Untersuchungen wurden bei Raumtemperatur ($23\text{ °C} \pm 2\text{ K}$) und erhöhten Prüftemperaturen ($50\text{ °C} \pm 2\text{ K}$) durchgeführt.

In Bild 7 sind die Kastendiagramme der gemessenen Zugfestigkeiten der Probekörper Typen 2 (T2) und 5 (T5) mit verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs bei Raumtemperatur dargestellt. Weiterhin sind die Variationskoeffizienten V_x , siehe eingerahmte Felder in Bild 7, sowie die mittleren Zugfestigkeiten f_u in MPa gegeben. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Probekörpergeometrie einen Einfluss auf die gemessene Zugfestigkeit von ETFE-Folien hat. So besitzen schmale T2-Probekörper eine höhere Zugfestigkeit (z. B. $f_{ux,T2,50 \times 10,100\ \mu\text{m}} = 49,8\text{ MPa}$) als breite T2-Probekörper derselben Probenlänge (z. B. $f_{ux,T2,50 \times 50,100\ \mu\text{m}} = 38,5\text{ MPa}$). Dabei liegen die Proben mit einer Breite von 10 mm und 20 mm innerhalb desselben Streubereichs, während die 50 mm breiten Proben eine signifikant geringere Zugfestigkeit aufweisen. Die Ergebnisse der T2-Probekörper deuten an, dass die Länge des Prüfbereichs L_0 ebenfalls einen Einfluss auf die gemessene Zugfestigkeit hat. Kürzere Proben (z. B. $f_{ux,T2,50 \times 20,100\ \mu\text{m}} = 48,5\text{ MPa}$) weisen im Vergleich zu längeren Proben (z. B. $f_{ux,T2,80 \times 20,100\ \mu\text{m}} = 41,7\text{ MPa}$) eine höhere Zugfestigkeit auf.

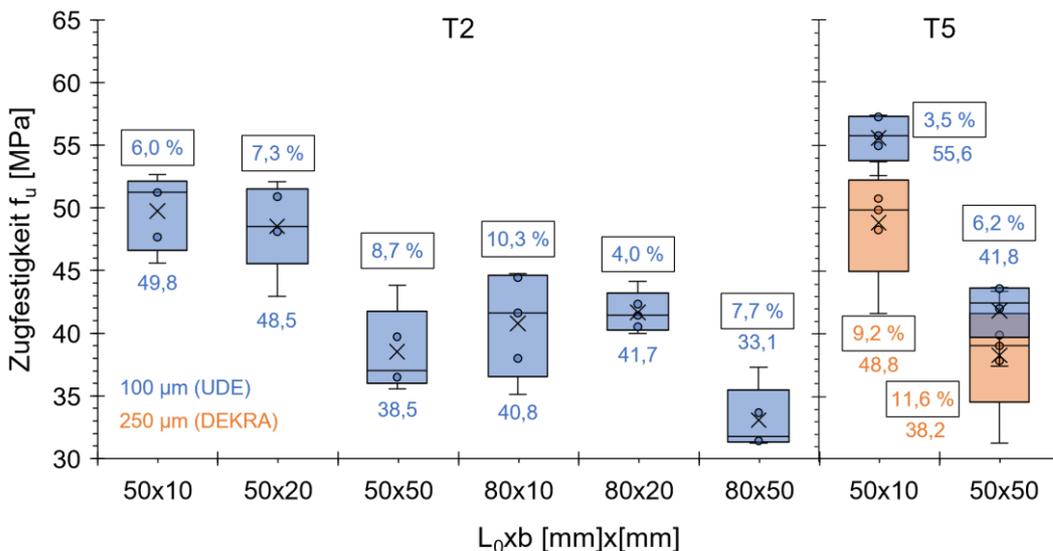


Bild 7 Gemessene Zugfestigkeiten des ETFE-Grundmaterials (100 µm (UDE) und 250 µm (DEKRA)) für den Probekörper Typ 2 (T2) und Typ 5 (T5) mit verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Zugfestigkeit $f_{u,x}$ in MPa, TD, T = $23\text{ °C} \pm 2\text{ K}$, n = 5

In Bild 8 sind die Zugfestigkeiten des ETFE-Grundmaterials bei Raumtemperatur für den modifizierten Probekörper Typen 2 (MT2) mit verschiedenen Abmessungen des

Prüfbereichs dargestellt. Die Ergebnisse zeigen ebenfalls einen eindeutigen Einfluss der Probekörpergeometrie auf die gemessene Zugfestigkeit des ETFE-Grundmaterials. Auch hier ist klar zu erkennen, dass breitere Proben eine geringere Zugfestigkeit ($f_{u,x,b=50,100 \mu\text{m}} = 35,8 \text{ MPa}$, $f_{u,x,b=50,250 \mu\text{m}} = 52,8 \text{ MPa}$) aufweisen als schmalere Proben ($f_{u,x,b=10,100 \mu\text{m}} = 58,9 \text{ MPa}$, $f_{u,x,b=50,250 \mu\text{m}} = 57,5 \text{ MPa}$). Analog zur Analyse der Probekörper Typen 2 und 5, legen die Ergebnisse einen Zusammenhang zwischen der Länge des Prüfbereichs L_0 und der gemessenen Zugfestigkeit des ETFE-Grundmaterials nahe. Kürzere Probekörper weisen eine höhere Zugfestigkeit auf als längere Probekörper.

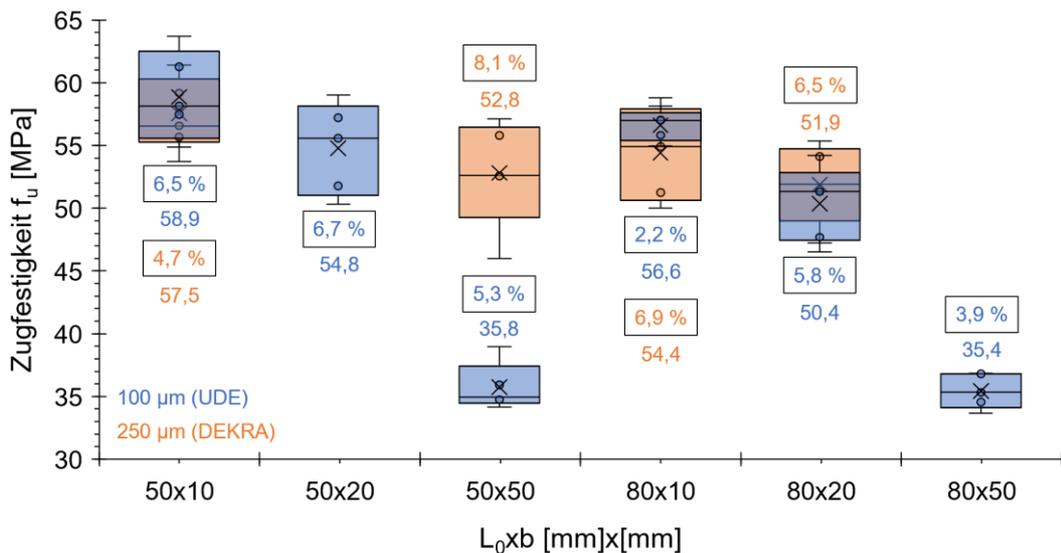


Bild 8 Gemessene Zugfestigkeiten des ETFE-Grundmaterials (100 µm (UDE) und 250 µm (DEKRA)) für den modifizierten Probekörper Typ 2 (MT2) mit verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Zugfestigkeit $f_{u,x}$ in MPa, TD, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

Ein Vergleich der Ergebnisse der drei Probekörpertypen T2, T5 und MT2 legt nahe, dass MT2 eine höhere Zugfestigkeit erreicht als die Probekörpertypen T2 und T5. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Prüfungen mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min durchgeführt wurden, was durch die unterschiedlichen Probekörpergeometrien zu unterschiedlichen Dehngeschwindigkeiten [%/min] führt. Probekörpertyp MT2 mit einer Länge des Prüfbereichs L_0 von 50 mm weist eine Dehngeschwindigkeit von 200 %/min auf, während Probekörpertyp T2 mit derselben Länge des Prüfbereichs L_0 aber doppeltem Abstand der Einspannklemmen L eine Dehngeschwindigkeit von 100 %/min aufweist. Probekörpertyp T5 weist mit einer Prüflänge L_0 von 50 mm eine Dehngeschwindigkeit von ca. 150 %/min auf. Um den Einfluss der verschiedenen Dehngeschwindigkeiten zu neutralisieren, wurden zusätzliche experimentelle Untersuchungen an den Probekörpertypen T2 und T5 mit einer Dehngeschwindigkeit von 200 %/min ($L_0 \times b$: 50 mm x 10 mm) durchgeführt. Bild 10 zeigt die Kastendiagramme der Zugfestigkeiten dieser experimentellen Untersuchungen bei Raumtemperatur. Die Zugfestigkeiten aller untersuchten Probekörpergeometrien liegen im vergleichbaren Streubereich. Der Probekörpertyp scheint daher keinen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit

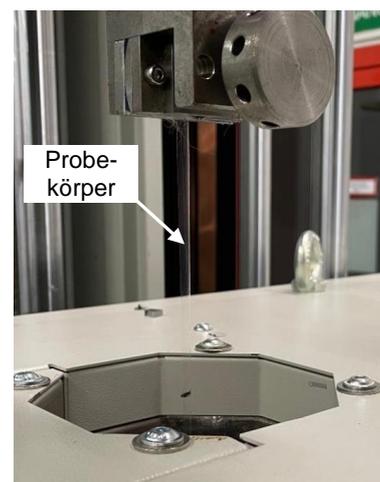


Bild 9 Aus Temperierkammer gezogene T2-Probe, Foto: UDE/IML

von ETFE-Folien zu haben. Die oben beschriebenen Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Dehngeschwindigkeiten während der Versuchsdurchführung zurückzuführen.

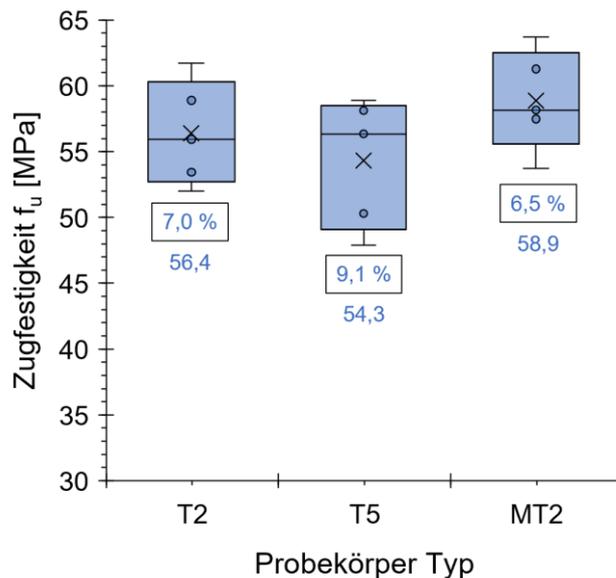


Bild 10 Gemessene Zugfestigkeiten des ETFE-Grundmaterials (100 μm (UDE)) für T2, T5 und MT2 mit einer Dehngeschwindigkeit von 200 %/min, $L_0 \times b$: 50 mm x 10 mm, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Zugfestigkeit $f_{u,x}$ in MPa, TD, T = 23 °C \pm 2 K, n = 5

Die experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Zugfestigkeit bei erhöhter Prüftemperatur konnte nur für Probekörpertyp MT2 ausgewertet werden. Die längeren Probekörpertypen T2 und T5 wurden während der Prüfung aus der Temperierkammer herausgezogen, siehe Bild 9. Eine homogene Temperaturverteilung über den Probekörper konnte während der Prüfung daher nicht sichergestellt werden.

Auch wenn die Proben stets innerhalb der Temperierkammer versagten, kann ein möglicher Einfluss der nicht homogenen Temperaturverteilung auf die Zugfestigkeit nicht ausgeschlossen werden. Im Gegenteil, die erhöhten Streuungen der gemessenen Zugfestigkeit (z.B. $V_{x,T2,50 \times 10,50 \text{ °C}} = 18,8 \%$) bei erhöhten Temperaturen im Vergleich zu denen bei Raumtemperatur (z.B. $V_{x,T2,50 \times 10,23 \text{ °C}} = 6,0 \%$) weisen auf einen Einfluss hin. Daher können die experimentellen Untersuchungen an den Probekörpertypen T2 und T5 bei erhöhten Temperaturen nicht ausgewertet werden.

Die Untersuchungen lassen Rückschlüsse auf eine optimierte Probekörpergeometrie zu. Da das ETFE-Grundmaterial ebenfalls im Hinblick auf die Entwicklung einer optimierten Schweißnahtprobe untersucht werden sollte und die Untersuchungen zeigen, dass die Probekörpertypen T2 und T5 bei hohen Temperaturen nicht gültig prüfbar sind, kommen die Probekörpertypen T2 und T5 nicht als optimierte Probekörpergeometrie in Betracht. Nichtsdestotrotz werden die Probekörpertypen T2 und T5 bei der nachfolgenden Auswertung des Einflusses der Probekörpergeometrie auf die Traglast von ETFE-Flächenschweißnähte berücksichtigt.

Bild 11 zeigt die Kastendiagramme zur Zugfestigkeit des Probekörpertyps MT2 für die verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs und bei erhöhter Prüftemperatur. Die Ergebnisse zeigen keinen systematischen Zusammenhang zwischen den Abmessungen des Prüfbereichs und der gemessenen Zugfestigkeit. Die Ergebnisse legen daher nahe, dass die Abmessungen des Prüfbereichs bei erhöhten Temperaturen keinen Einfluss auf die gemessene Zugfestigkeit des ETFE-Grundmaterials besitzen. Eine mögliche Erklärung für diese Diskrepanz könnte die erhöhte Beweglichkeit der Molekülketten unter erhöhten Temperaturen sein. Diese

könnte verhindern, dass sich aufgrund geometrischer Einflüsse Spannungsspitzen im Prüfbereich der Proben bilden.

Zusammenfassend legen die Ergebnisse der Referenzuntersuchungen am ETFE-Grundmaterial nahe, dass erhöhte Breiten b und Längen L_0 des Prüfbereiches für monoaxiale Kurzzeit-Zugprüfungen bei Raumtemperatur einen negativen Einfluss auf die Zugfestigkeit besitzen. Durch die ungünstige Kombination aus erhöhter Bruchdehnung der ETFE-Folien bei erhöhten Prüftemperaturen und der limitierten Höhe der Temperierkammer, verbleibt nur Probekörpertyp MT2 während der gesamten Prüfung innerhalb der Temperierkammer. Die Ergebnisse des Probekörpertyps MT2 legen nahe, dass die Abmessungen des Prüfbereichs bei erhöhten Temperaturen keinen Einfluss auf die Zugfestigkeit besitzen.

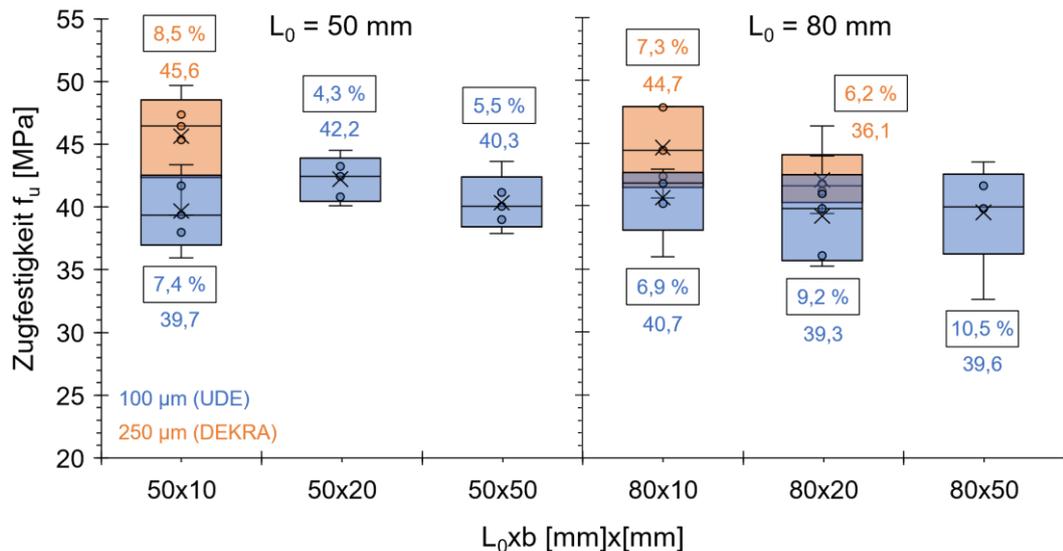


Bild 11 Gemessene Zugfestigkeiten des ETFE-Grundmaterials (100 µm (UDE) und 250 µm (DEKRA)) für den modifizierten Probekörper Typ 2 (MT2) mit verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Zugfestigkeit $f_{u,x}$ in MPa, TD, $T = 50 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

3.3.3.2 Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Traglast von ETFE-Flächenschweißnähten

Die Untersuchung des Einflusses der Probekörpergeometrie auf die Traglast von ETFE-Flächenschweißnähten wurde anhand von Schweißnahtproben der drei beteiligten Konfektionäre durchgeführt. Analog zu den Referenzuntersuchungen wurden die Prüfungen bei Raumtemperatur ($T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$) und bei erhöhten Temperaturen ($T = 50 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$) durchgeführt.

In Bild 12 sind die Traglasten des Probekörpertyps T2 mit verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs als Kastendiagramme dargestellt. Dieser Probekörpertyp wurde ausschließlich für die Foliendicke von 100 µm geprüft. Die Ergebnisse deuten an, dass kein systematischer Zusammenhang zwischen den Abmessungen des Prüfbereichs und der Traglast der Schweißnahtproben besteht. Auffällig ist jedoch, dass der Variationskoeffizient für breitere Probekörpergeometrien tendenziell erhöht ist.

Ferner zeigen die Ergebnisse, dass die Traglast und der zugehörige Variationskoeffizient abhängig vom Konfektionär sind. Konfektionär C besitzt mit Traglasten zwischen 37,1 MPa (80x50) und 43,5 MPa (80x10) sehr hohe Traglasten, dicht gefolgt von Konfektionär A mit 37,3 MPa (80x10 und 80x20) bis 39,7 MPa (50x20). Allerdings sind die Variationskoeffizienten des Konfektionärs A mit 1,3 % bis 3,2 % stets die niedrigsten. Konfektionär B besitzt mit Traglasten von 34,1 MPa (80x50) bis

36,7 MPa (50x20) leicht geringere Tragfähigkeiten. Insgesamt weisen alle Schweißnahtproben eine erfahrungsgemäß hohe Tragfähigkeit auf.

Aus Mangel an Probenmaterial des Konfektionärs A wurden die 50 mm breiten Proben dieses Konfektionärs nicht geprüft, da diese am meisten Schweißnahtlänge für die Herstellung benötigen.

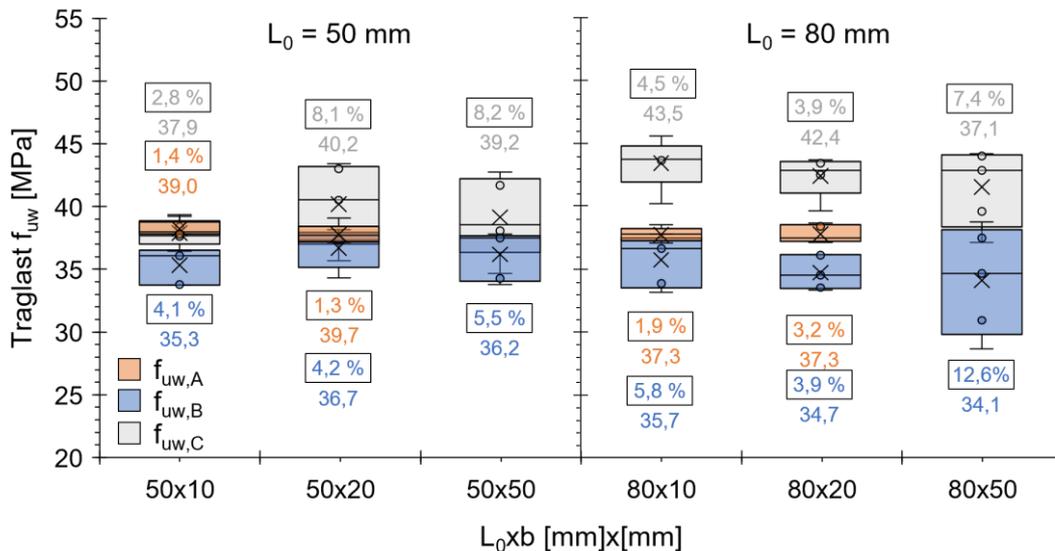


Bild 12 Traglast von ETFE-Flächenschweißnähten der drei Konfektionäre A, B und C (100 µm (UDE)) für den Probekörper Typ 2 (T2) mit verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

Bild 13 zeigt die Ergebnisse für den Probekörpertyp T5. Analog zu den Ergebnissen des T2-Probekörpers sind hier keine Abhängigkeiten zwischen der Probekörpergeometrie und der Traglast erkennbar. Auch die Variationskoeffizienten zeigen keine Abhängigkeit zur Geometrie des Prüfbereichs. Die Traglasten der 100 µm T5-Proben liegen in Abhängigkeit vom Konfektionär und der Abmessungen des Prüfbereichs im Streuband der Ergebnisse für die T2-Proben.

Die 250 µm Flächenschweißnähte weisen dagegen tendenziell eine leicht geringere mittlere flächenbezogene Tragfähigkeit auf als die Flächenschweißnähte aus dem dünneren Folienmaterial, siehe Bild 13. Beispielsweise weisen die mittleren Tragfähigkeiten des Konfektionärs C für die Abmessung des Prüfbereichs von 50 mm x 10 mm eine Verringerung von $\Delta_{C,50x10,100 \mu\text{m} - 250 \mu\text{m}} = -9,2 \%$ auf. Die mittleren Tragfähigkeiten des Konfektionärs A weisen für die Probekörperabmessung von 50 mm x 500 mm eine Verringerung von $\Delta_{A,50x50,100 \mu\text{m} - 250 \mu\text{m}} = -15,9 \%$ auf.

In Bild 14 sind die Kastendiagramme der Traglasten der ETFE-Flächenschweißnähte der 100 µm MT2-Proben dargestellt. Auch bei diesem Probekörpertyp zeigen die experimentellen Untersuchungen keine Abhängigkeit zwischen der Abmessung des Prüfbereichs und der Tragfähigkeit der ETFE-Flächenschweißnähte bzw. dessen Variationskoeffizienten.

Die ermittelten Tragfähigkeiten stimmen mit denen der T2- und T5-Proben desselben Konfektionärs und derselben Materialdicke überein. Die unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten scheinen hier keinen signifikanten Einfluss auf die Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten zu haben.

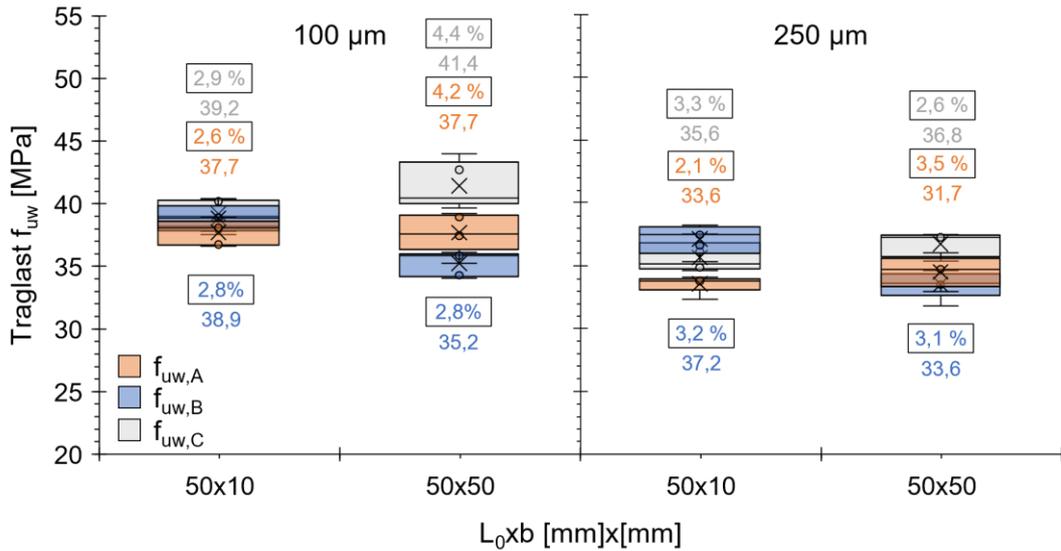


Bild 13 Traglast von ETFE-Flächenschweißnähten der drei Konfektionäre A, B und C (100 µm (UDE) und 250 µm (DEKRA)) für den Probekörper Typ 5 (T5) mit verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, $T = 23\text{ °C} \pm 2\text{ K}$, $n = 5$

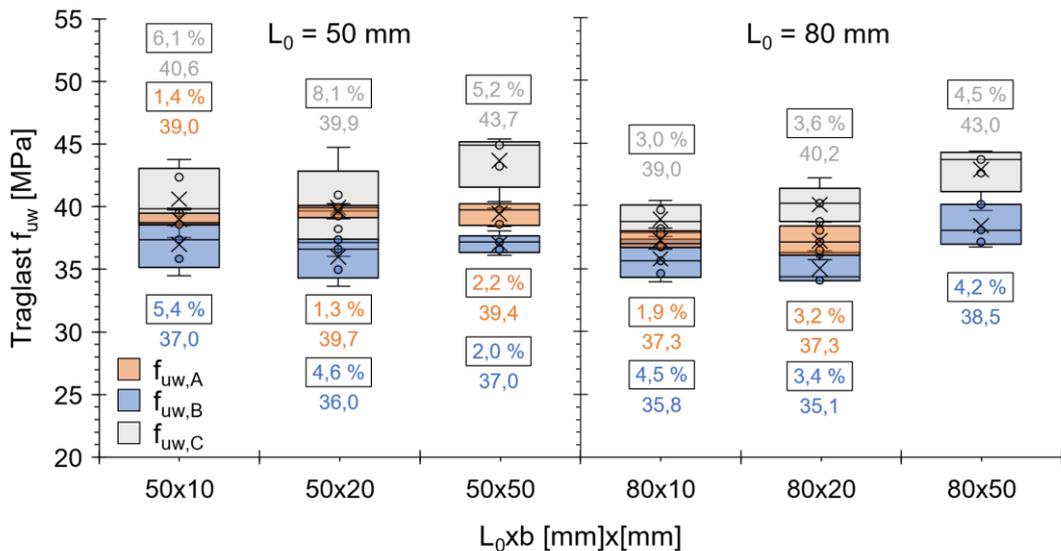


Bild 14 Traglast von ETFE-Flächenschweißnähten der drei Konfektionäre A, B und C (100 µm (UDE)) für den modifizierten Probekörper Typ 2 (MT2) mit verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, $T = 23\text{ °C} \pm 2\text{ K}$, $n = 5$

Die Untersuchungen an ETFE-Flächenschweißnähten an 250 µm dicken ETFE-Folien hingegen deuten abermals einen Zusammenhang zwischen der Breite des Prüfbereichs b und der Streuung der Tragfähigkeit an, siehe Bild 15. Breitere Proben weisen einen höheren Variationskoeffizienten auf als schmalere Proben.

Analog zu den Referenzprüfungen am ETFE-Grundmaterial liefern die T2- und T5-Proben aufgrund der limitierten Höhe der Temperierkammer keine verwertbaren Ergebnisse. Somit eignen sich diese beiden Probekörpertypen nicht als optimierte Probekörpergeometrie für die vereinheitlichte Schweißnahtprüfung.

Die Ergebnisse der 100 µm MT2-Proben zeigen bei erhöhter Prüftemperatur übereinstimmend mit den Prüfungen bei Raumtemperatur keinen systematischen Zusammenhang zwischen den Abmessungen des Prüfbereichs und der Tragfähigkeit, siehe Bild 16. Abhängigkeiten der Variationskoeffizienten werden ebenfalls nicht erkannt.

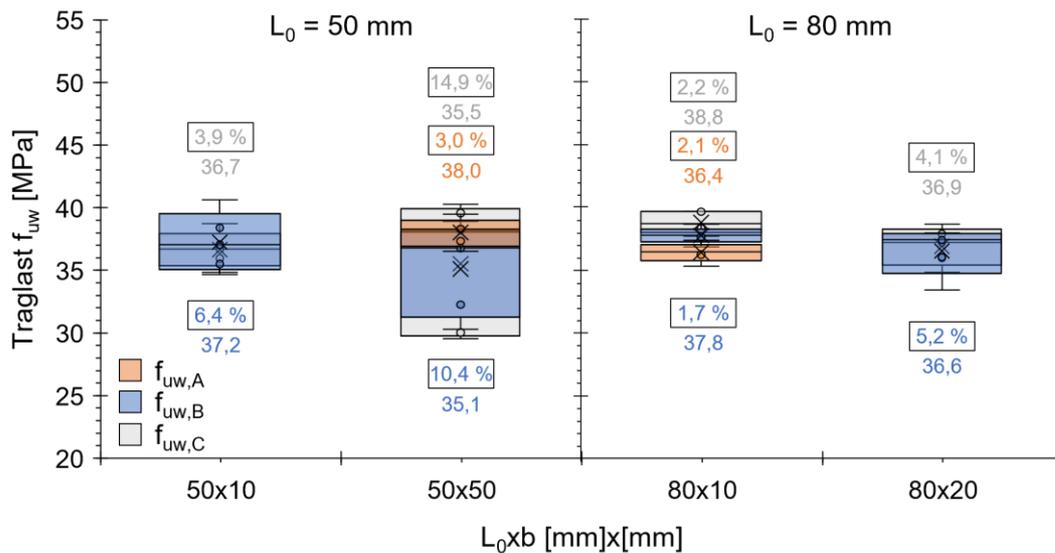


Bild 15 Traglast von ETFE-Flächenschweißnähten der drei Konfektionäre A, B und C (250 µm (DEKRA)) für den modifizierten Probekörper Typ 2 (MT2) mit verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

Die Ergebnisse für die 100 µm Schweißnahtproben deuten an, dass die Herstellerabhängigkeit der Tragfähigkeiten bei erhöhten Prüftemperaturen ausgeprägter ist. Die Schweißnahtproben des Konfektionärs C weisen bei erhöhten Temperaturen nur leicht verringerte Tragfähigkeiten von z. B. $\Delta_{C,23 \text{ °C} - 50 \text{ °C}} = -3,2 \%$ (50x10) im Vergleich zu den Untersuchungen bei Raumtemperatur auf, während die Tragfähigkeiten der Schweißnahtproben der Konfektionäre A (z. B. $\Delta_{A,23 \text{ °C} - 50 \text{ °C}} = -16,2 \%$ (50x10)) und B ($\Delta_{B,23 \text{ °C} - 50 \text{ °C}} = -22,4 \%$ (50x10)) eine deutliche Abminderung erfahren. Dies deutet an, dass die verwendeten Schweißparameter und die Ausführung ebenfalls einen Einfluss auf die Temperatursensitivität der Tragfähigkeit von Flächenschweißnähten besitzen.

Die Ergebnisse der 250 µm Schweißnahtproben zeigen ebenfalls keine systematischen Abhängigkeiten der Tragfähigkeit von den Abmessungen des Prüfbereichs, siehe Bild 17. Weiterhin liegen die Abminderung der Tragfähigkeiten bei erhöhten Prüftemperaturen über alle Konfektionäre im annähernd selben Bereich. Die Abminderungen reichen von $\Delta_{C,50x10,23 \text{ °C} - 50 \text{ °C}} = -10,4 \%$ bis $\Delta_{B,50x10,23 \text{ °C} - 50 \text{ °C}} = -21,2 \%$.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der monoaxialen Kurzzeit-Zugprüfungen an ETFE-Schweißnahtproben verschiedener Probekörpergeometrien und bei unterschiedlichen Prüftemperaturen keinen signifikanten Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Tragfähigkeit. Vereinzelt konnten höhere Variationskoeffizienten der Tragfähigkeit bei breiteren Proben festgestellt werden.

Prüfungen bei erhöhten Prüftemperaturen lieferten aufgrund der limitierten Höhe der Temperierkammern nur für MT2 verwertbare Ergebnisse. Diese bestätigen die Beobachtung, dass kein signifikanter Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten vorliegt.

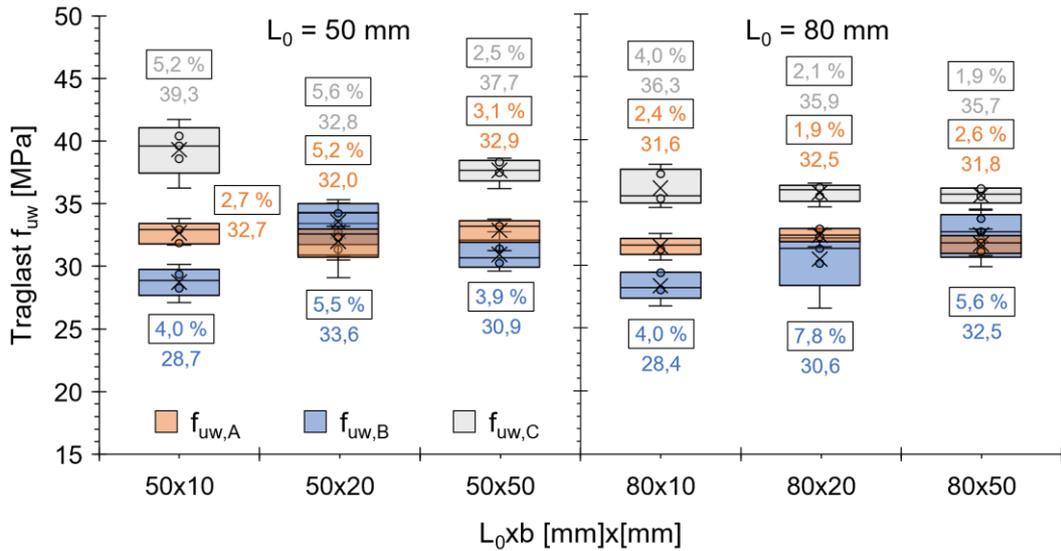


Bild 16 Traglast von ETFE-Flächenschweißnähten der drei Konfektionäre A, B und C (100 µm (UDE)) für den modifizierten Probekörper Typ 2 (MT2) mit verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, $T = 50\text{ °C} \pm 2\text{ K}$, $n = 5$

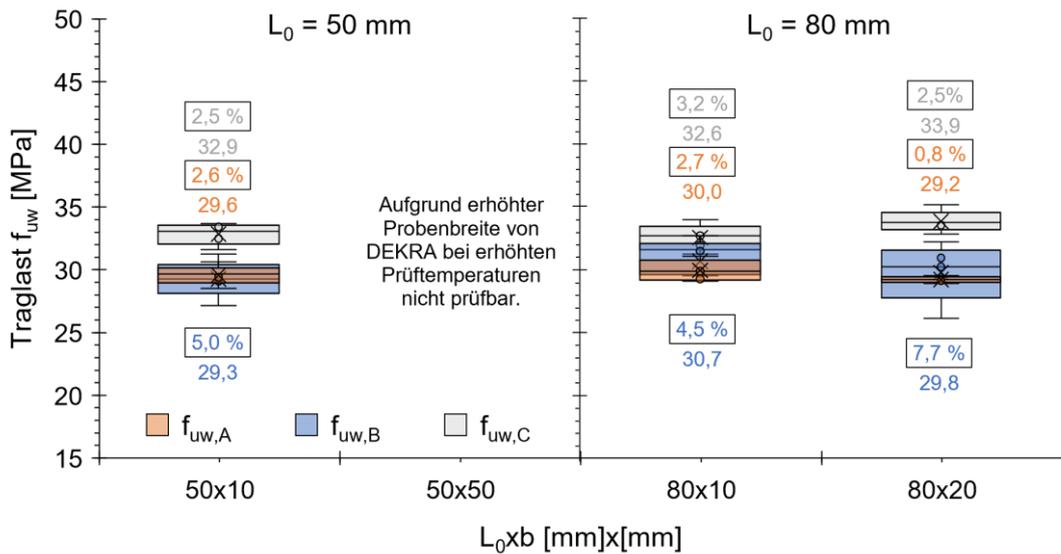


Bild 17 Traglast von ETFE-Flächenschweißnähten der drei Konfektionäre A, B und C (250 µm (DEKRA)) für den modifizierten Probekörper Typ 2 (MT2) mit verschiedenen Abmessungen des Prüfbereichs, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, $T = 50\text{ °C} \pm 2\text{ K}$, $n = 5$

Die Einzelprüfungen versagten größtenteils durch Bruch an einer der beiden Schweißnahtkanten. Die Schweißnahtproben des Konfektionärs C versagten vereinzelt auch im Bereich des Grundmaterials und wiesen meist höhere Bruchdehnungen auf als die Proben der Konfektionäre A und B. Dies deutet an, dass der Schweißprozess ebenfalls einen Einfluss auf das Bruch- und das Dehnungsverhalten des Bauteils Schweißnaht besitzt.

Weiterhin weisen die Tragfähigkeiten von ETFE-Schweißnahtproben eine geringere Streuung auf im Vergleich zum Grundmaterial. Der Variationskoeffizient ist dabei analog zur Tragfähigkeit abhängig vom Konfektionär.

3.3.4 Numerische Untersuchungen (AP 1.3)

Mit Hilfe des Programmpakets Abaqus 2021 [11] wurden numerische Finite Elemente (FE-)Modelle von ETFE-Grundmaterialproben und -Flächenschweißnahtproben (OV) zur Simulation monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen entwickelt. Die FE-Modelle dienen der stichprobenartigen, numerischen Untersuchung der resultierenden Spannungsverteilung im Prüfbereich sowie des Einflusses der Schweißnaht. Aufgrund der erhöhten Materialdicke im Schweißnahtbereich und der daraus resultierenden erhöhten Dehnsteifigkeit stellt die Schweißnaht einen Bereich mit verändertem Spannungs-Dehnungs-Verhalten dar.

Für die numerischen Untersuchungen wurden zwei FE-Modelle des modifizierten Probekörpertyps 2 (MT2-50) erstellt, die zum einen eine Grundmaterialprobe und zum anderen eine Schweißnahtprobe repräsentieren. Eine Ansicht der erstellten FE-Modelle inklusive Lagerung und Belastungsrichtung ist in Bild 18 dargestellt. Als Elementtyp wurde ein 3D-Shell-Element (M3D4) gewählt. Die Modellierung erfolgte mit Hilfe mehrerer Abschnitte mit unterschiedlicher Vernetzung und Materialdicke zur Simulation der Schweißnaht. Das

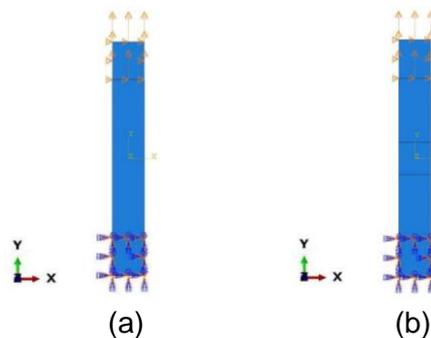


Bild 18 FE-Modell des modifizierten Probekörpertyps 2 inklusive Lagerung und Belastungsrichtung; (a) FE-Modell der Grundmaterialprobe, (b) FE-Modell der Flächenschweißnahtprobe

Grundmaterial wurde vereinfacht mit nomineller Foliendicke modelliert. Aufgrund der erhöhten Verformung in y-Richtung wurde in diese eine deutlich verringerte Elementlänge von 0,1 mm gewählt, während in x-Richtung eine Elementlänge von 1,0 mm gewählt wurde, siehe Bild 19 (a). Für die Vernetzung des Klemm- und Schweißnahtbereichs wurde eine quadratische Vernetzung von 1,0 mm in beide Richtungen genutzt. Der Schweißnahtbereich wurde ebenfalls vereinfacht mit der doppelten nominellen Foliendicke modelliert, siehe Bild 19 (b), obwohl aufgrund des Schweißprozesses dies nicht so zu trifft: die reale Schweißnahtdicke schwankt geringfügig um die Summe der beiden zu verschweißenden Foliendicken und kann damit sowohl geringfügig kleiner als auch geringfügig größer als die Summe der zu verschweißenden Foliendicken ausfallen. Ein Versatz der beiden Grundmaterialabschnitte in z-Richtung zur Simulation der Exzentrizität der beiden Fügepartner einer Überlappnaht in der Querschnittsebene wurde ebenfalls vernachlässigt, womit der

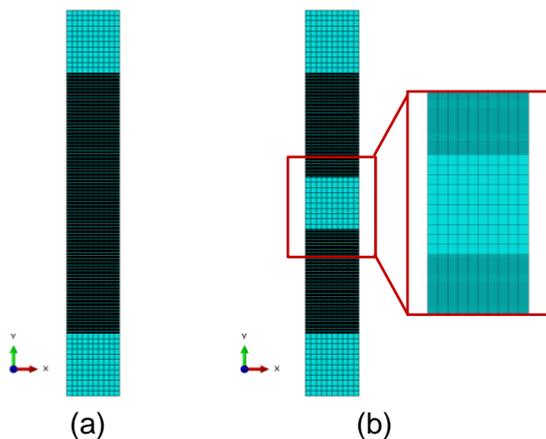


Bild 19 Vernetzung der FE-Modelle des modifizierten Probekörpertyps 2; (a) Grundmaterialprobe, (b) Flächenschweißnahtprobe

Einfluss der geringfügigen Exzentrizität und der daraus entstehenden Biegeanteile unberücksichtigt bleiben.

Das nichtlineare Materialverhalten wurde mit Hilfe der experimentellen Daten des T5-Probekörpertyps am ETFE-Grundmaterial abgebildet, da bei den T5-Probekörpertypen die Dehnungen mit Hilfe eines Video-Extensometers aufgenommen wurden, womit das monoaxiale Spannungs-Dehnungs-Verhalten im Prüfbereich ohne die Einflüsse der behinderten Querkontraktion im Klemmbereich aufgenommen wurden. Im Bereich von 0 % bis 1,4 % Dehnung wurde auf Basis der experimentellen Daten

ein Elastizitätsmodul von 1100 MPa gewählt. Das weitere nichtlineare Materialverhalten wurde mit Hilfe experimenteller Spannungs-Dehnungs-Punkte abgebildet. Auf Basis der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linie wurde eine wahre Spannungs-Dehnungs-Linie ermittelt, die den FE-Berechnungen zugrunde gelegt wurde. Die Querkontraktionszahl wurde auf Basis von Galliot & Luchsinger mit 0,45 angenommen, siehe [12].

Das FE-Modell der Grundmaterialprobe wurde an den experimentellen Daten des Probekörpertyps MT2-50 kalibriert. Die numerisch ermittelten Spannungs- und Dehnungswerte wurden als Mittelwerte über alle Elementknoten im Prüfbereich ermittelt, sodass diese mit den experimentellen Ergebnissen vergleichbar sind.

In Bild 20 sind die Spannungsverteilungen in y-Richtung des FE-Modells des Grundmaterials (a) und der Flächenschweißnaht (b) im letzten Lastschritt an der verformten Geometrie dargestellt. Das FE-Modell der Grundmaterialprobe weist über den gesamten Probenbereich hohe Verformungen auf. Die Probe weist ebenfalls über die gesamte Länge eine Einschnürung auf. Lediglich im Klemmbereich ist die Einschnürung aufgrund der behinderten Querkontraktion eingeschränkt. Im Bereich der freien Einschnürung treten erwartungsgemäß die höchsten Spannungen auf. In diesem Bereich versagt der Probekörper in experimentellen Untersuchungen üblicherweise. Im Übergang zwischen Klemm- und Prüfbereich sind erfahrungsgemäß Spannungsspitzen zu erwarten, die im realen Versuch zu Klemmbrüchen führen können, wenn die Streifenprobe kontinuierlich mit einer starren Linienlager geklemmt wird. Solche Spannungsspitzen zeigen sich in der numerischen Simulation allerdings nicht. Hier bedarf es weiterer zukünftiger Untersuchungen.

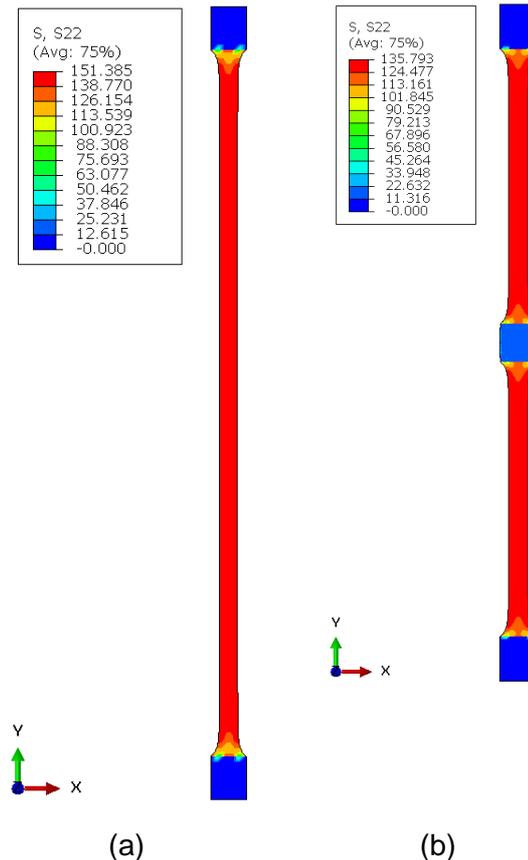


Bild 20 Numerisch ermittelte Spannungsverteilung in y-Richtung im letzten Lastschritt; (a) FE-Modell Grundmaterial, (b) FE-Modell Flächenschweißnaht

Die numerisch ermittelte Spannungsverteilung der Flächenschweißnahtprobe ist durch die Aussteifung des Schweißnahtbereichs geprägt. Analog zum Klemmbereich bildet sie Bereiche mit behinderter Querkontraktion. Die höchsten Spannungen treten in diesem FE-Modell ebenfalls im Einschnürungsbereich auf und nicht im Übergang zwischen Schweißnaht- bzw. Klemmbereich und Grundmaterial auf. In experimentellen Untersuchungen versagen allerdings Flächenschweißnahtproben üblicherweise an einer der beiden Schweißnahtkanten. Dieses Verhalten lässt sich auf Basis des bisherigen vereinfachten FE-Modells nicht abbilden.

Eine mögliche Erklärung für die Diskrepanz zwischen den numerischen Simulationen und experimentellen Ergebnissen ist zum einen eine mögliche Schädigung und damit Schwächung des Materials an der Schweißnahtkante durch den Schweißprozess. Weitere mögliche Erklärungen sind die starken Vereinfachungen, die für die

Erstellung der FE-Modelle getroffen wurden. Dies betrifft u. a. nicht berücksichtigte geometrische Effekte im numerischen Modell wie z. B. der Kerbwirkung oder der Exzentrizität der beiden Folienlagen sowie nicht berücksichtigte materielle Effekte: in der Schweißnaht. In zukünftigen Untersuchungen werden diese Einflüsse und Effekte gezielter zu berücksichtigen sein.

Die stichprobenartigen numerischen Untersuchungen auf Basis der vereinfachten FE-Modelle stellen damit lediglich eine erste Annäherung an das tatsächliche Bauteilverhalten dar. Sie zeigen insbesondere, dass der Klemm- und Schweißnahtbereich differenzierter zu betrachten sind und dass materielle sowie geometrische Einflüsse durchaus vorhanden sind, die einer vertieften Betrachtung bedürfen. Solche Untersuchungen erfolgen aufbauend auf den im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens getätigten Untersuchungen im Rahmen der Dissertation von Runge „Load-Bearing Behaviour and Quality Management of Welded ETFE-Foils for Building Applications“ [13], sodass zukünftig detailliertere Erkenntnisse zu erwarten sind.

3.3.5 Ermittlung einer optimierten Probekörpergeometrie

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Geometrie des Probekörpers keinen signifikanten Einfluss auf die Ermittlung der Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten im Kontext monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen besitzt. Die experimentellen Untersuchungen haben allerdings auch gezeigt, dass nicht alle Probekörpertypen für Prüfungen bei erhöhten Temperaturen geeignet sind. Dies betrifft die Probekörpertypen T2 und T5. Da die optimierte Probekörpergeometrie möglichst unabhängig von der Prüftemperatur sein sollte, gelten diese beiden Probekörpertypen als ungeeignete Probekörpergeometrien. Ferner sind bei diesen beiden Probekörpertypen der erhöhte Prüfaufwand und die zusätzlich benötigten Messvorrichtungen zur Dehnungsaufnahme als nachteilig anzusehen.

Als optimierter Probekörpertyp wurde daher der modifizierte Probekörpertyp 2 (MT2) identifiziert. Die Untersuchungen für den Probekörpertyp MT2 haben gezeigt, dass die Abmessungen des Prüfbereichs keinen signifikanten Einfluss auf die Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten besitzen. Allerdings deuten die Ergebnisse einzelner Prüfungen darauf hin, dass größere Probenbreiten zu höheren Streuungen der gemessenen Tragfähigkeit führen. Die Referenzuntersuchungen an dem ETFE-Grundmaterial legen nahe, einen möglichst kurzen und schmalen Probekörper zu verwenden.

Als empfohlene Abmessung des Prüfbereichs wurde eine Messlänge L_0 bzw. der Anfangsabstand der Einspannklemmen L von 50 mm und eine Breite b von 10 mm gewählt, siehe Bild 21. Dies entspricht der kürzesten und schmalsten untersuchten Geometrie des Prüfbereichs. Im weiteren Verlauf wird der damit resultierende Probekörpertyp als Probekörpertyp MT2-50 bezeichnet. Eine schmale Probekörpergeometrie hat weiterhin den Vorteil, dass nur wenig Schweißnahtlänge für die Prüfung benötigt wird. Ferner resultieren kurze Schweißnahtproben in geringeren Prüfdauern, die sowohl für die interne Qualitätskontrolle der Konfektionäre sowie für die Prüflabore erstrebenswert sind.

Im Verbund der Forschungspartner wurde weiterhin beschlossen, als weitere Probekörpergeometrie eine doppelt so breite und lange Probe zu untersuchen, siehe Bild 22. Auf diese wird im weiteren Verlauf als Probekörpertyp MT2-100 referenziert.

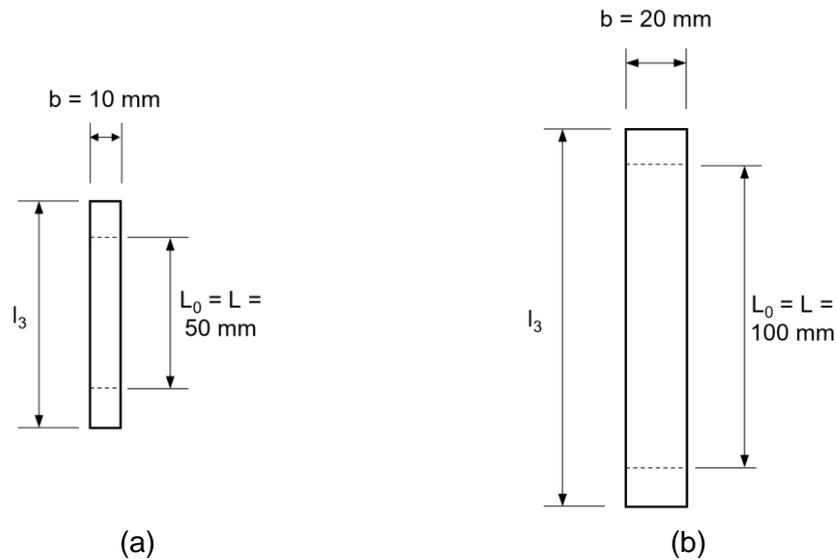


Bild 21 Zusätzlich untersuchte Probekörpertypen für die Optimierung der Probekörpergeometrie gemäß DIN EN ISO 527-3; (a) Probekörpertyp 2 modifiziert gemäß 6.1.1 mit $L \times b = 50 \times 10$ [mm]x[mm] (MT2-50), (b) Probekörpertyp 2 modifiziert gemäß 6.1.1 mit $L \times b = 100 \times 20$ [mm]x[mm] (MT2-100)

Bild 22 zeigt die Ergebnisse der Schweißnahtprüfungen für die Probekörpertypen MT2-50 und MT2-100 bei Raumtemperatur. Die Ergebnisse für die 100 µm Folie beider Probekörpertypen stimmen sehr gut überein, während Probekörpertyp MT2-100 für die dickeren 250 µm Folie geringere Tragfähigkeiten liefert. Für die Validierung des Probekörpertyps MT2-100 wurden zusätzliche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. In zukünftigen Forschungsaktivitäten sollte die Eignung des Probekörpertyps MT2-100 für die Prüfung des ETFE-Grundmaterials bei erhöhten Prüftemperaturen überprüft werden.

Aufgrund der behinderten Querkontraktion, die durch die Festhaltung in Probenebene im Klemmbereich erzeugt wird, entstehen biaxiale Spannungs- und Dehnungsbereiche im Klemmbereich. Diese führen zu einem inhomogenen Spannungs- und Dehnungszustand über die Probenlänge. Da diese Einflüsse lediglich in den Dehnungen der experimentellen Ergebnisse nachzuvollziehen sind, ist der Einfluss für Schweißnahtproben vernachlässigbar. Dies gilt allerdings nur solange die Proben nicht im Klemmbereich versagen.

Als optimierter Probekörpertyp wird der Probekörpertyp MT2-50 empfohlen, siehe Kapitel 3.3.5. Bei diesem wird die Dehnung über den Traversenweg ermittelt. Die Dehnungen werden somit über den gesamten Abstand zwischen den Einspannklemmen bestimmt und inkludiert damit ebenfalls den biaxial beanspruchten Klemmbereich. Die ermittelten Dehnungen des Probekörpertyps MT2 repräsentieren somit keine homogen monoaxialen Dehnungen.

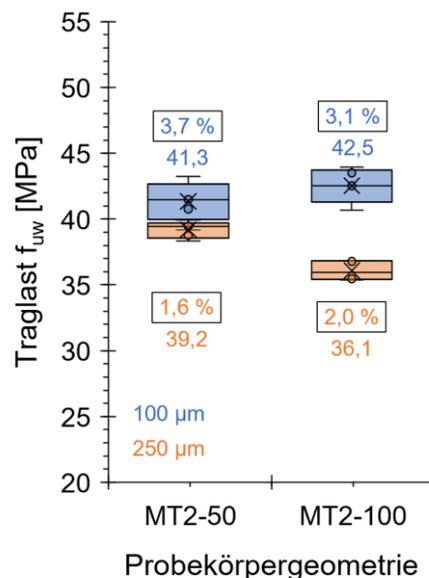


Bild 22 Traglast von ETFE-Flächenschweißnähten der beiden Probekörpergeometrien MT2-50 und MT2-100 des Konfektionärs C, durchgeführt von UDE, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

Durch die enthaltenen biaxialen Dehnungsanteile sind die ermittelten Dehnungen leicht geringer als im Falle homogen monoaxialer Dehnungen. Für die weiteren Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der Probekörpertyp MT2-50 verwendet.

3.4 Optimierung der Herstellmethode (AP 1.4)

3.4.1 Allgemein

Als wichtiger materialunabhängiger Einflussfaktor auf die Ergebnisse monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen gilt die Probenvorbereitung, die hauptsächlich das Zuschneiden der Proben auf eine vordefinierte Form umfasst. Derzeit werden verschiedene Zuschnittswerkzeuge für die Probenvorbereitung von ETFE-Grundmaterial- und Schweißnahtprüfungen verwendet.

Zur Optimierung der Herstellmethode wurde der Einfluss verschiedener Zuschnittswerkzeuge auf die Ergebnisse monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen an ETFE-Grundmaterial und -Flächenschweißnähten untersucht. Hierzu wurden mehrere Prüfserien monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen durchgeführt, die jeweils mit unterschiedlichen Herstellmethoden vorbereitet wurden. Da die Herstellmethode nicht abhängig vom Konfektionär ist, wurden nur Schweißnahtproben des Konfektionärs C untersucht. Zur Steigerung der statistischen Aussagekraft der Ergebnisse wurden 10 Einzelprüfungen je Prüfserie durchgeführt.

Gemäß den Untersuchungen zur Optimierung der Probekörpergeometrie wurde der Probekörpertyp MT2-50 für die Untersuchungen gewählt. Als Untersuchungsmethoden wurden zum einen monoaxiale Zugprüfungen an den mit den verschiedenen Herstellmethoden vorbereiteten Probekörper durchgeführt. Weiterhin wurden mikroskopische Untersuchungen an den Schnittkanten der Proben vorgenommen, um weitere Bewertungen auf die Wirkmechanismen der eventuellen Einflüsse vornehmen zu können.

Es sei angemerkt, dass individuelle Faktoren des verwendeten Zuschnittswerkzeugs die Prüfergebnisse beeinflussen können. Diese individuellen Faktoren umfassen beispielsweise die Beschaffenheit der verwendeten Klinge im Fall eines Cuttermessers und eines Rollschneiders oder der Schablone bei Verwendung einer Stanze.

Die Untersuchungen wurden größtenteils von UDE durchgeführt. Ergänzende Verifizierungsprüfungen erfolgten durch DEKRA.

3.4.2 Untersuchte Herstellmethoden

Insgesamt wurden sechs verschiedene Herstellmethoden untersucht, siehe Bild 20:

- Cuttermesser mit neuer Klinge (Scharfer Cutter, im Folgenden sch. Cutter),
- Cuttermesser mit sichtbar abgenutzter Klinge (Stumpfer Cutter, im Folgenden st. Cutter),
- Hebelschneider,
- Rollschneider,
- Skalpell und
- Stanze.

Im Nachgang zu den Untersuchungen wurden zusätzlich gestanzte Proben untersucht. Diese wurden vom Konfektionär C als MT2-100 hergestellt. Es ist zu erwähnen, dass für diese Zusatzprüfungen neue Schweißnahtproben hergestellt wurden. Die Vergleichbarkeit mit den zuvor untersuchten Schweißnahtproben ist daher nicht gegeben.



Bild 23 Für die Optimierung der Herstellmethode verwendete Zuschnittswerkzeuge; (a) Rollschneider, (b) Skalpell, (c) Cuttermesser mit neuer Klinge (Sch. Cutter, links) und sichtbar abgenutzter Klinge (St. Cutter, rechts), (d) Hebelschneider, Fotos: UDE/IML

3.4.3 Mikroskopische Untersuchung des Einflusses der Herstellmethode

Die Schnittkante der mit verschiedenen Zuschnittsmethoden hergestellten Probekörper wurden in der Ansicht, Draufsicht und im Querschnitt mikroskopisch untersucht. Die beobachteten Einflüsse der Zuschnittswerkzeuge unterscheiden sich nicht zwischen den Grundmaterial- und Schweißnahtproben. Es werden daher nur mikroskopischen Aufnahmen des Grundmaterials dargestellt.

Bild 24 stellt die mikroskopischen Aufnahmen für die mit dem Cuttermesser mit einer neuen Klinge vorbereitete Schnittkante dar. Deutlich zu erkennen ist der unterschiedliche Einfluss auf die beiden unterschiedlichen Foliendicken. Die Ansicht der Schnittkante der 250 µm Folie weist die für ein Messer typischen Riefen in Schnittkantenrichtung auf. Es sind keine weiteren Einflüsse erkennbar. In der Draufsicht ist eine saubere Schnittkante ohne Defekte zu erkennen. Der Querschnitt zeigt eine angewinkelte, aber gerade Schnittkante auf. Die mikroskopischen Aufnahmen der 100 µm Folie hingegen weisen statt eines sauberen Schnitts auf ein Abquetschen des Materials hin. Dies wird ebenfalls im Querschnitt ersichtlich. Dies könnte zu Einflüssen auf die Prüfergebnisse führen.

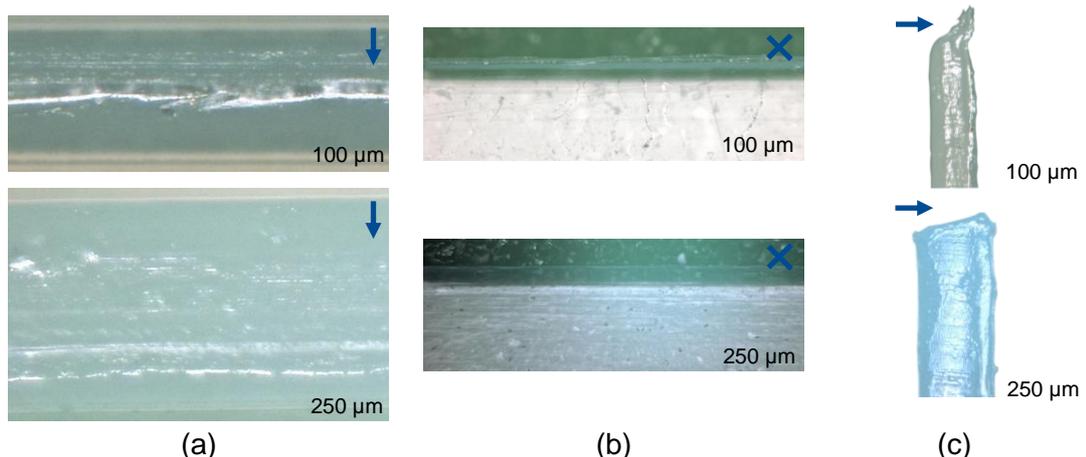


Bild 24 Mikroskopische Aufnahmen der mit einem Cuttermesser mit neuer Klinge vorbereitete Proben der beiden untersuchten Foliendicken mit Darstellung der Schnittrichtung in Pfeilform; (a) Ansicht der Schnittkante; (b) Draufsicht der Schnittkante; (c) Querschnitt der Schnittkante, Fotos: UDE/IML

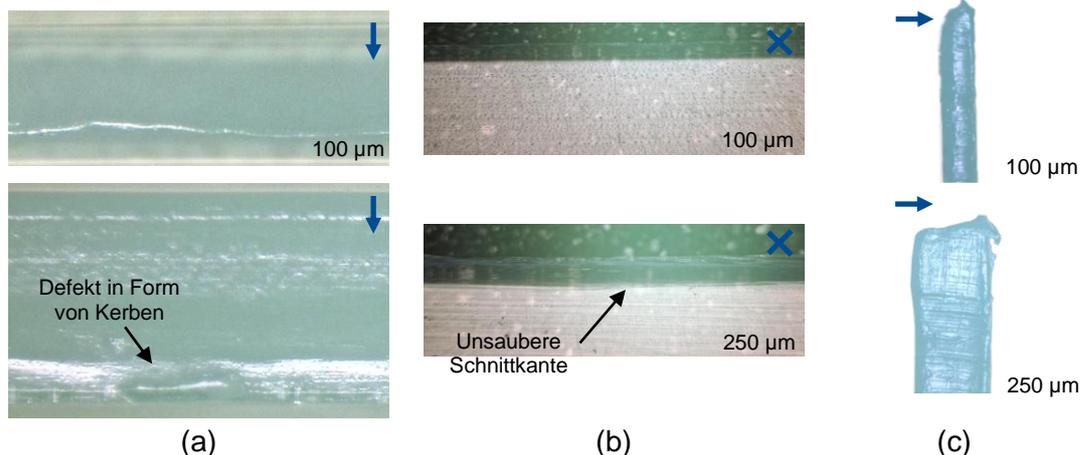


Bild 25 Mikroskopische Aufnahmen der mit einem Cuttermesser mit sichtbar abgenutzter Klinge vorbereiteten Proben der beiden untersuchten Foliendicken mit Darstellung der Schnitttrichtung in Pfeilform; (a) Ansicht der Schnittkante; (b) Draufsicht der Schnittkante; (c) Querschnitt der Schnittkante, Fotos: UDE/IML

In Bild 25 sind die mikroskopischen Aufnahmen der mit einem Cuttermesser mit sichtbar abgenutzter Klinge vorbereiteten Schnittkante dargestellt. Die 100 µm Folie weist in dem untersuchten Abschnitt keinerlei Auffälligkeiten auf. Die Aufnahmen der 250 µm Folie hingegen zeigen Defekte in Form von kleinen Kerben.

Die mikroskopischen Aufnahmen der mit Hebelschneider, Rollschneider, Skalpell und Stanze vorbereiteten Schnittkanten sind in Anlage A zusammengestellt. Bei den untersuchten Abschnitten wiesen nur die mit dem Rollschneider vorbereiteten Schnittkanten Defekte in Form von Kerben orthogonal zur Schnitttrichtung auf.

3.4.4 Einfluss der Herstellmethode auf die Zugfestigkeit von ETFE-Grundmaterial

Bild 26 zeigt die Zugfestigkeit des mit den beschriebenen Zuschnittswerkzeugen vorbereiteten Proben des ETFE-Grundmaterials. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Herstellmethode einen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit des ETFE-Grundmaterials besitzt. Die höchsten mittleren Zugfestigkeiten mit 57,2 MPa für die 100 µm Folie bzw. 55,6 MPa für die 250 µm Folie und gleichzeitig tendenziell niedrigsten Variationskoeffizienten von 6,2 % bzw. 6,0 % wird erwartungsgemäß von dem Cuttermesser mit neuer Klinge erreicht. Vergleichbare Ergebnisse werden vom Hebelschneider und dem Skalpell erzielt.

Allerdings sind die Variationskoeffizienten für die Ergebnisse der mit dem Skalpell hergestellten Proben leicht erhöht. Die Ergebnisse der gestanzten Proben weisen leicht verringerte Zugfestigkeiten und leicht erhöhte Variationskoeffizienten auf.

Die niedrigsten Zugfestigkeiten werden mit 40,5 MPa für die 100 µm Folie bzw. 49,0 MPa für die 250 µm Folie von dem mit einem Cuttermesser mit sichtbar abgenutzter Klinge vorbereiteten Proben erreicht. Die Abnahme der Zugfestigkeit der 100 µm Folie ist mit -29,2 % deutlich höher als die Abnahme der 250 µm Folie mit -11,9 %. Dies legt nahe, dass dünnere Folien sensibler auf die negativen Einflüsse der Zuschnittswerkzeuge reagieren als dickere Folien. Diese Vermutung wird durch den Variationskoeffizienten bestätigt, der für die 100 µm Folie deutlich erhöht ist. Die Ergebnisse des Rollschneiders weisen ebenfalls niedrigere Zugfestigkeiten bei erhöhten Variationskoeffizienten auf. Auch hier sind die Ergebnisse der dünneren Folie stärker betroffen als die der dickeren Folien.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Herstellmethode einen negativen Einfluss auf die gemessene Zugfestigkeit des ETFE-Grundmaterials besitzen kann. Dies ist allem voran für die mit einem Cuttermesser mit sichtbar abgenutzter

Klinge und mit Rollschneider hergestellten Proben der Fall, die die niedrigsten mittleren Zugfestigkeiten und höchsten Variationskoeffizienten aufweisen.

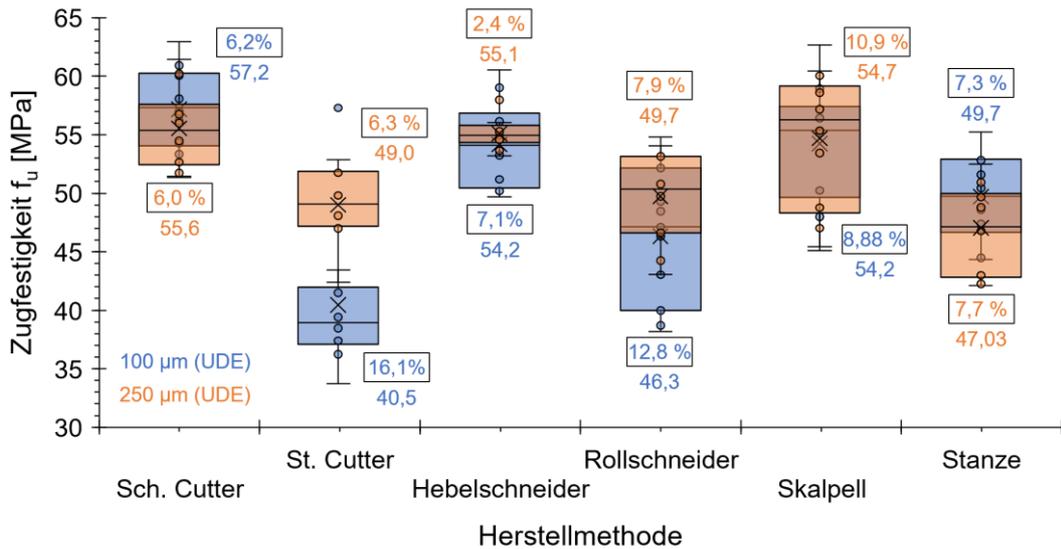


Bild 26 Zugfestigkeit von ETFE-Folien vorbereitet mit verschiedenen Zuschnittsmethoden, durchgeführt von UDE, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{u,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 10$

Bei beiden Herstellmethoden konnten bei den mikroskopischen Aufnahmen Defekte in Form von Kerben festgestellt werden. Diese können unter mechanischer Belastung zu Anrissen aufweiten und zum frühzeitigen Versagen der Probe führen. Die Probe kann dabei durch „Weiterreißen“ bei deutlich verringerter Tragfähigkeit versagen. Experimentelle Untersuchungen von DEKRA an mit einem Hebelschneider vorbereiteten 250 µm ETFE-Grundmaterialproben bestätigen die hohen Zugfestigkeiten.

3.4.5 Einfluss der Herstellmethode auf die Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähte

Bild 27 zeigt die monoaxiale Tragfähigkeit von mit verschiedenen Herstellmethoden vorbereiteten ETFE-Flächenschweißnähten des Konfektionärs C.

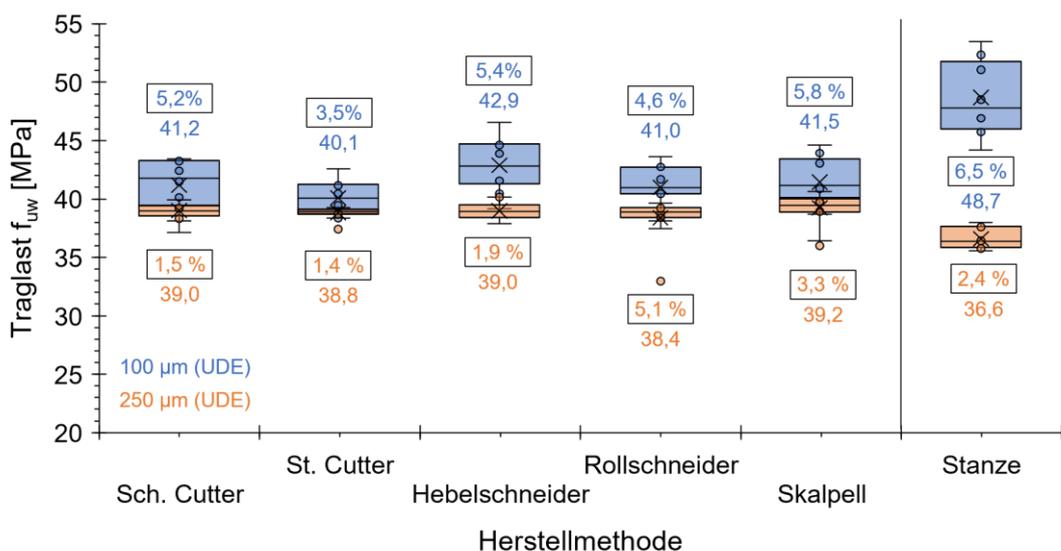


Bild 27 Traglast von ETFE-Flächenschweißnähten vorbereitet mit verschiedenen Zuschnittsmethoden des Konfektionärs C, durchgeführt von UDE, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 10$

Die gestanzten Schweißnahtproben wurden nachträglich mit anderem Probenmaterial desselben Folienproduktes einer anderen Produktionscharge und anderen Schweißparametern hergestellt. Die Ergebnisse lassen sich daher nur bedingt mit den übrigen erzielten Tragfähigkeiten vergleichen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass für sämtliche Herstellmethoden nahezu identische Tragfähigkeit und Variationskoeffizienten ermittelt werden konnten. Ein signifikanter Einfluss der Herstellmethode auf die Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten konnte im Gegensatz zum Grundmaterial nicht ermittelt werden.

Die deutlich erhöhte Tragfähigkeit der gestanzten Proben kann hier nicht diskutiert werden, da diese Proben mit anderen Schweißparametern und anderem Probenmaterial hergestellt wurden. Die hohen Tragfähigkeiten deuten allerdings an, dass diese Zuschnittsmethode ebenfalls keinen negativen Einfluss auf die Tragfähigkeit besitzt.

Die Referenzuntersuchungen am ETFE-Grundmaterial haben gezeigt, dass ein potenziell negativer Einfluss durch die Herstellmethode erst bei sehr hohen Festigkeiten ab ca. 40 MPa auftritt. So erreichen die Grundmaterialproben mit dem stärksten negativen Einfluss (St. Cutter) verminderte mittlerer Zugfestigkeiten von über 40 MPa. Erfahrungsgemäß erreichen ETFE-Flächenschweißnähte eine maximale Tragfähigkeit von etwa 40 MPa. Demzufolge ist der negative Einfluss der Schweißnaht und des Schweißprozesses auf die Tragfähigkeit deutlich größer als der der Probenvorbereitung. Dies begründet den scheinbar nicht vorhandenen Einfluss der Herstellmethode auf die Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten.

Experimentelle Untersuchungen von DEKRA an mit Hebelschneider vorbereitete 250 µm ETFE-Flächenschweißnahtproben unterschiedlicher Konfektionäre bestätigen die o. g. Ergebnisse am Probenmaterial eines Konfektionärs, siehe Bild 28.

3.4.6 Ermittlung einer optimierten Herstellmethode

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Herstellmethode keinen signifikanten Einfluss auf die mithilfe von monoaxialen Zugprüfungen ermittelten Tragfähigkeiten von ETFE-Flächenschweißnähten besitzt. Referenzuntersuchungen am ETFE-Grundmaterial haben jedoch gezeigt, dass durch bestimmte Zuschnittswerkzeuge Defekte in Form von Kerben orthogonal zur Schnittrichtung eingetragen werden können, die zum vorzeitigen Versagen der Grundmaterialproben geführt haben. Als optimierte Herstellmethode wird daher das Cuttermesser mit neuer Klinge, der Hebelschneider und die Stanze empfohlen. Hier sei weiterhin angemerkt, dass der Hebelschneider und die Stanze in arbeitsschutztechnischer Hinsicht Vorteile gegenüber dem Cuttermesser aufweisen. Für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhaben wird das Cuttermesser mit neuer Klinge als optimiertes Zuschnittswerkzeug verwendet.

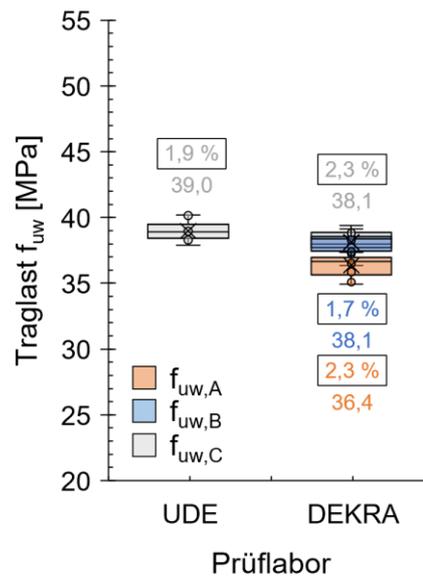


Bild 28 Tragfähigkeit von mit Hebelschneider vorbereiteten 250 µm ETFE-Flächenschweißnähten, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{u,w,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 10$, Tragfähigkeit $f_{u,w,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 10$

3.5 Optimierung der Prüfgeschwindigkeit (AP 1.5)

3.5.1 Allgemeines

Der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit bzw. der Dehngeschwindigkeit ist allgemein bekannt, siehe auch Kapitel 3.3. Um den Einfluss der Prüfgeschwindigkeit bzw. der Dehngeschwindigkeit auf die Ermittlung der monoaxialen Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten zu untersuchen, wurden mehrere Prüfserien monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Untersuchungen wurden größtenteils von DEKRA durchgeführt. Lediglich bereits durchgeführte Prüfungen am 100 μm Grundmaterial und Flächenschweißnähten für die Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min wurden von UDE übernommen. Die zu untersuchenden Prüfgeschwindigkeiten sollten die für monoaxiale Kurzzeit-Zugprüfungen an ETFE-Grundmaterial sowie an ETFE-Flächenschweißnähten üblichen Prüfgeschwindigkeiten abdecken sowie deutlich niedrigerer und höhere Geschwindigkeiten umfassen. Die folgenden Prüfgeschwindigkeiten (Dehngeschwindigkeiten) wurden untersucht:

- 10 mm/min (20 %/min),
- 100 mm/min (200 %/min),
- 200 mm/min (400 %/min),
- 500 mm/min (1000 %/min).

Es wurden sowohl ETFE-Flächenschweißnähte als auch das ETFE-Grundmaterial als Referenz untersucht.

3.5.2 Ermittlung der optimierten Prüfgeschwindigkeit

Bild 29 zeigt die Zugfestigkeit des ETFE-Grundmaterials bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten. Deutlich zu erkennen ist ein Anstieg der Zugfestigkeit von $\Delta_{100\mu\text{m},10-100} = 13,5\%$ und $\Delta_{250\mu\text{m},10-100} = 13,9\%$ bei Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min auf 100 mm/min. Die Prüfergebnisse zeigen aber auch, dass eine weitere Verdopplung der Prüfgeschwindigkeit auf 200 mm/min wiederum ein Abminderung der Zugfestigkeit um $\Delta_{100\mu\text{m},100-200} = -4,3\%$ bzw. $\Delta_{250\mu\text{m},100-200} = -15,3\%$ bewirkt. Die zugehörigen Zugfestigkeiten der 250 μm Folie liegen im Gegensatz zu den Zugfestigkeiten der 100 μm Folie nicht im selben Streubereich. Die Abweichung des dickeren Grundmaterials ist daher signifikant.

Allgemein gilt die durch viele Untersuchungen bestätigte Ansicht, dass eine Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit zu einer Erhöhung der gemessenen Festigkeit von ETFE-Folien führt. Eine Erhöhung der Festigkeiten ist allerdings erst bei einer Steigerung der Prüfgeschwindigkeit im Bereich einer 10er Potenz signifikant, wie sie ebenfalls in dieser Untersuchung gezeigt werden konnte. Dies erklärt auch, warum für die Prüfgeschwindigkeiten 200 mm/min und 500 mm/min verglichen mit 100 mm/min keine weitere signifikante Erhöhung zu beobachten ist.

In Bild 30 sind die mit verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten ermittelten Tragfähigkeiten der 100 μm ETFE-Flächenschweißnähte der drei Konfektionäre A, B und C dargestellt. Die Ergebnisse deuten eine leichte Erhöhung der Tragfähigkeiten bei erhöhten Prüfgeschwindigkeiten an. Dabei ist lediglich der Anstieg der Traglast von 10 mm/min auf 100 mm/min mit $\Delta_{A,10-100} = 9,9\%$, $\Delta_{B,10-100} = 5,1\%$, $\Delta_{C,10-100} = 6,3\%$ deutlich erkennbar. Eine weitere Erhöhung resultiert für die 100 μm Folien im untersuchten Rahmen in keiner signifikanten Steigerung der Tragfähigkeit.

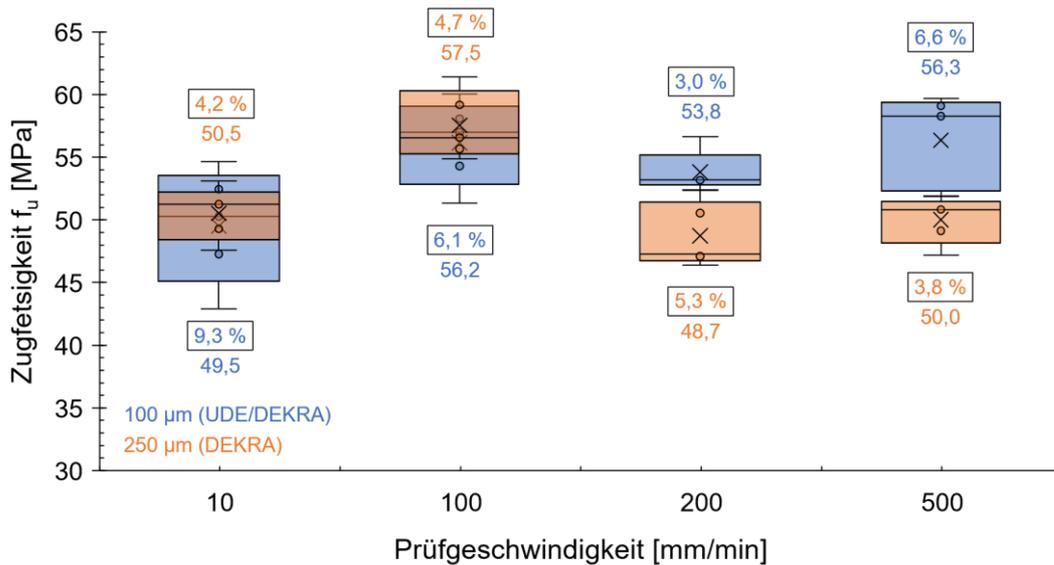


Bild 29 Gemessene Zugfestigkeit des ETFE-Grundmaterials verschiedener Prüfgeschwindigkeiten, durchgeführt von UDE und DEKRA, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{u,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

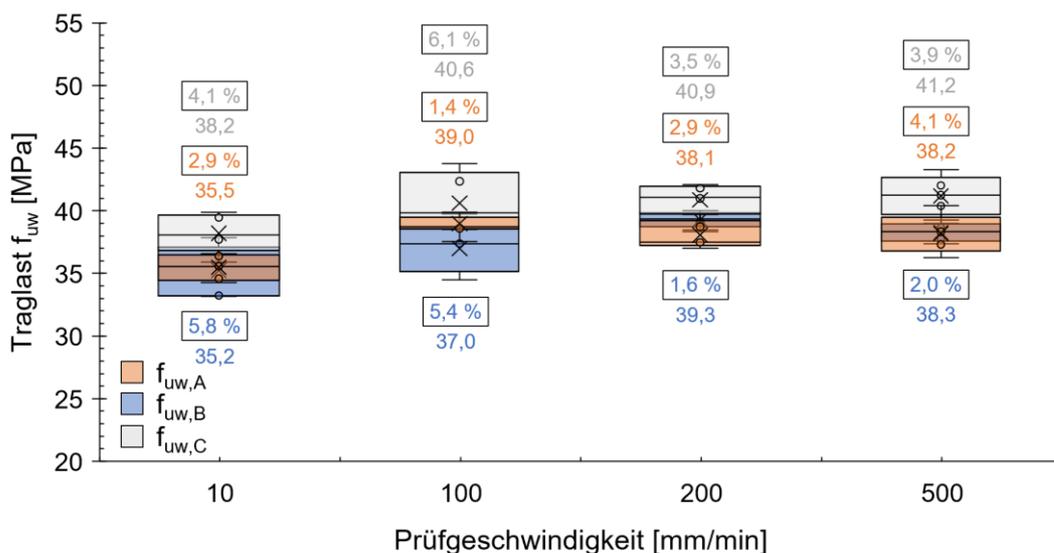


Bild 30 Tragfähigkeiten der 100 µm ETFE-Flächenschweißnähte verschiedener Prüfgeschwindigkeiten der Konfektionäre A, B und C, durchgeführt von UDE und DEKRA, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

Bild 31 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit auf die 250 µm ETFE-Flächenschweißnähte verschiedener Konfektionäre. Die Ergebnisse decken sich mit denen der dünneren Schweißnahtproben.

Die Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min auf 100 mm/min resultiert in einer signifikanten Steigerung der Traglast ($\Delta_{A,10-100} = 6,7 \%$, $\Delta_{B,10-100} = 6,1 \%$, $\Delta_{C,10-100} = 8,9 \%$), während eine weitere Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit keine weitere Steigerung der Tragfähigkeiten bewirkt.

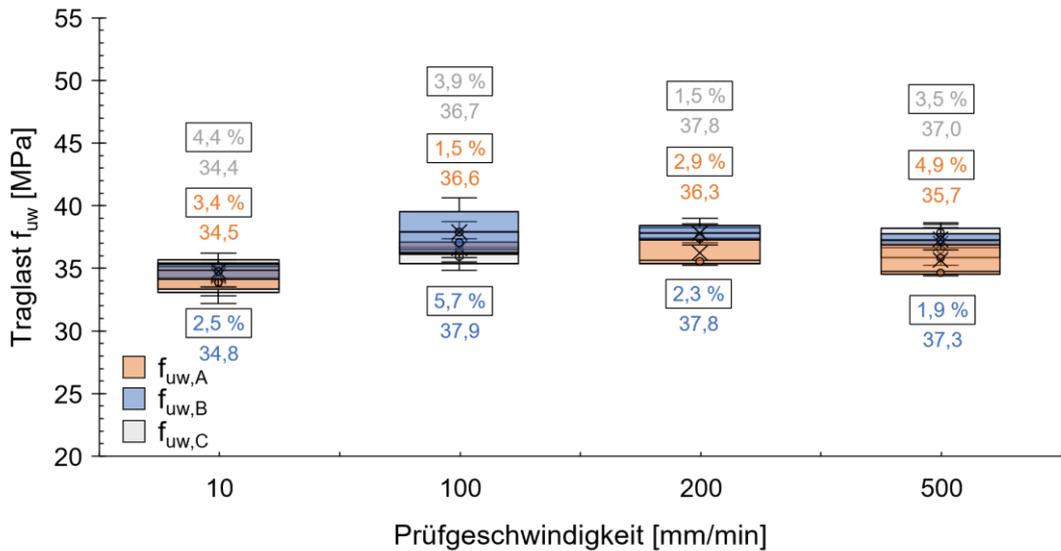


Bild 31 Tragfähigkeiten der 250 µm ETFE-Flächenschweißnähte verschiedener Prüfgeschwindigkeiten der Konfektionäre A, B und C, durchgeführt von UDE und DEKRA, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{u,w,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

Als optimierte Prüfgeschwindigkeit für die Schweißnahtprüfungen am Prüfkörpertyp MT2-50 wird eine Prüfgeschwindigkeit von 200 mm/min empfohlen. Diese Prüfgeschwindigkeit ist für sämtlichen gängigen Prüfeinrichtungen erreichbar und resultiert in repräsentativen Traglasten von ETFE-Flächenschweißnähten. Für andere Probekörpergeometrien wird eine Prüfgeschwindigkeit empfohlen, die in einer Dehngeschwindigkeit von 400 %/min resultiert.

3.6 Optimierung der Klemmtechnik (AP 1.6)

3.6.1 Allgemeines

Die Ergebnisse monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen können maßgeblich durch die verwendete Klemmtechnik beeinflusst werden. Bei ungeeigneter Klemmung kann es beispielsweise zum Herausrutschen des Probekörpers und damit zu einer ungültigen Prüfung kommen. Eine weitere Folge einer ungeeigneten Probenklemmung kann ein vorzeitiges Versagen im Bereich der Klemmung sein.

Erfahrungsgemäß führt die vollflächige Klemmung über zwei ebene Klemmbacken – der sogenannten Flächenklemmung – zum Herausrutschen der Probe. Ein Klemmen der Probe mithilfe einer über die Klemmbreite angeordneten lokalen Ausbuchtung auf einer der Klemmbacken – der sogenannten Linienklemmung, siehe Bild 32 (b) – führt zu frühzeitigem Versagen der Probe im Klemmbereich. Typischerweise werden monoaxiale Kurzzeit-Zugprüfungen an ETFE-Grundmaterial und -Flächenschweißnähten mithilfe einer „verschmierten Linienklemmung“ durchgeführt. Diese wird durch das Klemmen der Proben zwischen einer konvexen und einer ebenen Klemmbacke erzeugt, siehe Bild 32 (a).

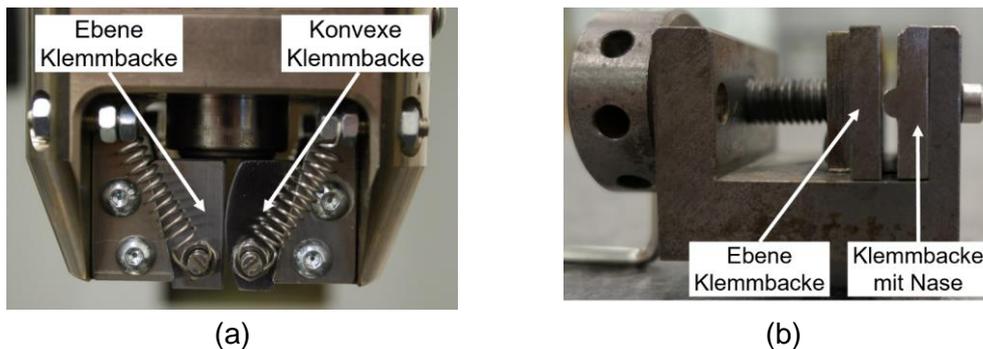


Bild 32 (a) Verschmierte Linienpressung mit konvexer Klemmbacke, (b) Linienpressung mit Klemmbacke mit Nase, Fotos: UDE/IML

Für die Optimierung der Klemmtechnik wurden die Flächen- und Linienklemmung mit unterschiedlichen Klemmbeschichtungen untersucht. Die Beschichtung wird dabei nur auf einer der beiden Klemmenteile aufgebracht. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass eine Beschichtung beider Klemmbacken zum Herausrutschen der Proben führt. Weiterhin konnte in Voruntersuchungen gezeigt werden, dass im Falle einer verschmierten Linienpressung sowohl die Beschichtung der konvexen Klemmbacke wie auch die der ebenen Klemmbacke zu vergleichbaren Ergebnissen führt.

Als Kriterium für die Optimierung der Klemmtechnik gilt eine über die Prüfdauer konstant bleibende Klemmlänge, d. h. ein Nichttherausrutschen des Probekörpers, sowie ein Versagen innerhalb des Prüfbereichs. Regelmäßiges Versagen des Probekörpers im Klemmbereich weist auf durch die Klemmung erzeugte Spannungsspitzen und somit eine ungeeignete Klemmtechnik hin.

3.6.2 Untersuchte Klemmtechniken

Drei verschiedene Klemmbeschichtungen wurden jeweils als Flächen- und Linienpressung untersucht. Als Beschichtung wurden im Forschungsverbund die Folgenden festgelegt:

- keine Beschichtung (Stahl),
- PVC-Polyester Gewebe,
- Vulkollan.

Die Beschichtungen wurden auf die ebene Klemmbacke aufgebracht und gegen eine unbeschichtete Klemmbacke (konvex oder eben) gespannt. Die untersuchten Klemmtechniken von UDE sind in Bild 33 dargestellt.

Für die verschmierte Linienklemmung wird der Anfangsabstand der Klemmbacken durch den Abstand der Einspannklemmen L bzw. die Messlänge L_0 durch den Abstand der Scheitelpunkte der konvexen Klemmbacken definiert, siehe Bild 33.

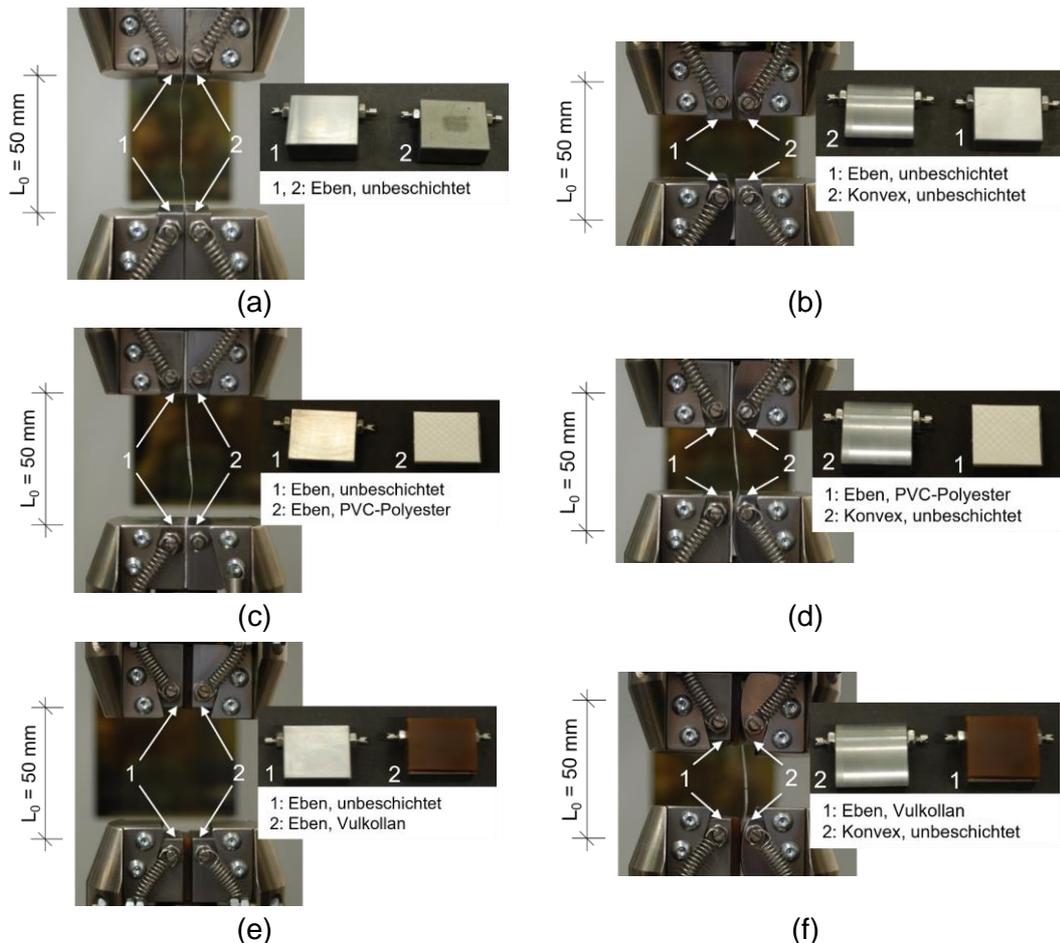


Bild 33 Untersuchte Klemmkonfigurationen; Stahl auf Stahl: (a) Flächenpressung, (b) Linienpressung; Stahl auf PVC-Polyester: (c) Flächenpressung, (d) Linienpressung; Stahl auf Vulkollan: (e) Flächenpressung, (f) Linienpressung, Fotos: UDE/IML

3.6.3 Ermittlung der optimierten Klemmtechnik

Bild 34 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen unterschiedlicher Klemmarten und -beschichtungen für die 100 μm Flächenschweißnähte der drei Konfektionäre. Die mit unbeschichteten Klemmbacken flächengeklebten Proben rutschten während der Zugprüfung aus dem Probenhalter heraus. Sie werden daher als ungeeignete Klemmtechnik identifiziert.

Die Ergebnisse der Schweißnahtproben der Konfektionäre A und C sind für alle weiteren untersuchten Klemmtechniken nahezu identisch. Für die Schweißnahtproben dieser beiden Konfektionäre kann keine systematische Abhängigkeit zwischen der Tragfähigkeit und der verwendeten Klemmtechnik identifiziert werden. Die mittleren Tragfähigkeiten $f_{u,w,x}$ des Konfektionärs B streuen von 35,8 MPa bis 41,7 MPa stark. Die Ergebnisse der Konfektionäre A und C legen nahe, dass diese Schwankungen nicht auf Einflüsse der Klemmtechnik zurückzuführen sind, da die Einflüsse als unabhängig von den verwendeten Schweißparametern gelten. Eine mögliche Erklärung für die starken Streuungen der erzielten Tragfähigkeiten des Konfektionärs B könnte eine ungleichmäßige Qualität über die Schweißnahtlänge aus Schwankungen der Schweißparameter wie z.B. der Fügetemperatur oder der Kühltemperatur während des Schweißprozesses sein.

Analog zu den Ergebnissen der dünneren Schweißnahtproben zeigen die Tragfähigkeiten der 250 μm Flächenschweißnähte ebenfalls keine systematische Abhängigkeit zu den verwendeten Klemmtechniken, siehe Bild 35. Die Tragfähigkeiten des Konfektionärs B zeigen hier ebenfalls keine Auffälligkeiten.

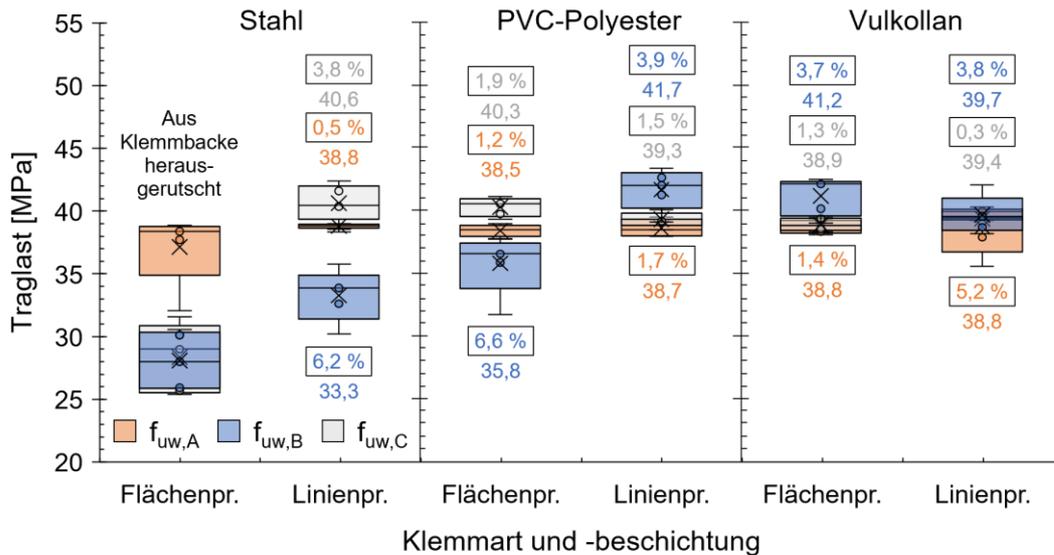


Bild 34 Gemessene Tragfähigkeiten der 100 µm ETFE-Flächenschweißnähte bei verschiedenen Klemmarten und -beschichtungen der Konfektionäre A, B und C, durchgeführt von UDE, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, $T = 23\text{ °C} \pm 2\text{ K}$, $n = 5$

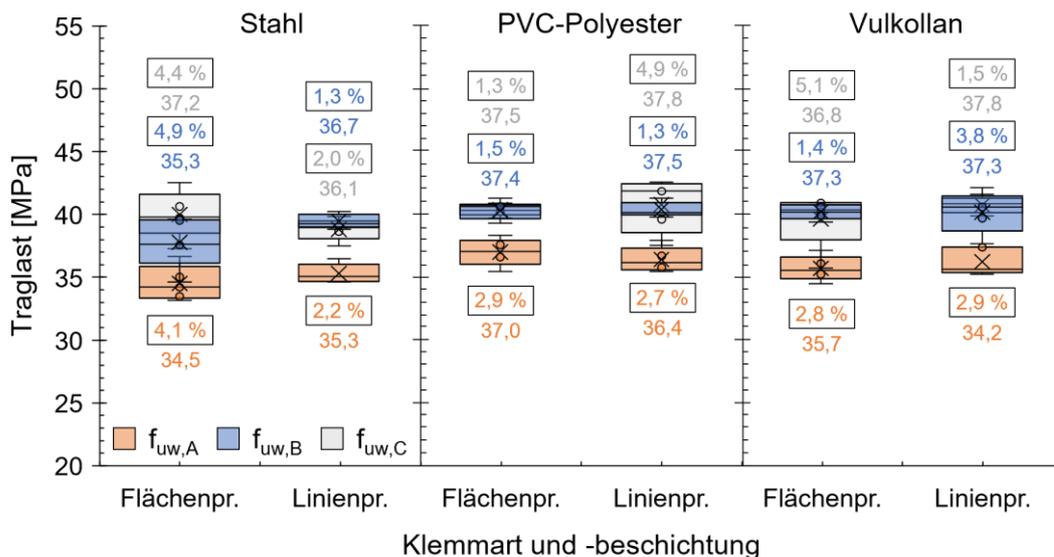


Bild 35 Gemessene Tragfähigkeiten der 250 µm ETFE-Flächenschweißnähte bei verschiedenen Klemmarten und -beschichtungen der Konfektionäre A, B und C, durchgeführt von DEKRA, Angabe des Variationskoeffizienten V_x und der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, $T = 23\text{ °C} \pm 2\text{ K}$, $n = 5$

Die experimentellen Untersuchungen zur Optimierung der Klemmtechnik zeigen, dass die gemessene Tragfähigkeit der Flächenschweißnähte unabhängig von der Klemmtechnik ist. Lediglich die Flächenpressung mit unbeschichteten Klemmbacken konnte als ungeeignet identifiziert werden. Als Klemmtechnik wird die verschmierte Linienpressung mit PVC-Polyester Gewebe oder Vulkollan beschichteten Klemmbacken empfohlen. Diese weisen erfahrungsgemäß wenig Rutschen und keine Klemmbrüche auf. Für die weiteren experimentellen Untersuchungen werden Vulkollan beschichtete Klemmbacken verwendet.

3.7 Konsensfindung der optimierten Prüfparameter (AP 1.7)

Die experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der Einflüsse der unterschiedlichen Prüfparameter haben gezeigt, dass die gemessene Tragfähigkeit von ETFE-

Flächenschweißnähten nahezu unabhängig von den gewählten Prüfparametern ist. Vereinzelt konnten allerdings auch bestimmte Konfigurationen von Prüfparametern als ungeeignet identifiziert werden. Im Folgenden sind die optimierten Prüfparameter für die Schweißnahtprüfung aufgeführt:

Probekörpergeometrie: MT2-50,

Herstellmethode: Hebelschneider oder Cuttermesser mit neuer Klinge,

Prüfgeschwindigkeit: 200 mm/min,

Klemmtechnik: verschmierte Linienpressung mit einseitiger Vulkollan oder PVC-Polyester Gewebe beschichtet.

Diese optimierten Prüfparameter stellen eine Empfehlung dar, die neben dem Einfluss auf die Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten ebenfalls praxisrelevante Vorteile wie beispielsweise eine möglichst kurze Prüfdauer berücksichtigen. Des Weiteren wird empfohlen, zukünftig Abweichungen von den o. g. Prüfparametern zu untersuchen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit nach den optimierten Prüfparametern durchgeführten monoaxialen Zugprüfungen sicherzustellen.

3.8 Verifizierung der vereinheitlichten Prüfmethode (AP 1.8)

Die Gesamtheit der optimierten Prüfparameter stellt die vereinheitlichte Prüfmethode zur Ermittlung der Tragfähigkeiten von ETFE-Flächenschweißnähten dar. Die vereinheitlichte Prüfmethode soll die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der in verschiedenen Prüflaboren ermittelten Ergebnisse an ETFE-Flächenschweißnähten sicherstellen. Zur Verifizierung dieser wurden monoaxiale Kurzzeit-Zugprüfungen gemäß der vereinheitlichten Prüfmethode in den beiden Prüflaboren der UDE und DEKRA durchgeführt und die Ergebnisse verglichen.

Bild 36 zeigt die Tragfähigkeiten der ETFE-Flächenschweißnähte der drei Konfektionäre, die gemäß der vereinheitlichten Prüfmethode von UDE und DEKRA unabhängig voneinander bei Raumtemperatur ermittelt wurden.

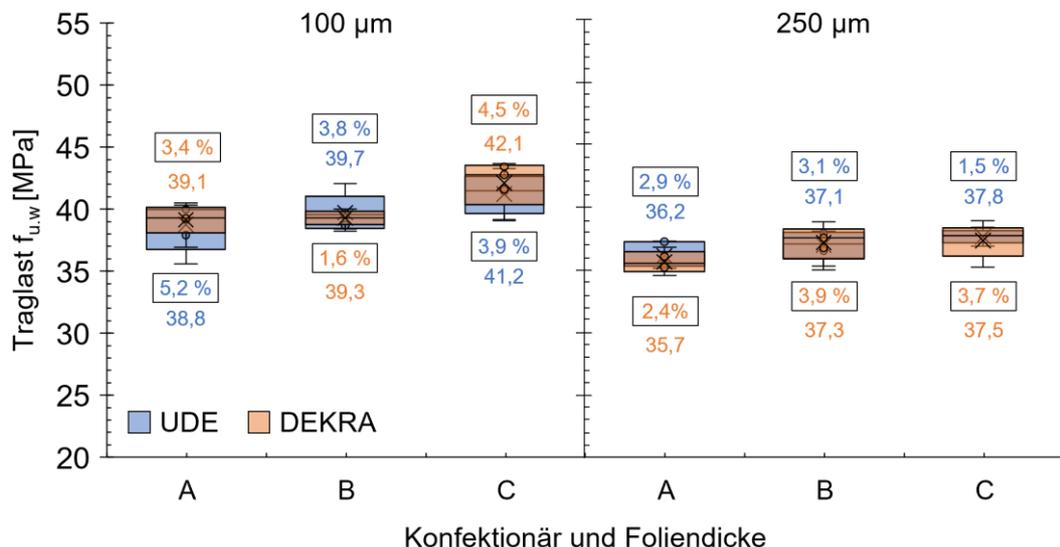


Bild 36 Gemessene Tragfähigkeiten von ETFE-Flächenschweißnähte der drei Konfektionäre geprüft durch UDE und DEKRA gemäß der vereinheitlichten Prüfmethode, Angabe des Variationskoeffizienten V_x [%] und der mittleren Tragfähigkeit $f_{u,w,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

Sowohl die mittleren Tragfähigkeiten als auch die Variationskoeffizienten sind nahezu identisch. Sämtliche Werte liegen in einem gemeinsamen Streubereich. Die vereinheitlichte Prüfmethode gilt somit als verifiziert.

4 Entwicklung von Konzepten und normativen Richtlinien zur Qualitätssicherung geschweißter ETFE-Folien (AP 2 und AP 3)

4.1 Vorgehensweise

Für die Entwicklung von Konzepten und normativen Richtlinien zur Qualitätssicherung wurden zunächst die für die Ausführung von ETFE-Konstruktionen verwendeten Schweißnahtdetails sowie die verwendeten Schweißprozesse identifiziert. Auf diesen Kenntnissen aufbauend, wurden einheitliche Ablaufpläne der Schweißverfahren entwickelt und die wesentlichen Einflussgrößen dieser evaluiert. Die zu entwickelnden Ablaufpläne der derzeit vorherrschenden Arbeitsabläufe umfassen:

- Ermittlung geeigneter Schweißparameter,
- Herstellung einer ETFE-Schweißnaht,
- Prüfungen vor, während und nach der Herstellung.

Mithilfe der identifizierten wesentlichen Einflussgrößen konnten Konzepte zur Qualifizierung der Schweißverfahren entwickelt werden. Dabei wurden bereits existierende normative Regelungen zum Schweißen im konstruktiven Stahlbau als Orientierung und Grundlage verwendet. Parallel wurden Konzepte zur Qualifizierung des Schweißpersonals entwickelt. Die Grundlagen dazu bildeten ebenfalls die im Vorfeld gewonnenen Erkenntnisse über den derzeitigen Ablauf der Konfektion von Folienkonstruktionen sowie normative Regelungen und Richtlinien zum Schweißen im konstruktiven Stahlbau sowie zum Schweißen von Kunststoffbauteilen des Deutschen Verbands für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., kurz DVS. In den sogenannten DVS-Richtlinien wird u. a. das Schweißen von Kunststoffrohren und -tafeln sowie Prüfungen der Schweißer und Fehlstellen in Schweißverbindungen aus Kunststoff geregelt.

Als System für die Qualifizierung des Schweißverfahrens für die Ausführung geschweißter ETFE-Folien wurde das bereits etablierte und bewährte Konzept aus dem konstruktiven Stahlbau zugrunde gelegt, siehe z. B. DIN EN ISO 15607, DIN EN ISO 15609-1 [18], DIN EN ISO 15614-1 [19] und ergänzend DIN-Fachbericht ISO/TR 25901 [20]. In Bild 37 sind die Zusammenhänge der schweißtechnischen Konzepte dieses Qualifizierungssystem aus dem konstruktiven Stahlbau dargestellt. Das Schweißverfahren ist ein übergeordneter Begriff, der die Gesamtheit der vorgeschriebenen Tätigkeiten und Angaben umfasst, die für die Ausführung einer Schweißnaht notwendig sind. Diese schließen den Schweißprozess, Angaben zum Grundwerkstoff, die Schweißnahtvorbereitung und -ausführung sowie weitere Angaben wie eventuell Überwachungsmaßnahmen während des Schweißens und Nachbehandlungsmaßnahmen ein.

Grundlegend für dieses Qualifizierungssystem ist die Erstellung einer Schweißanweisung (engl. Welding Procedure Specification, kurz WPS), die alle für die Ausführung einer Schweißnaht notwendigen Angaben enthält. Da dies die Schweißparameter einschließt, sind Schweißanweisungen naturgemäß abhängig vom Schweißprozess. Eine Schweißanweisung gilt so lange als vorläufige Schweißanweisung (engl. Preliminary Welding Procedure Specification, kurz pWPS) wie sie nicht durch ein geeignetes Verfahren qualifiziert wurde. Die Schweißnaht darf erst nach Qualifizierung der Schweißanweisung und Erstellung eines Berichts für die Qualifizierung der Schweißanweisung (engl. Welding Procedure Qualification Report, kurz WPQR) ausgeführt werden.

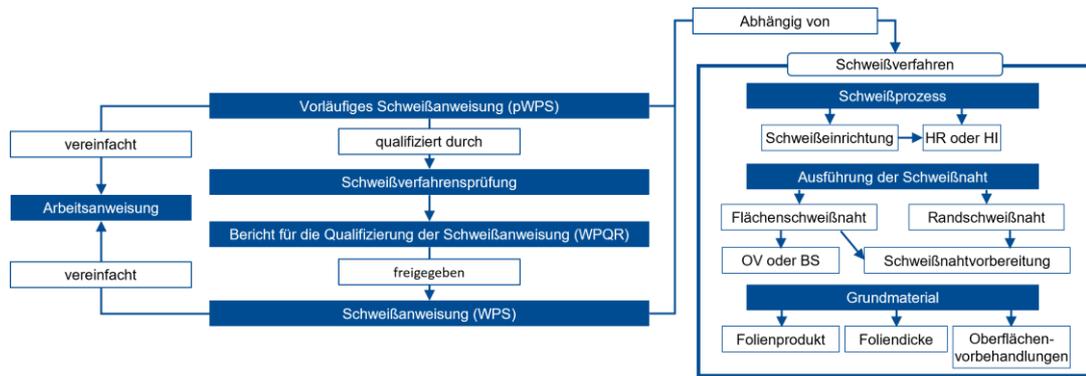


Bild 37 Zusammenhang zwischen schweißtechnischen Konzepten

Prinzipiell handelt es sich bei diesem Qualifizierungssystem um eine Methode zur Ermittlung geeigneter Schweißparameter für die vorliegenden Randbedingungen der auszuführenden Schweißnaht. Es hat sich für die Qualifizierung von Schweißnähten im konstruktiven Bereich bewährt und wurde daher im Rahmen dieses Forschungsvorhabens auf die Ausführung geschweißter ETFE-Folien übertragen.

Weiterhin wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens eine Methodik zur Erstellung eines für Flächenschweißnähte von ETFE-Folien geeigneten Schweißplans entwickelt. Auch dieser wurde auf der Grundlage der o. g. Erkenntnisse und bereits angewandter normativer Regelungen und Richtlinien erstellt.

Aus den erstellten Konzepten wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die Normenreihe DIN 18229 zur Qualitätssicherung geschweißter ETFE-Folien für die Anwendung im Bauwesen im Entwurf entwickelt. Als Basis dienen die bereits erwähnten normativen Richtlinien aus dem konstruktiven Stahlbau und des DVS. Die Normenreihe DIN 18229 trägt den Titel „Schweißen von ETFE-Folien für die Anwendung im Bauwesen“ und enthält die folgenden fünf Teile. Die Normenteile E DIN 18229-1 und E DIN 18229-2 regeln die Qualifizierung der Schweißaufsicht und des Schweißpersonals. E DIN 18229-3 und E DIN 18229-4 regeln die Qualifizierung des Schweißverfahrens. In E DIN 18229-5 soll die Prüfung der gefertigten Schweißnaht standardisiert werden. Die Titel der einzelnen Teile lauten wie folgt:

- E DIN 18229-1: Schweißaufsicht – Aufgaben und Verantwortung,
- E DIN 18229-2: Schweißpersonal – Prüfung von Bedienern und Einrichtern zum vollmechanischen und automatischen Schweißen von ETFE-Folien,
- E DIN 18229-3: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für ETFE-Folien – Schweißanweisung,
- E DIN 18229-4: Anforderungen und Qualifizierung von Schweißverfahren für ETFE-Folien – Schweißverfahrensprüfung,
- E DIN 18229-5: Prüfen geschweißter ETFE-Folien.

Für die Teile 1 bis 4 wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens finalisierte Normenentwürfe entwickelt E DIN 18229-1 bis -4. E DIN 18229-5 wurde konzeptualisiert. Die Normenreihe wurde im DIN Normenausschuss NA 005-51-08AA „Eurocode für Membrantragwerke DIN 18204-1 sowie 4134“ vorgestellt, diskutiert und als weiteres Normungsprojekt beschlossen. Das neue Normungsprojekt DIN 18229 mit dem Titel „Schweißen von ETFE-Folien für die Ausführung im Bauwesen“ wurde seitens des DIN bereits eröffnet.

Die Normenreihe DIN 18229 stellt eine Verwertung der in diesem Vorhaben erarbeiteten Erkenntnisse und Konzepte dar. Damit können die normativen Regelungen einen wichtigen Beitrag zur Standardisierung der Ausführung sowie zur Qualitätssicherung geschweißter ETFE-Folien leisten. Bild 38 zeigt die in diesem Vorhaben entwickelten und zugrundeliegenden drei Säulen der Qualitätssicherung geschweißter ETFE-Folien.

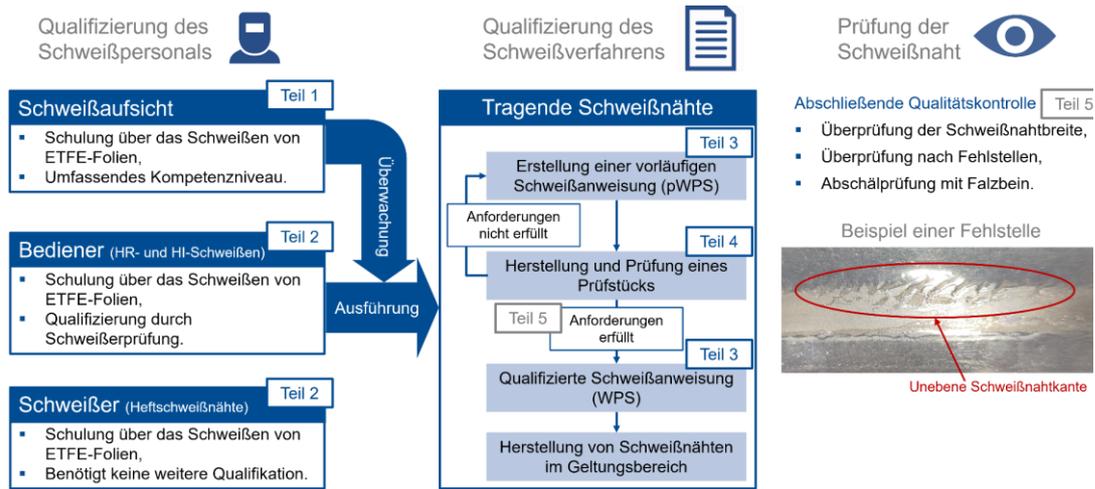


Bild 38 Die drei Säulen der Qualitätssicherung geschweißter ETFE-Folien für die Anwendung im Bauwesen und die Zuordnung der einzelnen Teile der DIN-Normenreihe E DIN 18229 Schweißen von ETFE-Folien für die Anwendung im Bauwesen, Foto: UDE/IML

Die o. g. beschriebenen und in Bild 38 dargestellten Ablaufpläne, Konzepte und Normentwürfe wurden federführend von UDE entwickelt. Als Grundlage dienten u. a. auch Werksbesichtigungen bei den beteiligten ausführenden Betrieben sowie Interviews mit für die Koordinierung der Ausführung von ETFE-Konstruktion verantwortlichen Personen. Sämtliche Dokumente wurden in Projekttreffen mit allen Verbundpartnern diskutiert und finalisiert.

4.2 Identifizierung von Schweißnahtdetails von ETFE-Konstruktionen

Für die Ausführung von ETFE-Konstruktionen kann grundsätzlich zwischen Flächenschweißnähten (engl. area weld seams) und Randschweißnähten (engl. edge weld seams) sowie konstruktiven Schweißnähten als Arten von Schweißnahtdetails unterschieden werden, siehe Bild 39. Flächenschweißnähte dienen der Erweiterung der Folienlage und/oder der doppelgekrümmten Ausführung der Folienlage. Bei ETFE-Flächenschweißnähten wird zwischen Überlappnaht (engl. overlap weld seam, kurz OV) und Stoßnaht mit Deckstreifen (engl. backstrip weld seam, kurz BS) sowie einer Seiltasche (engl. cable pocket) unterschieden. Für die Ausführung einer Überlappnaht werden die beiden Fügepartner teilüberlappend positioniert und in diesem Bereich verschweißt, siehe Bild 40 (a). Stoßnähte werden durch Stoßen der beiden Fügepartner und Aufschweißen eines Deckstreifens auf die Stoßfuge ausgeführt, siehe Bild 40 (b).

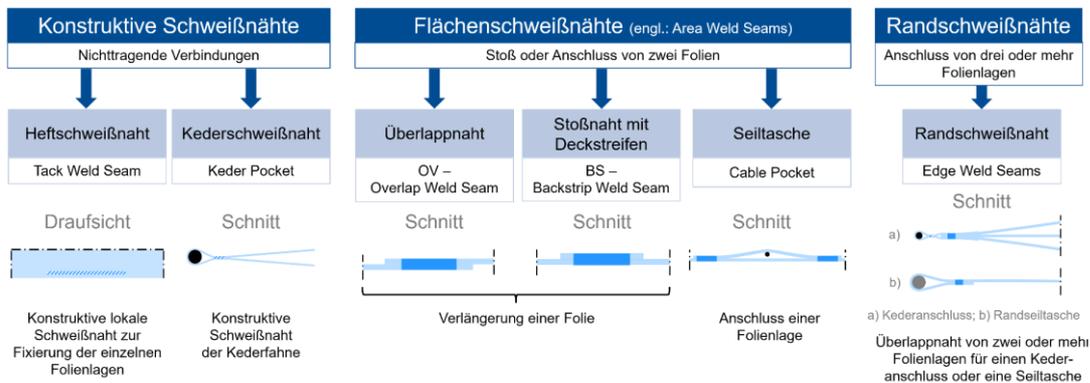


Bild 39 Unterteilung der ETFE-Folienschweißnähte

Die Deckstreifen bestehen meist aus einem 250 µm ETFE-Folienstreifen. Seiltaschen werden durch Aufschweißen eines breiteren ETFE-Folienstreifens mithilfe zweier paralleler Überlappnähte ausgeführt. Die so entstandene Folientasche bildet die

Möglichkeit des Anschlusses der Folienkonstruktion an ein beschichtetes Stahlseil. Alternativ kann die Seiltasche auch durch zwei Zuschnittsbahnen ausgebildet werden.

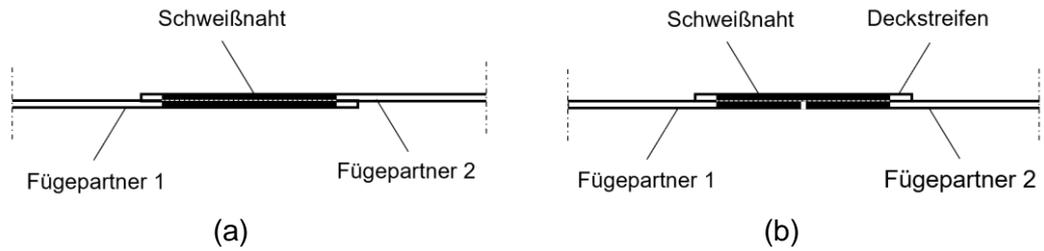


Bild 40 Details von ETFE-Flächenschweißnähten: (a) Überlappnaht, OV, (b) Stoßnaht mit Deckstreifen, BS

Randschweißnähte werden zum Anschluss der Folienkonstruktion an die Primärstruktur genutzt. Bei mehrlagigen Folienkonstruktionen dienen sie ebenfalls der luftdichten Verbindung von derzeit bis zu fünf verschiedenen Folienlagen. Randschweißnähte werden ausschließlich mithilfe von Überlappnähten ausgeführt. In Bild 41 ist die Randschweißnaht eines dreilagigen Kissens dargestellt. Die Kedertasche wurde durch Umschlagen der unteren Folienlage (Fügepartner 3) hergestellt. Der Keder dient dem Anschluss an das Kederprofil und damit an die Primärkonstruktion.

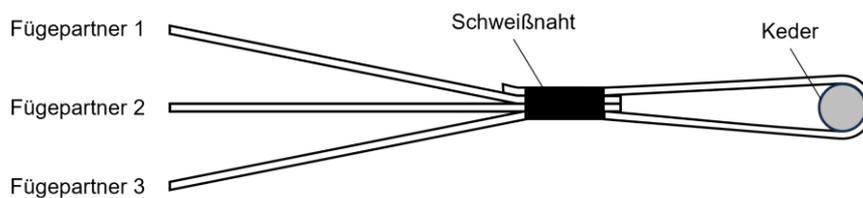


Bild 41 Detail einer ETFE-Randschweißnaht eines dreilagigen Kissens mit Umschlag

Eine weit verbreitete Ausführung der Randschweißnaht bildet die Verschweißung einer separaten Kedertasche an das Folienpaket (im Falle einer mehrlagigen Konstruktion) oder die einzelne Folienlage (im Falle einer einlagigen Konstruktion). Die separate Kedertasche wird meist über eine konstruktive Schweißnaht gebildet, die den Keder in Position hält, siehe Bild 42. Planmäßig übernehmen konstruktive Schweißnähte keine Kraftübertragung und werden durch Ausführung adhäsiver Schweißnähte gebildet. Die gefügten Folien lösen sich während der Nutzungsdauer üblicherweise voneinander.

Konstruktive Schweißnähte umfassen die o. g. Schweißnähte zur Positionierung des Keders innerhalb der Kederfahne sowie Heftnähte, die zur Fixierung der einzelnen Folienlagen mehrlagiger Folienkonstruktionen eingesetzt werden. Heftschweißnähte werden üblicherweise mit Ultraschallschweißgeräten oder Handschweißgeräten ausgeführt.

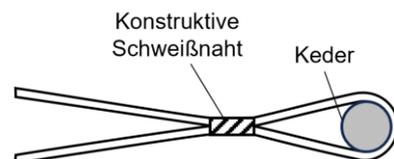


Bild 42 Kedertasche mit konstruktiver Schweißnaht

Weitere Schweißnahtdetails sind in Anlage E der E DIN 18229-3 dargestellt, siehe Anlage E. Die hier aufgeführten Schweißnahtdetails stellen den derzeitigen Stand der Technik der Ausführung von ETFE-Konstruktionen dar. Mit der Weiterentwicklung der Schweißtechnik im Bereich des Schweißens von ETFE-Folien werden zukünftig vermutlich weitere Schweißnahtdetails entwickelt und verwendet werden.

4.3 Erstellung vereinheitlichter Ablaufpläne der vorherrschenden Schweißverfahren und Ermittlung der Einflussgrößen

4.3.1 Allgemeines

Die für die Herstellung geschweißter ETFE-Folien zu erstellenden Ablaufpläne umfassen im Wesentlichen die Identifizierung der für die Ausführung der individuellen Schweißdetails geeigneten Schweißparameter. Die Schweißparameter sind abhängig von der Schweißeinrichtung und dem zugrundeliegenden Schweißprozess. Daher wurden zunächst die den in Kapitel 2 beschriebenen Schweißeinrichtungen zugrundeliegenden Schweißprozesse identifiziert. Diese umfassen:

- stationäre Heizbalkenschweißmaschinen mit langem Heizbalken (1),
- verfahrbare Heizbalkenschweißmaschinen mit kurzen Heizbalken (2) und
- Verfahrschweißmaschinen mit kurzen Heizbalken (3).

Allgemein folgt das Schweißen von ETFE-Folien dem Prinzip des Wärmekontaktschweißens. Der Schweißprozess wird als Heizelementschweißen bezeichnet, siehe Bild 43. Diesem Schweißprozess liegen verschiedene Varianten zugrunde.

Prinzip	Prozess	Varianten
Schweißen durch feste Körper (Wärmekontaktschweißen)	Heizelementschweißen	Direktes Heizelementschweißen Indirektes Heizelementschweißen Heizkeilschweißen Wärmeimpulsschweißen Trennnahtschweißen Heizelement-Rollband-Schweißen

Bild 43 Kunststoffschweißverfahren, Tabellenausschnitt aus [16]

Für das Schweißen von ETFE-Folien konnten gemäß DIN 1910-3 [5] zwei Varianten des Heizelementschweißens identifiziert werden. Diese umfassen das Heizelement-Rollbandschweißen (kurz HR, engl. band sealing) und das Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (kurz HI, engl. impuls sealing), die im weiteren Verlauf in den Kapiteln 4.3.2 und 4.3.3 eingehender beschrieben und die Schweißparameter dieser Schweißprozesse identifiziert werden.

Mithilfe von Werksbesichtigungen bei den beteiligten ausführenden Betrieben und Interviews mit dem in diesen Betrieben im Bereich der Ausführung agierenden Personal wurde der in Bild 44 dargestellte Ablaufplan zur Identifizierung geeigneter Schweißparameter erstellt. Der Ablaufplan wurde im Forschungsverbund diskutiert und finalisiert. Die Herstellung eines nicht standardisierten Prüfstücks sowie die Herstellung der Schweißnaht gemäß der geeigneten Schweißparameter erfolgt nach den identifizierten Ablaufplänen des verwendeten Schweißprozesses, siehe Bild 46 oder Bild 48.

Nicht tragende Schweißnähte der Kederfahne können mithilfe einer Verfahrschweißmaschine oder von Ultraschall- oder Handschweißgeräten ausgeführt werden. Heftschweißnähte werden üblicherweise mit Ultraschall- und Handschweißgeräten ausgeführt. Aufgrund der konstruktiven Natur dieser Schweißnahtdetails werden die zugrundeliegenden Schweißprozesse sowie Einflussgrößen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht weiter betrachtet.

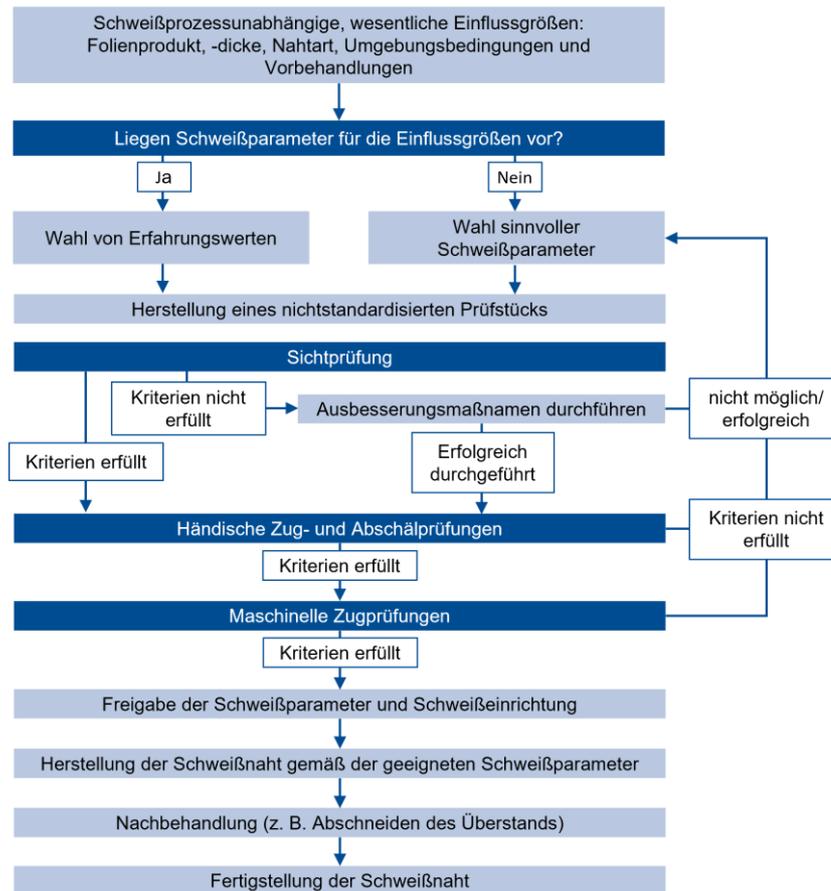


Bild 44 Ablaufplan zur Identifizierung geeigneter Schweißparameter für die Ausführung von ETFE-Schweißnähten

Die wesentlichen Einflussgrößen für die Ausführung von ETFE-Schweißnähten stellen solche Schweißparameter, Umgebungsbedingungen und weitere Faktoren dar, die einen signifikanten Effekt auf den Schweißprozess und/oder auf die Qualität der Schweißverbindung haben können. Dies umfasst zum einen die bereits angesprochenen Schweißparameter, aber auch vom Schweißprozess unabhängige Faktoren. Diese wurden auf der Grundlage der Erfahrungen der beteiligten ausführenden Betriebe sowie den allgemein bekannten und im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erlangten Erkenntnissen identifiziert und umfassen:

- Folienprodukt,
- nominelle Foliendicke,
- Schweißnahttyp,
- Umgebungstemperatur,
- Luftfeuchtigkeit,
- Schweißnahtvorbereitung, z. B. Entfernung der Bedruckung,
- Trenn- und Oberflächenvorbereitungsverfahren, z. B. Koronabehandlung,
- verwendete Schweißeinrichtung.

Die Qualität einer Schweißnaht umfasst neben visuellen Eigenschaften im Wesentlichen die Tragfähigkeit. Daher gelten alle schweißtechnischen und das Grundmaterial betreffende Faktoren, die die Tragfähigkeit der Schweißnaht beeinflussen, als wesentliche Einflussgrößen. Allgemein ist bekannt, dass die Zugfestigkeiten von ETFE-Folien vom verwendeten Folienprodukt abhängen. Dies wurde im Zuge der Referenzprüfungen am ETFE-Grundmaterial im Rahmen dieses Forschungsvorhabens auch bestätigt, siehe Kapitel 5.2. Im gleichen Maße hängt die Tragfähigkeit einer Flächenschweißnaht vom zugrundeliegenden Folienprodukt ab. Weiterhin ist allgemein bekannt, dass die Tragfähigkeit auch von der nominellen Foliendicke des

der Schweißnaht zugrundeliegenden Grundmaterials abhängt. Dies konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens bestätigt werden. Ferner konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gezeigt werden, dass die Tragfähigkeit ebenfalls vom Ausführungstyp der Flächenschweißnaht (OV oder BS) abhängig ist, siehe 5.2.

Aus Erfahrungen der beteiligten Konfektionäre ist bekannt, dass die Umgebungstemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit, die während des Schweißvorgangs herrschen, einen Einfluss auf die Tragfähigkeit geschweißter ETFE-Folien haben kann. Sie stellen daher ebenfalls wesentliche Einflussgrößen dar. Laut beteiligten Konfektionären können die Schweißnahtvorbereitung und die Trenn- und Oberflächenvorbereitungsverfahren ebenfalls die Tragfähigkeit geschweißter ETFE-Folien beeinflussen.

Weiterhin gilt die Schweißeinrichtung als wesentlicher Einflussfaktor. Die ermittelten Schweißparameter sind daher nur für die jeweilige Schweißeinrichtung gültig, an der das Prüfstück hergestellt wurde. Bei den beteiligten Konfektionären wird die Schweißeinrichtung erst nach Ermittlung einer ausreichenden Tragfähigkeit des Prüfstücks mithilfe monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen für die Fertigung von Schweißnähten freigegeben, siehe Bild 44.

4.3.2 Heizelement-Rollbandschweißen (HR)

Das Heizelement-Rollbandschweißen (HR) ist die für das Fügen von ETFE-Folien vorherrschende Variante des Schweißprozesses. Dieser Schweißprozess liegt der Verfahrenschweißmaschine mit kurzem Heizbalken zugrunde, siehe Bild 45. Hierbei handelt es sich um einen kontinuierlichen Schweißprozess, bei dem die zu verbindenden Fügepartner mithilfe zweier übereinander positionierter und verfahrbarer Rollbänder verschweißt werden.



Während des Schweißvorgangs bewegen sich die Rollbänder mit einer Geschwindigkeit von 1 m/min bis 3 m/min. Die Fügepartner werden in die sich übereinander bewegenden Rollbänder eingefädelt. Die sich während des Schweißprozesses im Kontakt befindlichen Flächen der Rollbänder werden als Schweißbereich bezeichnet. Der vordere Teil des Schweißbereichs wird über Heizelemente auf die Fügetemperatur erwärmt, siehe Bild 45. Die eingefädelten Fügepartner werden in diesem Bereich aufgeschmolzen und über den durch die Rollbänder eingebrachten Fügedruck im schmelzflüssigen Zustand miteinander verpresst. Der hintere Teil des Schweißbereichs wird über ein Kühlelement auf den Bereich der Kühltemperatur abgekühlt. In diesem Bereich findet die Rekristallisation des aufgeschmolzenen Fügebereichs und damit die Herstellung der Schweißnaht statt.

Bild 45 Verfahrenschweißmaschine (HR) von se-cover (Quelle und ©: se-cover)

Mit diesem kontinuierlichen Schweißprozess können über den vergleichsweise kurzen Schweißbereich Schweißnähte beliebiger Krümmung bezogen auf die Schweißnahtebene sowie nahezu beliebiger Schweißnahtlänge hergestellt werden. Ein Nachteil dieses Prozesses stellt die etwas niedrigere Produktionsgeschwindigkeit und der erhöhte Arbeits- und Überwachungsaufwand während des Schweißvorgangs dar.

Bild 46 zeigt den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten Ablaufplan für das Schweißen von ETFE-Folien gemäß dem Heizelement-Rollbandschweißen (HR). Der kontinuierliche Schweißvorgang besteht aus dem Einfädeln und der Sichtprüfung sowie aus der Anpassung des Einfädlungsprozess bei ermittelten Abweichungen. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die gewünschte Schweißnahtlänge erreicht wird oder eine nicht tolerierbare Abweichung aufgetreten ist.



Bild 46 Ablaufplan des Heizelement-Rollbandschweißens (HR) für das Schweißen von ETFE-Folien

Bei dem Heizelement-Rollbandschweißen (HR) handelt es sich um einen vollmechanischen Schweißprozess gemäß DIN 1910-100 [15]. Dies ist durch die mechanische Führung des Werkstoffs und der manuellen Handhabung des Werkstoffes begründet, siehe Bild 47.

Als Schweißparameter und damit wesentliche Einflussgrößen für das Schweißen von ETFE-Folien gemäß dem Heizelement-Rollbandschweißen (HR) gelten die folgenden Parameter:

- Schweißtemperatur bzw. elektr. Leistung des oberen/unteren Rollbandes,
- Fügedruck = Kühldruck,
- Vortriebsgeschwindigkeit und
- Bereich der Kühltemperatur.

4.3.3 Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI)

Bei dem Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI) werden die Fügepartner über einen oder mehrere Heizbalken miteinander verschweißt. Bei dieser Variante des Heizelementschweißens handelt es sich um den Schweißprozess, der stationären Heizbalkenschweißmaschinen mit langem Heizbalken (1) und verfahrbaren Heizbalkenschweißmaschinen mit kurzen Heizbalken (2) zugrunde liegt. Bei beiden Schweißeinrichtungen werden die Fügepartner vor dem Schweißvorgang unter dem oberen, nach unten verfahrbaren Heizbalken positioniert. Während der Vorlaufzeit wird das den Heizbalken abschließende Heizband auf die Schweißtemperatur vorgewärmt. Nach dem Stempelprinzip wird der Heizbalken abgesenkt, bis ein vordefinierter Fügedruck auf die Fügepartner ausgeübt wird. Durch die Anwendung von Hitze und Druck über eine definierte Fügedauer werden die Fügepartner aufgeschmolzen und im schmelzflüssigen Zustand miteinander verpresst. Diesem Prozess folgt eine Kühlphase, in der der Fügebereich rekristallisiert und die tragfähige Schweißverbindung entsteht. Die Kühlung kann dabei aktiv durch Kühlelemente oder durch Abkühlen bei Raumtemperatur erfolgen.

Bei den Schweißeinrichtungen, die dieser Variante des Heizelementschweißens folgen, stimmt der Schweißbereich mit der Länge der Heizbalken bzw. der Länge der Fügepartner überein. Um den Temperaturgradienten innerhalb des Fügebereichs zu optimieren, verfügen die Schweißeinrichtungen meist auch über einen unteren Heizbalken. Dies ist vor allem beim Schweißen deutlich dickerer Randschweißnähte notwendig, um zu hohe Fügetemperaturen zu vermeiden, die möglicherweise die äußeren Folienlagen beschädigen.

Die Ausführung von ETFE-Schweißnähten mithilfe des Heizelement-Wärmeimpulsschweißens zeichnet sich durch eine sehr hohe Produktionsgeschwindigkeit aus. Ein

Nachteil dieser Variante des Heizelementschweißens bildet die auf die Heizbalkenlänge begrenzte Schweißnahtlänge und die nur im geringen Maße konfektionierbare Krümmung in Schweißnahtebene.

Gemäß DIN 1910-100 handelt es sich beim Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI) um einen automatischen Schweißprozess, da bei diesem Schweißprozess sowohl die Werkstückführung wie auch Handhabung mechanisch erfolgt, siehe Bild 47.

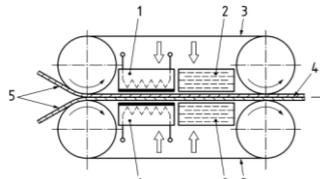
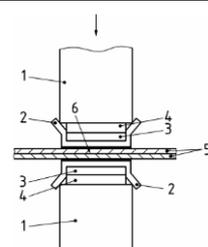
Benennung	Beispiel Heizelementschweißens	Bewegungs-/Arbeitsabläufe	
		Werkstoffführung	Werkstückhandhabung
Manuelles Schweißen	Ultraschall- oder Handschweißgerät	Manuell	Manuell
Vollmechanisches Schweißen	 <p>Heizelement-Rollbandschweißen (HR) gemäß DIN 1910-3</p> <p>Legende 1 Heizelement 2 Kühlung 3 Rollband 4 Schweißnaht 5 Fügepartner</p>	Mechanisch	Manuell
Automatisches Schweißen	 <p>Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI) gemäß DIN 1910-3</p> <p>Legende 1 Stempel 2 Trennfolie 3 Heizelement 4 Wärmeisolierung 5 Fügepartner 6 Schweißnaht</p>	Mechanisch	Mechanisch

Bild 47 Einteilung der für das Schweißen von ETFE-Folien genutzten Varianten des Heizelementschweißens nach dem Grad der Mechanisierung, in Anlehnung an DIN 1910-100 [15], Bilder aus DIN 1910-3 [5]

In Bild 48 ist der Ablaufplan des Heizelement-Wärmeimpulsschweißens (HI) dargestellt. Essenziell für den Schweißprozess ist die Positionierung und Fixierung der Fügepartner vor der Durchführung des automatischen Schweißprozesses. Nach dem Bedienen der Schweißeinrichtung folgt eine Vorlaufzeit, in der das Heizband bzw. die Heizbänder erhitzt wird/werden, bevor der Fügedruck durch Absenken des oberen Heizbalkens aufgebracht wird und der Schweißvorgang beginnt.



Bild 48 Ablaufplan des Heizelement-Wärmeimpulsschweißens (HI) für das Schweißen von ETFE-Folien

Als Schweißparameter und damit wesentliche Einflussgrößen für das Schweißen von ETFE-Folien gemäß dem Heizelement-Wärmeimpulsschweißen wurden die folgenden Parameter identifiziert:

- Schweißtemperatur bzw. elektr. Leistung des oberen/unteren Heizbalkens,
- Fügedruck = Kühldruck,

- Fügedauer,
- Bereich der Kühltemperatur und
- Bereich der Abkühldauer.

4.4 Qualifizierung der Schweißverfahren (AP 2.3)

4.4.1 Vorgehensweise

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung einer Schweißanweisung für die derzeit verwendeten Schweißverfahren für das Schweißen von ETFE-Folien sowie die Entwicklung einer entsprechenden Schweißverfahrensprüfung. Mithilfe der identifizierten wesentlichen Einflussgrößen der verschiedenen Schweißverfahren im Bereich der Ausführung von ETFE-Konstruktionen, wurden Schweißanweisungen für die beiden verwendeten Schweißprozesse, Heizelement-Rollbandschweißen (HR) und Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI), entwickelt. Aus dieser Basis wurde anschließend der Entwurf der DIN 18229-3 (E DIN 18229-3) entwickelt, die die Erstellung einer Schweißanweisung im Bereich der Ausführung von ETFE-Schweißnähten regelt. Als Grundlage für die Erstellung der Schweißanweisungen sowie der Entwicklung der E DIN 18229-3 diente die DIN EN ISO 15609-1.

Für die Entwicklung eines Qualifizierungsverfahrens der Schweißanweisung wurden, die im konstruktiven Stahlbau verwendeten Konzepte auf ihre Anwendbarkeit im Bereich der Ausführung von ETFE-Schweißnähten bewertet. Darauf aufbauend wurde ein Verfahren zur Qualifizierung der Schweißanweisung für die Ausführung von ETFE-Schweißnähten entwickelt. Dazu wurden verschiedene Untersuchungsmethoden auf ihre Eignung und den Prüfungsumfang hinsichtlich der Prüfung von ETFE-Schweißnähten evaluiert. Die Untersuchungsmethoden umfassten sowohl zerstörungsfreie Prüfungen (ZfP) wie auch zerstörende Prüfungen. Grundlage des entwickelten Qualifizierungsverfahrens bildet DIN EN ISO 15614-1.

Die entwickelten Normenentwürfe E DIN 18229-3 und -4 sind in Anlage D bzw. E enthalten.

4.4.2 Entwicklung von Schweißanweisungen für die Ausführung geschweißter ETFE-Folien

Eine Schweißanweisung ist die Grundlage für die Reproduzierbarkeit von Schweißnähten. Sie ist ein Instrument zur wirtschaftlichen Qualitätssicherung gleichwertig hergestellter Schweißnähte und der allgemeinen Sicherheit. Sie legt die zur Erreichung gleichbleibender Schweißnahtqualitäten erforderlichen Schweißparameter, Schweißprozesse, Nahtart und Schweißposition fest. Die Schweißanweisung muss der Schweißaufsicht und den Einrichtern bzw. den Bedienern der Schweißeinrichtungen während der Ausführung zur Verfügung stehen. Eine Schweißanweisung enthält daher sämtliche für die Ausführung einer Schweißnaht benötigten Angaben. Diese umfassen neben allgemeinen Informationen zum Konfektionär, zum Projekt, zum verwendeten Folienprodukt und der Ausführung der Schweißverbindung ebenfalls die in Kapitel 4.3 ermittelten wesentlichen Schweißparameter.

Schweißanweisungen sind aufgrund der Abhängigkeit von den Schweißparametern spezifisch für den jeweils verwendeten Schweißprozess. Daher wurden für beide für die Ausführung von ETFE-Schweißnähten verwendeten Schweißprozesse (HR und HI) jeweils eine Schweißanweisung entwickelt. Grundlagen bildeten die in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Konzepte sowie normative Richtlinien aus dem konstruktiven Stahlbau, siehe DIN EN ISO 15609-1 [18] und DIN-Fachbericht ISO/TR 25901 [21], sowie aus dem Bereich des Kunststoffschweißens, siehe DIN 35230 [21]. Schweißanweisungen für die Ausführung geschweißter ETFE-Folien werden in der E DIN 18229-3 geregelt.

Eine Schweißanweisung gilt so lange als vorläufig (engl. preliminary Welding Procedure Specification, pWPS for short) wie sie nicht durch eine Schweißverfahrensprüfung qualifiziert wurde, siehe Bild 49. Eine qualifizierte Schweißanweisung behält ihre Gültigkeit für die Schweißeinrichtung, auf der sie qualifiziert wurde, bis Wartungen oder andere Veränderungen eine neue Qualifizierung erforderlich machen.



Bild 49 Qualifizierung der vorläufigen Schweißanweisung (pWPS)

Für die Erstellung einer Schweißanweisung im Bereich der Ausführung von ETFE-Schweißnähten wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens E DIN 18229-3 entwickelt, siehe Anlage E. Vordrucke für die Schweißanweisungen des Heizelement-Rollbandschweißens sowie das Heizelement-Wärmeimpulsschweißen sind als Vordrucke in den Anhängen der E DIN 18229-3 enthalten.

4.4.3 Entwicklung eines Qualifizierungsverfahren für das Schweißverfahren in der Ausführung geschweißter ETFE-Folien

4.4.3.1 Allgemeines

Die Schweißverfahrensprüfung ist ein mögliches Verfahren zur Qualifizierung einer vorläufigen Schweißanweisung. Die Qualifizierung kann im konstruktiven Stahlbau durch verschiedene Verfahren erfolgen. In Bild 50 ist das Qualifizierungssystem des Schweißverfahrens im konstruktiven Stahlbau mit den verschiedenen Qualifizierungsverfahren dargestellt. Erst nach der Qualifizierung der vorläufigen Schweißanweisung und der Erstellung eines Berichts über die Qualifizierung des Schweißverfahrens (engl. Welding Procedure Qualification Report, kurz WPQR), der alle relevanten Angaben zur Qualifizierung enthält, darf die Ausführung der Schweißnaht erfolgen.

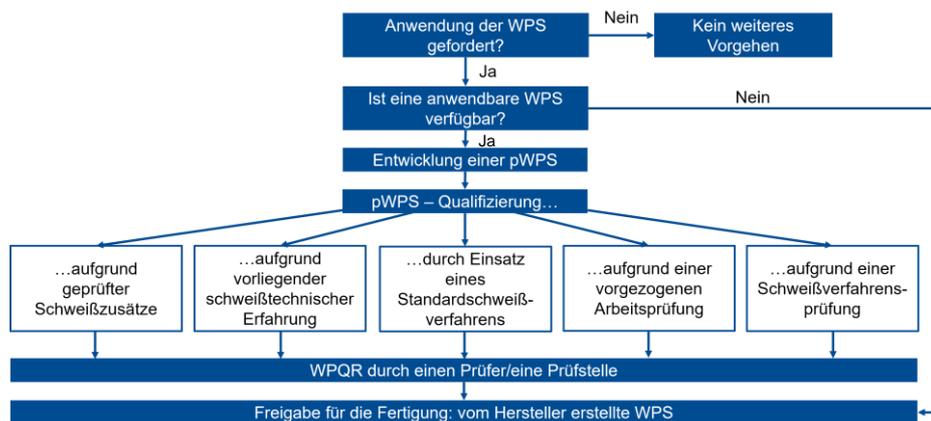


Bild 50 Verfahren zur Qualifizierung des Schweißverfahrens im konstruktiven Stahlbau, siehe DIN EN ISO 15607

Die im konstruktiven Stahlbau verwendeten Verfahren zur Qualifizierung des Schweißverfahrens wurden auf der Basis, der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erlangten Erkenntnisse, analysiert und für die Anwendung auf geschweißte ETFE-Folien evaluiert.

Für die Qualifizierung aufgrund einer Schweißverfahrensprüfung wird ein genormtes Prüfstück gemäß einer vorläufigen Schweißanweisung hergestellt. Aus diesem Prüfstück werden Proben entnommen, die vordefinierten Prüfungen unterzogen werden. Der Prüfungsumfang kann zerstörende und zerstörungsfreie Prüfungen beinhalten. Weiterhin kann der Prüfungsumfang abhängig von einer Stufe sein, die

die Qualitätsanforderungen repräsentiert. Bei einem zweistufigen System darf eine Schweißanweisung, die nach Stufe 2 qualifiziert wurde, beispielsweise für Anwendungen mit höheren Qualitätsanforderungen eingesetzt werden als Schweißanweisungen, die nach Stufe 1 qualifiziert wurden. Dieses Verfahren zur Qualifizierung der Schweißanweisung wurde im Forschungsverbund als geeignet für die Anwendung auf geschweißte ETFE-Folien angesehen.

Eine Qualifizierung aufgrund geprüfter Schweißzusätze ist für die Anwendung auf das Schweißen von ETFE-Folien ungeeignet, da in diesem Bereich keine Schweißzusätze eingesetzt werden. Eine Qualifizierung aufgrund vorliegender schweißtechnischer Erfahrung darf von Unternehmen mit einer ausreichenden schweißtechnischen Erfahrung zur Qualifizierung der Schweißanweisung genutzt werden. Da derzeit keine standardisierte Qualifizierung für das Schweißverfahren von ETFE-Folien existiert, ist auch dieses Verfahren als ungeeignet zu bewerten. Die Qualifizierung durch Einsatz eines Standardschweißverfahrens ist ebenfalls für die Anwendung auf das Schweißen von ETFE-Folien ungeeignet, da in diesem Bereich kein Standardschweißverfahren vorliegt.

Eine Qualifizierung aufgrund einer vorgezogenen Arbeitsprüfung kann dann angewendet werden, wenn die Form und Maße der genormten Prüfstücke der Schweißverfahrensprüfung die zu verschweißende Verbindung nicht angemessen repräsentieren. In diesen Fällen können Sonderprüfstücke hergestellt werden, um die herzustellende Schweißnaht angemessen zu repräsentieren. Nach Erfahrungen der beteiligten ausführenden Betriebe repräsentieren die in Kapitel 4.2 bzw. in Anlage E (E DIN 18229-3) dargestellten, identifizierten Schweißnahtdetails sämtliche für die Ausführung von geschweißten ETFE-Konstruktionen genutzten Schweißnahtdetails. Demzufolge wird eine Qualifizierung aufgrund einer vorgezogenen Arbeitsprüfung für die Anwendung auf geschweißte ETFE-Folien nicht benötigt.

Als geeignetes Qualifizierungsverfahren für die Anwendung im Bereich des Schweißens von ETFE-Folien wurde die Schweißverfahrensprüfung identifiziert. Um den Anforderungen der großen Bandbreite an ETFE-Konstruktionen in der Architektur möglichst gerecht zu werden, ist die Einführung verschiedener Stufen der Qualitätsanforderungen bei der Schweißverfahrensprüfung sinnvoll. Die Bandbreite an ETFE-Konstruktionen gemäß ihrer Ausführungsklasse (engl. execution class, kurz EXC) reicht vom Gewächshausbau (EXC1) bis hin zum Bau repräsentativer Gebäude wie Fußball- und Footballstadien (EXC3).

Für die Schweißverfahrensprüfung zur Qualifizierung von Schweißverfahren im Bereich geschweißter ETFE-Folien wurde ein zweistufiges Qualifizierungssystem konzipiert. Die Stufe 1 deckt dabei die geringeren Anforderungen der EXC1 ab. Als Geltungsbereich der nach Stufe 1 qualifizierten Schweißanweisung gilt daher die Herstellung von Schweißnähten in Projekten der EXC1. Die Stufe 2 umfasst einen breiteren Prüfungsumfang und deckt die höheren Anforderungen der EXC2 und EXC3 ab. Die Schweißanweisung, die nach Stufe 2 dieser Schweißverfahrensprüfung qualifiziert wurden, sind für Projekte aller Ausführungsklassen gültig. Schweißverfahrensprüfungen, die nach Stufe 2 durchgeführt wurden, sind automatisch für Stufe 1 qualifiziert, jedoch nicht umgekehrt. Weitere Informationen zu den beiden Qualifizierungsstufen sind in E DIN 18229-4 enthalten, siehe Anlage F.

Für die Entwicklung einer Schweißverfahrensprüfung für die Qualifizierung von Schweißverfahren im Bereich der Ausführung geschweißter ETFE-Folien wurden verschiedene Untersuchungsmethoden evaluiert. Für die Schweißverfahrensprüfung mögliche Untersuchungsmethoden wurden im Forschungsverbund erarbeitet und umfassen die folgenden Prüfungen:

- Zerstörungsfreie Prüfungen (ZfP):
 - Sichtprüfung (engl. visual testing, kurz VT),
 - Abschälprüfung mit Falzbein.

- Zerstörende Prüfungen:
 - manuelle Zug- und Abschälprüfung,
 - monoaxiale maschinelle Kurzzeit-Zug- und Abschälprüfung,
 - mikroskopische Untersuchungen.

Als geeignete Untersuchungsmethode für die Schweißverfahrensmethode wurden die Sichtprüfung, die Abschälprüfung mit Falzbein, die manuelle Zug- und Abschälprüfung sowie die monoaxiale maschinelle Zugprüfung identifiziert. Im weiteren Verlauf wurden die unterschiedlichen Untersuchungsmethoden auf ihre Anwendbarkeit innerhalb der Schweißverfahrensprüfung evaluiert. Die mithilfe der evaluierten Untersuchungen entwickelte Schweißverfahrensprüfung ist in E DIN 18229-4 enthalten, siehe Anlage F.

Der Geltungsbereich der nach dieser Schweißverfahrensprüfung qualifizierten Schweißanweisung umfasst sämtliche Schweißnähte, deren wesentliche Einflussgrößen übereinstimmen, siehe Kapitel 4.3 und ergänzend Anlage E sowie Anlage F. Ferner ist die Schweißanweisung abhängig von der Schweißeinrichtung, an der das qualifizierte Prüfstück hergestellt wurde, sowie an der zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Konfiguration. Sollte diese Konfiguration verändert werden, z. B. die Rollbänder bzw. Heizbänder gewechselt werden, ist die Gültigkeit der an dieser Schweißeinrichtung qualifizierten Schweißanweisung zu überprüfen.

4.4.3.2 Evaluation zerstörungsfreier Prüfungen (ZfP)

Als mögliche zerstörungsfreie Prüfungen für die Schweißverfahrensprüfung wurde die Sichtprüfung und die Abschälprüfung mit Falzbein identifiziert. Die Sichtprüfung wird derzeit bei allen beteiligten ausführenden Verbundpartnern als Untersuchungsmethode der gefertigten Schweißnaht eingesetzt. Als optische Kriterien für die Sichtprüfung wurden die Folgende evaluiert:

- gleichmäßige und gerade Schweißnahtkanten,
- Einhaltung einer minimalen Schweißnahtbreite von $\geq 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$,
- Dichtigkeit der Schweißnaht,
- keine Verfärbung oder andere optische Auffälligkeiten,
- keine sichtbare Trennschicht bzw. Rückstände der Bedruckung,
- nur minimale Verschmutzungen oder andere Einschlüsse.

In Bild 51 sind Beispiele für Fehlstellen dargestellt. Die Festlegung von Kriterien und Toleranzen ist Gegenstand der aktuellen Normungs- und Forschungsarbeit sowie der Entwicklung der DIN 18229-5, siehe Kapitel 4.4.3.



Bild 51 Schweißnahtfehler: (a) undichte Schweißnaht, (b) unebene Schweißnahtkante, Fotos: UDE/IML

Abschälprüfungen mit Falzbein werden bisher von nur einem der an diesem Forschungsvorhaben beteiligten ausführenden Betriebe zur Bewertung der gefertigten Schweißnaht genutzt. Bei dieser Prüfung wird unter Zuhilfenahme eines Falzbeins und unter minimalem Kraftaufwand ein Abschälen der Fügepartner herbeigeführt. Gelingt dies nicht, bleibt die Schweißnaht unbeschädigt und die Prüfung gilt als bestanden. Diese Prüfung kann unter geringem Zeitaufwand über die gesamte Schweißnahtlänge durchgeführt werden.

Aufgrund der einfachen Handhabung wurde im Forschungsverbund entschieden, die Abschälprüfung mit Falzbein als Untersuchungsmethode in die zu entwickelnde

Schweißverfahrensprüfung zu integrieren. Die Definition der Randbedingungen und Kriterien zum Bestehen der Prüfung ist Gegenstand der aktuellen Normungs- und Forschungsarbeit sowie der Entwicklung der DIN 18229-5, siehe Kapitel 4.4.3.

4.4.3.3 Evaluation zerstörender Prüfungen

Zerstörenden Prüfungen an ETFE-Folienschweißnähten umfassen hauptsächlich mechanische Zug- und Abschälprüfungen sowie mikroskopische Untersuchungen. Die mechanischen Prüfungen lassen sich in qualitative, manuelle Prüfungen und quantitative maschinelle Prüfungen unterscheiden. Die manuellen Prüfungen eignen sich gut für eine erste Einschätzung der Zug- bzw. Abschältragfähigkeit der gefertigten Schweißnaht. Diese Untersuchungsmethoden werden derzeit bei den beteiligten ausführenden Betrieben im ersten Schritt der Ermittlung der Schweißparameter genutzt. Nach der Fertigung eines nicht standardisierten Prüfstücks wird eine bis zu 2 cm breite Streifenprobe entnommen und manuell abgezogen, siehe Bild 52 (a).

Die Prüfung gilt als bestanden, wenn das die Schweißnaht umgebende Grundmaterial zu fließen beginnt, bevor die Probe an der Schweißnahtkante versagt oder die Fügepartner sich voneinander lösen, siehe Bild 52 (b). Bei erfolgreicher Durchführung der manuellen Prüfung kann auf eine ausreichende Zug- bzw. Abschältragfähigkeit geschlossen werden, da sie höher ist als die Fließgrenze des Grundmaterials. Die Bestehenskriterien der manuellen Zug- und Abschälprüfung wurden in Anlehnung an FprCEN/TS 19102, Anhang H entwickelt.

Aufgrund der einfachen und schnellen Durchführbarkeit wird diese Untersuchungsmethode zur Qualifizierung innerhalb der zu entwickelnden Schweißverfahrensprüfung genutzt. Ein weiterer Vorteil dieser Untersuchungsmethode ist, dass keine Prüfeinrichtung zur Durchführung benötigt wird. Dies prädestiniert sie als ideale Prüfung für die Qualifizierung gemäß Stufe 1. Diese Untersuchungsmethode wird auch als Option in der Qualifizierung gemäß Stufe 2 zur ersten Einschätzung der Zug- und Abschältragfähigkeit integriert.

Die monoaxiale maschinelle Kurzzeit-Zugprüfung wird sowohl in Prüflaboren wie auch bei Konfektionären zur Ermittlung der Tragfähigkeit geschweißter ETFE-Folien eingesetzt. Sie ist die etablierteste Methode für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von ETFE-Folien und deren Verbindungen. Im AP 1 dieses Forschungsvorhabens wurden optimale Prüfparameter für die Prüfung von ETFE-Flächenschweißnähte bestimmt. Monoaxiale Kurzzeit-Zugprüfungen werden zur Qualifizierung gemäß Stufe 2 eingesetzt.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden monoaxiale Kurzzeit-Abschälprüfungen an ETFE-Flächenschweißnähten durchgeführt, um die Eignung innerhalb der Schweißverfahrensprüfung zu evaluieren. Bild 53 zeigt eine eingebaute Abschälprobe. Bei der monoaxialen Kurzzeit-Abschälprüfung werden die beiden Fügepartner an derselben Schweißnahtkante abgezogen. Für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten monoaxialen Abschälprüfungen wurden die Prüfparameter entsprechend der in Kapitel 3 entwickelten vereinheitlichten Prüfmethode gewählt.

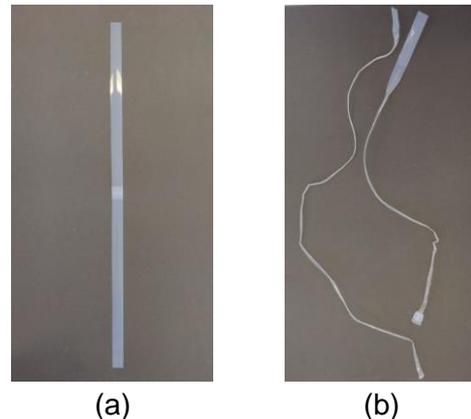


Bild 52 Streifenprobe für manuelle Zug- oder Abschälprüfung; (a) Vor Durchführung der manuelle Prüfung, (b) Nach bestandener Prüfung, Fotos: UDE/IML

Bild 54 (a) zeigt die Abschällast-Verformungs-Kurven von 100 µm und 250 µm ETFE-Flächenschweißnahtproben des Konfektionärs C. Die Abschällast-Verformungs-Kurven entsprechen im Bereich bis ca. 25 % Verformung dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Grundmaterials. Dies ist darin begründet, dass sich während der Versuchsdurchführung in diesem Verformungsbereich lediglich das um die Schweißnaht umliegende Grundmaterial verformt. Erst nach Erreichen der Fließgrenze beginnt die Schweißnaht sich abzuschälen. Sämtliche Abschälprüfungen versagten durch Abschälen der beiden Fügepartner.

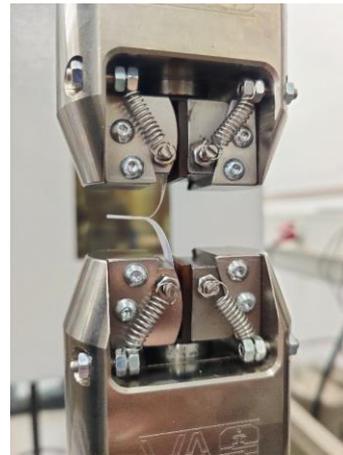


Bild 53 Eingebauter Probekörper für monoaxiale Kurzzeit-Abschälprüfung, Foto: UDE/IML

In Bild 54 (b) sind die Kastendiagramme der Abschälfestigkeiten der beiden Prüfungen dargestellt. Die beiden ermittelten mittleren Abschälfestigkeiten von 28,1 MPa bzw. 27,3 MPa liegen im nahezu identischen Streubereich. Die Abschälfestigkeiten weisen mit $V_{x,100\ \mu\text{m}} = 0,7\ \%$ und $V_{x,250\ \mu\text{m}} = 1,6\ \%$ einen sehr geringen Variationskoeffizienten auf. Dies unterstreicht die Aussagekraft dieser Prüfmethode. Monoaxiale Kurzzeit-Abschälprüfungen wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht weiter behandelt. In der weiteren Entwicklung des Normenentwurfes E DIN 18229-5 wird diese Prüfmethode allerdings weiter evaluiert.

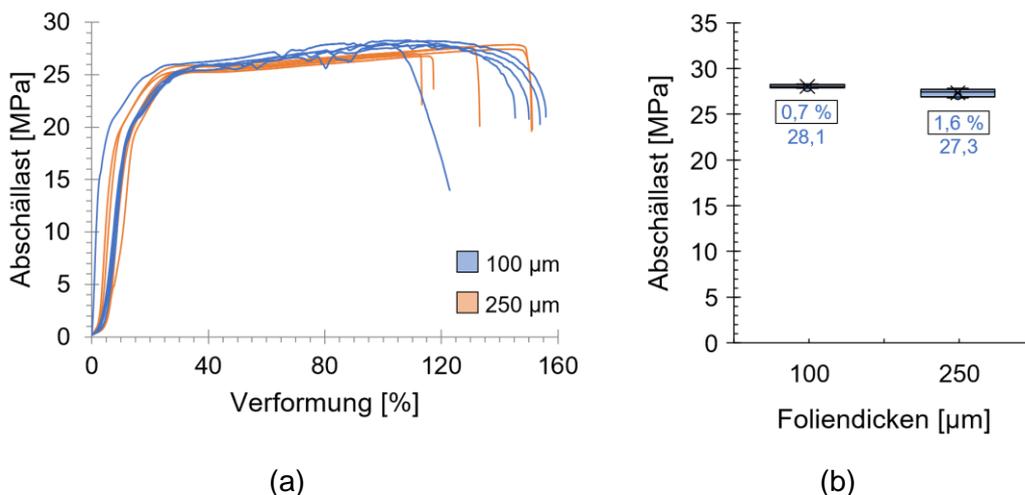


Bild 54 Monoaxiale Kurzzeit-Abschälprüfungen von 100 µm und 250 µm ETFE-Flächenschweißnähten des Konfektionärs C; (a) Abschällast-Verformungs-Kurven, (b) Kastendiagramme der Abschälfestigkeiten, TD, T= 23 °C ± 2 K, n= 5

Als weitere zerstörende Prüfung wurden mikroskopische Untersuchungen an ETFE-Schweißnähten durchgeführt, siehe Kapitel 3.4. Diese Untersuchungsmethode hat sich als aufwendig und zeitintensiv herausgestellt. Weiterhin ist die Anschaffung geeigneter Mikroskope kostenintensiv und die erzielten Ergebnisse sind lediglich qualitativer Natur und lassen nur eine grobe Einschätzung über die Qualität der Schweißnaht zu. Mikroskopische Untersuchungen wurden daher als ungeeignete Prüfmethode für die Schweißverfahrensprüfung bewertet.

Die Entwicklung sämtlicher als geeignet evaluierter Untersuchungsmethoden ist Gegenstand der aktuellen Forschungs- und Normungsarbeit. Für die Entwicklung der Untersuchungsmethoden im Zuge der Ausarbeitung der E DIN 18229-5 werden die Regelungen der FprCEN/TS 19102 unter Berücksichtigung ihres Anhangs I berücksichtigt.

Schweißer im Bereich der Ausführung geschweißter ETFE-Folien sind für die Herstellung konstruktiver Schweißnähte und Heftnähte verantwortlich. Sie müssen ebenfalls sämtliche Schulungsinhalte erfolgreich bestehen. Eine Qualifizierung ist in diesem Bereich allerdings nicht erforderlich.

4.4.3.4 Entwicklung einer Schweißverfahrensprüfung für die Ausführung von ETFE-Schweißnähten

Auf der Grundlage der evaluierten Untersuchungsmethode wurde eine Schweißverfahrensprüfung im Bereich der Ausführung von ETFE-Schweißnähten entwickelt. Die Schweißverfahrensprüfung wurde im Rahmen des Normentwurfes E DIN 18229-4 verwertet, siehe Anlage E. Als Basis dieses Normentwurfes gilt DIN EN ISO 15614-1, die die Schweißverfahrensprüfung für das Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen regelt. Die Schweißverfahrensprüfung umfasst die Fertigung eines geschweißten Prüfstücks gemäß einer Schweißanweisung, die Entnahme von Probestücken und gegebenenfalls eines Rückstellmusters sowie der Prüfung der Probestücke. Die Prüfungen umfassen die evaluierten Untersuchungsmethoden.

Für die Qualifizierung des Schweißverfahrens wurde eine zweistufige Schweißverfahrensprüfung entwickelt. Die beiden Qualifizierungsstufen sind an verschiedene Prüfungsumfänge geknüpft, siehe Bild 55. Für die Stufe 1 sind lediglich qualitative und manuelle Prüfungen erforderlich, während für die Qualifizierung nach Stufe 2 quantitative und maschinelle Prüfungen gefordert werden.

Abhängig von der Stufe der Qualifizierung darf die Schweißanweisung für die Ausführung von Tragwerken unterschiedlicher Ausführungsklassen verwendet werden. Ist die Schweißanweisung nach Stufe 2 qualifiziert, darf sie für die Ausführung sämtlicher Ausführungsklassen verwendet werden. Schweißanweisungen, die nach Stufe 1 qualifiziert wurden, dürfen lediglich für die Ausführung von Konstruktionen der Ausführungsklasse EXC1 genutzt werden.

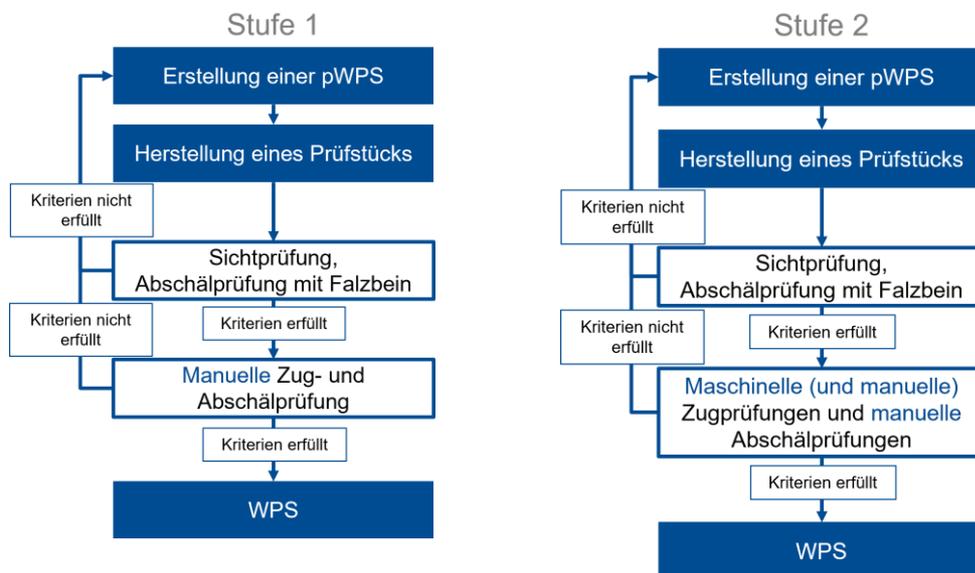


Bild 55 Qualifizierungsstufe 1 und 2 der Schweißverfahrensprüfung von ETFE-Schweißnähten gemäß E DIN 18229-4

Weiterhin ist in E DIN 18229-4 der Bericht über die Qualifizierung des Schweißverfahrens definiert, der die Beurteilungsergebnisse für jedes Prüfstück einschließlich eventueller Ersatzprüfungen enthält. Ein entsprechender Vordruck ist in Anhang A des vorliegenden Berichts enthalten.

4.4.3.5 Entwicklung einer Prüfnorm für die Qualitätssicherung geschweißter ETFE-Folien

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ferner ein Konzept für eine Prüfnorm für geschweißte ETFE-Folien entwickelt, E DIN 18229-5. Die Norm soll alle für die Qualitätssicherung von geschweißten ETFE-Folien erforderlichen Prüfungen enthalten. Dies umfasst Prüfungen vor, während und nach dem Schweißen sowie zerstörungsfreie (ZfP, engl. non destructive testing, kurz ndt) und zerstörende Prüfungen. Dies schließt sämtliche in der Schweißverfahrensprüfung festgelegten Prüfungen ein. E DIN 18229-5 soll folgende im Rahmen dieses Vorhabens als geeignet evaluierten Untersuchungsmethoden umfassen:

- monoaxiale maschinelle Kurzzeit-Zugprüfung, siehe Kapitel 3 (zerstörende Prüfung),
- manuelle Zugprüfung (zerstörende Prüfung),
- manuelle Abschälprüfung (zerstörende Prüfung),
- Sichtprüfung vor dem Schweißen (ZfP),
- Sichtprüfung während des HR-Schweißens (ZfP),
- Sichtprüfung nach dem Schweißen (ZfP) und
- Abschälprüfung mit Falzbein (ZfP).

Die manuellen Prüfungen dienen der qualitativen Überprüfung der Schweißnahtqualität. Fließt das die Schweißnaht umgebende Grundmaterial bei der manuellen Zug- und Abschälprüfung bevor die Probe an einer der Schweißnahtkanten versagt, so lässt dies auf eine ausreichende Schweißnahtqualität schließen, siehe Bild 56. Werden beide Fügepartner während der Prüfung voneinander getrennt, gilt die Prüfung als nicht bestanden.

Die monoaxiale maschinelle Kurzzeit-Zugprüfung dient dahingegen der quantitativen Ermittlung der Schweißnahtfestigkeit bzw. der Tragfähigkeit des geprüften Bauteils. Die monoaxiale Kurzzeit-Zugprüfung entspricht der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten vereinheitlichten Schweißnahtprüfung, siehe Kapitel 3.

Die in E DIN 18229-5 vorgesehenen zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden umfassen eine Sichtprüfung vor der Ausführung der Schweißnaht, um die Schweißnahtvorbereitung zu prüfen und eventuelle Fehlstellen der Zuschnittsflächen zu ermitteln.

Weiterhin soll eine Sichtprüfung während des Schweißvorgangs des Heizelement-Rollbandschweißens definiert werden, um die Qualität der erzeugten Schweißnaht in diesem kontinuierlichen Prozess sicherzustellen. Ferner umfasst der Umfang der Untersuchungsmethoden eine Sichtprüfung nach dem Schweißen, die gravierende Fehlstellen in einer Schweißnaht aufdecken soll. In Bild 51 sind Beispiele für Fehlstellen dargestellt. Inwiefern Fehlstellen als nicht mehr tolerierbar gelten, ist Gegenstand der aktuellen Forschungs- und Normungsarbeit.

Während einer Abschälprüfung nach dem Schweißen wird mit einem Hilfsmittel, z. B. einem Falzbein geprüft, ob sich die Fügepartner bei Aufbringung geringer Schälkräfte voneinander lösen. Bei Bestehen der Prüfung bleibt die Schweißnaht unbeschädigt.

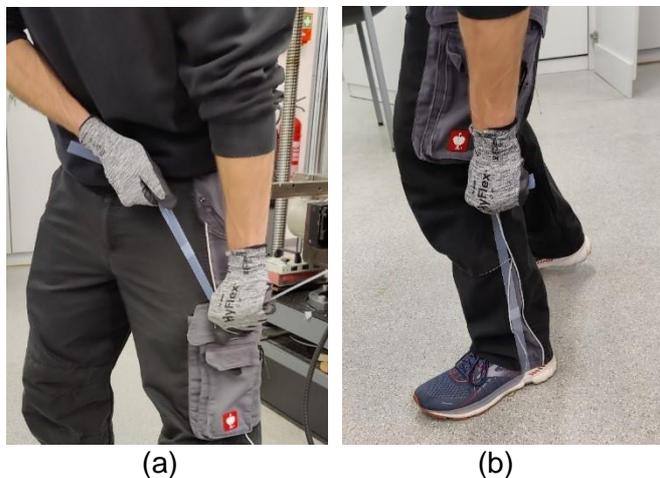


Bild 56 Durchführung einer manuellen Zug- bzw. Abschälprüfung; (a) Beidseitig manuelles Abziehen, (b) Einseitig am Boden fixiert, Fotos: UDE/IML

E DIN 18229-5 wird derzeit im Rahmen des Normenausschuss NA 005-51-08AA „Eurocode für Membrantragwerke DIN 18204-1 sowie 4134“ unter Federführung des Instituts für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen (UDE) entwickelt.

4.5 Qualifizierung des Schweißpersonals (AP 2.4)

4.5.1 Allgemeines

Die Qualität der Schweißnähte von ETFE-Konstruktionen hängt im Wesentlichen von den Fertigkeiten und Kenntnissen der Bediener und Einrichter der Schweißeinrichtungen sowie des Schweißaufsichtspersonals ab. Zur Sicherstellung einer angemessenen und konstanten Qualität von ETFE-Schweißnähten ist zu gewährleisten, dass die Bediener und Einrichter ihre Kenntnisse und Fertigkeiten in einer Prüfung nachgewiesen haben. Die Kenntnisse und Fertigkeiten bleiben nur dann erhalten, wenn die Bediener und Einrichter regelmäßig und in ausreichendem Umfang mit Schweißarbeiten beschäftigt sind.

In diesem Arbeitspaket wurden Konzepte und normative Richtlinien zur Qualifizierung von Bedienern und Einrichtern sowie des Schweißaufsichtspersonals für die Ausführung geschweißter ETFE-Folien entwickelt. Als Grundlage für die Entwicklung der Konzepte diente eine ausführliche Recherche über bereits bestehende normative Regelungen und Richtlinien zur Qualifizierung des Schweißpersonals im konstruktiven Stahlbau und im Bereich des Kunststoffschweißens. Die recherchierten Verfahren wurden anschließend auf die Anwendbarkeit auf den vorliegenden Bereich bewertet. Auf den bewerteten Konzepten aufbauend wurden Prüfungen zur Qualifizierung der Bediener und Einrichter entwickelt sowie Kompetenzniveaus für das Schweißaufsichtspersonal festgelegt.

Als Präqualifikation für die Qualifizierung zur Ausführung geschweißter ETFE-Folien wurde eine Schulung entwickelt, die sich in fünf Bereiche einteilt. Die Schulung wurde in Anlehnung an die Inhalte der Ausbildung zum Schweißfachingenieur des DVS entwickelt. Die Schulung ist sowohl für die Einrichter und Bediener sowie für das Schweißaufsichtspersonal und Schweißer konstruktiver Schweißnähte verpflichtend.

Aufbauend auf den erstellten Konzepten wurden Normenentwürfe entwickelt, die die Qualifizierung des Schweißpersonals für die Ausführung von ETFE-Schweißnähten regeln: E DIN 18229-1 regelt die Aufgaben und Verantwortungen des Schweißaufsichtspersonals und E DIN 18229-2 enthält Regelungen zur Qualifizierung der Bediener und Einrichter von Schweißeinrichtungen.

4.5.2 Schweißaufsicht und Schweißaufsichtspersonal

Als Grundlage für die Entwicklung der Qualifizierung des Schweißaufsichtspersonals diente DIN EN ISO 14731, in der das Kompetenzniveau sowie Verantwortungs- und Aufgabenbereiche der Schweißaufsicht im konstruktiven Stahlbau normativ festgelegt ist. Diese regelt die Aufgaben und Verantwortung der Schweißaufsicht im Kontext des Schweißens metallischer Werkstoffe. Dieses Regelwerk wurde auf die Anforderungen des Schweißens von ETFE-Folien im Bauwesen soweit möglich transferiert und wo erforderlich modifiziert. Beispielsweise werden beim Schweißen von ETFE-Folien keine Schweißzusätze verwendet. Eine Wärmebehandlung der Schweißnähte wird ebenfalls nicht praktiziert, siehe Bild 57. Die Verantwortungsbereiche des Schweißaufsichtspersonals wurden entsprechend für das Schweißen von ETFE-Folien angepasst.

Der Konfektionär muss mindestens eine Person benennen, die für schweißtechnische Koordinationsaufgaben verantwortlich ist und somit die Schweißaufsicht innehat. Die Hauptaufgaben des Schweißaufsichtspersonals sind:

- Planung,
- Ausführung oder Erstellung,
- Überwachung,
- (Über-) Prüfung und
- Dokumentation.



Bild 57 Qualitätsbezogene Verantwortungsbereiche des Schweißaufsichtspersonals nach DIN EN ISO 14731 [22] mit Berücksichtigung nichtzutreffender Arbeitsschritte für das Schweißen von ETFE-Folien

Das Schweißaufsichtspersonal muss über ein umfangreiches Kompetenzniveau verfügen. Dies schließt die Problemlösungskompetenz sowie die Fähigkeit ein, Entscheidungen zu treffen und schweißtechnische und mit dem Schweißen verbundene Personalaufgaben zu definieren und zu überprüfen.

Auf der Grundlage, der für die Ausführung von ETFE-Schweißnähten festgelegten Regelungen für die Schweißaufsicht, wurde im Rahmen dieses Vorhabens der Normenentwurf E DIN 18229-1 entwickelt. E DIN 18229-1 legt fest, dass die Schweißaufsicht in der alleinigen Verantwortung des Konfektionärs liegt. Dies gilt auch bei der Untervergabe von Schweißarbeiten. Die Aufgaben des Schweißaufsichtspersonals müssen nach E DIN 18229-1, Anhang B oder einem anderen Dokument, welches zu spezifizieren wäre, ausgewählt und in der Arbeitsbeschreibung des Schweißaufsichtspersonals festgehalten werden. Die Schweißaufsicht darf auf mehrere Personen übertragen werden. Dabei sind die Aufgaben- und Verantwortungsbereiche personenspezifisch festzuhalten.

Die Kompetenz des Schweißaufsichtspersonals muss der Vielfältigkeit der schweißtechnischen und mit dem Schweißen verbundenen Tätigkeiten und Verantwortung entsprechen. Die Anforderungen an das Kompetenzniveau des Schweißaufsichtspersonals ist in E DIN 18229-1 definiert. Der finalisierte Entwurf der E DIN 18229-1 ist in Anlage C enthalten.

4.5.3 Bediener und Einrichter

Als Grundlage für die Entwicklung von Konzepten zur Qualifizierung von Bedienern und Einrichtern von Schweißeinrichtungen für die Ausführung geschweißter ETFE-Folien diente DIN EN ISO 14732, die die Qualifizierung der Bediener und Einrichter zum mechanischen und automatischen Schweißen von metallischen Werkstoffen regelt, sowie DVS-Richtlinie 2212-1 [24], in der die Prüfungen für Kunststoffschweißern im Kontext von Fügen von Rohren und Schalen festgelegt werden. DIN EN ISO 14732 regelt die Qualifizierung des ausführenden Schweißpersonals im konstruktiven Stahlbau.

Als Voraussetzung für die Qualifizierung von Bedienern und Einrichtern von Schweißeinrichtungen zum Schweißen von ETFE-Folien gilt die erfolgreiche Absolvierung einer Präqualifizierung, siehe Bild 58. Diese Präqualifizierung ist ebenfalls für Schweißer von ETFE-Folien für die Ausführung von nicht tragenden Schweißverbindungen und das Schweißaufsichtspersonal erforderlich.

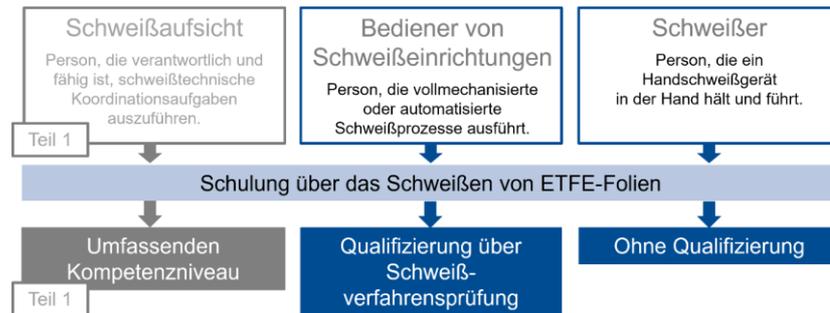


Bild 58 Qualifizierung und Präqualifizierung von Schweißern, Bedienern und Einrichtern für die Ausführung geschweißter ETFE-Folien nach E DIN 18229-2 mit Berücksichtigung der Schweißaufsicht gemäß E DIN 18229-1

Die Präqualifizierung besteht aus fünf Schulungsbereichen, siehe Bild 59. Die Präqualifizierung gilt als erfolgreich absolviert, wenn die einzelnen Prüfungen der verschiedenen Schulungsbereiche unabhängig voneinander bestanden wurden. Die Vermittlung und Überprüfung der Schulungsinhalte obliegen dem Konfektionär. Eine Kontrolle der vermittelten Inhalte über den Konfektionär selbst ist nicht zielführend. In Ermangelung einer angemessenen Alternative wurde dies für die Einführung der Norm allerdings vorerst beschlossen. Eine Fremdkontrolle der vermittelten Inhalte ist im Sinne einer vereinheitlichten Qualitätssicherung angebracht und wird in der weiteren Überarbeitung der Norm angestrebt.



Bild 59 Präqualifizierung im Bereich geschweißter ETFE-Folien bestehend aus vier Schulungsabschnitten

Die Qualifizierung von Einrichtern und Bedienern für die Ausführung von ETFE-Schweißnähten erfolgt auf der Grundlage einer Schweißverfahrensprüfung. Diese kann durch eine fachkundliche Prüfung der schweißtechnologischen Kenntnisse ergänzt werden. Sie ist jedoch nicht vorgeschrieben.

Die Änderung einer der folgenden Randbedingungen erfordert eine erneute Qualifizierung:

- Wechsel der Variante des Schweißprozesses oder der Schweißeinrichtung,
- Änderung der Schweißnahtvorbereitung, z. B. Entfernung der Bedruckung,
- Wechsel der Schweißnahtart,
- Änderung des Bereichs der Foliendicke bei der Herstellung von Flächenschweißnähten:
 - Bereich 1: ETFE-Folien mit einer nominellen Dicke kleiner 100 µm,
 - Bereich 2: ETFE-Folien mit einer nominellen Dicke von 100 µm bis einschließlich 350 µm,
 - Bereich 3: ETFE-Folien mit einer nominellen Dicke größer 350 µm.
- Änderung des Bereichs der Paketdicke bei der Herstellung von Randschweißnähten:

- Bereich 1: Folienpakete mit einer Summe der nominellen Foliendicken kleiner gleich 1200 µm,
- Bereich 2: Folienpakete mit einer Summe der nominellen Foliendicken größer 1200 µm.

Die Gültigkeit der Prüfbescheinigung beginnt mit dem Datum der Auswertung des Prüfstücks, vorausgesetzt, dass die erhaltenen Prüfergebnisse akzeptiert wurden. Die Prüfbescheinigung ist alle sechs Monate von einer Person, die für die Schweißaktivität zuständig ist oder als Prüfer bestätigt wurde, zu bestätigen. Diese bestätigt, dass der Bediener oder Einrichter für Schweißeinrichtungen innerhalb des Geltungsbereiches gearbeitet hat. Diese Bestätigung verlängert die Gültigkeit um weitere sechs Monate. Andernfalls entfällt die Gültigkeit. Die Prüfbescheinigung kann bei berechtigten Zweifeln an der Fähigkeit des Bedieners oder des Einrichters von Schweißeinrichtungen auch entzogen werden. Alle weiteren Qualifikationen behalten weiterhin ihre Gültigkeit.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein Normenentwurf zur Qualifizierung von Bedienern und Einrichtern von Schweißeinrichtungen im Bereich der Ausführung von ETFE-Schweißnähten entwickelt. Diese E DIN 18229-2 dient der Verwertung der in diesem Forschungsvorhaben erarbeiteten Konzepte zur Qualifizierung des Schweißpersonals. Der Normenentwurf E DIN 18229-2 ist in Anlage D enthalten.

4.6 Entwicklung einer Methodik zur Erstellung eines für ETFE-Schweißnähte geeigneten Schweißplans (AP 2.5)

Für die Entwicklung einer Methodik zur Erstellung eines für ETFE-Schweißnähte geeigneten Schweißplans wurden ebenfalls bereits bestehende Konzepte und normative Richtlinien recherchiert und auf ihre Anwendbarkeit auf das Schweißen von ETFE-Folien überprüft.

Der Schweißplan ist Bestandteil der Fertigungsplanung. Als erforderliche Inhalte des Schweißplans wurden folgende Angaben und Dokumente definiert:

- Allgemeines, z. B. Konfektionär, ausführender Bediener bzw. Einrichter etc.,
- Schweißverfahren,
- Folienprodukt und Foliendicken,
- Schweißerqualifikation,
- Schweißnahtvorbereitung,
- Prüfplan,
- Nachbesserungen,
- Schweißnahtprüfung,
- Mitgeltende Unterlagen und
- Anlagen.

In welcher Form und Darstellung der Schweißplan vorliegt, ist freigestellt. Bei Änderungen des Schweißplans durch neue Erkenntnisse oder ähnliches ist der Revisionsstand durch Index und Datum kenntlich zu machen. Der Prüfplan ist das Ergebnis der Prüfplanung und Teil des Schweißplans. Die Prüfplanung legt den Prüfumfang, die Prüfverfahren und deren Reihenfolge unter Berücksichtigung des schweißtechnischen Fertigungsablaufs fest. Ein Vordruck eines Schweißplans für die Ausführung geschweißter ETFE-Folien ist in Anlage B dieses Berichts enthalten.

5 Experimentelle Festigkeitsuntersuchungen geschweißter ETFE-Folien (AP 4)

5.1 Allgemeines

Mit der Veröffentlichung des Entwurfes der Technischen Spezifikation (TS) FprCEN/TS 19102 „Bemessung von vorgespannten Membrantragwerken“ wurden erste auf europäischer Basis entwickelte Regelungen zur Bemessung für ETFE-Konstruktionen veröffentlicht, die zukünftig in einen Eurocode für die Bemessung von und eine Ausführungsnorm für Membrantragwerke(n) überführt werden sollen. Gemäß dieser europäischen TS sind die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) erbracht, wenn die Bemessungs-Last in sämtlichen Lastfällen (f_{Ed}) niedriger oder gleich der modifizierten Zugfestigkeit des Materials oder der Tragfähigkeit der Schweißnaht ($f_{Rd,mod}$) in der betrachteten Materialrichtung ist, siehe Gleichung (2):

$$f_{Ed} \leq f_{Rd,mod} \quad (2)$$

Dabei ist

- f_{Ed} der Bemessungswert der Membranspannung in der betrachteten Richtung; und
- $f_{Rd,mod}$ der Bemessungswert der Zugfestigkeit der Folie oder der Verbindung bezogen auf die jeweilige Bemessungssituation.

Der modifizierte Bemessungswiderstand $f_{Rd,mod}$ wird mithilfe des Bemessungswiderstands f_{Rd} und der für den betrachteten Lastfall gültigen Modifikationsbeiwerten in Form der k-Faktoren ermittelt. Der Bemessungswiderstand f_{Rd} wird nach Gleichung (3) berechnet:

$$f_{Rd} = \min \begin{cases} f_{1Rd} = f_{u23} / \gamma_{M0} \\ f_{2Rd} = f_{uw23} / \gamma_{M1} \end{cases} \quad (3)$$

Dabei ist

- f_{u23} die Kurzzeit-Zugfestigkeit des Grundmaterials, ermittelt anhand monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen bei $T = 23 \text{ °C}$;
- f_{uw23} die Tragfähigkeit einer Flächen- oder Randschweißnaht, ermittelt anhand monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen bei $T = 23 \text{ °C}$;
- γ_{M0} der Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand von ETFE-Folien; empfohlener Wert beträgt 1,1;
- γ_{M1} der Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand von ETFE-Verbindungen; empfohlener Wert beträgt 1,15.

Die beiden charakteristischen Widerstände f_{u23} und f_{uw23} entsprechen den 5 %-Fraktilwerten aus einer Prüferie monoaxialer Zugprüfungen mit mindestens fünf Einzelprüfungen. Die Ermittlung der 5 %-Fraktilwerte erfolgt gemäß DIN EN 1990, D.7.2 [25]. Wie allgemein bekannt und in diesem Forschungsvorhaben mehrmals bestätigt, besitzen ETFE-Schweißnähte nach dem aktuellen Stand der Schweißtechnologien eine geringere Tragfähigkeit als das zugrundeliegende Folienmaterial. Weiterhin kann gemäß FprCEN/TS 19102 der Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand von ETFE-Verbindungen den Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand des Grundmaterials nicht unterschreiten. Somit ist die Tragfähigkeit der ETFE-Verbindung für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit stets maßgebend.

In FprCEN/TS 19102 sind empfohlene Werte für die Mindestfestigkeit des ETFE-Grundmaterials und von ETFE-Verbindungen gegeben, die für eine Vorbemessung

genutzt werden können. Die Werte müssen im weiteren Verlauf der Auslegung des Tragwerks mithilfe monoaxialer Kurzzeit-Zugprüfungen am eingesetzten Folienprodukt bestätigt werden. Der empfohlene Wert für den charakteristischen Widerstand des ETFE-Grundmaterials beträgt 40 MPa.

Der empfohlene Wert für den charakteristischen Widerstands von ETFE-Verbindungen ist mit 30 MPa angegeben. Dieser Wert repräsentiert somit den in FprCEN/TS 19102 festgelegten Wert für die Mindestfestigkeit von ETFE-Verbindungen bei Raumtemperatur. Dabei wird von einer Prüferie mit fünf Einzelprüfungen ausgegangen. Der Mittelwert der Tragfähigkeiten in Höhe von 33 MPa wurde auf Basis der Erfahrung der an der Erarbeitung der TS beteiligten Ausschussmitgliedern aus dem Bereich der Ausführung von ETFE-Folien gewählt. Als Mindestfestigkeit bei erhöhten Temperaturen von 50 °C wird nach FprCEN/TS 19102 ein Wert von 24 MPa vorgegeben. Um eine wirtschaftliche und sichere Bemessung von ETFE-Konstruktionen zu gewährleisten, ist eine angemessen hohe, aber für alle Marktteilnehmer erreichbare Mindestfestigkeit von ETFE-Verbindungen unbedingt erforderlich. Dies

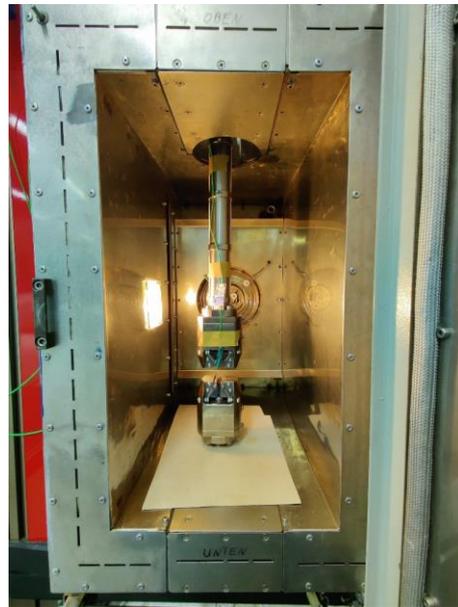


Bild 60 Prüfkonfiguration von UDE für die Durchführung temperierter monoaxialer Zugprüfungen, Foto: UDE/IML

wird vor allem vor dem Hintergrund der oben aufgeführten großen Bedeutung der Tragfähigkeit von ETFE-Schweißverbindungen für die Bemessung im GZT deutlich. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden erstmals systematische Untersuchungen an ETFE-Flächenschweißnähten zur Ermittlung von Mindestfestigkeiten durchgeführt. Die Untersuchungen umfassten drei Konfektionäre (A, B und C), zwei Schweißprozesse (HR und HI), zwei Arten von Flächenschweißnähten (OV und BS), drei Folienprodukte (1, 2 und 3) mit unterschiedlichen Foliendicken sowie zwei Prüftemperaturen (23 °C ± 2 K und 50 °C ± 2 K), siehe Bild 60.

Die Folienprodukte 1 und 2 stammen vom gleichen Hersteller. Die Folienprodukte und zugehörigen untersuchten Foliendicken sind in Tabelle 2 aufgeführt. Untersuchungen zu den Stoßnähten mit Deckstreifen (BS) wurden lediglich für das Folienprodukt 1 und die Foliendicken 100 µm und 250 µm und bei Raumtemperatur durchgeführt.

Tabelle 2 Untersuchte Folienprodukte und -dicken

Folienprodukt	Foliendicke
1	80 µm, 100 µm, 150 µm, 200 µm, 250 µm, 300 µm
2	100 µm, 200 µm, 250 µm, 300 µm
3	100 µm, 150 µm, 200 µm, 250 µm, 300 µm, 500 µm

Sämtliche Konfektionäre haben Schweißnahtproben bereitgestellt, die mithilfe des HR-Schweißens hergestellt wurden. Schweißnahtproben, die mithilfe des HI-Schweißens hergestellt wurden, wurden nur vom Konfektionär C geliefert. Die Schweißnahtproben wurden in Anlehnung an die in Kapitel 4 entwickelten Konzepte zur Qualitätssicherung geschweißter ETFE-Folien hergestellt.

Für die Ermittlung einer Mindestfestigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten wurden die o. g. Schweißnahtproben gemäß der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten vereinheitlichten Prüfmethodik untersucht. Weiterhin wurden biaxiale Hysterese-Zugprüfungen gemäß FprCEN/TS 19102, Anhang E.4 durchgeführt. Die Dehnungen wurden dabei von einem Stereo-Kamerasystem photogrammetrisch aufgezeichnet.

5.2 Monoaxiale Festigkeitsuntersuchungen (AP 4.1)

Die monoaxialen Festigkeitsuntersuchungen umfassen Zugprüfungen an Überlappnähten in einem großen Prüfumfang, der alle oben genannten Folienprodukte, -dicke, Schweißprozesse etc. umfasst, sowie Zugprüfungen an Stoßnähten mit Deckstreifen, die in einem kleinerem Versuchsumfang untersucht wurden.

Als Referenz wurden zusätzlich Untersuchungen am Grundmaterial durchgeführt, welches den Schweißnahtproben zugrunde liegt. Dazu wurden alle drei Folienprodukte in den untersuchten Foliendicken in den beiden Materialrichtungen MD und TD bei den vorgesehenen Prüftemperaturen untersucht. Die Prüfparameter wurden in Übereinstimmung mit der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten, vereinheitlichten Prüfmethode gewählt.

Bild 61 zeigt die mittleren Spannungs-Dehnungs-Kurven der zugrundeliegenden Einzelprüfungen der drei verschiedenen Folienprodukte und der beiden Foliendicken 100 µm und 250 µm bis zum ersten Bruch. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Folienprodukte sich hinsichtlich Anisotropie und Festigkeitsniveau erheblich unterscheiden. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die beiden als Materialcharakteristiken weit verbreiteten Knickpunkte abhängig vom Folienprodukt sind.

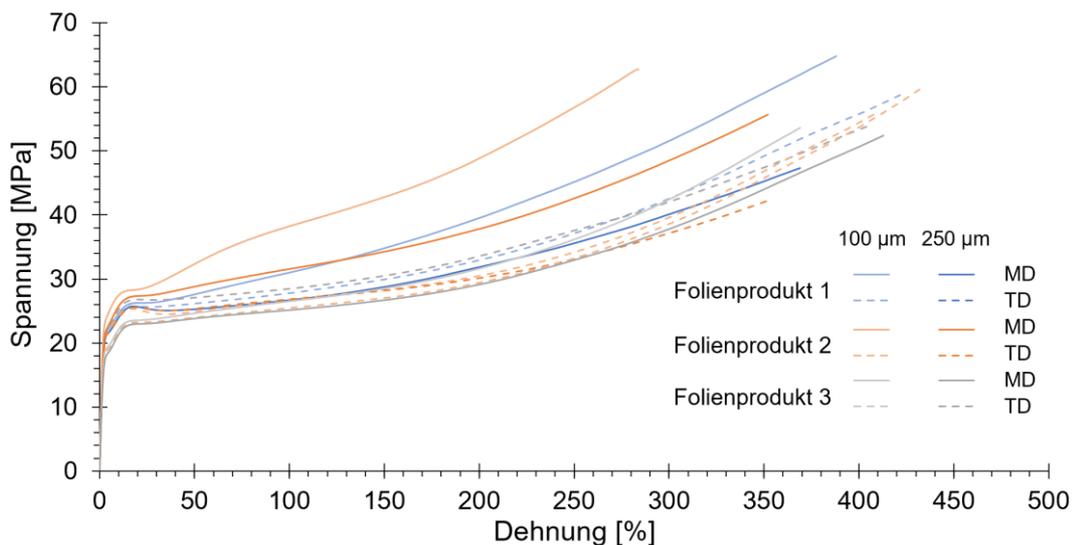


Bild 61 Mittlere Spannungs-Dehnungs-Kurven der Folienprodukte 1, 2 und 3 mit den Foliendicken 100 µm und 250 µm in MD und TD, geprüft durch UDE, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

In Bild 62 sind die Kastendiagramme der Zugfestigkeiten der untersuchten Folienprodukte bei Raumtemperatur dargestellt. Im Gegensatz zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten ist bei den Zugfestigkeiten keine eindeutige Abhängigkeit vom Folienprodukt erkennbar.

Es gibt ebenfalls keine Hinweise darauf, dass der Variationskoeffizient der Zugfestigkeit abhängig von Folienprodukt, -dicke oder Materialrichtung ist. Tendenziell verfügen die 250 µm Folien über leicht geringere Zugfestigkeiten als die 100 µm dicken Folien des gleichen Folienprodukts.

Bild 63 zeigt die Zugfestigkeiten der untersuchten Folienprodukte aufgetragen über die nominelle Foliendicke. Bei sämtlichen Folienprodukten ist eine tendenzielle Abminderung der Zugfestigkeit mit steigender Foliendicke zu erkennen.

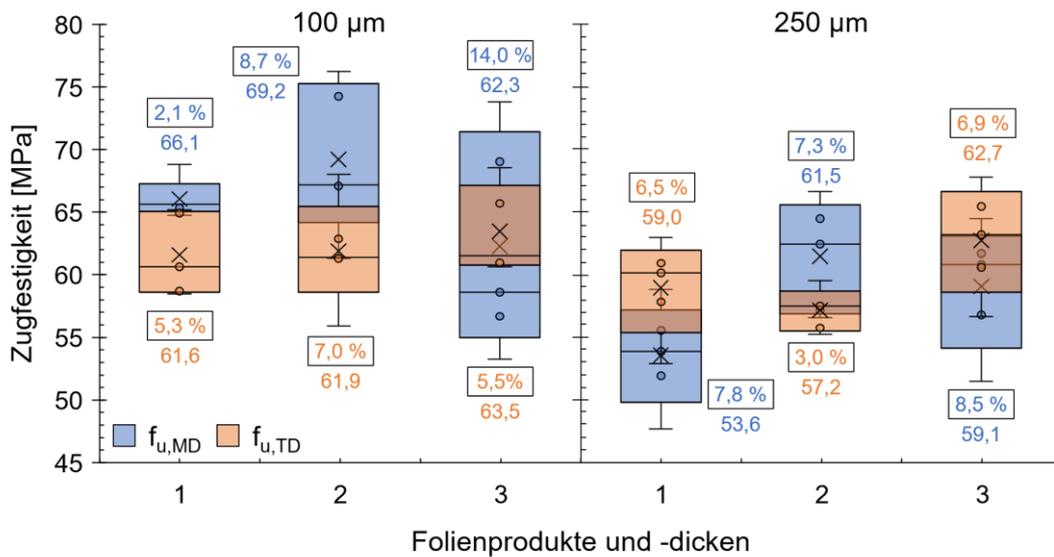


Bild 62 Kastendiagramme der Zugfestigkeiten der Folienprodukte 1, 2 und 3 mit den Foliendicken 100 µm und 250 µm in MD und TD, geprüft durch UDE, Angabe des Variationskoeffizienten V_x [%] und der mittleren Tragfähigkeit $f_{u,w,x}$ in MPa, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

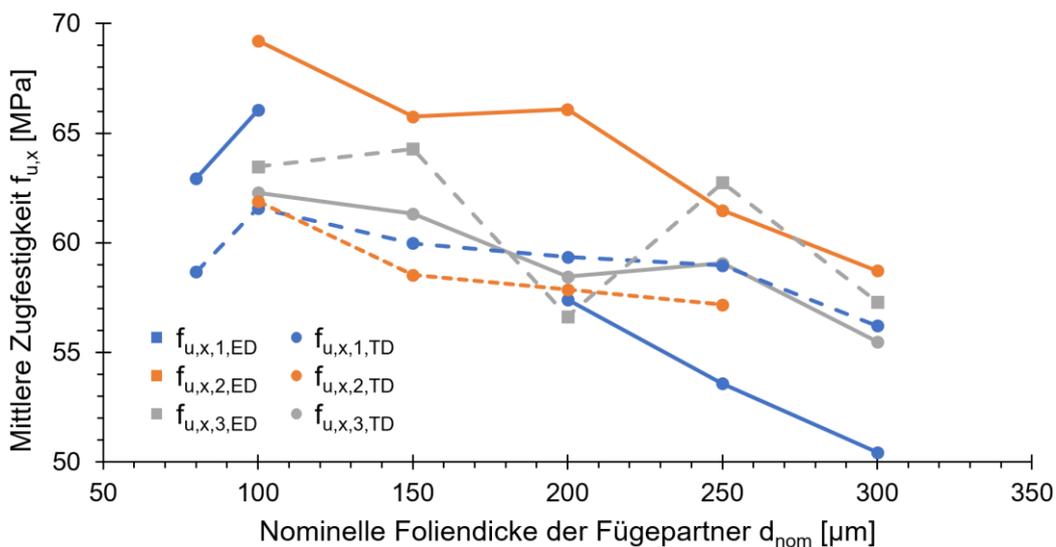


Bild 63 Zugfestigkeiten der verschiedenen Folienprodukte 1, 2 und 3 über die nominelle Foliendicke aufgetragen, ED und TD, geprüft durch UDE und DEKRA, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

Die mittleren Spannungs-Dehnungs-Kurven für die Untersuchungen bei erhöhten Temperaturen $T = 50 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$ sind in Bild 64 dargestellt. Analog zu den Prüfergebnissen bei Raumtemperatur sind Abhängigkeiten der Anisotropie und des Festigkeitsniveaus vom Folienprodukt zu erkennen. Im Vergleich zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten bei Raumtemperatur weisen sämtliche Folienprodukte erwartungsgemäß ein niedrigeres Festigkeitsniveau auf.

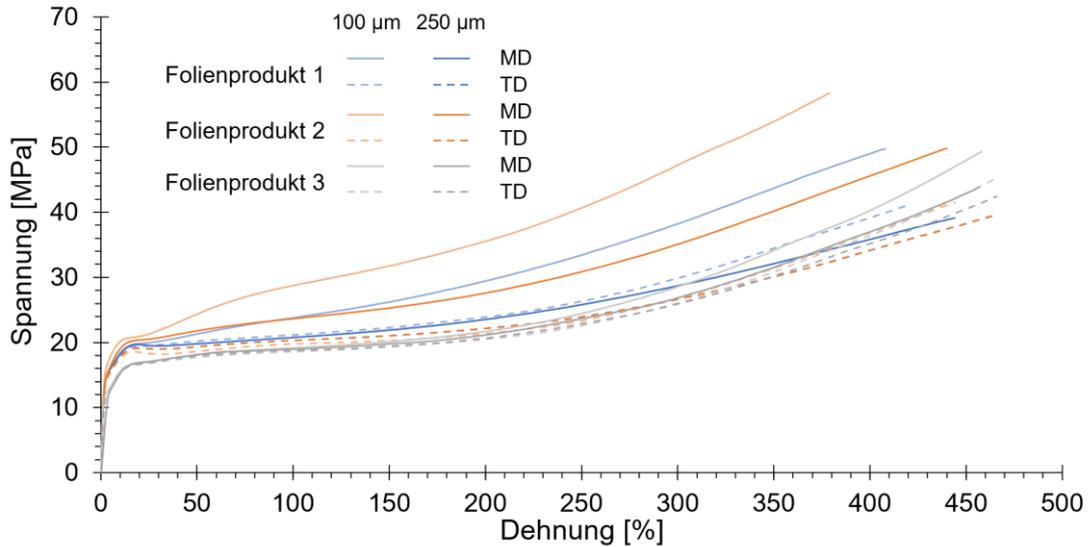


Bild 64 Mittlere Spannungs-Dehnungs-Kurven der Folienprodukte 1, 2 und 3 mit den Foliendicken 100 µm und 250 µm in MD und TD, geprüft durch UDE, T = 50 °C ± 2 K, n = 5

Bild 65 zeigt die Kastendiagramme der Zugfestigkeiten der untersuchten Folienprodukte bei erhöhten Prüftemperaturen. Die Zugfestigkeiten weisen analog zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten ein niedrigeres Festigkeitsniveau auf. Die Ergebnisse zeigen tendenziell Abhängigkeiten der Zugfestigkeit vom Folienprodukt. So weist das Folienprodukt 2 für beide Foliendicken eine höhere Zugfestigkeit in MD im Vergleich zu den beiden anderen Folienprodukten auf. Dieser Effekt ist bei den dünneren Folien ausgeprägter als bei den dickeren Folien. Weiterhin ist die Anisotropie der Zugfestigkeiten des Folienproduktes 2 im Vergleich deutlich ausgeprägter. Die Folienprodukte 1 und 3 weisen ähnliche Festigkeitswerte auf, wobei die Werte des Folienproduktes 1 tendenziell geringer ausfallen. Die Variationskoeffizienten der Zugfestigkeiten liegen im selben Wertebereich wie für Raumtemperatur.

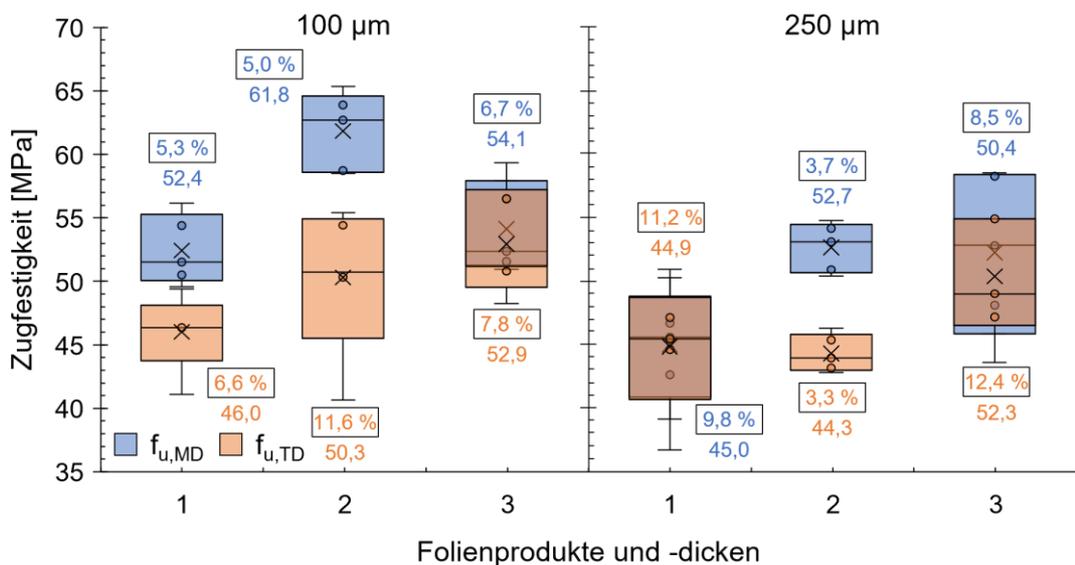


Bild 65 Kastendiagramme der Zugfestigkeiten der Folienprodukte 1, 2 und 3 mit den Foliendicken 100 µm und 250 µm in MD und TD, geprüft durch UDE, Angabe des Variationskoeffizienten V_x [%] und der mittleren Tragfähigkeit f_{uw,x} in MPa, T = 50 °C ± 2 K, n = 5

Die Referenzprüfungen an den untersuchten Folienprodukten haben gezeigt, dass das Spannungs-Dehnungs-Verhalten sowie das Festigkeitsniveau sowohl bei Raumtemperatur wie auch bei erhöhten Prüftemperaturen abhängig vom Folienprodukt

sind. Dies trifft ebenfalls auf den ersten und zweiten Knickpunkt zu. Die Zugfestigkeiten weisen aufgrund der erhöhten Variationskoeffizienten beim Bruch nur tendenzielle Abhängigkeiten vom Grundmaterial auf. Diese sind ausgeprägter bei erhöhten Temperaturen.

In Bild 66 sind die Kastendiagramme der Tragfähigkeiten der 100 µm und 250 µm Flächenschweißnähte der drei Konfektionäre A, B und C für die drei verschiedenen Folienprodukte bei Raumtemperatur dargestellt. Hier sind keine signifikanten Abhängigkeiten der Tragfähigkeiten von den zugrundeliegenden Folienprodukten zu erkennen. Die 100 µm Schweißnahtproben des Konfektionärs C, die mithilfe des HR-Verfahrens hergestellt wurden, weisen für das Folienprodukt 1 deutlich erhöhte Tragfähigkeiten gegenüber den üblichen Traglasten auf. Dies verdeutlicht, dass die Ausführung der Schweißnaht sowie die Wahl der Schweißparameter einen deutlich höheren Einfluss auf die Tragfähigkeit von ETFE-Schweißnähten besitzt als die Wahl des Folienprodukts.

In Tabelle 3 sind die zu diesen Prüfergebnissen zugehörigen Mittelwerte, Variationskoeffizienten und 5 %-Fraktilwerte der ermittelten Tragfähigkeiten dargestellt. Die Folienprodukte 1 und 2 decken über beide untersuchte Foliendicken einen nahezu identischen Festigkeitsbereich von ca. 32,0 MPa bis 37,0 MPa ab. Die Tragfähigkeiten der Schweißnähte des Folienproduktes 3 weisen eine Abhängigkeit von der Foliendicke auf. Während die Schweißnähte der 100 µm Folien mittlere Tragfähigkeiten von 34,4 MPa bis 41,1 MPa erreichen, weist der Bereich der mittleren Tragfähigkeiten der 250 µm Folien mit 31,0 MPa bis 33,1 MPa leicht geringere Werte auf.

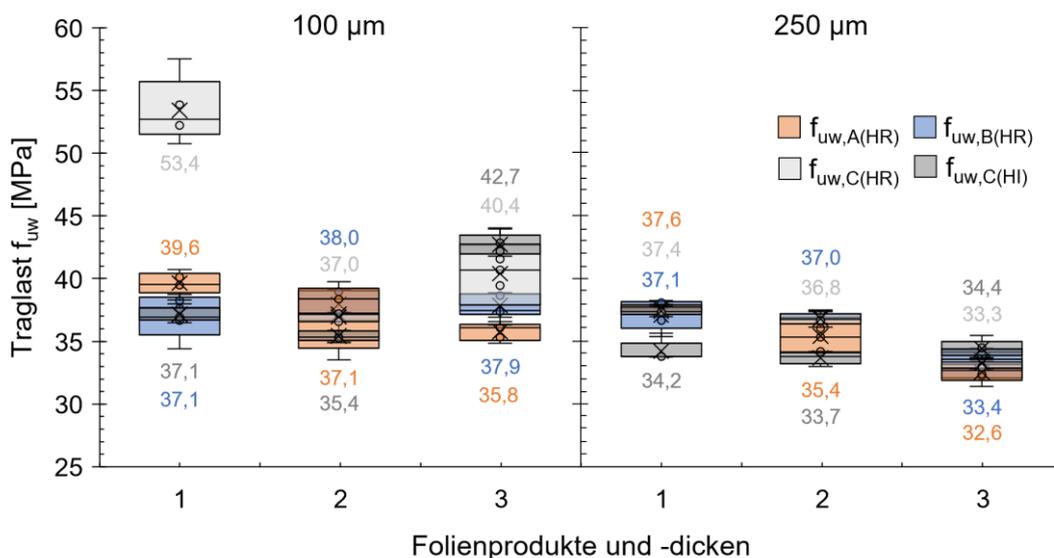


Bild 66 Kastendiagramme der Tragfähigkeiten von ETFE-Flächenschweißnähten der Konfektionäre A, B und C für die Folienprodukte 1, 2 und 3 mit den Foliendicken 100 µm und 250 µm, geprüft durch UDE, Angabe der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, OV, TD, $T = 23 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$, $n = 5$

Sämtliche untersuchten ETFE-Flächenschweißnähte erreichen bei Raumtemperatur einen 5 %-Fraktilwert, der höher ist als der in FprCEN/TS 19102 empfohlene charakteristische Widerstand bei Raumtemperatur von 30 MPa. Die Variationskoeffizienten überschreiten mit maximal 7,0 % ebenfalls nicht den durch FprCEN/TS 19102 gegebenen Maximalwert von 8,0 %.

Bild 67 zeigt eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse bei Raumtemperatur zur Ermittlung der Mindestfestigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten. Eine signifikante Abnahme der Tragfähigkeit der Schweißnähte mit zunehmender Foliendicke der Fügepartner ist nicht zu erkennen. Weiterhin zeigt die Darstellung, dass eine Mindestfestigkeit von 30 MPa bei Raumtemperatur einen anspruchsvollen,

aber für alle Konfektionäre erreichbaren Wert darstellt. Lediglich bei einem Folienprodukt erreichen die Tragfähigkeiten der 300 µm Flächenschweißnaht des Konfektionärs B die Mindestfestigkeit von 30 MPa nicht. Die hohen Tragfähigkeiten der beiden anderen Folienprodukten legen nahe, dass dies lediglich ein Ausreißer darstellt.

Tabelle 3 Mittelwerte, Variationskoeffizienten und 5 %-Fraktilwerte der Tragfähigkeiten der untersuchten ETFE-Flächenschweißnähte der Konfektionäre A, B und C der Folienprodukte 1, 2 und 3 für Raumtemperatur, Werte ohne Einheit in MPa

Folienprodukt		A (HR)		B (HR)		C (HR)		C (HI)	
		100 µm	250 µm						
1	$f_{uw,x}$	39,6	37,6	37,1	37,1	53,4	37,4	37,1	34,2
	V_x	2,3 %	0,7 %	4,6 %	3,1 %	4,8 %	0,9 %	1,5 %	2,4 %
	$f_{uw,5\%}$	37,9	37,1	33,8	34,9	48,5	36,8	36,1	32,6
2	$f_{uw,x}$	37,1	35,4	38,0	37,0	37,0	36,8	35,4	33,7
	V_x	7,0 %	4,0 %	4,5 %	0,8 %	1,0 %	1,2 %	1,1 %	1,4 %
	$f_{uw,5\%}$	32,2	32,7	34,7	36,4	36,3	35,9	34,7	32,8
3	$f_{uw,x}$	35,8	32,6	37,9	33,4	40,4	33,3	42,7	34,4
	V_x	2,0 %	2,3 %	2,3 %	3,7 %	7,0 %	1,1 %	2,0 %	1,9 %
	$f_{uw,5\%}$	34,4	31,1	36,2	31,0	35,0	32,6	41,1	33,1

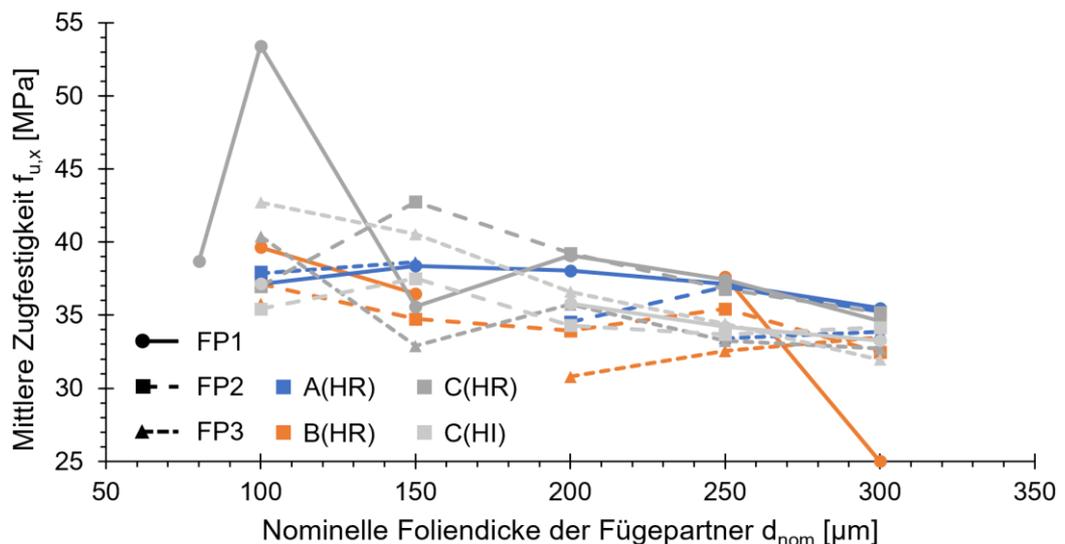


Bild 67 Monoaxiale Tragfähigkeiten der ETFE-Flächenschweißnahtproben der verschiedenen Konfektionäre A, B und C und untersuchten Folienprodukten FP1, FP2 und FP3 sowie der beiden Schweißprozesse HR und HI, geprüft durch UDE und DEKRA, OV, TD, T = 23 °C ± 2 K, n = 5

Bild 68 zeigt die Kastendiagramme der Traglasten der untersuchten Schweißnahtkonfigurationen bei erhöhten Prüftemperaturen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Schweißparameter einen größeren Einfluss auf die Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähte besitzt als die Wahl des Grundmaterials. Auch hier lassen sich für das Folienprodukt 3 Tendenzen für eine Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Foliendicke erkennen. 100 µm Schweißnahtproben weisen hier eine tendenziell leicht höhere Tragfähigkeit auf als 250 µm Schweißnahtproben.

In Tabelle 4 sind die entsprechenden statistischen Werte und 5 %-Fraktilwerte der Prüfergebnisse bei erhöhten Temperaturen zusammengefasst. Der niedrigste 5 %-Fraktilwert innerhalb der Untersuchung beträgt 25,3 MPa. Als anspruchsvoller, aber erreichbarer Mindestwert der Festigkeit für Flächenschweißnähte bei einer Prüftemperatur von 50 °C kann der Wert von 25,0 MPa verwendet werden. Gemäß

FprCEN/TS 19102, Anhang B entspricht dies einem Modifikationsfaktor zur Berücksichtigung veränderter Temperaturen von $k_{temp,50} = 1,2$.

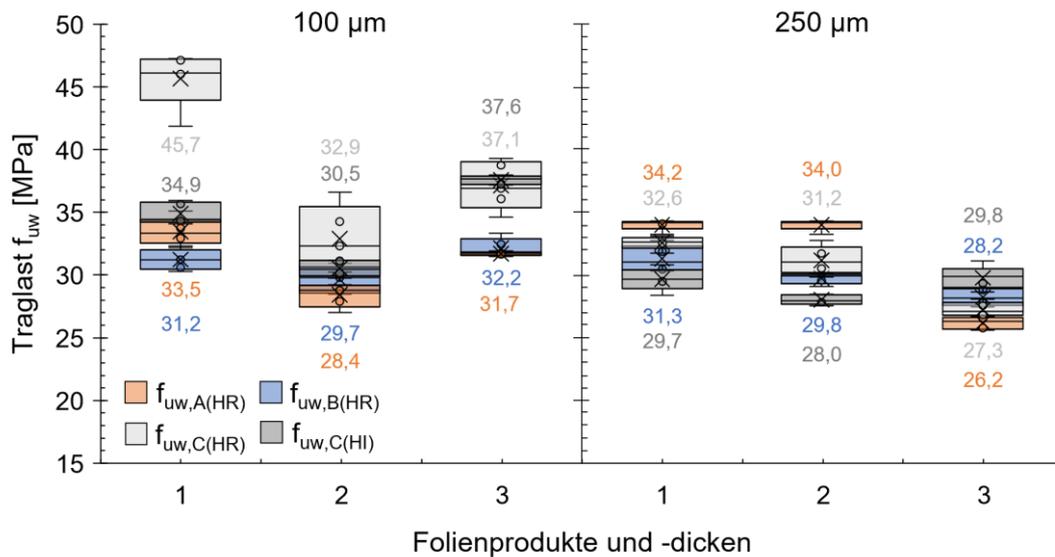


Bild 68 Kastendiagramme der Tragfähigkeiten von ETFE-Flächenschweißnähten der Konfektionäre A, B und C für die Folienprodukte 1, 2 und 3 mit den Foliendicken 100 µm und 250 µm geprüft durch UDE, Angabe der mittleren Tragfähigkeit $f_{uw,x}$ in MPa, OV, TD, T = 50 °C ± 2 K, n = 5

Tabelle 4 Mittelwerte, Variationskoeffizienten und 5 %-Fraktile der Tragfähigkeiten der untersuchten ETFE-Flächenschweißnähte der Konfektionäre A, B und C der Folienprodukte 1, 2 und 3 für erhöhte Prüftemperaturen von 50 °C ± 2 K, Werte ohne Einheit in MPa

Folienprodukt		A (HR)		B (HR)		C (HR)		C (HI)	
		100 µm	250 µm						
1	$f_{uw,x}$	33,5	34,1	31,2	31,3	45,7	32,6	34,9	29,7
	V_x	3,2 %	3,9 %	2,6 %	3,2 %	4,8 %	1,6 %	2,4 %	3,0 %
	$f_{uw,5\%}$	31,4	31,6	29,6	29,4	41,5	31,6	33,3	28,0
2	$f_{uw,x}$	28,4	34,0	29,7	29,7	32,9	31,2	30,5	28,0
	V_x	3,3 %	1,2 %	3,6 %	1,4 %	7,8 %	3,6 %	2,0 %	1,4 %
	$f_{uw,5\%}$	26,6	33,2	27,6	28,9	28,0	29,0	29,3	27,3
3	$f_{uw,x}$	31,7	26,2	32,2	28,2	37,1	27,3	37,6	29,8
	V_x	0,5 %	1,8 %	2,3 %	2,3 %	5,2 %	2,0 %	0,9 %	3,1 %
	$f_{uw,5\%}$	31,4	25,3	30,7	27,0	33,4	26,2	36,9	28,0

Für den Vergleich verschiedener Schweißnahttypen wurden Schweißnahtproben von Überlappnähten (OV) und Stoßnähten mit Deckstreifen (BS) hergestellt. Die Schweißnahtproben wurden von allen Konfektionären mithilfe des HR-Verfahrens gefertigt. Als Grundmaterial wurde das Folienprodukt 1 in den Foliendicken 100 µm und 250 µm verwendet. Die Konfektionäre B und C stellten die 100 µm BS-Nähte mit einem Deckstreifen aus dem entsprechenden Grundmaterial her, während Konfektionär A dickeres Folienmaterial desselben Folienproduktes als Deckstreifen verwendete.

Bild 69 zeigt die Kastendiagramme der Tragfähigkeiten der OV- und BS-Flächenschweißnähte. Deutlich ist zu erkennen, dass die BS-Nähte tendenziell geringere Tragfähigkeiten aufweisen als OV-Nähte desgleichen Konfektionärs und dergleichen Foliendicke. Die Variationskoeffizienten bewegen sich für beide Schweißnahttypen im gleichen Streubereich.

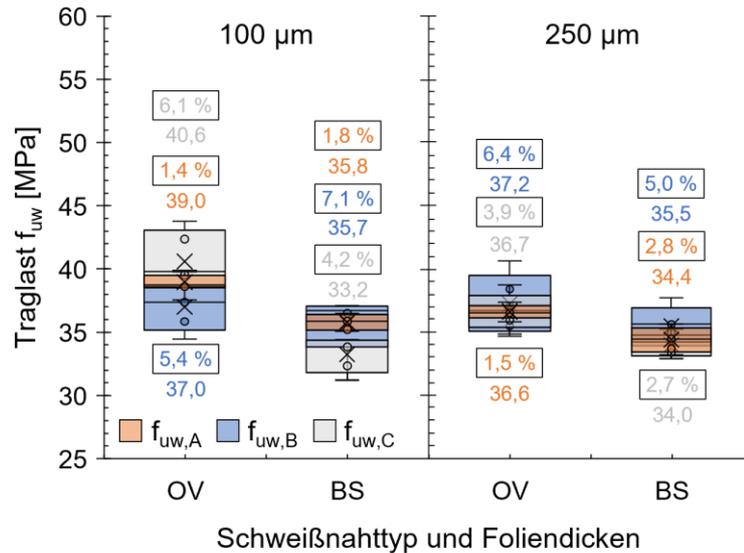


Bild 69 Kastendiagramme der Tragfähigkeiten von OV und BS ETFE-Flächenschweißnähten der Konfektionäre A, B und C, 100 µm und 250 µm, geprüft durch UDE, Angabe der mittleren Tragfähigkeit $f_{u,w,x}$ in MPa, OV, T = 23 °C ± 2 K, n = 5

In Tabelle 5 sind die entsprechenden statistischen Kennwerte zusammengefasst. Der 5 %-Fraktilwert der 100 µm BS-Naht des Konfektionärs C erreicht genau den in FprCEN/TS 19102 festgelegten Wert der Mindestfestigkeit von 30 MPa. Der 5 %-Fraktilwert des Konfektionärs B liegt mit 29,8 MPa leicht darunter. Nur Konfektionär A erreicht einen 5 %-Fraktilwert größer als 30 MPa. Eine mögliche Erklärung könnte, wie bereits ausgeführt, die unterschiedliche Ausführung der BS-Nähte sein. Die Prüfergebnisse legen nahe, dass ein dickerer Deckstreifen bei dünnen BS-Nähten eine bessere Tragfähigkeit liefert als wenn Deckstreifen derselben Dicke wie die des Grundmaterials verwendet werden.

Tabelle 5 Mittelwerte, Variationskoeffizienten und 5 %-Fraktilwerte der Tragfähigkeiten der untersuchten ETFE-Flächenschweißnähte der Konfektionäre A, B und C der Folienprodukte 1, 2 und 3 für Raumtemperatur 23 °C ± 2 K, Werte ohne Einheit in MPa

Folienprodukt		A		B		C	
		100 µm	250 µm	100 µm	250 µm	100 µm	250 µm
OV	$f_{u,w,x}$	39,0	36,6	37,0	37,2	40,6	36,7
	V_x	1,4 %	1,5 %	5,4 %	6,4 %	6,1 %	3,9 %
	$f_{u,w,5\%}$	37,7	35,3	32,4	31,7	34,9	33,3
BS	$f_{u,w,x}$	35,8	34,4	35,7	35,5	33,2	34,0
	V_x	1,8 %	2,8 %	7,1 %	5,0 %	4,2 %	2,7 %
	$f_{u,w,5\%}$	34,3	32,1	29,8	31,4	30,0	31,9

Die umfangreichen Untersuchungen an ETFE-Flächenschweißnähten unterschiedlicher Konfigurationen haben gezeigt, dass die in FprCEN/TS 19102 festgelegte Mindestfestigkeit von 30 MPa ein anspruchsvoller, aber von allen beteiligten Konfektionären erreichbarer Wert für die Tragfähigkeit bei Raumtemperatur darstellt. Der ebenfalls in den FprCEN/TS 19102 festgelegte Wert der Mindestfestigkeit bei 50 °C von 24 MPa konnte ebenfalls von allen Konfektionären gut erreicht werden. Gleichzeitig stellt das Erreichen dieser Mindestfestigkeit eine hohe Qualität der Schweißnähte sicher.

5.3 Biaxiale Festigkeitsuntersuchungen (AP 4.2)

Zusätzlich zu monoaxialen Zugprüfungen wurden in Rahmen dieses Forschungsvorhabens biaxiale Zugprüfungen zur Ermittlung des mehraxialen Dehnungsverhaltens von ETFE-Flächenschweißnähten durchgeführt. Dazu wurden die für ETFE-Folien typischen Kreuzproben geprüft. Diese biaxiale Prüfungen lassen keine Aussage über die biaxiale Tragfähigkeiten zu, da die Proben stets in den monoaxial belasteten Armen der Kreuzproben versagen. Um dennoch eine Aussage über das Lastabtragverhalten von ETFE-Flächenschweißnähten zu ermitteln, wurden die Dehnungen mithilfe des photogrammetrischen Messsystems GOM ARAMIS 3D im biaxial belasteten Messbereich flächig aufgenommen, siehe Bild 70.

Das Lastprotokoll wurde in Anlehnung an FprCEN/TS 19102, Anhang E.4 als Hysterese-Zugprüfung durchgeführt. Diese Zugprüfung soll die Belastung unter Windbelastungen simulieren. Dazu werden typisch für Windlasten sukzessiv höhere Lastniveaus angefahren. Je Lastniveau werden die Proben durch 50 Lastzyklen belastet. Die untere Grenze jedes Zyklus beträgt 60 % des maximalen Lastniveaus. Nach jedem Lastniveau werden die Proben auf Vorspannniveau mit einer Relaxationszeit von 10 min entlastet, sodass ein Sättigungseffekt eintreten kann. Die Lastniveaus reichten bei voller Belastung von 15 MPa bis 26 MPa. Für das Spannungsverhältnis ED:TD 2:1 bzw. 1:2 wurde die schwächer belastete Richtung mit 50 % der Last beansprucht.

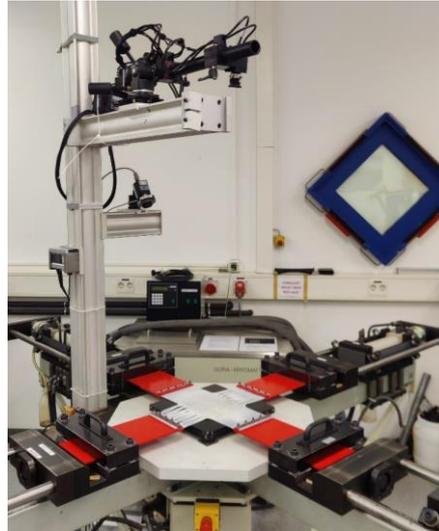


Bild 70 ARAMIS 3D System der GOM GmbH über der biaxialen Zugprüfmaschine der UDE installiert, Foto: UDE/IML

Als Probekörper wurden 250 µm Schweißnahtproben (OV) des Konfektionärs C verwendet. Die Schweißnaht wurde in der Mitte der Achse in Extrusionsrichtung (ED) angeordnet. Es wurden drei Spannungsverhältnisse – 1:1, 2:1 und 1:2 – untersucht. Je Spannungsverhältnis wurde eine Hysterese-Zugprüfung durchgeführt. Das Lastprotokoll der Prüfung unter einem 2:1-Spannungsverhältnis ist in Bild 71 dargestellt.

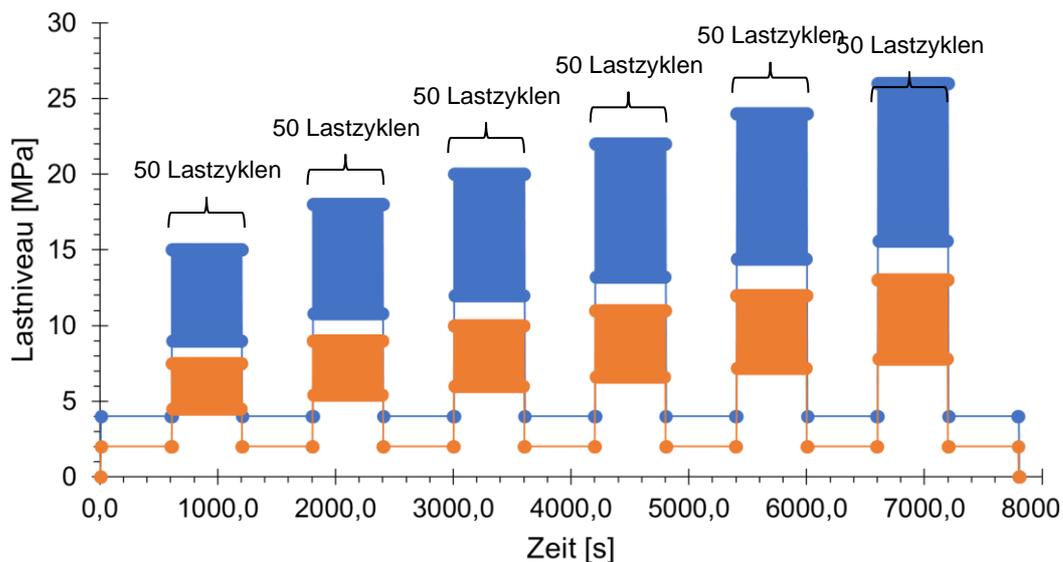


Bild 71 Lastprotokoll einer Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1 in Anlehnung an FprCEN/TS 19102, blau: ED, orange: TD

Für die flächige Dehnungsaufnahme mithilfe des photogrammetrischen Stereo-Kamera System mussten die Proben mit einem stochastischen Muster mit Schwarz-Weiß-Kontrast versehen werden. Um den Einfluss der Beschichtung auf das Materialverhalten so gering wie möglich zu halten, wurde ein Kreidespray für die weiße Grundierung verwendet. Ein Beispiel für einen vorbereiteten Probekörper ist in Bild 72 (a) dargestellt. Analog zu den Erfahrungen mit ETFE-Grundmaterial versagten die Proben ebenfalls in den monoaxial beanspruchten Armen, siehe Bild 72 (b). Dies traf für die Proben zu, die im Spannungsverhältnis 1:1 und 1:2 (ED:TD) getestet wurden.

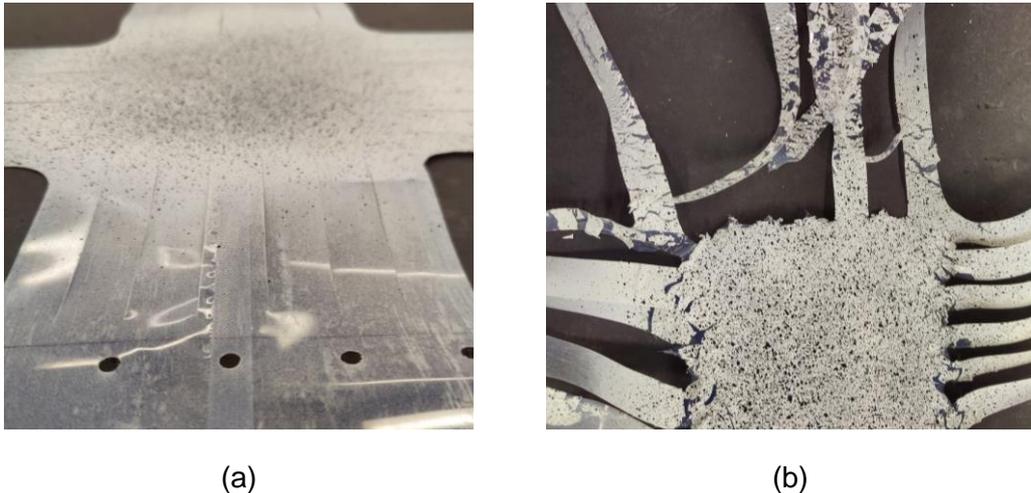


Bild 72 Probekörper mit stochastischem Schwarz-Weiß Muster für biaxiale Zugprüfung mit flächiger Dehnungsmessung: (a) Mittige Anordnung der Schweißnaht in Extrusionsrichtung; (b) In den Armen versagte Probe, Fotos: UDE/IML

Für die Auswertung der Prüfungen wurden die Dehnungen in x-Richtung (ED) und y-Richtung (TD) in drei verschiedenen Punkten ausgelesen. Punkt 1 wurde auf der Schweißnaht positioniert, Punkt 2 an der Schweißnahtkante bzw. der Wärmeeinflusszone (WEZ) und Punkt 3 im unbeeinflussten Grundmaterial.

Bild 73 zeigt neben den Dehnungswerten an den genannten Punkten die flächige Verteilung der Dehnungen in Y-Richtung (TD) der Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1 kurz vor dem Versagen des Probekörpers. Der Bereich der Schweißnaht ist durch das niedrigere Dehnungsniveau deutlich zu erkennen. Die Dehnung innerhalb der Schweißnaht beträgt mit 1,10 % erwartungsgemäß deutlich weniger als beim unbeeinflussten Grundmaterial mit 6,31 %. Entsprechend zeigen die Aufnahmen am Ende der Entlastungsphase nach dem fünften Lastniveau mit 3,65 % etwa 10-fach höhere „bleibende“ Dehnungen im Grundmaterial als in der Schweißnaht mit 0,36 %, siehe Bild 74.

Die Dehnungen an der Schweißnahtkante weisen keine Auffälligkeiten auf. Eine vermutete Spannungsspitze und damit einhergehende erhöhte Dehnungen dieses Details konnten in keinem Spannungsverhältnis festgestellt werden. Vermutungen bezüglich eines Einflusses der Schweißnahtgeometrie auf das Lastabtragverhalten von ETFE-Flächenschweißnähte konnten daher nicht erhärtet werden. Es sei hier allerdings darauf hingewiesen, dass eine präzise Bestimmung der Dehnungen in unmittelbarer Nähe zur Schweißnahtkante mithilfe der verwendeten photogrammetrischen Messmethode nicht möglich war. Die aufgenommenen Dehnungen des Grundmaterials und der Schweißnaht beeinflussen die ermittelten Dehnungen der Schweißnahtkante.

Auffällig ist weiterhin, dass das Grundmaterial trotz einer annähernd gleichmäßigen Belastung beider Belastungsrichtungen von 25,04 MPa in x-Richtung (ED) und 25,59 MPa in y-Richtung (TD) orthogonal zur Schweißnahtrichtung mit 6,31 % eine deutlich höhere Dehnung aufweist als in Schweißnahtrichtung mit 4,58 %.

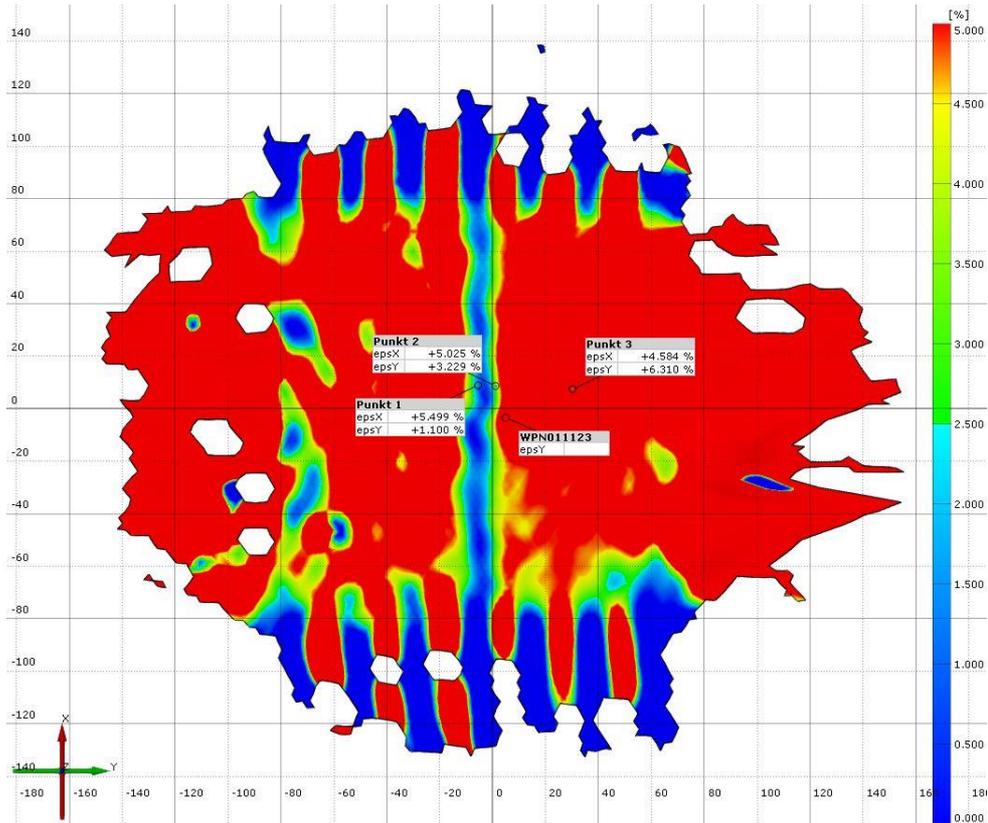


Bild 73 Dehnungen in Y-Richtung (TD) der Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1 kurz vor dem Versagen der Probe im 6. Lastniveau (26 MPa)

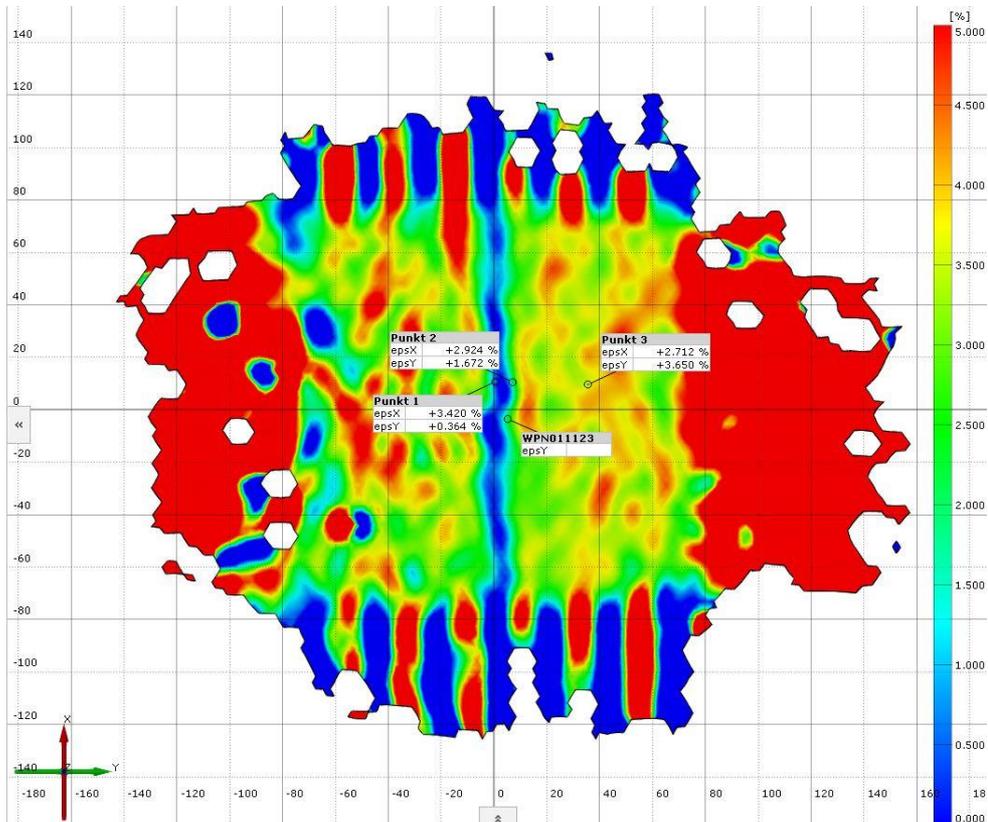


Bild 74 Dehnungen in Y-Richtung (TD) der Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1 am Ende der Haltezeit nach dem 5. Lastniveau (26 MPa)

Die Vermutung liegt nahe, dass die erhöhte Steifigkeit der Schweißnaht und die daraus resultierende niedrigere Dehnung in y-Richtung durch erhöhte Verformungen des Grundmaterials ausgeglichen werden.

In Anlage F sind weitere Dehnungsaufnahmen der Prüfergebnisse der Hysterese-Zugprüfungen aufgeführt. Die Anlage enthält Aufnahmen der Dehnungen des ersten und letzten Maximums jedes Lastniveaus sowie der Dehnungen am Ende jeder Entlastungsphase. Die Dehnungsaufnahmen in x-Richtung weisen erhöhte Dehnungen innerhalb der Schweißnaht auf. Eine mögliche Erklärung ist die ungleichmäßige Klemmung der Proben aufgrund der erhöhten Dicke der Schweißnaht.

Die stichprobenartigen biaxialen Hysterese-Zugprüfungen mit flächiger Dehnungsmessung haben gezeigt, dass die Schweißnaht bei orthogonal zur Schweißnahttrichtung wirkenden Belastungen erwartungsgemäß weniger Verformung erfährt als das umliegende nichtverschweißte Material.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Membranbau stellt eine vergleichsweise neue und ressourceneffektive Bauart dar, die u. a. neue Möglichkeiten in der Überdachung großer Spannweiten eröffnet. Die nur bis zu 1 mm dicken Membrane werden meist für repräsentative Gebäude wie Stadien oder ähnliches eingesetzt. Membrane sind sehr leichte und auf Zug abtragende Bauelemente und umfassen sowohl technische Textilien (Gewebe-membrane) als auch die in diesem Vorhaben behandelten ETFE-Folien. Die normativen Richtlinien im Bereich der Ausführung, Prüfung und Bemessung dieser Bauelemente weisen Regelungslücken auf. Diese sind besonders ausgeprägt im Kontext der Schweißverbindungen von ETFE-Folien. In diesem Vorhaben wurden daher Konzepte, Verfahren und normative Richtlinien bezüglich der Ausführung, Prüfung und Bemessung geschweißter ETFE-Folien entwickelt.

Um die Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse an ETFE-Flächenschweißnähten zu gewährleisten, ist eine standardisierten Schweißnahtprüfung erforderlich. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden daher optimierte Prüfparameter ermittelt, die die Grundlage für die Entwicklung einer standardisierten Schweißnahtprüfung bildeten. Auf dieser Basis wurden Prüfungen an Schweißnahtproben verschiedener Konfektionäre zur Ermittlung einer Mindestfestigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten durchgeführt. Den Schweißnahtproben lagen weiterhin verschiedene Folienprodukte und -dicken sowie Schweißprozesse und Schweißnahttypen zugrunde. Die ermittelten Mindestfestigkeiten dienen als Basis einer wirtschaftlich effizienten und sicheren Bemessung der für den GZT relevanten Schweißnahtdetails.

Weiterhin wurden Konzepte und Verfahren zur Qualitätssicherung von ETFE-Schweißnähten entwickelt. Basis für die Entwicklung bildete die Erfahrung der beteiligten planenden und ausführenden Betriebe sowie Werksbesichtigungen bei diesen und Interviews mit an der Ausführung beteiligten Personen. Die Konzepte und Verfahren umfassen die Qualifizierung des Schweißverfahrens und des Schweißpersonals, welches die Schweißaufsicht sowie die Bediener und Einrichter der Schweißeinrichtungen einschließen, und der Prüfung von ETFE-Schweißnähten.

Die entwickelten Konzepte und Verfahren dienen als Grundlage für die Entwicklung normativer Regelungen zur Qualitätssicherung der Ausführung von ETFE-Schweißnähten für die Anwendung im Bauwesen. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstellte und bereits im Normungsausschuss als neues Normungsprojekt beschlossenen Normenreihe DIN 18229 umfasst fünf Teile, die die Qualifizierung des Schweißverfahrens und des Schweißpersonals umfasst sowie Randbedingungen für die Prüfung geschweißter ETFE-Folien definiert: E DIN 18229-1 bis -4, die die Qualifizierung umfassen, wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens als finale Normenentwürfe entwickelt. E DIN 18229-5, der die Prüfung geschweißter ETFE-Folien umfasst, wurde konzeptualisiert.

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten Konzepte und normativen Regelungen tragen wesentlich zu den förderpolitischen Zielen bei. Die Sicherheit und Festigkeit der Schweißverbindungen entscheidet über die Sicherheit und Ökonomie von innovativen und nachhaltigen ETFE-Folientragwerken. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens unterstützen durch die normungsmäßige Aufbereitung der Ausführung und Prüfung von Folienschweißnähten die gleichmäßige Erreichung einer hohen Ausführungsqualität bei allen Konfektionären. Dies wird zur Marktdurchdringung der innovativen Technologie der Folientragwerke entscheidend beitragen. Die Marktteilnehmer im Bereich der ETFE-Folientragwerke sind vielfach kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), die durch den Transfer der Forschungsergebnisse direkt unterstützt werden. Gleichzeitig wird die Vereinheitlichung von Anforderungen an ihre Produkte zu fairen Marktbedingungen führen und eine hohe Qualität sicherstellen.

Die Vereinheitlichung der Schweißausführung sowie die Anhebung der Qualitätsstandards werden gerade deutschen Konfektionären zugutekommen, die heute bereits hohe Qualitätsanforderungen erfüllen. Diese werden z. B. dadurch erfüllt, dass in sehr kurzen Zeitabständen (beispielsweise zu Beginn eines jeden Arbeitstages) die Schweißnahtqualität im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle geprüft wird und die anstehenden Schweißungen erst nach Erfüllung der im Projekt festgelegten Anforderungen freigegeben werden.

Die Untersuchungen zur Ermittlung einer Mindestfestigkeit hat ergeben, dass die in FprCEN/TS 19102 angegebene Mindestfestigkeiten von 30 MPa bei Raumtemperatur bzw. 24 MPa bei erhöhten Prüftemperaturen von 50 °C anspruchsvolle, jedoch erreichbare Werte für die monoaxiale Tragfähigkeit von ETFE-Flächenschweißnähten darstellt.

Die erarbeiteten Erkenntnisse wurden zur Erarbeitung der europäischen Technischen Spezifikation FprCEN/TS 19102 „Bemessung von vorgespannten Membrantragwerken“ herangezogen. Diese Technischen Spezifikation (TS) stellt die erste europäisch abgestimmte Regelung für Membranstrukturen dar und ist bereits in einer deutschen Fassung im Beuth-Verlag verfügbar. Zukünftig sollen basierend auf dieser TS innerhalb der nächsten drei Jahre ein neuer Eurocode und eine Ausführungsnorm für Membrantragwerke entwickelt werden.

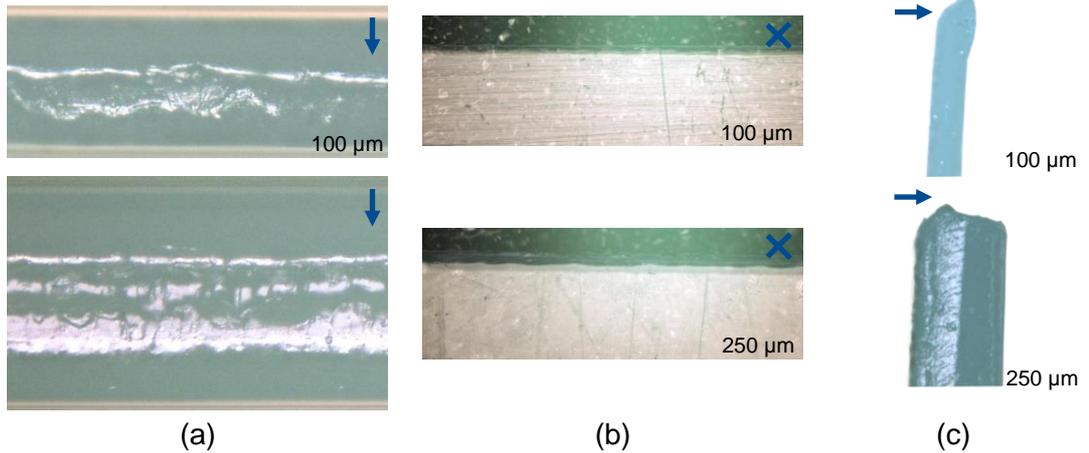
Zukünftige Forschungsaktivitäten sollten sich mit den Besonderheiten zur Qualitätssicherung von Randschweißnähten beschäftigen. Ferner sind weitere grundlegende Untersuchungen zu den Wirkmechanismen geschweißter ETFE-Folien möglich, um die Schweißtechnik weiterzuentwickeln.

7 Literatur

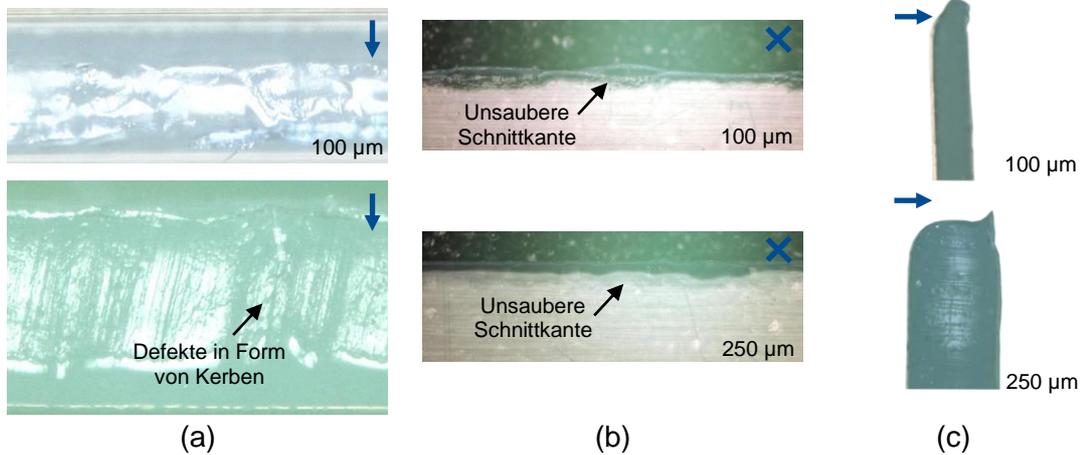
- [1] DIN EN ISO 527-3:2019-02, *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln (ISO 527-3:2018); Deutsche Fassung EN ISO 527-3:2018.*
- [2] DVS-Richtlinie 2203-1:1986-03, *Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen – Anforderungen*, DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
- [3] DVS-Richtlinie 2203-2:1985-07, *Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen – Zugversuch*, DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
- [4] DIN EN ISO 527-1:2019-12, *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2019.*
- [5] DIN 1910-3:2023-05, *Schweißen und verwandte Prozesse – Kunststoffschweißen – Teil 3: Prozesse zum Schweißen thermoplastischer Kunststoffe.*
- [6] DIN 18204-1:2018-11, *Bauteile aus textilen Flächengebilden und Folien - Teil 1: Hallen und Zelte.*
- [7] DIN 4134:1983-02, *Tragluftbauten; Berechnung, Ausführung und Betrieb.*
- [8] Schuler, V., Twrdek, J., *Praxiswissen Schweißtechnik, Werkstoffe – Prozesse – Fertigung*, 6. Auflage, Editor: Fahrenwaldt, H.-J., 2019.
- [9] Seidel, M., *Textile Hüllen Seidel, Bauen mit biegeweichen Tragelementen: Material, Konstruktion, Montage*, Ernst & Sohn, 2008.
- [10] FprCEN/TS 19102:2023-06, *Design of tensioned membrane structures.*
- [11] Abaqus (2021), *ABAQUS User's Manual*, Version 6.21 Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence, France.
- [12] Galliot, G., Luchsinger, R. H., *Uniaxial and biaxial mechanical properties of ETFE foils*, *Polymer Testing* 30 (2011), S. 356-365.
- [13] Runge, D., *Load-Bearing Behaviour and Quality Management of Welded ETFE-Foils for Building Applications*, Dissertation, in Bearbeitung.
- [14] Stranghöner, N., et al., *Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures*, Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes, JRC Science and Policy Report, European Commission, Joint Research Centre, Editors: M. Mollaert, S. Dimova, A. Pinto, St. Denton, EUR 25400 EN, European Union, 2016.
- [15] DIN 1910-100:2008-02, *Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe – Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzung zu DIN EN 14610:2005.*
- [16] H. J. Fahrenwaldt, V. Schuler, *Praxiswissen Schweißtechnik*, DOI 10.1007/978-3-8348-8199-1_7, Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- [17] DIN EN ISO 15607:2020-02, *Anforderungen und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Allgemeine Regeln (ISO 15607:2019); Deutsche Fassung EN ISO 15607:2019.*
- [18] DIN EN ISO 15609-1:2019-12, *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißanweisung – Teil 1: Lichtbogenschweißen (ISO 15609-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 15609-1:2019.*
- [19] DIN EN ISO 15614-1:2020-05, *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung – Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen (ISO 15614-1:2017) + Amd 1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 15614-1:2017 + A1:2019.*
- [20] DIN-Fachbericht ISO/TR 25901:2018-11, *Schweißen und verwandte Verfahren – Terminologie.*
- [21] DIN 35230:2016-09, *Kunststoffe – Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen – Angaben zu Schweißverfahren; Deutsche Fassung CEN/TS 16892:2015.*

- [22] DIN EN ISO 14731:2019-07, *Schweißaufsicht – Aufgaben und Verantwortung (ISO 14731:2019); Deutsche Fassung EN ISO 14731:2019.*
- [23] DIN EN ISO 14732:2013-12, *Schweißpersonal – Prüfung von Bedienern und Einrichtern zum mechanischen und automatischen Schweißen von metallischen Werkstoffen (ISO 14732:2013); Deutsche Fassung EN ISO 14732:2013.*
- [24] DVS-Richtlinie 2212-1:2015-12, *Prüfung von Kunststoffschweißern Prüfgruppen I und II.*
- [25] DIN EN 1990:2021-10, *Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.*

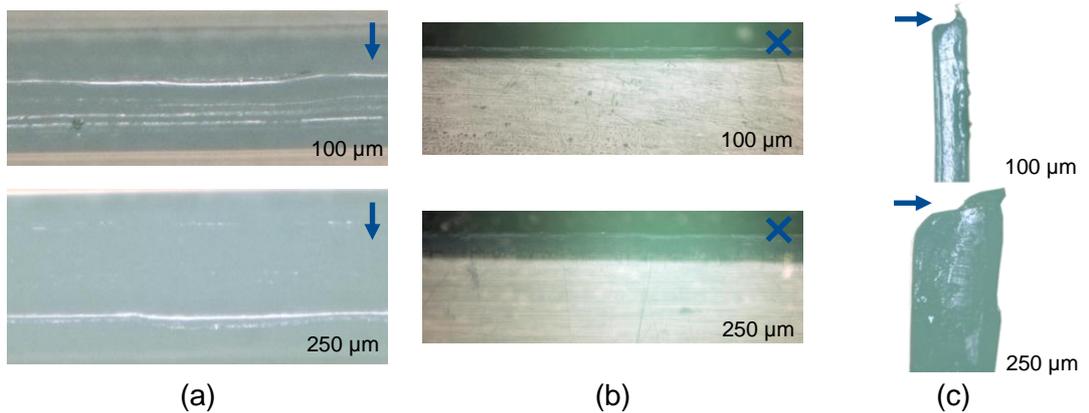
Anlage A
Mikroskopische Aufnahmen zur Optimierung der
Herstellmethode



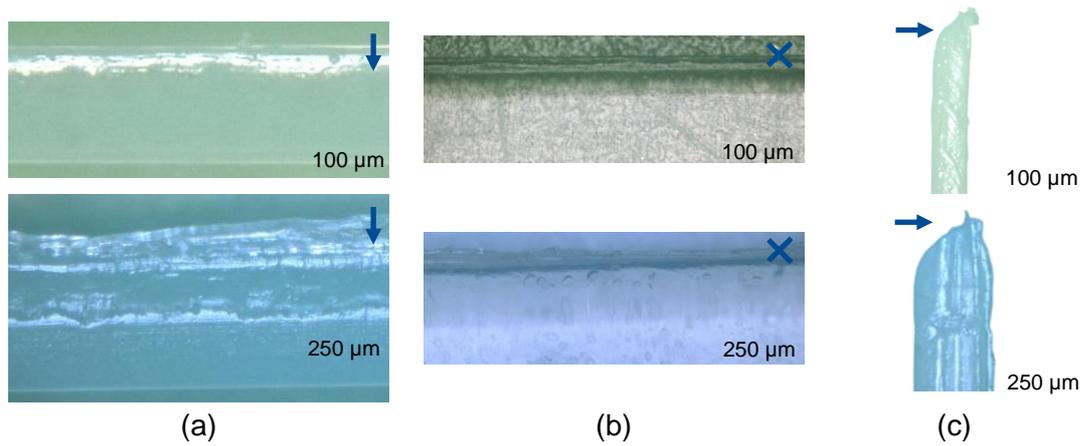
Mikroskopische Aufnahmen der mit einem Hebelschneider vorbereiteten Proben der beiden untersuchten Foliendicken mit Darstellung der Schnittrichtung in Pfeilform; (a) Ansicht der Schnittkante; (b) Draufsicht der Schnittkante; (c) Querschnitt der Schnittkante, Fotos: UDE/IML



Mikroskopische Aufnahmen der mit einem Rollschneider vorbereiteten Proben der beiden untersuchten Foliendicken mit Darstellung der Schnittrichtung in Pfeilform; (a) Ansicht der Schnittkante; (b) Draufsicht der Schnittkante; (c) Querschnitt der Schnittkante, Fotos: UDE/IML



Mikroskopische Aufnahmen der mit einem Skalpell vorbereiteten Proben der beiden untersuchten Foliendicken mit Darstellung der Schnittrichtung in Pfeilform; (a) Ansicht der Schnittkante; (b) Draufsicht der Schnittkante; (c) Querschnitt der Schnittkante, Fotos: UDE/IML



Mikroskopische Aufnahmen der von Konfektionär C gestanzten Proben der beiden untersuchten Foliendicken mit Darstellung der Schnittrichtung in Pfeilform; (a) Ansicht der Schnittkante; (b) Draufsicht der Schnittkante; (c) Querschnitt der Schnittkante, Fotos: UDE/IML

Anlage C

Vordruck eines Schweißplans für die Ausführung
geschweißter ETFE-Folien

Vordruck Schweißplan

ETFE-Folien (Extrusionsfolien geeignet für die konstruktive Anwendung)

Firma:

Projekt:

Datum:

Rev.

Index:

Schweißplan für ETFE-Folien im Bauwesen

Inhaltsverzeichnis:

1. Allgemeines
2. Schweißverfahren, Grundwerkstoffe und Hilfsstoffe
3. Schweißerqualifikation
4. Schweißnahtvorbereitung
5. Schweißen
6. Nachbesserungen
7. Schweißnahtprüfung
8. Mitgeltende Unterlagen
9. Anlagen

1. Allgemeines

Der Schweißplan ist verbindlich für die _____ GmbH, sowie für alle an der Fertigung dieses Auftrages beteiligten Subunternehmen. Abweichungen sind nur mit Genehmigung durch die _____ GmbH gestattet.

Die für den Auftrag zuständige Schweißaufsichtsperson der ausführenden Firma ist für die Einhaltung der Vorgaben in diesem Schweißplan verantwortlich.

2. Schweißverfahren, Grundwerkstoffe und Hilfsstoffe

Es kommen folgende Schweißverfahren zum Einsatz:

2.1 Heizelement-Rollbandschweißen (HR)

Anwendung

- Randnaht (OV)

2.2 Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI)

Anwendung

- Flächenschweißnaht (OV)

3. Schweißerqualifikation

Es werden nur Schweißer mit einem erfolgreichen Abschluss der „Schulung für das Schweißen von ETFE-Folien“ und einer Qualifizierung für die Herstellung der entsprechenden Schweißnähte.

4. Schweißnahtvorbereitung

Die Beschichtung im Bereich der Überlappnähte im Flächen- und Randbereich wird entfernt. Die Flächen werden im Anschluss gesäubert, sodass keine Rückstände auf Folie zurückbleiben.

5. Schweißen

Sowohl für das HR wie auch für das HI sind weder Vor- noch Rücklauf zu berücksichtigen.

5.1 Heftschweißen

Heftschweißnähte dienen während der Konfektionierung von Folienkissen der Fixierung aller Einzelteile zu einer Hauptposition. Sie werden rein konstruktiv angeordnet und können (in Abhängigkeit des verwendeten Schweißverfahrens) sowohl innerhalb der planmäßigen Randschweißung liegen oder im nichttragenden Überlappungsbereich.

5.2 Planmäßig unterbrochene Schweißnähte

Unterbrochenen Schweißnähte sollten möglichst vermieden werden. Wenn unterbrochene Schweißnähte geplant sind, sollte ein Prüfstück mit einer im Projekt geplanten unterbrochenen Schweißnaht gefertigt und entsprechend der Schweißverfahrensprüfung zu qualifizieren.

6. Nachbesserungen

Bei dem HI sollten nach dem Verschweißen die Überstände mit einem geeigneten Werkzeug, welches die Beschädigung der Folien ausschließt, entfernt werden.

7. Schweißnahtprüfung

Die zerstörungsfreien Schweißnahtprüfung umfasst die visuelle Kontrolle nach äußeren Unregelmäßigkeiten und Kontrolle der Schweißnahtbreite und -dicke. Die Prüfungen werden nach dem entwickelten Konzept durchgeführt.

8. Mitgeltende Unterlagen

(DIN EN 35230)

DIN EN 14731

Anhang A

Dokumentierte Änderungen oder Zeichnungen der Schweißreihenfolge etc.

Anlage C

E DIN 18229-1: Schweißen von ETFE-Folien für
die Anwendung im Bauwesen – Teil 1:
Schweißaufsicht – Aufgaben und Verantwortung

Datum:2023 Mai

E DIN 18229-1

**Schweißen von ETFE-Folien für die Anwendung im Bauwesen
Teil 1: Schweißaufsicht – Aufgaben und Verantwortung**

Welding of ETFE foils for building applications
Part 1: Welding coordination - Tasks and responsibilities

Soudage des films ETFE pour applications de construction
Partie 1: Coordination en soudage - Tâches et responsabilités

Basiert auf:

- *DIN EN ISO 14731:2019-07, Schweißaufsicht – Aufgaben und Verantwortung (ISO 14731:2019); Deutsche Fassung EN ISO 14731:2019,*
- *WIPANO-Forschungsvorhaben „Schweißverbindungen von ETFE-Folien im Bauwesen: Standardisierung, Ausführung, Prüfung und Bemessung“, Förderkennzeichen 03TN0011A.*

Dokument-Typ: Norm
Dokument-Untertyp:
Dokumentstufe: Vorlage
Dokumentsprache: D

STD Version 2.9a

E DIN 18229-1:2023-02

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung	4
1 Anwendungsbereich.....	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe.....	5
4 Aufgaben und Verantwortung	6
4.1 Mit der Schweißqualität zusammenhängende Aufgaben	6
4.2 Festlegung der Aufgaben und der Verantwortung.....	6
5 Arbeitsbeschreibung.....	7
5.1 Allgemeines	7
5.2 Aufgaben.....	7
5.3 Verantwortung und Umfang der Befugnisse	7
6 Technische Kenntnisse und Kompetenz	8
6.1 Allgemeines	8
6.2 Kompetenzniveau für das Schweißaufsichtspersonal.....	8
Anhang A (normativ) Beurteilung des Schweißaufsichtspersonals	9
Anhang B (informativ) Wesentliche schweißtechnische und mit dem Schweißen verbundene Aufgaben, die zu berücksichtigen sind, soweit zutreffend.....	10

E DIN 18229-1:2023-02

Vorwort

Dieser Norm-Entwurf wurde im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) im Arbeitsausschuss NA 005-51-08 AA "Eurocode für Membrantragwerke DIN 18204-1 sowie DIN 4134 (SpA zu CEN/TC 250/WG 5)" erarbeitet.

Dieser Norm-Entwurf basiert auf der DIN EN ISO 14731:2006-12 und wurde auf das Schweißen von ETFE-Folien angepasst.

E DIN 18229-1:2023-02

Einleitung

Validierung und Verifizierung beim Schweißen erfordert Fachkräfte zur Durchführung der Schweißaufsicht, um Vertrauen in die Qualität der Schweißverbindungen zu schaffen und um eine verlässliche Arbeitsleistung während der Produktion sicherzustellen.

Die Aufgaben und Verantwortung des Schweißaufsichtspersonals, das die mit der Schweißtechnik verbundenen Tätigkeiten beeinflusst (z. B. Planung, Ausführung, Überwachung und Inspektion) sind eindeutig festzulegen.

E DIN 18229-1:2023-02

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die wesentlichen mit der Schweißqualität zusammenhängenden Aufgaben und die Verantwortung, die die Schweißaufsicht umfasst, fest.

Als Beurteilungsgrundsatz nach diesem Dokument gilt, dass das Schweißaufsichtspersonal für die ihm zugewiesenen schweißtechnischen Aufgaben kompetent sein muss.

Es wird davon ausgegangen, dass das Schweißaufsichtspersonal die erforderliche Ausbildung, die erforderlichen Qualifikationen und Erfahrung hat und vom Konfektionär benannt ist.

Rechtsvorschriften, Anwendungsstandards und Verträge können besondere Anforderungen für das Schweißaufsichtspersonal ergeben. Im Übrigen ist es die Verantwortung des Konfektionärs, die Anforderungen nach diesem Dokument festzulegen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 1910-3, *Schweißen – Schweißen von Kunststoffen – Verfahren*

prCEN/TS 19102, *Design of tensioned membrane structures*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach E DIN 18229-2, -3, -4, -5 und die folgenden Begriffe.

3.1

Konfektionär

Organisation, die schweißtechnische und mit dem Schweißen verbundene Tätigkeiten, die demselben technischen Management und Qualitätsmanagement unterstehen, durchführt

Anmerkung 1 zum Begriff: Schweißtechnische und mit dem Schweißen verbundene Tätigkeiten dürfen in Schweißwerkstätten oder -baustellen durchgeführt werden, der Konfektionär bleibt jedoch für die schweißtechnische Fertigung verantwortlich

3.2

Schweißaufsicht

Koordinierung der Ausführungen bei der Herstellung von Schweißungen und für die mit dem Schweißen zusammenhängenden Tätigkeiten

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Schweißaufsicht kann einer Person oder einem Team zugewiesen werden.

Schweißaufsichtspersonal

Schweißaufsichtsperson

Person oder Personengruppe, die festgelegte schweißtechnische Koordinierungsaufgaben ausübt

Anmerkung 1 zum Begriff: Vom *Konfektionär* (3.1) darf unterschiedliches Personal für verschiedene schweißtechnische und mit dem Schweißen verbundene Aufgaben benannt werden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Eine Qualifikation und/oder praktische Erfahrung kann erforderlich sein.

E DIN 18229-1:2023-02**3.3****Schweißinspektion**

Beurteilung der Übereinstimmung der mit dem Schweißen in Verbindung stehenden Einflussgrößen durch Beobachtung und Beurteilung, soweit zutreffend unterstützt durch Messungen und Prüfungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Schweißinspektion ist Teil der schweißtechnischen Koordinierungsaufgaben.

3.4**Fertigkeit**

Fähigkeit, Kenntnisse anzuwenden und Erfahrungen einzusetzen, um Aufgaben auszuführen und Probleme zu lösen

Anmerkung 1 zum Begriff: Fertigkeiten werden als kognitive Fertigkeiten (logisches, intuitives und kreatives Denken) oder als praktische Fertigkeiten (Geschicklichkeit und Anwendung von Methoden, Materialien, Werkzeugen und Instrumenten) beschrieben.

3.5**Kenntnisse**

Ergebnis der Verarbeitung von Informationen, die Gesamtheit der Fakten, Grundsätze, Theorie und Praxis in einem Arbeits- und Lernbereich, durch Lehren (Theorie- und/oder Faktenwissen)

3.6**Qualifikation**

<Personal> formales Ergebnis eines Beurteilungs- und Validierungsprozesses, um festzustellen, dass die Lernergebnisse einer Person einem vorgegebenen Programm entsprechen

3.7**Kompetenz**

nachgewiesene Fähigkeit, wirksam Kenntnisse, Erfahrungen sowie persönliche, soziale und methodische Fähigkeiten in vielen Arbeitssituationen und für die berufliche und persönliche Entwicklung zu nutzen

3.8**Verantwortung**

vom *Konfektionär* (3.1) infolge der beruflichen Kompetenz zugewiesene Verantwortung, Aufgaben, Verpflichtungen und damit verbundene Rechte

4 Aufgaben und Verantwortung**4.1 Mit der Schweißqualität zusammenhängende Aufgaben**

Anhang B ist vom Konfektionär als Leitfaden für die Festlegung der mit der Schweißqualität zusammenhängenden Aufgaben und Verantwortungen des Personals für schweißtechnische Koordinierungsaufgaben zu verwenden. Er darf für besondere Anwendungen ergänzt werden. Es sind nicht alle Bestandteile für alle Konfektionär oder Qualitätssicherungsanforderungen erforderlich, und die Auswahl muss nach Bedarf getroffen werden. Wenn z. B. keine zerstörende Prüfung nach dem Schweißen durchgeführt wird, ist B.13 c) nicht anwendbar.

4.2 Festlegung der Aufgaben und der Verantwortung

Die Schweißaufsicht liegt in der alleinigen Verantwortung des Konfektionärs.

Die Aufgaben des Schweißaufsichtspersonals müssen aus Anhang B und/oder wie in anderen Dokumenten festgelegt ausgewählt werden. Die Kompetenz des Schweißaufsichtspersonals muss der Vielschichtigkeit der schweißtechnischen und mit dem Schweißen verbundenen Tätigkeiten, Produktat(en), der Kritikalität der Anwendung entsprechen. Das Schweißpersonal muss qualifiziert sein, die Qualität der hergestellten

E DIN 18229-1:2023-02

Schweißnähte nach den Anforderungen der prCEN/TS 19102 und dieser Normenreihe sowie weiteren vertraglich geregelten und betriebsinternen Anforderungen sicherzustellen. Der Konfektionär ist verpflichtet diese Anforderungen zu prüfen.

Jede Aufgabe nach Anhang B darf mit einer Anzahl von Tätigkeiten verknüpft sein, wie:

- Überprüfung der Anforderungen und Vorbereitung;
- Überwachung;
- Inspektion, Nachprüfung oder Bestätigung.

Wenn mehr als eine Person die Schweißaufsicht ausübt, sind die Aufgaben und die Verantwortung für jede Person festzulegen, sodass die Verantwortung eindeutig definiert ist und die Personen für jede spezielle schweißtechnische Koordinierungsaufgabe ausreichend kompetent sind.

Der Konfektionär muss mindestens eine Person benennen, die für die schweißtechnischen Koordinierungsaufgaben verantwortlich ist.

Wenn die Schweißaufsicht untervergeben wird, müssen die Aufgaben und die Verantwortung definiert und dokumentiert werden. Die Einhaltung dieses Dokuments bleibt jedoch in der Verantwortung des Konfektionärs.

ANMERKUNG Beispiele für Bestandteile, die bei Untervergabe der Schweißaufsicht zu berücksichtigen sind: a) eine Möglichkeit für die untervergebene Schweißaufsichtsperson, die Betriebsstätten zu besichtigen, laufend oder anders; b) Berichte zu den Besichtigungen, einschließlich des Zwecks und der durchgeführten Tätigkeiten.

5 Arbeitsbeschreibung

5.1 Allgemeines

Der Konfektionär muss für alle Schweißaufsichtspersonen Arbeitsbeschreibungen erstellen, die mindestens ihre Aufgaben und Verantwortung sowie den Umfang der Befugnisse enthalten müssen, siehe 5.2 und 5.3.

Der Konfektionär muss das für das Schweißaufsichtspersonal erforderliche Ausbildungs-, Qualifikations- und Erfahrungsniveau (siehe Abschnitt 6) festlegen.

Das Schweißaufsichtspersonal muss in der Lage sein, seine Kompetenz, die ihm zugewiesenen Aufgaben (siehe Anhang B) zu erfüllen, z. B. durch eine Beurteilung nach Anhang A nachzuweisen.

Jeder Konfektionär ist für die Ernennung seines Schweißaufsichtspersonals verantwortlich. Diese Ernennung ist nicht auf andere Konfektionär übertragbar.

5.2 Aufgaben

Die dem Schweißaufsichtspersonal zugewiesenen Aufgaben müssen nach 4.2 und Anhang B festgelegt werden.

5.3 Verantwortung und Umfang der Befugnisse

Festlegungen der dem Schweißaufsichtspersonal zugewiesenen Verantwortung und Umfang der Befugnisse wie folgt:

- Stellung in der Konfektionärorganisation und Verantwortung;
- Umfang der Befugnisse, um die zugewiesenen Aufgaben durchzuführen (siehe Anhang B);

E DIN 18229-1:2023-02

- Umfang der Befugnisse, die Annahme oder Validierung technischer Verwaltungsdokumente oder Verträge im Namen des Konfektionärs gegenzuzeichnen, z. B. Schweißanweisung, Berichte über die Beaufsichtigung, soweit es zur Erfüllung der zugewiesenen Aufgaben notwendig ist.

6 Technische Kenntnisse und Kompetenz

6.1 Allgemeines

Alle Schweißaufsichtspersonen müssen in der Lage sein, Folgendes nachzuweisen:

- Kompetenz in den ihnen zugewiesenen schweißtechnischen Aufgaben;
- technische Kenntnisse in der Schweißtechnik und in verwandten Technologien entsprechend der zugewiesenen Aufgaben, die durch eine Verbindung aus Wissen, Schulung und/oder Erfahrung erworben sind.

Kompetenz schließt die Anwendung von schweißtechnischen Normen und verwandten Normen ein, falls diese den zugewiesenen Aufgaben entsprechen.

Der Umfang der Berufserfahrung und das für die Schweißaufsicht erforderliche Kompetenzniveau hängen von den Folgen bei Ausfall eines geschweißten Bauteils ab.

Anhang A enthält eine Anleitung für die Beurteilung des Schweißaufsichtspersonals.

6.2 Kompetenzniveau für das Schweißaufsichtspersonal

Das Schweißaufsichtspersonal muss über hochspezialisierte Problemlösungsfähigkeiten verfügen. Diese Fähigkeiten müssen kritische und ursprüngliche Bewertung zur Festlegung und Entwicklung der besten technischen und wirtschaftlichen Lösung bei der Anwendung der Schweißtechnik umfassen.

Es muss in der Lage sein, die Schweißtechnik für die Fertigung von Schweißkonstruktionen, einschließlich hochkomplexer Sachverhalte, zu bewältigen und anzupassen.

Es muss befähigt sein, Entscheidungen zu treffen und schweißtechnologische und mit dem Schweißen verbundene Personalaufgaben zu definieren und zu überprüfen.

Anhang A (normativ)

Beurteilung des Schweißaufsichtspersonals

Das Schweißaufsichtspersonal trägt die Verantwortung für die Herstellung von Schweißungen nach speziellen Anforderungen und unter Berücksichtigung von Schweißbarkeitsproblemen, die in Bezug auf die verwendeten Werkstoffe, Schweißprozesse und Fertigungstechnik(en) auftreten können. Hierzu zählt, sicherzustellen, dass die Schweißnahtqualität erhalten wird und dass Vorschriften, Normen, Spezifikationen und Kundenvorgaben erfüllt werden. Die Beurteilung des Schweißaufsichtspersonals sollte in Bezug auf die Beschaffenheit und/oder Komplexität der Fertigung mindestens Folgendes umfassen:

- vorliegende Erfahrung im Schweißen ähnlicher Produkte nach den bei der Herstellungsorganisation angewandten Normen und vorliegenden Spezifikationen;
- Grad der Erfahrung in der Fertigung mit den vom Konfektionär verwendeten Werkstoffen;
- vorliegende Erfahrung in der Anwendung der bei der Herstellungsorganisation angewandten unterstützenden Schweißnormen und vorliegenden Spezifikationen, z. B. Bericht über die Qualifizierung des Schweißverfahrens, Schweißanweisung, Qualifizierungen für Schweißer und Bediener von Schweißeinrichtungen;
- Verständnis der prCEN/TS 19102 und dieses Dokuments;
- Erfahrung in der Fehlerbehebung bei schweißtechnischen Problemen;
- Kenntnisse wesentlicher schweißtechnischer und mit dem Schweißen verbundener Aufgaben nach Anhang B;
- theoretisches Wissen auf dem Kompetenzniveau nach Abschnitt 6.2.

Die Kompetenzbeurteilung des Schweißaufsichtspersonals sollte eine Überprüfung umfassen und als separates professionelles Interview und/oder während eines Werkstatttrundgangs erfolgen. Nach Möglichkeit sollte die Überprüfung von einer Person durchgeführt werden, die das Kompetenzniveau nach Abschnitt 6.2 hat.

E DIN 18229-1:2023-02

Anhang B (informativ)

Wesentliche schweißtechnische und mit dem Schweißen verbundene Aufgaben, die zu berücksichtigen sind, soweit zutreffend

B.1 Überprüfung der Anforderungen

Folgendes muss bei der Überprüfung der Anforderungen in Betracht gezogen werden:

- a) die Produkthanforderungen nach prCEN/TS 19102 zusammen mit etwaigen ergänzenden Anforderungen;
- b) die Fähigkeit des Konfektionärs, die vorgeschriebenen Anforderungen zu erfüllen.

B.2 Technische Überprüfung

Folgendes muss bei der technischen Überprüfung in Betracht gezogen werden:

- a) Festlegung der/s Grundwerkstoffe(s) und der Eigenschaften der Schweißverbindung;
- b) Lage der Verbindung in Übereinstimmung mit den Konstruktionsanforderungen;
- c) Qualitäts- und Abnahmeanforderungen für Schweißnähte;
- d) Andere schweißtechnische Anforderungen, z. B. Oberflächenvorbereitung, Schweißnahtkontur;
- e) Maße und Einzelheiten der Nahtvorbereitung und der fertigen Schweißnaht.

B.3 Untervergabe

Bei der Untervergabe müssen die Eignung jeglicher Unterlieferanten für die Schweißfertigung sowie die Fähigkeit zur Einhaltung der Qualitätsanforderungen nach prCEN/TS 19102 und nach diesem Dokument geprüft werden.

B.4 Schweißtechnisches Personal

Für das schweißtechnische Personal muss die Qualifizierung der Schweißer und Bediener von Schweißeinrichtungen berücksichtigt werden und die relevanten Vertragsanforderungen müssen erfüllt werden.

B.5 Einrichtungen

Folgendes muss bei den Einrichtungen in Betracht gezogen werden:

- a) Eignung der Schweiß- und Zusatzrichtungen;
- b) Bereitstellung, Kennzeichnung und Handhabung von Hilfsmitteln und Einrichtungen;
- c) persönliche Arbeitsschutz- und sonstige Sicherheitsausrüstungen, die in unmittelbarem Zusammenhang mit dem angewendeten Fertigungsprozess stehen;
- d) Instandhaltung der Einrichtungen;

E DIN 18229-1:2023-02

- e) Verifizierung und Validierung der Einrichtungen.

B.6 Fertigungsplanung

Folgendes muss für die Fertigungsplanung in Betracht gezogen werden:

- a) Verweisung auf geeignete Verfahrensanweisungen für das Schweißen und für verwandte Verfahren;
- b) Reihenfolge, in der die Schweißnähte auszuführen sind;
- c) Umgebungsbedingungen (z. B. Schutz vor Wind, Temperatur und Regen);
- d) Bereitstellung von qualifiziertem Personal;
- e) Vorkehrungen für etwaige Fertigungsprüfungen.

B.7 Qualifizierung von Schweißverfahren

Für die Qualifizierung von Schweißverfahren müssen das Verfahren, der Geltungsbereich sowie alle Variablen berücksichtigt und mit den relevanten Vertragsanforderungen abgeglichen werden.

B.8 Schweißanweisungen

Für Schweißanweisungen muss der Geltungsbereich berücksichtigt werden und dieser muss mit den relevanten Vertragsanforderungen übereinstimmen.

B.9 Arbeitsanweisungen

Für Arbeitsanweisungen muss die Ausstellung und Anwendung von Arbeitsanweisungen berücksichtigt werden.

B.10 Werkstoffe

Folgendes muss für die Werkstoffe in Betracht gezogen werden:

- a) etwaige Zusatzanforderungen für die Lieferbedingungen der Werkstoffe, einschließlich der Art der Prüfbescheinigung für den Werkstoff;
- b) Schweißeignung der zu verwendenden Werkstoffe;
- c) Lagerung und Handhabung des Grundwerkstoffs;
- d) Rückverfolgbarkeit.

B.11 Inspektion und Prüfung vor dem Schweißen

Folgendes muss bei der Inspektion und Prüfung vor dem Schweißen in Betracht gezogen werden:

- a) Eignung und Gültigkeit der Prüfbescheinigung der Schweißer und Bediener;
- b) Eignung der Schweißanweisung;
- c) Kennzeichnung der Grundwerkstoffe;
- d) Nahtvorbereitung (z. B. Form und Maße);

E DIN 18229-1:2023-02

- e) Vorbehandlung des Werkstoffes (z. B. Koronabehandlung, Bedruckung)
- f) Positionierung der Fügepartner, Fixieren und Heften;
- g) besondere Anforderungen in der Schweißanweisung (z. B. Verhinderung von Verzug);
- h) Eignung der Arbeitsbedingungen für das Schweißen, einschließlich der Umgebungsbedingungen.

B.12 Inspektion und Prüfung während des Schweißens

Folgendes muss bei der Inspektion und Prüfung während des Schweißens in Betracht gezogen werden:

- a) wesentliche Schweißparameter (z. B. Schweißstrom, Schweißtemperatur, Schweißgeschwindigkeit);
- b) Kontrolle des Verzugs;
- c) Überprüfung der Überlappung der Fügepartner bzw. der Position des Deckstreifens;
- d) Nachprüfung der Maße.

B.13 Inspektion und Prüfung nach dem Schweißen

Folgendes muss bei der Inspektion und Prüfung nach dem Schweißen in Betracht gezogen werden:

- a) die Durchführung von Sichtprüfungen (auf Vollständigkeit der Schweißung, Schweißnahtmaße, Form);
- b) die Durchführung zerstörungsfreier Prüfungen;
- c) die Durchführung zerstörender Prüfungen;
- d) Form, Gestalt, Toleranzen und Maße des Bauteils.

B.14 Mangelnde Übereinstimmung und Korrekturmaßnahmen

Bei mangelnder Übereinstimmung und Korrekturmaßnahmen müssen die erforderlichen Maßnahmen und Tätigkeiten (z. B. Schweißnahtreparaturen, Nachbewertung der reparierten Schweißnähte, Korrekturmaßnahmen) berücksichtigt werden.

B.15 Kalibrierung und Validierung von Mess-, Inspektions- und Prüfeinrichtungen

Für die Kalibrierung und Validierung von Mess-, Inspektions- und Prüfeinrichtungen müssen erforderliche Verfahren und Tätigkeiten berücksichtigt werden.

B.16 Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit

Folgendes muss bei der Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit in Betracht gezogen werden:

- a) Kennzeichnung von Fertigungsplänen;
- b) Kennzeichnung von Begleitkarten;
- c) Kennzeichnung der Lage der Schweißnähte im Bauteil;
- d) Kennzeichnung der Verfahren für zerstörungsfreie Prüfungen und des Personals;

E DIN 18229-1:2023-02

- e) Kennzeichnung und/oder Rückverfolgbarkeit der Grundwerkstoffe (z. B. Folienprodukt, Produktionscharge, Foliendicke);
- f) Kennzeichnung der Lage von Reparaturen;
- g) Kennzeichnung der Lage von Zusammenbauhilfen;
- h) Rückverfolgbarkeit der Schweißer und Bediener zu speziellen Schweißnähten;
- i) Rückverfolgbarkeit von Schweißanlagen zu speziellen Schweißnähten.
- j) Rückverfolgbarkeit der Schweißer und Bediener zu speziellen Schweißnähten;
- k) Rückverfolgbarkeit von Schweißanweisungen zu speziellen Schweißnähten.

B.17 Qualitätsberichte

Im Hinblick auf Qualitätsberichte müssen die Erstellung und Aufbewahrung der erforderlichen Berichte (einschließlich untervergebener Tätigkeiten) berücksichtigt werden.

Qualitätsberichte müssen, soweit angebracht, Folgendes enthalten:

- a) Bericht über die Überprüfung der Anforderungen/technische Überprüfung;
- b) Werkstoffprüfbescheinigung;
- c) Schweißanweisungen;
- d) Bericht über die Instandhaltung der Einrichtung;
- e) Bericht über die Qualifizierung der Schweißverfahren (WPQR);
- f) Qualifizierungsdokumente der Schweißer und Bediener;
- g) Fertigungsplan;
- h) Dokumente des Personals für zerstörungsfreie Prüfungen;
- i) Anweisungen und berichte der Wärmenbehandlungsverfahren;
- j) Bericht über die zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfverfahren;
- k) Bericht über die Abmessungen;
- l) Bericht über Reparaturen und mangelnden Übereinstimmung;
- m) Andere Dokumente falls erforderlich.

Qualitätsberichte müssen, sofern nicht andere Anforderungen festgelegt sind, mindestens für einen Zeitraum von fünf Jahren aufbewahrt werden.

B.18 Umwelt, Gesundheit und Sicherheit

Hinsichtlich der Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsaspekte müssen alle einschlägigen Regeln und Vorschriften berücksichtigt werden.

Anlage D
E DIN 18229-2, Schweißen von ETFE-Folien für
die Anwendung im Bauwesen – Teil2:
Schweißpersonal – Prüfung von Bedienern und
Einrichtern zum vollautomatischen und
automatischen Schweißen von ETFE-Folien

Datum:2023 Mai

E DIN 18229-2

**Schweißen von ETFE-Folien für die Anwendung im Bauwesen
Teil 2: Schweißpersonal - Prüfung von Bedienern und Einrichtern zum vollmechanischen
und automatischen Schweißen von ETFE-Folien**

Welding of ETFE films for building applications

Part 1: Welding personnel - Qualification testing of welding operators and weld setters for mechanized and automatic welding of ETFE foils

Soudage des films ETFE pour applications de construction

Partie 1: Personnel en soudage - Épreuve de qualification des opérateurs soudeurs et des régleurs en soudage pour le soudage mécanisé et le soudage automatique des films ETFE

Basiert auf:

- *DIN EN ISO 14732:2013-12, Schweißpersonal – Prüfung von Bedienern und Einrichtern zum mechanischen und automatischen Schweißen von metallischen Werkstoffen (ISO 14732:2013); Deutsche Fassung EN ISO 14732 :2013,*
- *DVS-Richtlinie 2212-1:2015-12, Prüfung von Kunststoffschweißern Prüfgruppen I und II,*
- *WIPANO-Forschungsvorhaben „Schweißverbindungen von ETFE-Folien im Bauwesen: Standardisierung, Ausführung, Prüfung und Bemessung“, Förderkennzeichen 03TN0011A.*

Dokument-Typ: Norm

Dokument-Untertyp:

Dokumentstufe: Vorlage

Dokumentsprache: D

STD Version 2.9a

E DIN 18229-2:2023-02

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	5
4 Qualifizierung	7
4.1 Verfahren zur Qualifizierung	7
4.2 Wesentliche Einflussgrößen und Geltungsbereich	7
4.2.1 Allgemeines	7
4.2.2 Automatisches und mechanisches Schweißen	8
4.2.3 Automatisches Schweißen	8
4.2.4 Mechanisches Schweißen	8
5 Präqualifikation von Bedienern und Einrichtern von Schweißeinrichtungen zum Schweißen von ETFE-Folien	8
5.1 Allgemeines	8
5.2 Schulung im Bereich des Werkstoffverhaltens von ETFE-Folien	9
5.2.1 Inhalt der Schulung	9
5.2.2 Prüfung der Inhalte	9
5.3 Schulung im Bereich des Plottens von Zuschnittsbahnen	9
5.3.1 Inhalt der Schulung	9
5.3.2 Prüfung der Inhalte	10
5.4 Schulung im Bereich des Heftens mehrlagiger ETFE-Konstruktionen	10
5.4.1 Inhalt der Schulung	10
5.4.2 Prüfung der Inhalte	10
5.5 Schulung im Bereich der Schweißprozesse, -ausrüstung und ausführung	11
5.5.1 Inhalte der Schulung	11
5.5.2 Prüfung der Inhalte	11
5.6 Gültigkeitsdauer	11
5.7 Prüfungsbescheinigung	12
6 Gültigkeitsdauer	12
6.1 Erstmalige Qualifizierung	12
6.2 Bestätigung der Gültigkeit	12
6.3 Verlängerung der Qualifikation	12
6.4 Entzug der Qualifikation	13
7 Prüfungsbescheinigung	13
8 Dokumentation	13
Anhang A (normativ) Funktionskenntnisse bezogen auf die Schweißeinrichtung	14
Anhang B (informativ) Fachkunde über die Technologie beim Schweißen	15
Anhang C (informativ) Prüfungsbescheinigung für Bediener und Einrichter von Schweißeinrichtungen	17

E DIN 18229-2:2023-02

Vorwort

Dieses Dokument wurde im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) im Arbeitsausschuss NA 005-51-08 AA "Eurocode für Membrantragwerke DIN 18204-1 sowie DIN 4134 (SpA zu CEN/TC 250/WG 5)" erarbeitet.

Dieser Norm-Entwurf basiert auf der DIN EN ISO 14732:2013-12 und wurde auf das Schweißen von ETFE-Folien angepasst.

E DIN 18229-2:2023-02

Einleitung

Mit dieser Norm ist beabsichtigt, die Grundlage für die gegenseitige Qualifizierung von Prüfungen über das Können der Bediener und Einrichter von Schweißeinrichtungen in den verschiedenen Anwendungsgebieten durch die Prüfstellen zu schaffen. Die Prüfungen sind in Übereinstimmung mit dieser Norm durchzuführen, es sei denn, dass gemäß der in Betracht kommenden Anwendungsnorm schwierigere Prüfungen verlangt werden.

Das Können und die Fachkenntnisse des Bedieners oder Einrichters von Schweißeinrichtungen für ETFE-Folien bleiben nur dann erhalten, wenn dieser regelmäßig Schweißarbeiten innerhalb des Zulassungsbereiches ausführt. Eine Prüfung der Funktionskenntnisse bezogen auf die Schweißeinrichtung ist hierfür erforderlich.

Es wird vorausgesetzt, dass der Bediener oder Einrichter von Schweißeinrichtungen einen Lehrgang oder ein Industriepraktikum innerhalb seines Zulassungsbereiches absolviert hat.

Alle neuen Prüfungen müssen vom Tag der Veröffentlichung dieser Norm mit ihr übereinstimmen.

Am Ende der Gültigkeitsdauer darf eine bestehende und gültige Bediener- und Einrichterprüfung auf Basis dieser Norm verlängert werden. Der neue Gültigkeitsbereich beruht auf den Festlegungen dieser Norm.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die Anforderungen für die Qualifizierung von Bedienern und Einrichtern für das mechanische und automatische Schweißen von ETFE-Folien fest.

Dieses Dokument gilt nicht für Personen, die ausschließlich die Schweißeinrichtung beim automatischen Schweißen be- oder entladen.

Dieses Dokument ist anzuwenden, wenn eine Prüfung des Bedieners und Einrichters durch den Vertrag oder durch die Anwendungsnorm verlangt wird.

Anhang A behandelt die Funktionskenntnisse und ist fester Bestandteil dieser Norm. Der Anhang B behandelt die Fachkundeprüfung und der Anhang C enthält eine Prüfungsbescheinigung. Beide Anhänge sind wie die Literaturhinweise informativ.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 1910-3, *Schweißen – Schweißen von Kunststoffen – Verfahren*

DIN EN 10204, *Metallische Erzeugnisse - Arten von Prüfbescheinigungen*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach E DIN 18229-1, -3, -4, -5 und die folgenden Begriffe.

3.1

automatisches Schweißen

Schweißen, wobei alle Vorgänge ohne Eingreifen des Bedieners während des Schweißprozesses ablaufen

Anmerkung 1 zum Begriff: Nachstellen schweißtechnischer Einflussgrößen während des Schweißvorganges von Hand nicht möglich.

3.2

mechanisches Schweißen

Schweißen, bei dem die während des Prozesses erforderlichen variierenden SchweißEinstellungen, auch manuell, über mechanische oder elektronische Einrichtungen ablaufen

3.3

schweißtechnische Prüfung vor Fertigungsbeginn

Koordinierung der Ausführung bei der Herstellung von Schweißungen und für die mit dem Schweißen zusammenhängenden Tätigkeiten. Die Schweißaufsicht kann einer Person oder einem Team zugewiesen werden.

3.4

Fertigungsprüfung

Prüfung, die im Fertigungsbereich an der Schweißeinrichtung, an vorliegenden Teilen in der Fertigung oder an vereinfachten Prüfstücken ausgeführt werden, wobei die Fertigung während dieser Prüfung unterbrochen wird

E DIN 18229-2:2023-02

3.5

Stichprobenprüfung

Prüfung an vorliegenden schweißtechnischen Erzeugnissen, die beim Einsatz einer Schweißeinrichtung aus der fortlaufenden Fertigung entnommen werden

3.6

Programmierung

Einbinden der anerkannten Schweißanweisung und/oder der festgelegten Bewegungen der Schweißeinrichtung in ein Programm

3.7

Einrichten

richtiges Einstellen der Schweißeinrichtung vor dem Schweißen und, falls erforderlich, beim Einspeisen des Roboterprogramms

3.8

Bediener von Schweißeinrichtungen

Person, die beim mechanischen oder automatischen Schweißen die jeweiligen Schweißparameter überwacht oder anpasst

3.9

Einrichter

Person, die mechanische und automatische Schweißeinrichtungen einrichtet

3.10

Schweißeinrichtung

Schweißanlage, eingerichtet mit geeigneten Geräten wie z. B. Einspann- und Aufspannvorrichtungen, Einfädeleinrichtungen, automatischer Vorschub

3.11

Arbeitsweise der Schweißeinrichtung

Starten und, falls notwendig, Stoppen des Fertigungsablaufes, einschließlich Be- und Entladen der Werkstücke

3.12

Prüfer

qualifizierte Person, die benannt ist, um die Übereinstimmung mit der anzuwendenden Norm zu prüfen

Anmerkung 1 zum Begriff: In bestimmten Fällen kann ein unabhängiger externer Prüfer gefordert werden.

3.13

Prüfstelle

Organisation, die benannt ist, um die Übereinstimmung mit der anzuwendenden Norm zu prüfen

Anmerkung 1 zum Begriff: In bestimmten Fällen kann eine unabhängige externe Prüfstelle gefordert werden.

3.14

Schweißvorrichtung

einzelnes Gerät zur Nutzung beim Schweißen, wie z. B. Stromversorgungseinrichtung

3.15

Heizelement-Rollbandschweißen (HR)

Variante des Heizelement-Wärmekontaktschweißen, bei dem das Fügen über zwei temperierte Rollbänder erfolgt. Es handelt sich dabei um ein kontinuierliches Schweißverfahren. Die Fügedauer wird dabei über die Vorschubgeschwindigkeit geregelt wird. Das Heizelement-Rollbandschweißen gilt gemäß DIN 1910-100 als vollmechanisches Schweißverfahren.

3.16**Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI)**

Variante des Heizelement-Wärmekontaktschweißens, bei dem das Fügen einen oder mehrere Heizbalken erfolgt. Der Fügedruck wird meist über den verfahrbaren Heizbalken ausgebracht. Die Schweißmaschinen dieses Schweißverfahrens werden als Balkenschweißmaschinen bezeichnet. Das Heizelement-Wärmeimpulsschweißen gilt gemäß DIN 1910-100 als automatisches Schweißverfahren.

3.17**Heftnaht**

Konstruktive nichttragende Schweißnaht zur Fixierung mehrerer Folienlagen. Die Ausführung erfolgt über einen Hefter.

3.18**Hefter**

Gerät mit dem eine Heftnaht hergestellt wird.

3.19**Folienpaket**

Gehaftete Folienlagen, die mithilfe einer Randschweißnaht gefügt werden.

4 Qualifizierung**4.1 Verfahren zur Qualifizierung**

Die Prüfung von Bedienern und Einrichtern von Schweißeinrichtungen muss nach einer in Übereinstimmung mit E DIN 18229-3 vorbereiteten vorläufigen Schweißanweisung (qWPS) oder Schweißanweisung (WPS) erfolgen.

Die erfolgreiche Absolvierung der Präqualifikation nach Abschnitt 5 ist die Voraussetzung für die Qualifizierung nach diesem Abschnitt. Ist ein Bediener oder Einrichter im Besitz einer gültigen Qualifizierung für einen Schweißprozess, ist keine erneute Präqualifikation zur Verlängerung oder Erweiterung der Qualifizierung im Bereich des bereits qualifizierten Schweißprozesses erforderlich.

Die Bediener oder Einrichter für Schweißeinrichtungen muss auf der Grundlage einer Schweißverfahrensprüfung nach E DIN 18229-4 qualifiziert werden. Die Prüf- und Bewertungskriterien sind in E DIN 18229-4 definiert.

Die Qualifizierung kann durch eine Prüfung der schweißtechnologischen Kenntnisse ergänzt werden. Eine derartige Prüfung ist nicht vorgeschrieben. Anhang B enthält eine Empfehlung für eine derartige Prüfung.

Die Qualifizierung muss durch eine Prüfung der Kenntnisse über die Arbeitsweise der eingesetzten Schweißeinrichtung ergänzt werden, siehe Anhang A.

Die wesentlichen Einflussgrößen und der Geltungsbereich sind in den entsprechenden Unterabschnitten von 4.2 sowie deren Gültigkeit in Abschnitt 5.8 geregelt.

4.2 Wesentliche Einflussgrößen und Geltungsbereich**4.2.1 Allgemeines**

Vorausgesetzt, dass der Bediener oder Einrichter der Schweißeinrichtung seine Arbeit nach einer qualifizierten Schweißanweisung (WPS) durchführt, besteht für den Geltungsbereich der Qualifizierung keine Begrenzung, es sei denn, es wurde anderes als in 4.2.2 festgelegt vereinbart.

E DIN 18229-2:2023-02**4.2.2 Automatisches und vollmechanisches Schweißen**

Die folgenden Änderungen erfordern eine erneute Qualifizierung:

- Wechsel der Variante des Schweißprozesses oder der Schweißeinrichtung;
- Änderung der Schweißnahtvorbereitung, z. B. Entfernung der Bedruckung;
- Wechsel der Schweißnahtart;
- Die Änderung des Bereichs der Foliendicke bei der Herstellung von Flächenschweißnähten:
 - Bereich 1: ETFE-Folien mit einer nominellen Dicke kleiner 100 µm;
 - Bereich 2: ETFE-Folien mit einer nominellen Dicke von 100 µm bis einschließlich 350 µm;
 - Bereich 3: ETFE-Folien mit einer nominellen Dicke größer 350 µm.
- Die Änderung des Bereichs der Paketdicke bei der Herstellung von Randschweißnähten:
 - Bereich 1: Folienpakete mit einer Summe der nominellen Foliendicken kleiner gleich 1200 µm;
 - Bereich 2: Folienpakete mit einer Summe der nominellen Foliendicken größer 1200 µm.

5 Präqualifikation von Bedienern und Einrichtern von Schweißeinrichtungen zum Schweißen von ETFE-Folien**5.1 Allgemeines**

Als Präqualifikation von Bedienern und Einrichtern von Schweißeinrichtungen zum Schweißen von ETFE-Folien gilt der gültige Abschluss der in diesem Abschnitt beschriebenen Schulung. Die Schulung ist in die folgenden vier Bereiche aufgeteilt:

- Schulung im Bereich des Werkstoffverhaltens von ETFE-Folien,
- Schulung im Bereich des Plottens von Zuschnittsbahnen,
- Schulung im Bereich der Schweißnahtvorbereitung,
- Schulung im Bereich des Heftens mehrlagiger ETFE-Konstruktionen,
- Schulung im Bereich der Schweißprozesse, -ausrüstung und -ausführung.

Zum Erwerb der Präqualifikation ist der erfolgreiche Abschluss aller Bereiche notwendig. Der erfolgreiche Abschluss eines Bereiches der Schulung erfolgt durch das Bestehen der Abschlussprüfungen der jeweiligen Bereiche. Die Bereiche und Prüfungen bestehen aus theoretischen und praktischen Inhalten.

Die Vermittlung und Prüfung der vier Schulungsbereiche obliegt dem Konfektionär, der ebenfalls für die hergestellten Schweißnähte verantwortlich ist. Die Vermittlung der Schulungsinhalte hat in geeigneter Form entsprechend der in den Abschnitten 5.2 bis 5.6 beschriebenen theoretischen und praktischen Inhalten zu erfolgen. Die Form der Prüfung der vermittelten Inhalte ist ebenfalls in den Abschnitten beschrieben.

Wird eine Prüfung nicht bestanden, so entscheidet der Konfektionär, ob bzw. wann eine neue Prüfung stattfinden kann. Bei erneutem Nichtbestehen ist der zugehörige Bereich der Schulung zu wiederholen.

Die Ergebnisse der Prüfungen sind zu dokumentieren. Die vier Schulungsbereiche müssen innerhalb von sechs Monaten abgeschlossen werden.

5.2 Schulung im Bereich des Werkstoffverhaltens von ETFE-Folien

5.2.1 Inhalt der Schulung

Die Schulung sollte folgende Inhalte aufweisen:

- Schulung über die schweißstechnisch relevanten Eigenschaften von ETFE-Folien (Theorie):
 - Eigenschaften von Thermoplasten;
 - Allgemeine Werkstoffeigenschaften von ETFE-Folien;
 - Einfluss der Temperatur auf das Werkstoffverhalten von ETFE-Folien (Erweichungstemperatur, Schweißtemperatur, Schmelz- und Zersetzungstemperatur).
- Schulung über die Handhabung und Lagerung von ETFE-Folien (Theorie):
 - Regeln für das Arbeiten mit ETFE-Folien;
 - Hinweise und Maßnahmen für das Arbeiten mit ETFE-Folien;
 - Hinweise und Maßnahmen für die Lagerung von ETFE-Folien.
- Visuelle und manuelle Prüfungen von ETFE-Grundmaterial und -Schweißverbindungen (Praxis):
 - Sichtprüfung von ETFE-Flächen- und -Randschweißnähten gemäß E DIN 18229-5;
 - Zerstörungsfreie, manuelle Abschälprüfungen gemäß E DIN 18229-5;
 - Manuelle Zug- und Abschälprüfungen gemäß E DIN 18229-5.
- Schulung über Wareneingangskontrolle (Praxis):
 - Überprüfung der Materialparameter des Datenblattes anhand des mitgelieferten Abnahmeprüfzeugnisses 3.1 (APZ 3.1) nach DIN EN 10204 oder eigenen Messungen;
 - Erstellen von Rückstellmustern.

5.2.2 Prüfung der Inhalte

Siehe Abschnitt 5.7.

5.3 Schulung im Bereich des Plattens von Zuschnittsbahnen

5.3.1 Inhalt der Schulung

Die Schulung sollte folgende Inhalte aufweisen:

- Auslegen der Rollware und Durchführung einer Sichtprüfung gemäß E DIN 18229-5 (Praxis),
- Bedeutung und Platzierung von Bezeichnungen und Kennzeichen (Theorie),

E DIN 18229-2:2023-02

- Plotten der Zuschnittsbahnen (Praxis):
 - Einrichten des Plotters und Einlesen der Zuschnittsdaten;
 - Bedienen des Plotters;
 - Sichtprüfung der Zuschnittsbahnen gemäß E DIN 18229-5;
 - Kontrolle der Abmessungen der hergestellten Zuschnittsbahn.

5.3.2 Prüfung der Inhalte

Siehe Abschnitt 5.7.

5.4 Schulung im Bereich der Schweißnahtvorbereitung

5.4.1 Inhalt der Schulung

Die Schulung sollte folgende Inhalte aufweisen:

- Begrenzung des Bereichs der zu entfernenden Bedruckung;
- Auswahl eines geeigneten Lösemittels;
- Auswahl geeigneter Werkzeuge;
- Methoden zum Entfernen der Bedruckung im Bereich der Schweißnaht.

5.4.2 Prüfung der Inhalte

Siehe Abschnitt 5.7.

5.5 Schulung im Bereich des Heftens mehrlagiger ETFE-Konstruktionen

5.5.1 Inhalt der Schulung

Die Schulung sollte folgende Inhalte aufweisen:

- Einbau geplanter Ventile in die einzelnen Folienlagen (Praxis):
 - Stanzen der vorgesehenen Öffnungen;
 - Einbau der Ventilflansche und Ventile.
- Heften des Folienpakets (Praxis):
 - Positionierung der Folienlagen;
 - Einrichten und Bedienen des Hefters;
 - Anfertigung der Heftnähte.

5.5.2 Prüfung der Inhalte

Siehe Abschnitt 5.7.

5.6 Schulung im Bereich der Schweißprozesse, -ausrüstung und ausführung

Die Schulung ist für jede im Betrieb verwendete Variante des Heizelementschweißens (HR und HI) separat zu absolvieren.

5.6.1 Inhalte der Schulung

Die Schulung sollte folgende Inhalte aufweisen:

- Einrichten und Bedienen der Schweißeinrichtung (Praxis);
- Vorbereitung der Fügepartner (z. B. Entfernen der Bedruckung) (Praxis);
- Positionierung und Fixierung bzw. Einfädeln der Fügepartner (Praxis);
- Qualitätsanforderungen an die verschiedenen Schweißnahttypen und -arten (Praxis);
- Herstellung der verschiedenen Schweißnahtarten (Praxis):
 - Herstellung einer Überlappnaht;
 - Herstellung einer Stoßnaht mit Deckstreifen;
 - Herstellung einer Randschweißnaht mit Kederfahne;
 - Herstellung einer Randschweißnaht mit Umschlag.

5.6.2 Prüfung der Inhalte

Siehe Abschnitt 5.7.

5.7 Prüfung

Die erworbenen Kenntnisse der vermittelten theoretischen und praktischen Inhalte sind in den folgenden Prüfungen zu ermitteln. Zum Bestehen des Schulungsbereiches sind alle Prüfungen zu bestehen.

- Separat zu bestehende praktische Prüfungen:
 - Herstellung einer Flächenschweißnaht als Überlappnaht zweier 250 µm dicken, klaren ETFE-Folien;
 - Bewertung der hergestellten Schweißnahtproben anhand von manuellen Prüfungen gemäß E DIN 18229-5,
 - Herstellung einer Randschweißnaht mit Kederfahne eines Folienpaketes mit einer Mindestdicke von 700 µm,
 - Bewertung der hergestellten Schweißnahtproben anhand von nichtmaschinellen Prüfungen gemäß E DIN 18229-5.

5.8 Gültigkeitsdauer

Die Gültigkeit der Präqualifikation als Bediener für Schweißeinrichtungen beginnt mit dem Datum der letzten bestandenen Abschlussprüfung der Präqualifikation. Die Präqualifikation ist sechs Monate gültig.

E DIN 18229-2:2023-02**5.9 Prüfungsbescheinigung**

Der Abschluss eines Bereichs der Präqualifikation ist in der Prüfbescheinigung, siehe Anhang C, einzutragen. Der Erwerb der Präqualifikation sowie das entsprechende Gültigkeitsdatum ist ebenfalls in der Prüfbescheinigung zu dokumentieren.

6 Gültigkeitsdauer**6.1 Erstmalige Qualifizierung**

Die Gültigkeit der Prüfbescheinigung als Bediener oder Einrichter für Schweißeinrichtungen beginnt mit dem Datum der Auswertung der/des Prüfstücke/s, vorausgesetzt, dass die erforderliche Prüfung durchgeführt wurde und die erhaltenen Prüfergebnisse akzeptiert wurden. Die Prüfbescheinigung ist alle sechs Monate zu bestätigen, sonst wird sie ungültig.

Die Gültigkeit der Prüfbescheinigung kann, wie in 6.3 beschrieben, verlängert werden. Die ausgewählte Art der Verlängerung der Qualifizierung nach 6.3 a), b) oder c) ist am Ausstellungsdatum auf der Prüfbescheinigung anzugeben.

6.2 Bestätigung der Gültigkeit

Die Gültigkeit der Prüfbescheinigung eines Bedieners oder Einrichters für Schweißeinrichtungen für einen Schweißprozess muss alle sechs Monate von einer Person, die für die Schweißaktivität zuständig ist oder von einem Prüfer/Prüfstelle bestätigt werden. Diese bestätigt, dass der Bediener oder Einrichter für Schweißeinrichtungen innerhalb des Geltungsbereiches gearbeitet hat und verlängert die Gültigkeit der Prüfbescheinigung für weitere sechs Monate.

Dieser Abschnitt ist für alle Optionen der Verlängerung der Qualifikation in 6.3 anwendbar.

6.3 Verlängerung der Qualifikation

Die Verlängerung der Qualifikation ist durch den Konfektionär durchzuführen.

Die Kompetenz des Bedieners oder Einrichters für die Schweißeinrichtungen muss periodisch durch eine der folgenden Verfahren geprüft werden:

- a) Der Bediener oder Einrichter für das Schweißen muss alle sechs Jahre erneut geprüft werden.
- b) Alle drei Jahre müssen zwei Schweißungen, die während der letzten sechs Monate der Gültigkeitsdauer gemacht wurden, erfolgreich geprüft worden sein. Die Prüfstücke müssen dabei nachweislich unter der Verantwortung des Bedieners hergestellt worden sein. Diese Prüfungen verlängern die Prüfbescheinigung für zusätzliche drei Jahre.
- c) Jede Prüfbescheinigung ist gültig, solange sie nach 6.2 bestätigt und alle folgenden Bedingungen erfüllt wurden:
 - der Bediener oder Einrichter für Schweißeinrichtungen arbeitet für denselben Konfektionär, für den er oder sie qualifiziert ist und der für die Fertigung des Produktes verantwortlich ist,
 - dass der Konfektionär über das Inspektionslevel 3 gemäß prCEN/TS 19102 verfügt,
 - der Konfektionär hat dokumentiert, dass der Bediener oder Einrichter für Schweißeinrichtungen Schweißungen von annehmbarer Qualität auf der Grundlage der Kriterien gemäß E DIN-18229-5 hergestellt hat.

6.4 Entzug der Qualifikation

Gibt es berechtigten Zweifel an der Fähigkeit des Bedieners oder Einrichters von Schweißeinrichtungen die Qualitätsanforderungen des Produktstandards zu erfüllen, muss ihr oder ihm die Prüfbescheinigung entzogen werden. Alle anderen Qualifikationen, die nicht angezweifelt werden, behalten ihre Gültigkeit.

7 Prüfungsbescheinigung

Der Konfektionär muss bescheinigen, dass der Bediener oder Einrichter von Schweißeinrichtungen die Prüfung erfolgreich bestanden hat. Alle entscheidenden Prüfbedingungen müssen auf der Prüfbescheinigung aufgeführt werden. Wenn der Bediener oder Einrichter von Schweißeinrichtungen eine der vorgeschriebenen Prüfungen nicht bestanden hat, darf keine Prüfbescheinigung ausgestellt werden.

Die Prüfbescheinigung muss unter der alleinigen Verantwortung des Konfektionärs ausgestellt werden. Anhang C enthält einen Vorschlag für eine Prüfbescheinigung.

Jede Änderung der wesentlichen Einflussgrößen für die Prüfung außerhalb des zulässigen Geltungsbereiches erfordert eine neue Prüfung und eine neue Prüfbescheinigung.

8 Dokumentation

Prüfbescheinigung und Prüfbericht/Berichte über die Prüfung von Schweißungen sowie Verlängerungen sind verfügbar aufzubewahren.

E DIN 18229-2:2023-02

Anhang A **(normativ)**

Funktionskenntnisse bezogen auf die Schweißeinrichtung

A.1 Allgemeines

Dieser Anhang erfasst die Funktionskenntnisse bezogen auf die Schweißeinrichtung, die ein Bediener oder Einrichter von Schweißeinrichtungen haben muss, um sicherzustellen, dass die Verfahrensvorgaben befolgt und die üblichen Praktiken erfüllt werden.

A.2 Schweißfolgen/Verfahren bei dem entsprechenden Prozess

Verständnis für die Anforderungen an das Schweißverfahren und für den Einfluss der Schweißparameter.

A.3 Nahtvorbereitung und Beschreibung des Schweißens bei dem entsprechenden Prozess

- a) Übereinstimmung der Nahtvorbereitung zum Schweißen mit der Schweißanweisung (WPS).
- b) Sauberkeit des Überlappbereichs bzw. der Fugenkante.

A.4 Schweißnaht-Unregelmäßigkeiten bei dem entsprechenden Prozess

- a) Bestimmung der Schweißnaht-Unregelmäßigkeiten.
- b) Gründe.
- c) Verhüten und Abhilfemaßnahmen.

A.5 Prüfung des Bedieners von Schweißeinrichtungen

Der Bediener oder Einrichter von Schweißeinrichtungen muss über den Geltungsbereich unterrichtet sein.

A.6 Prozessabläufe

- a) Programmierkenntnis (falls sinnvoll).
- b) Kenntnis des Überwachungssystems und der Signale, die dieses System abgibt.
- c) Bewegungssystem.
- d) Hilfseinrichtungen.
- e) Vorrichtungen und Spanneinheiten sowie Einrichten derselben.
- f) Parameter und Einstellungen innerhalb der vorliegenden Verfahren.
- g) Sicherheitsregeln und Vorsichtsmaßnahmen.
- h) Start-Stop-Verfahren.

14

Anhang B (informativ)

Fachkunde über die Technologie beim Schweißen

B.1 Allgemeines

Die Fachkundeprüfung wird empfohlen, ist aber nicht vorgeschrieben. Wenn die Fachkundeprüfung durchgeführt wurde, sollte dies auf der Prüfbescheinigung für den Bediener oder Einrichter von Schweißeinrichtungen vermerkt werden.

Dieser Anhang erfasst die Fachkunde, die ein Bediener oder Einrichter von Schweißeinrichtungen haben sollte, um sicherzustellen, dass die Verfahrensvorgaben befolgt und die üblichen Praktiken erfüllt werden. Bei der Fachkunde, auf die in diesem Anhang hingewiesen wird, handelt es sich nur um die notwendigen Grundkenntnisse.

In diesem Anhang werden nur allgemeine Ziele und Kategorien der Fachkunde vorgestellt. Die tatsächlich gestellten Fragen sollten vom Konfektionär aufgestellt werden, jedoch sollten sie die Fragen entsprechend der anstehenden Prüfung des Bedieners von Schweißeinrichtungen aus dem Bereich von Abschnitt B.2 enthalten.

Die tatsächlichen Prüfungen über die fachkundlichen Kenntnisse eines Bedieners oder Einrichter von Schweißeinrichtungen können nach einer der folgenden Methoden oder Kombination aus diesen durchgeführt werden:

- a) Schriftliche Zielsetzungsprüfung (Auswahlfragen);
- b) Mündliche Befragung entsprechend eines schriftlichen Fragenkatalogs;
- c) Prüfung entsprechend EDV-Programm;
- d) Vorführungs-/Beobachtungsprüfung entsprechend eines schriftlichen Merkmalskatalogs.

Die Fachkundeprüfung beschränkt sich inhaltlich auf die in der Prüfung benutzte Variante des Schweißprozesses.

B.2 Anforderungen

B.2.1 Schweißeinrichtung

B.2.1.1 Heizelement-Rollbandschweißen (HR)

- a) Auswahl der Einfädel-Vorrichtung.
- b) Kenntnisse über den Einfädelprozess während des Schweißens.
- c) Kriterien der Sichtprüfung während des Schweißens.
- d) Vorgehen und Maßnahmen bei gekrümmten Schweißnähten.
- e) Einstellung der Schweißparameter (z. B. Heizelemente, Fügedruck, Vortriebsgeschwindigkeit)
- f) ...

E DIN 18229-2:2023-02

B.2.1.2 Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI)

- a) Kenntnisse über die Positionierung der Fügepartner vor dem Schweißen.
- b) Entfernen der Fügepartner nach Herstellung der Schweißnaht.
- c) Einstellung der Schweißparameter (z. B. Heizelemente, Fügedruck, Fügedauer)
- d) ...

B.2.2 Sicherheit und Unfallverhütung

- a) Elektrische Gefahr.
- b) Gefahr durch erhitzte Gegenstände.
- c) Lärmgefahr
- d)

E DIN 18229-2:2023-02

Anhang C
(informativ)

**Prüfungsbescheinigung für Bediener und Einrichter von
Schweißeinrichtungen**

Konfektionär-Schweißanweisung

Prüfer:

Beleg-Nr. (falls verfügbar):

Name des Bediener/Einrichters:

Beleg-Nr.

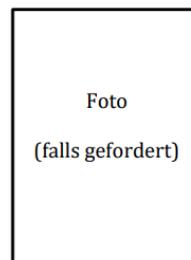
Legitimation:

Art der Legitimation:

Geburtsdatum und -ort:

Beschäftigt bei:

Vorschrift/Prüfnorm:



Prüfung der Funktionskenntnisse (vorgeschrieben):

Fachkunde: bestanden/nicht geprüft (Unzutreffendes durchstreichen)

**Präqualifikation von Bedienern von Schweißeinrichtungen zum Herstellen von
Schweißnähten von ETFE-Folien**

Bereich	Art der Prüfung	Datum der bestandenen Prüfung
Werkstoffverhalten von ETFE-Folien	Schriftliche Zielsetzungsprüfung	
	Praktische Prüfung	
Plotten von Zuschnittsbahnen	Praktische Prüfung	
Heften mehrlagiger Folienkonstruktionen	Praktische Prüfung	
Schweißprozesse, -ausrüstung und -ausführung (HR)	Schriftliche Zielsetzungsprüfung	
	Praktische Prüfung	
Schweißprozesse, -ausrüstung und -ausführung (HI)	Schriftliche Zielsetzungsprüfung	
	Praktische Prüfung	

E DIN 18229-2:2023-02

Qualifizierung auf Basis einer Schweißverfahrensprüfung gemäß E DIN 18229-4

Variante des Schweißprozesses:					
Schweißeinrichtung:					
Schweißnahtart:					
Schweißnahtvorbereitung:					
Bereich der Folien- bzw. Paketdicke:					
Bereich der Schweißnahtkrümmung:					
WPQR-Nr. der zugrundeliegenden Schweißanweisung:					
Name, Datum, Unterschrift:					
Prüfer:					
Datum des Schweißens:					
Ort:					
Gültig bis:					
Verlängerung der Prüfbescheinigung für die folgenden 6 Jahre durch den Prüfer (siehe Abschnitt 6)			Verlängerung der Prüfbescheinigung für die folgenden 6 Monate durch den Arbeitgeber/Schweißaufsicht (siehe Abschnitt 6)		
			Datum	Unterschrift	Stellung Titel

Anlage E

E DIN 18229-3, Schweißen von ETFE-Folien für
die Anwendung im Bauwesen – Teil 3:
Anforderung und Qualifizierung von
Schweißverfahren für ETFE-Folien –
Schweißanweisung

Datum:2023 Mai

E DIN 18229-3

**Schweißen von ETFE-Folie für die Anwendung im Bauwesen
Teil 3: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für ETFE-Folien -
Schweißanweisung**

Welding of ETFE films for building applications

Part 3: Specification and qualification of welding procedures for ETFE foils – Welding procedure specification

Soudage des films ETFE pour applications de construction

Partie 3: Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les films ETFE – Descriptif d'un mode opératoire de soudage

Basiert auf:

- *DIN EN ISO 15609-1:2019-12, Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißanweisung – Teil 1: Lichtbogenschweißen (ISO 15609-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 15609-1:2019,*
- *DIN 35230:2016-09, Kunststoffe – Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen – Angaben zu Schweißverfahren; Deutsche Fassung CEN/TS 16892:2015,*
- *DIN-Fachbericht ISO/TR 25901:2008-11, Schweißen und verwandte Verfahren – Terminologie,*
- *WIPANO-Forschungsvorhaben „Schweißverbindungen von ETFE-Folien im Bauwesen: Standardisierung, Ausführung, Prüfung und Bemessung“, Förderkennzeichen 03TN0011A.*

Dokument-Typ: Norm
Dokument-Untertyp:
Dokumentstufe: Vorlage
Dokumentsprache: D

STD Version 2.9a

E DIN 18229-3:2023-02

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriff	5
4 Technischer Inhalt der Schweißanweisung (WPS)	9
4.1 Allgemeines	9
4.2 Bezogen auf den Hersteller	9
4.3 Bezogen auf den Grundwerkstoff	9
4.4 Gemeinsam für alle Schweißverfahren	10
4.5 Spezifische Angaben der angewandten Variante des Heizelement-Kontaktschweißens	10
4.5.1 Heizelement-Rollbandschweißen (HR)	10
4.5.2 Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI)	10
Anhang A (informativ) Schweißanweisung (WPS) – Heizelement-Rollbandschweißen (HR)	11
Anhang B (informativ) Schweißanweisung (WPS) – Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI)	12

E DIN 18229-3:2023-02

Vorwort

Dieses Dokument wurde im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) im Arbeitsausschuss NA 005-51-08 AA "Eurocode für Membrantragwerke DIN 18204-1 sowie DIN 4134 (SpA zu CEN/TC 250/WG 5)" erarbeitet.

Dieser Norm-Entwurf basiert auf der DIN EN ISO 15609-1:2019-12 und wurde auf das Schweißen von ETFE-Folien angepasst.

E DIN 18229-3:2023-02

Einleitung

Sämtliche neuen Schweißanweisungen müssen nach diesem Dokument ab dem Datum seiner Veröffentlichung erarbeitet werden.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die Anforderungen an den Inhalt der Schweißanweisung für das Heizelement-Rollbandschweißens (HR) und das Heizelement-Wärmeimpulsschweißens (HI) gemäß DIN 1910-3 fest.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 1910-3, *Schweißen – Schweißen von Kunststoffen - Verfahren*

3 Begriff

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach E DIN 18229-1, -2, -4 und die folgenden Begriffe.

3.1

Schweißverfahren

vorgeschriebener Ablauf von Tätigkeiten, der zur Herstellung einer Schweißung zu befolgen ist, einschließlich der(s) Schweißprozesse(s), der Hinweise auf die Werkstoffe, die Schweißzusätze, die Vorbereitung, die Vorwärmung (falls notwendig), Verfahren und die Überwachung des Schweißens sowie die notwendigen eingesetzten Einrichtungen

3.2

Schweißprozess

Verfahren charakterisiert durch eine Methode des Plastizierens, um eine dauerhafte Verbindung zu erhalten

3.3

Schweißanweisung

WPS

Dokument, das durch ein Verfahren qualifiziert wurde und die erforderlichen Einflussgrößen des Schweißverfahrens enthält, um die Wiederholbarkeit beim Schweißen in der Fertigung sicherzustellen.

3.4

Arbeitsanweisung

vereinfachte Schweißanweisung (WPS), die für die direkte Anwendung geeignet ist

3.5

Bericht über die Qualifizierung des Schweißverfahrens

WPQR

(en: welding procedure qualification record)

Bericht, der alle erforderlichen Daten enthält, die für die Qualifizierung einer vorläufigen Schweißanweisung benötigt werden.

3.6

wesentliche Einflussgröße

schweißtechnische Bedingung, die die Qualität der geschweißten Verbindung beeinflusst und eine Qualifizierung erfordert

3.7

unwesentliche Einflussgröße

E DIN 18229-3:2023-02

schweißtechnische Bedingung, die in der WPS angegeben ist, aber keine Qualifizierung erfordert

**3.8
Vorläufige Schweißanweisung
pWPS**

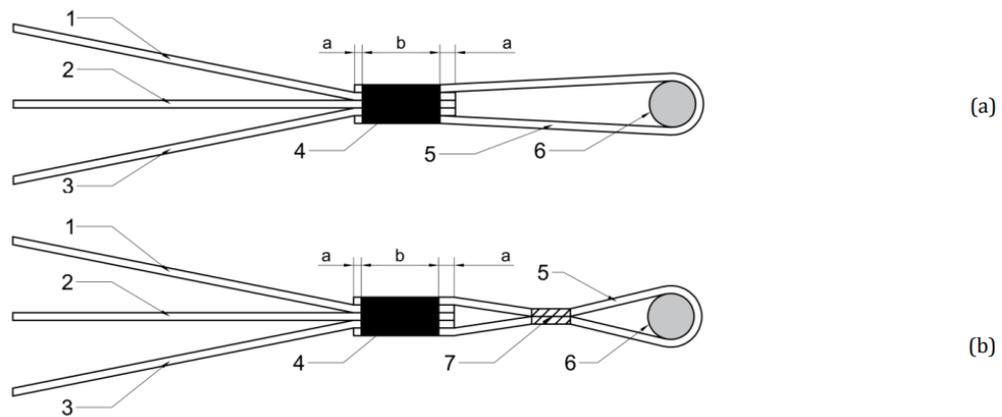
(en: preliminary Welding Procedure Specification)

Dokument, das die erforderlichen Einflussgrößen eines Schweißverfahrens enthält und noch zu qualifizieren ist

**3.9
Schweißverfahrensprüfung**

Herstellung und Prüfung eines genormten Prüfstücks entsprechend der Angabe in der pWPS, um ein Schweißverfahren zu qualifizieren

**3.10
Randschweißnaht als Kederanschluss eines mehrlagigen Folienkissens mit Kederfahne (en: edge weld seam as keder connection of a multi-layer construction)**



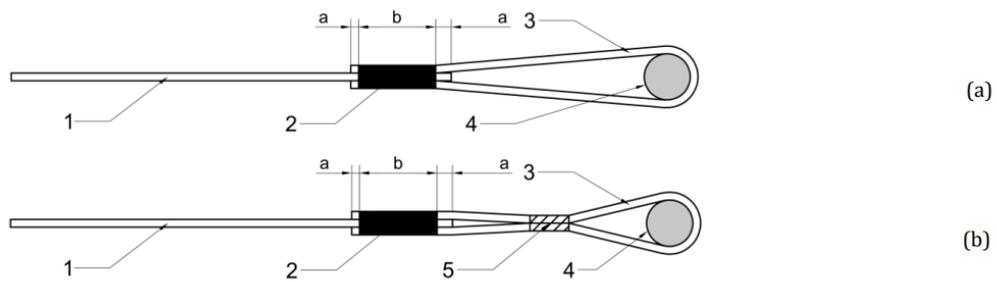
Legende

- 1 Obere Folienlage der Kissenkonstruktion (OL, en: outer layer)
- 2 Mittlere Folienlage der Kissenkonstruktion (ML, en: middle layer)
- 3 Innere Folienlage der Kissenkonstruktion (IL, en: inner layer)
- 4 Überlappnaht
- 5 Kederfahne
- 6 Keder
- 7 Konstruktive Schweißnaht der Kederfahne zur Fixierung des Keders
- a Überstand ≤ 1 mm
- b Minimale Schweißnahtbreite ≥ 6 mm mit einer Toleranz von 1 mm

Bild 1 – Querschnitt einer Randschweißnaht als Kederanschluss am Beispiel eines dreilagigen Folienkissens (a) ohne und (b) mit konstruktiver Schweißnaht

**3.11
Randschweißnaht als Keder-/Seiltasche einer einlagigen Folienkonstruktion mit Kederfahne (en: edge weld seam as keder/cable connection of a single-layer construction)**

E DIN 18229-3:2023-02



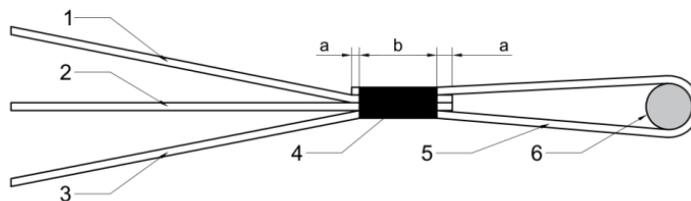
Legende

- 1 Anzuschließende Folienlage
- 2 Überlappnaht
- 3 Kederfahne
- 4 Keder oder Seil
- 5 Konstruktive Schweißnaht der Kederfahne zur Fixierung des Keders
- a Überstand ≤ 1 mm
- b Minimale Schweißnahtbreite ≥ 6 mm mit einer Toleranz von 1 mm

Bild 2 – Querschnitt einer Randschweißnaht als Keder-/Seiltasche einer einlagigen Folienkonstruktion (a) ohne und (b) mit konstruktiver Schweißnaht

3.12

Randschweißnaht als Kederanschluss eines mehrlagigen Folienkissens mit Umschlagkeder (en: edge weld seam as keder connection of a multi-layer construction as an envelope)



Legende

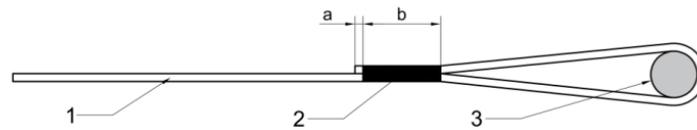
- 1 Obere Folienlage der Kissenkonstruktion (OL, eng. outer layer)
- 2 Mittlere Folienlage der Kissenkonstruktion (ML, eng. middle layer)
- 3 Innere Folienlage der Kissenkonstruktion (IL, eng. inner layer)
- 4 Überlappnaht
- 5 Kederfahne
- 6 Keder
- a Überstand ≤ 1 mm
- b Minimale Schweißnahtbreite ≥ 6 mm mit einer Toleranz von 1 mm

Bild 3 – Querschnitt einer Randschweißnaht als Kederanschluss am Beispiel eines dreilagigen Folienkissens (a) ohne und (b) mit konstruktiver Schweißnaht

3.13

Randschweißnaht als Keder-/Seiltasche einer einlagigen Folienkonstruktion mit Umschlagkeder (en: edge weld seam as keder/cable connection of a single-layer construction as an envelope)

E DIN 18229-3:2023-02



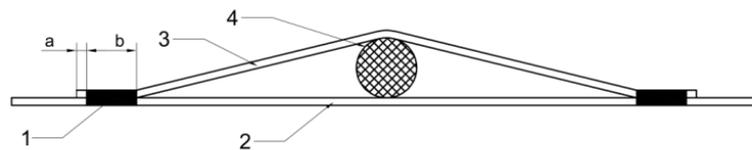
Legende

- 1 Anzuschließende Folienlage
- 2 Überlappnaht
- 3 Keder
- a Überstand ≤ 1 mm
- b Minimale Schweißnahtbreite ≥ 6 mm mit einer Toleranz von 1 mm

Bild 4 – Querschnitt einer Randschweißnaht als Keder-/Seiltasche einer einlagigen Folienkonstruktion als Umschlag

3.14

Flächenschweißnaht einer Seiltasche (en: area weld seam of a cable pocket)



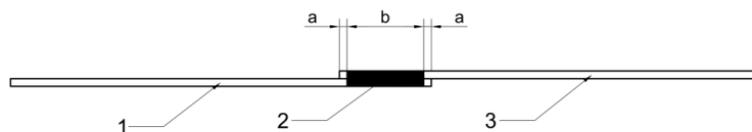
Legende

- 1 Überlappnaht
- 2 Anzuschließende Folienlage
- 3 Seiltasche
- 4 Seil
- a Überstand ≤ 1 mm
- b Minimale Schweißnahtbreite ≥ 6 mm mit einer Toleranz von 1 mm

Bild 5 – Querschnitt einer Seiltasche

3.15

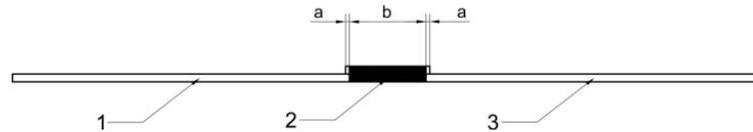
Flächenschweißnaht als Überlappnaht (en: area weld seam as overlap weld)



Legende

- 1 Zuschnittsbahn 1 bzw. Fügepartner 1
- 2 Überlappnaht
- 3 Zuschnittsbahn 2 bzw. Fügepartner 2
- a Überstand ≥ 1 mm
- b Minimale Schweißnahtbreite ≥ 6 mm mit einer Toleranz von 1 mm

Bild 6 – Querschnitt einer Flächenschweißnaht als Überlappnaht

3.16**Flächenschweißnaht als Stoßnaht mit Deckstreifen (en: area weld seam as backstrip weld)****Legende**

- 1 Zuschnittsbahn 1 bzw. Fügepartner 1
- 2 Deckstreifen
- 3 Zuschnittsbahn 2 bzw. Fügepartner 2
- a Überstand ≤ 1 mm
- b Minimale Schweißnahtbreite ≥ 6 mm mit einer Toleranz von 1 mm

Bild 7 – Querschnitt einer Flächenschweißnaht als Stoßnaht mit Deckstreifen**4 Technischer Inhalt der Schweißanweisung (WPS)****4.1 Allgemeines**

Eine vorläufige Schweißanweisung/Schweißanweisung (pWPS/WPS) muss alle notwendigen Angaben enthalten, die zur Herstellung einer Schweißung erforderlich sind. Die in einer pWPS/WPS erforderlichen Angaben sind in 4.2 bis 4.5 wiedergegeben.

Für einige Anwendungsfälle kann eine Ergänzung oder Verringerung der Anforderungsliste erforderlich sein.

Schweißanweisungen gelten für alle Bereiche, die notwendige Angaben enthalten, die zur Herstellung einer Schweißung erforderlich sind. Einige Hersteller bevorzugen das Erstellen von zusätzlichen Arbeitsanweisungen für jede besondere Arbeitsaufgabe als Teil der ausführlichen Fertigungsplanung.

Die Bereiche und die zulässigen Abweichungen müssen, wenn geeignet, nach der entsprechenden Norm und nach der Erfahrung des Herstellers festgelegt werden.

Anhang A und Anhang B enthalten Beispiele von Vordrucken für Schweißanweisungen für das HR- und das HI-Verfahren.

4.2 Bezogen auf den Hersteller

- Kennzeichnung des Herstellers;
- Kennzeichnung der WPS;
- Verweisung auf den Bericht über die Qualifizierung des Schweißverfahrens (WPQR, en: Welding Procedure Qualification Report) oder auf andere Dokumente, soweit erforderlich.

4.3 Bezogen auf den Grundwerkstoff

- Folienhersteller und -produkt;
- Nominelle Foliendicke [μm];
- Angaben zur Art der Folie (klar/pigmentiert/mattiert);

E DIN 18229-3:2023-02

— Angaben zur Vorbehandlung der Folie (Laminat/Koronabehandlung/Bedruckung).

4.4 Gemeinsam für alle Schweißverfahren

- Bereich der Umgebungstemperatur [°C];
- Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit [%];
- Angewandte Variante des Heizelement-Kontaktschweißens (HR/HI);
- Nominelle Schweißnahtbreite [mm];
- Eine Skizze der Verbindung/Verbindungsanordnung mit Maßen oder Verweisung auf Dokumente, die solche Angaben enthalten.

4.5 Spezifische Angaben der angewandten Variante des Heizelement-Kontaktschweißens

4.5.1 Heizelement-Rollbandschweißen (HR)

Die folgenden Angaben sind in Abhängigkeit der Kennzeichnung der geschweißten Schweißnaht bzw. Schweißnahtnummer festzuhalten:

- Schweißtemperaturen des oberen und des unteren Rollbandes [°C];
- Bereich der Kühltemperatur [°C];
- Vortriebsgeschwindigkeit [m/s];
- Fügedruck [bar].

4.5.2 Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI)

Die folgenden Angaben sind in Abhängigkeit der Kennzeichnung der geschweißten Schweißnaht bzw. Schweißnahtnummer festzuhalten:

- Schweißtemperatur bzw. elektrische Leistung des oberen und des unteren Heizbalkens [°C] bzw. [W];
- Bereich der Kühltemperatur [°C];
- Fügedruck und Kühldruck [bar];
- Fügedauer [s];
- Kühldauer [s].

E DIN 18229-3:2023-02

Anhang A (informativ)

Schweißanweisung (WPS) – Heizelement-Rollbandschweißen (HR)¹

Allgemeines

Kennzeichen der Schweißorganisation²:
 Kennzeichen/Nr. der Schweißanweisung/Revision:
 Kennzeichen/Nr. des WPQR/Revision:
 Erstellungsdatum:

Umgebungsbedingungen

Bereich der Umgebungstemperatur [°C]:
 Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit [%]:

Grundwerkstoff

Folienhersteller und -produkt:
 Nominelle Foliendicke(n)³ [µm]:
 Folienart⁴:
 Vorbehandlung⁵:

Ausführung der Schweißverbindung

Schweißnahttyp und -art⁶:
 Nominelle Schweißnahtbreite [mm]:

Schweißparameter

Schweißnaht- nummer	Schweißtemperaturen oberes/unteres Rollband °C	Bereich der Kühltemperatur °C	Vortriebs- geschwindigkeit m/s	Füge- druck bar

Bediener und Einrichter der Schweißeinrichtung⁷

Name	Vorname	Unterschrift

¹ Dem Anwender dieses Formblattes ist unbeschadet der Rechte des DIN an der Gesamtheit des Dokumentes die Vervielfältigung des Formblattes gestattet

² Ausführender Betrieb

³ z.B.: Im Falle einer Randschweißnaht alle Foliendicken des Folienpaketes mit Bezeichnung der Folienlage bzw. der Kederfahne eintragen

⁴ z.B.: klar, pigmentiert

⁵ z.B. Koronabehandlung, Bedruckung bzw. Entfernung der Bedruckung

⁶ Flächenschweißnaht als Überlappnaht (AW-OV, en: Area Weld Seam as Overlapp Weld) oder als Stoßnaht mit Deckstreifen (AW-OV, en: Area Weld Seam as Backstrip Weld), Randschweißnaht als Kederanschluss (EWK, en: Edge Weld Seam as Keder Connection) odeor Randschweißnaht als Seiltasche (EWC, en: Edge Weld Seam as Cable Pocket), Seiltasche (CP, en: Cable Pocket)

⁷ Alle an der Herstellung des Prüfstücks beteiligten Bediener und Einrichter sind hier einzutragen

E DIN 18229-3:2023-02

Anhang B
(informativ)

Schweißanweisung (WPS) – Heizelement-Wärmeimpulsschweißen (HI)¹

Allgemeines

Kennzeichen der Schweißorganisation²:
 Kennzeichen/Nr. der Schweißanweisung/Revision:
 Kennzeichen/Nr. des WPQR/Revision:

Umgebungsbedingungen

Bereich der Umgebungstemperatur [°C]:
 Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit [%]:

Grundwerkstoff

Folienhersteller und -produkt:
 Nominelle Foliendicke(n)³ [µm]:
 Folienart⁴:
 Vorbereitung, Reinigung, Vorbehandlung⁵:

Ausführung der Schweißverbindung

Schweißnahttyp und -art⁶:
 Nominelle Schweißnahtbreite [mm]:

Schweißparameter

Schweißnaht- nummer	Schweißtemperatur/elektr. Leistung oberer/unterer Heizbalken °C bzw. W	Bereich der Kühltemperatur °C	Fügedruck/ Kühldruck bar	Schweiß- dauer s	Kühl- dauer s

Bediener und/oder Einrichter der Schweißeinrichtung⁷

Name	Vorname	Unterschrift

¹ Dem Anwender dieses Formblattes ist unbeschadet der Rechte des DIN an der Gesamtheit des Dokumentes die Vervielfältigung des Formblattes gestattet

² Ausführender Betrieb

³ z.B.: Im Falle einer Randschweißnaht alle Foliendicken des Folienpaketes mit Bezeichnung der Folienlage bzw. der Kederfahne eintragen

⁴ z.B.: klar, pigmentiert

⁵ z.B. Koronabehandlung, Bedruckung bzw. Entfernung der Bedruckung

⁶ Flächenschweißnaht als Überlappnaht (AW-OV, en: Area Weld Seam as Overlapp Weld) oder als Stoßnaht mit Deckstreifen (AW-OV, en: Area Weld Seam as Backstrip Weld), Randschweißnaht als Kederanschluss (EWK, en: Edge Weld Seam as Keder Connection) oder Randschweißnaht als Seiltasche (EWC, en: Edge Weld Seam as Cable Pocket), Seiltasche (CP, en: Cable Pocket)

⁷ Alle an der Herstellung des Prüfstücks beteiligten Bediener und Einrichter sind hier einzutragen

Anlage E

E DIN 18229-3, Schweißen von ETFE-Folien für
die Anwendung im Bauwesen – Teil 3:
Anforderung und Qualifizierung von
Schweißverfahren für ETFE-Folien –
Schweißanweisung

Datum:2023 Mai

E DIN 18229-4

**Schweißen von ETFE-Folie für die Anwendung im Bauwesen
Teil 4: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für ETFE-Folien -
Schweißverfahrensprüfung**

Welding of ETFE films for building applications

Part 4: Specification and qualification of welding procedures for ETFE foils – Welding procedure test

Soudage des films ETFE pour applications de construction

Partie 4: Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les films ETFE – Épreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage

Basiert auf:

- *DIN EN ISO 15614-1:2020-05, Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung – Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen (ISO 15614-1:2017 + Amd 1 :2019); Deutsche Fassung EN ISO 15614-1:2017 + A1 :2019,*
- *WIPANO-Forschungsvorhaben „Schweißverbindungen von ETFE-Folien im Bauwesen: Standardisierung, Ausführung, Prüfung und Bemessung“, Förderkennzeichen 03TN0011A.*

Dokument-Typ: Norm

Dokument-Untertyp:

Dokumentstufe: Vorlage

Dokumentsprache: D

STD Version 2.9a

E DIN 18229-4:2023-02

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriff	5
4 Vorläufige Schweißanweisung (pWPS, en: preliminary Welding Procedure Specification)	5
5 Schweißverfahrensprüfung	6
6 Prüfstück	6
6.1 Allgemeines	6
6.2 Form und Maße des Prüfstückes	6
6.2.1 Allgemeines	6
6.2.2 Flächenschweißnaht als Überlappnaht	6
6.2.3 Flächenschweißnaht als Stoßnaht mit Deckstreifen	6
6.2.4 Seiltasche	6
6.2.5 Randdetail als Kederanschluss für eine starre Berandung	6
6.2.6 Randdetail als Seiltasche für eine flexible Berandung	6
6.3 Schweißen des Prüfstücks	7
7 Untersuchung und Prüfung	8
7.1 Allgemeines	8
7.2 Art und Umfang der Prüfung	8
7.3 Lage und Entnahme von Proben	9
7.4 Zerstörungsfreie Prüfung	11
7.5 Zerstörende Prüfungen	11
7.6 Zulässigkeitsgrenzen	11
7.7 Ersatzprüfung	11
8 Geltungsbereich	11
8.1 Allgemeines	11
8.2 Bezogen auf den Hersteller	11
9 Bericht über die Qualifizierung des Schweißverfahrens (WPQR, en: Welding Procedure Qualification Report)	12
Anhang A (informativ) Vordruck für Bescheinigung über die Qualifizierung des Schweißverfahrens (WPQR)	13

E DIN 18229-4:2023-02

Vorwort

Dieses Dokument wurde im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) im Arbeitsausschuss NA 005-51-08 AA "Eurocode für Membrantragwerke DIN 18204-1 sowie DIN 4134 (SpA zu CEN/TC 250/WG 5)" erarbeitet.

Dieser Norm-Entwurf basiert auf der DIN EN ISO 15614-1:2020-05 und wurde auf das Schweißen von ETFE-Folien angepasst.

E DIN 18229-4:2023-02

Einleitung

Alle neuen Schweißverfahrensprüfungen sind nach diesem Dokument ab dem Tag seiner Veröffentlichung durchzuführen.

Zwei Stufen der Schweißverfahrensprüfung sind angegeben, um eine große Anzahl von Schweißkonstruktionen abzudecken. Diese werden als Stufe 1 und Stufe 2 bezeichnet.

Beide Stufen basieren auf Anforderungen der prCEN/TS 19102.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt fest, wie eine vorläufige Schweißanweisung durch Schweißverfahrensprüfungen qualifiziert wird.

Dieses Dokument gilt für das Produktionsschweißen und Reparaturschweißen.

Dieses Dokument legt die Bedingungen für die Durchführung der Schweißverfahrensprüfungen und den Geltungsbereich für alle praktischen schweißtechnischen Tätigkeiten innerhalb der Qualifikation nach diesem Dokument fest.

Der Hauptzweck der Qualifizierung des Schweißverfahrens ist der Nachweis, dass der für die Konstruktion vorgeschlagene Fügeprozess dazu geeignet ist, Verbindungen herzustellen, die die mechanischen Eigenschaften des beabsichtigten Anwendungsfalls erfüllen.

Zwei Stufen der Schweißverfahrensprüfung sind angegeben, um eine große Anzahl von Schweißkonstruktionen abzudecken. Diese sind in Stufe 1 und Stufe 2 bezeichnet. Bei Stufe 2 ist der Prüfumfang größer und die Geltungsbereiche sind eingeschränkter als bei Stufe 1.

Schweißverfahrensprüfungen, die auf Stufe 2 durchgeführt werden, sind automatisch für Stufe 1 qualifiziert, jedoch nicht umgekehrt.

Falls in einem Auftrag oder einer Anwendungsnorm keine Stufe festgelegt ist, gelten die Anforderungen von Stufe 2.

Die Stufe 1 ist nur gültig für Schweißarbeiten von Projekten der Ausführungsklasse 1 (en: Execution classes, EXC 1) nach prCEN/TS 19102. Die Stufe 2 ist für Schweißarbeiten von Projekten der EXC 1, 2 und 3 nach prCEN/TS 19102 gültig.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 1910-3, *Schweißen – Schweißen von Kunststoffen – Verfahren*

prCEN/TS 19102, *Design of tensioned membrane structures*

3 Begriff

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach E DIN 18229-1, -2 und -3 und die folgenden Begriffe.

3.1

Prüfstück

Geschweißte Folienkonstruktion, die für Prüfzwecke verwendet wird.

4 Vorläufige Schweißanweisung (pWPS, en: preliminary Welding Procedure Specification)

Die vorläufige Schweißanweisung muss nach E DIN 18229-3 angefertigt werden.

E DIN 18229-4:2023-02**5 Schweißverfahrensprüfung**

Das Schweißen und Prüfen der Prüfstücke muss nach den Abschnitten 6 und 7 erfolgen.

Der Schweißer oder Bediener, der die Schweißverfahrensprüfung nach diesem Dokument erfolgreich durchführt, ist entsprechend der E DIN 18229-2 qualifiziert, vorausgesetzt, dass die maßgebenden Prüfanforderungen dieser Norm erfüllt sind.

6 Prüfstück**6.1 Allgemeines**

Die Schweißverbindung, auf die sich das Schweißverfahren in der Produktion bezieht, muss durch ein genormtes Prüfstück, wie in 6.2 festgelegt, repräsentiert werden.

6.2 Form und Maße des Prüfstückes**6.2.1 Allgemeines**

Die Länge oder Anzahl der Prüfstücke muss ausreichen, damit alle geforderten Prüfungen durchgeführt werden können. Hierbei ist die Ausrichtung der Prüfstücke bzgl. der Materialrichtung (Extrusionsrichtung (ED) und Transversalrichtung (TD)) zu beachten.

Aus einem Prüfstück werden Probekörper für Untersuchungen der Zug- und Abschälfestigkeit entnommen. Das Restmaterial des Prüfstücks kann zur Herstellung eventuell benötigter Ersatzproben genutzt werden.

Es darf nur ein Prüfstück erstellt werden, aus dem alle o. g. Probekörper sowie mögliche Ersatzprobekörper entnommen werden.

6.2.2 Flächenschweißnaht als Überlappnaht

Das Prüfstück muss nach Bild 1 vorbereitet werden.

6.2.3 Flächenschweißnaht als Stoßnaht mit Deckstreifen

Das Prüfstück muss nach Bild 2 vorbereitet werden.

6.2.4 Seiltasche

Da eine Seiltasche aus zwei parallelen Überlappnähten besteht, muss die Qualifizierung des Schweißverfahrens ebenfalls mithilfe eines Prüfstücks nach Bild 1 erfolgen.

6.2.5 Randdetail als Kederanschluss für eine starre Berandung

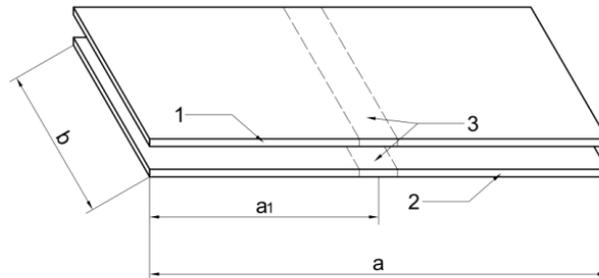
Das Prüfstück muss nach Bild 3 vorbereitet werden. Wenn das Folienpaket in der Produktion, für das die Schweißverfahrensprüfung durchgeführt wird, geheftet wird, ist auch das Folienpaket des Prüfstücks in gleicher Weise zu heften. Das gleiche gilt für die Vorbereitung und Herstellung der Kederfahne.

6.2.6 Randdetail als Seiltasche für eine flexible Berandung

Das Prüfstück muss nach Bild 4 vorbereitet werden. Wenn das Folienpaket in der Produktion, für das die Schweißverfahrensprüfung durchgeführt wird, geheftet wird, ist auch das Folienpaket des Prüfstücks in gleicher Weise zu heften. Das gleiche gilt für die Vorbereitung und Herstellung der Kederfahne.

6.3 Schweißen des Prüfstücks

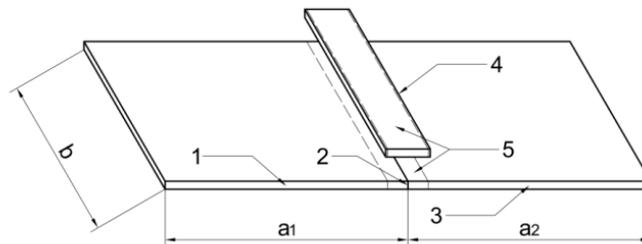
Die Vorbereitung und das Schweißen des Prüfstücks muss entsprechend der vorläufigen Schweißanweisung (pWPS), für die sie gelten soll, ausgeführt werden.



Legende

- 1 Zuschnittsbahn 1
- 2 Zuschnittsbahn 2
- 3 Lage der Überlappnaht
- a Länge der Zuschnittsbahnen: $a \geq 600$ mm
- a₁ Abstand der Schweißnahtmitte bis zum Rand der Zuschnittsbahn: $a_1 = a/2$
- b Breite der Zuschnittsbahnen: $b \geq 200$ mm

Bild 1 – Prüfstück für eine Flächenschweißnaht als Überlappnaht oder für eine Seitentasche

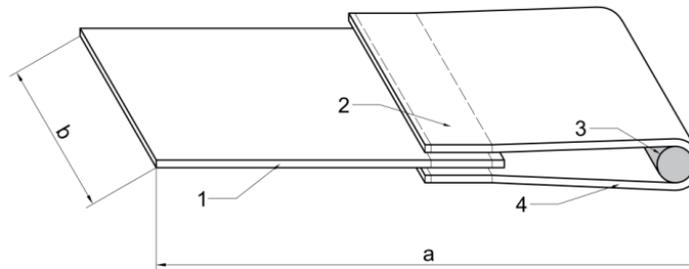


Legende

- 1 Zuschnittsbahn 1
- 2 Stoß der Zuschnittslagen
- 3 Zuschnittsbahn 2
- 4 Deckstreifen
- 5 Lage der Schweißnaht
- a₁ Länge der Zuschnittsbahn 1: $a_1 = a/2$
- a₂ Länge der Zuschnittsbahn 2: $a_2 = a/2$
- b Breite der Zuschnittsbahnen: $b \geq 200$ mm

Bild 2 – Prüfstück für eine Flächenschweißnaht als Stoßnaht mit Deckstreifen

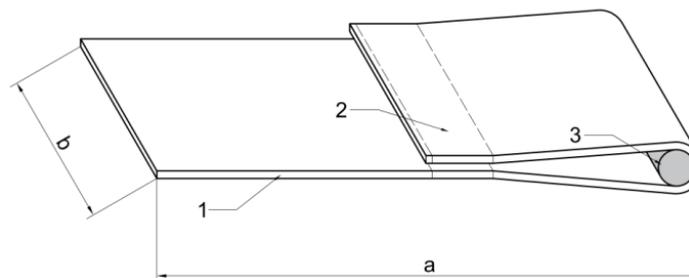
E DIN 18229-4:2023-02



Legende

- 1 Zuschnittsbahn bzw. Folienpaket
- 2 Lage der Schweißnaht
- 3 Keder bzw. Seil
- 4 Kederfahne (mit bzw. ohne konstruktiver Schweißnaht)
- a Länge der Zuschnittsbahn: $a \geq 250$ mm
- b Breite der Zuschnittsbahn: $b \geq 200$ mm

Bild 3 – Prüfstück für eine Randschweißnaht als Keder-/Seilanschluss



Legende

- 1 Zuschnittsbahn bzw. Folienpaket mit Umschlag
- 2 Lage der Überlappnaht
- 3 Keder bzw. Seil
- a Länge der Zuschnittsbahn: $a \geq 250$ mm
- b Breite der Zuschnittsbahn: $b \geq 200$ mm

Bild 4 – Prüfstück für eine Randschweißnaht mit Umschlag

7 Untersuchung und Prüfung

7.1 Allgemeines

Die Prüfungen sowie die Methode der Probekörperentnahme sind gemäß E DIN 18229-5 durchzuführen.

7.2 Art und Umfang der Prüfung

Bei Stufe 1: Art und Umfang der Prüfung müssen den Anforderungen nach Tabelle 1 entsprechen.

Bei Stufe 2: Art und Umfang der Prüfung müssen den Anforderungen nach Tabelle 2 entsprechen.

Tabelle 1 – Bei Stufe 1: Untersuchung und Prüfung der Prüfstücke

Probe/Prüfstück	Prüfart	Prüfumfang	Fußnote
Prüfstück	Sichtprüfung Abschälprüfung mit Falzbein	Gesamte Nahtlänge	a
Probe 1	Manuelle Zugprüfung	2 Proben	a
Probe 2	Manuelle Abschälprüfung	2 Proben	a, b

^a Prüfung gemäß E DIN 18229-5.
^b Für die Qualifizierung von Stoßnähten mit Deckstreifen nicht erforderlich.

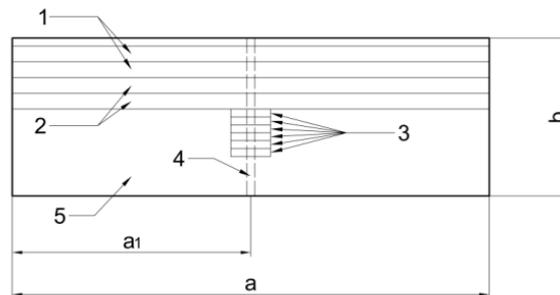
Tabelle 2 – Bei Stufe 2: Untersuchung und Prüfung der Prüfstücke

Probe/Prüfstück	Prüfart	Prüfumfang	Fußnote
Prüfstück	Sichtprüfung Abschälprüfung mit Falzbein	Gesamte Nahtlänge	a
Probe 1	Manuelle Zugprüfung	2 Proben	a, b
Probe 2	Manuelle Abschälprüfung	2 Proben	a, c
Probe 3	Maschinelle Zugprüfungen	5 Proben	a

^a Prüfung gemäß E DIN 18229-5
^b Diese Prüfung kann nach der Herstellung des Prüfstücks zur ersten Einschätzung der Zugfestigkeit durchgeführt werden, ist allerdings nicht verpflichtend.
^c Für die Qualifizierung von Stoßnähten mit Deckstreifen nicht erforderlich.

7.3 Lage und Entnahme von Proben

Die Proben müssen entsprechend den Bildern 11, 12 und 13 entnommen werden. Die Entnahme der Proben muss gemäß E DIN 18229-5 erfolgen.



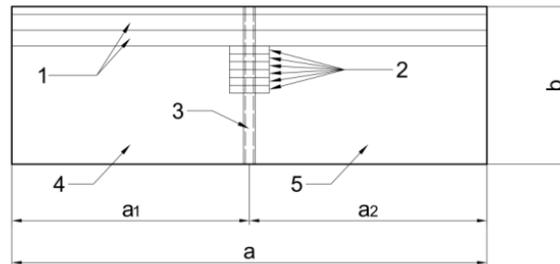
Legende

- 1 Proben für manuelle Zugprüfung, siehe E DIN 18229-5
- 2 Proben für manuelle Abschälprüfung, siehe E DIN 18229-5
- 3 Proben für maschinelle Zugprüfung, siehe E DIN 18229-5

E DIN 18229-4:2023-02

- 4 Lage der Überlappnaht
- 5 Übereinanderliegende Zuschnittsbahnen 1 und 2
- a Länge des Prüfstücks: $a \geq 600$ mm
- a_1 Abstand der Schweißnahtmitte bis zum Rand der Zuschnittsbahn: $a_1 = a/2$
- b Breite des Prüfstücks: $b \geq 200$ mm

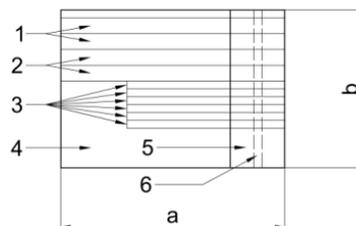
Bild 5 – Probenlage bei Flächenschweißnähten als Überlappnaht



Legende

- 1 Proben für manuelle Zugprüfung, siehe E DIN 18229-5
- 2 Proben für maschinelle Zugprüfung, siehe E DIN 18229-5
- 3 Lage der Stoßnaht und des Deckstreifens
- 4 Zuschnittsbahn 1
- 5 Zuschnittsbahn 2
- a Länge des Prüfstücks: $a \geq 600$ mm
- a_1 Länge der Zuschnittsbahn 1: $a_1 = a/2$
- a_2 Länge der Zuschnittsbahn 2: $a_2 = a/2$
- b Breite des Prüfstücks: $b \geq 200$ mm

Bild 6 – Probenlage bei Flächenschweißnähte als Stoßnaht mit Deckstreifen



Legende

- 1 Proben für manuelle Zugprüfung, siehe E DIN 18229-5
- 2 Proben für manuelle Abschälprüfungen, siehe E DIN 18229-5
- 3 Proben für maschinelle Zugprüfung, siehe E DIN 18229-5
- 4 Zuschnittsbahn bzw. Folienpaket
- 5 Kederfahne bzw. Umschlag
- 6 Lage der Schweißnaht
- a Länge des Prüfstücks: $a \geq 250$ mm
- b Breite des Prüfstücks: $b \geq 200$ mm

Bild 7 – Probenlage bei Randschweißnähten als Kederanschluss oder mit Umschlag

7.4 Zerstörungsfreie Prüfung

Alle zerstörungsfreien Prüfungen nach 7.2 müssen an den Prüfstücken vor der Aufteilung in Proben durchgeführt werden. Die Durchführung erfolgt gemäß E DIN 18229-5.

7.5 Zerstörende Prüfungen

Die Durchführung und die Bestehenskriterien der manuellen und maschinellen Zug- und Abschälversuche sind in der E DIN 18229-5 festgelegt.

Die maschinellen Zugprüfungen werden als Prüfserie mit fünf Einzelprüfungen durchgeführt. Die Prüfungen gelten als bestanden, wenn die Anforderungen nach prCEN/TS 19102 erfüllt werden.

7.6 Zulässigkeitsgrenzen

Die Zulässigkeitsgrenzen für Unregelmäßigkeiten sind für Stufe 1 und Stufe 2 der Qualifizierung identisch und sind in E DIN 18229-5 festgelegt.

7.7 Ersatzprüfung

Falls das Prüfstück eine der Anforderungen an die zerstörungsfreie Prüfung (NDT) nicht erfüllt, muss ein weiteres Prüfstück geschweißt und der gleichen Untersuchung unterzogen werden. Falls dieses zusätzliche Prüfstück den Anforderungen nicht genügt, gilt die Schweißverfahrensprüfung als nicht bestanden. Alternativ dazu kann eine Analyse durchgeführt werden, um die Hauptursache des Mangels zu ermitteln. Wenn sich herausstellt, dass die Hauptursache des Mangels nicht verfahrensbedingt ist, sondern mit unzureichender Fähigkeit des Bedieners oder Einrichters der Schweißeinrichtung zusammenhängt, wird kein weiteres Prüfstück benötigt und dem Bericht muss ein Nachweis beigefügt werden.

Wenn eine nach Tabelle 1 oder Tabelle 2 erforderliche Probe die anwendbaren Annahmekriterien nicht erfüllt, gilt das Prüfstück als nicht bestanden. Im Falle des Versagens des Prüfstückes darf ein neues Prüfstück mit den gleichen Schweißparametern geschweißt werden.

Im Falle des Ausfalls einer zerstörbaren Probe dürfen für jede Probe, die nicht bestanden hat, zwei zusätzliche Proben vom ursprünglichen Prüfstück entnommen werden, sofern ausreichend Werkstoff verfügbar ist. Die Proben müssen möglichst in der Nähe der ursprünglichen Probenlage entnommen werden.

Jede zusätzliche Probe muss denselben Prüfungen wie die ursprüngliche Probe, die nicht bestanden hat, unterzogen werden. Wenn eine der zusätzlichen Proben die Anforderung nicht erfüllt, gilt die Schweißverfahrensprüfung als nicht bestanden.

8 Geltungsbereich

8.1 Allgemeines

Änderungen außerhalb der festgelegten Bereiche erfordern eine neue Schweißverfahrensprüfung.

8.2 Bezogen auf den Hersteller

Eine von einem Hersteller vorbereitete Schweißverfahrensprüfung nach diesem Dokument gilt dann für Schweißarbeiten in Werkstätten oder an Baustellen, wenn der die Schweißverfahrensprüfung durchführende Hersteller für alle durchgeführten Schweißarbeiten voll verantwortlich ist.

Die Qualifizierung des Schweißverfahrens ist nur für die Schweißeinrichtung gültig, auf der das Prüfstück für die Schweißverfahrensprüfung hergestellt wird. Die Qualifizierung des Schweißverfahrens ist nur für das Personal gültig, von dem/der das Prüfstück für die Schweißverfahrensprüfung hergestellt wird.

E DIN 18229-4:2023-02

9 Bericht über die Qualifizierung des Schweißverfahrens (WPQR, en: Welding Procedure Qualification Report)

Der Bericht über die Qualifizierung des Schweißverfahrens (WPQR) ist ein Bericht über die Beurteilungsergebnisse für jedes Prüfstück einschließlich der Ersatzprüfungen. Die entsprechenden Einzelheiten, die in der WPS aufgeführt sind, müssen zusammen mit den Einzelheiten jener Merkmale, die infolge der Anforderungen nach Abschnitt 7 verworfen wurden, enthalten sein. Falls keine zu verwerfenden Merkmale oder kein unannehmbares Prüfergebnis gefunden werden, ist ein WPQR, der die Ergebnisse der Schweißverfahrensprüfung am Prüfstück enthält, qualifiziert und muss vom Prüfer oder von der Prüfstelle unterzeichnet und datiert werden.

Zur Aufzeichnung der Einzelheiten, des Geltungsbereiches der Qualifizierung und der Stufe des Schweißverfahrens sowie der Prüfergebnisse muss ein WPQR-Vordruck verwendet werden, um eine einheitliche Darstellung und Beurteilung der Angabe zu erleichtern.

Anhang A enthält ein Beispiel für ein WPQR-Vordruck.

E DIN 18229-4:2023-02

Anhang A
(informativ)

Vordruck für Bescheinigung über die Qualifizierung des Schweißverfahrens (WPQR)¹

Qualifizierung eines Schweißverfahrens – Prüfbescheinigung

Kennzeichen der Schweißorganisation²:
 Kennzeichen/Nr. des WPQR/Revision:
 Kennzeichen/Nr. der Schweißanweisung/Revision:
 Stufe:
 Datum der Schweißung:
 Prüfer oder Prüfstelle:

Prüfstück/Geltungsbereich

Folienhersteller und -produkt:
 Nominelle Foliendicke [µm]:
 Schweißprozess:
 Bereich der Umgebungstemperatur [°C]:
 Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit [%]:
 Schweißnahttyp und -art³:
 Nominelle Schweißnahtbreite [mm]:

Hiermit wird bestätigt, dass die Angaben in diesem Bericht zutreffend und dass die Prüfstücke entsprechend den Anforderungen (der E DIN 18229-5) zufriedenstellend vorbereitet, geschweißt und geprüft worden sind.

.....
 Ort Datum der Ausstellung Name und Unterschrift

Schweißorganisation

Name:	Unterschrift:	Datum:
--------------	----------------------	---------------

¹ Dem Anwender dieses Formblattes ist unbeschadet der Rechte des DIN an der Gesamtheit des Dokumentes die Vervielfältigung des Formblattes gestattet.

² Ausführender Betrieb.

³ Flächenschweißnaht als Überlappnaht (AW-OV, en: Area Weld Seam as Overlapp Weld) oder als Stoßnaht mit Verluststreifen (AW-OV, en: Area Weld Seam as Backstrip Weld), Randschweißnaht als Kederanschluss (EWK, en: Edge Weld Seam as Keder Connection) oder Randschweißnaht als Seiltasche (EWC, en: Edge Weld Seam as Cable Pocket), Seiltasche (CP, en: Cable Pocket)

E DIN 18229-4:2023-02

Protokoll der Schweißprüfung

Fertigungsstelle:
 pWPS-Nr.:
 WPQR-Nr.:
 Stoßnaht und Nahtart:
 Vorbereitung, Reinigung, Vorbehandlung¹:

Bediener und/oder Einrichter der Schweißeinrichtung²

Name	Vorname	Unterschrift

Ergebnisse der Prüfung

WPQR-Nr.:
 Sichtprüfung:
 Manuelle Abschälprüfung:
 Manuelle Zugprüfung:
 Maschinelle Zugprüfung:

¹ z.B. Koronabehandlung, Bedruckung bzw. Entfernung der Bedruckung.
² Alle an der Herstellung des Prüfstücks beteiligten Bediener und Einrichter sind hier einzutragen.

Anlage E

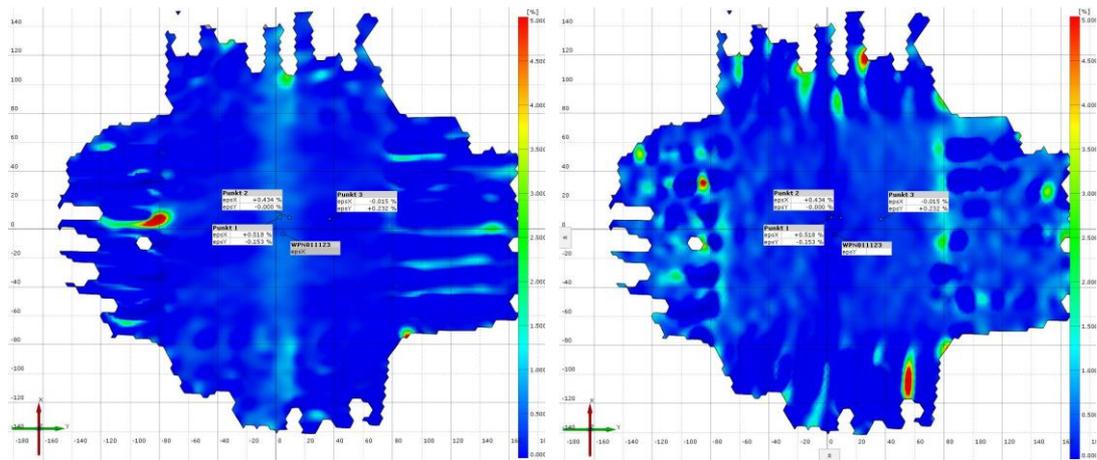
E DIN 18229-3, Schweißen von ETFE-Folien für
die Anwendung im Bauwesen – Teil 3:
Anforderung und Qualifizierung von
Schweißverfahren für ETFE-Folien –
Schweißanweisung

Zusammenfassung der Prüfergebnisse der biaxialen Hysteresis-Zugprüfungen

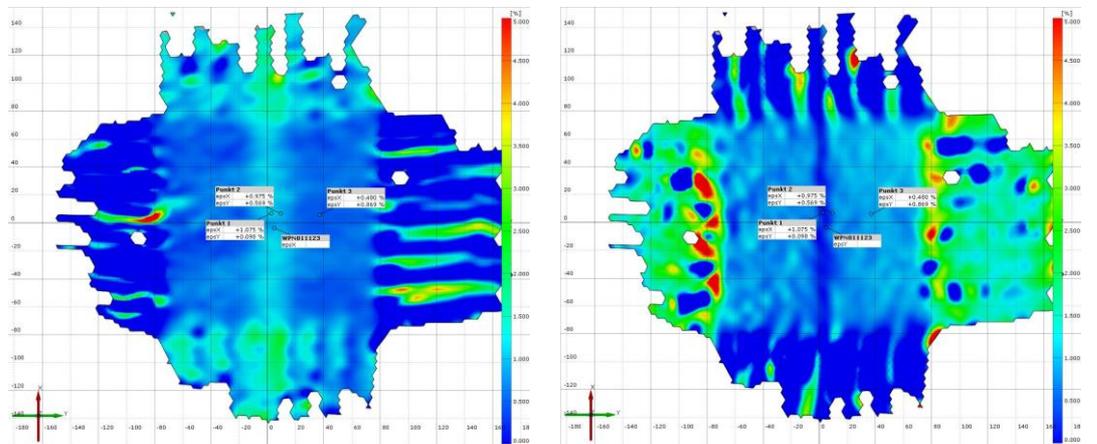
Dehnungswerte an der Schweißnaht (FN), der Schweißnahtkante bzw. Wärmeeinflusszone (WEZ) und dem unbeeinflussten Grundmaterial (MA) bei verschiedenen Belastungen in der Hysteresis-Zugprüfung

Stelle	Spannungsverhältnis (MD:TD)	Richtung	Vorspannung (4 MPa)		Lastniveau 1 (15 MPa)		Lastniveau 2 (18 MPa)		Lastniveau 3 (20 MPa)		Lastniveau 4 (22 MPa)		Lastniveau 5 (24 MPa)		Lastniveau 6 (MPa)						
			Max	Entl.	Max	Entl.	Max	Entl.	Max	Entl.	Max	Entl.	Max	Entl.	Max	Entl.	Max	Entl.			
FN	1:1	ϵ_x	0,52	1,08	1,12	0,57	1,29	1,52	0,66	1,73	2,69	1,50	2,78	3,72	2,43	3,91	4,92	3,42	5,07	5,50	-
	2:1	ϵ_x	0,39	1,21	1,19	0,40	1,44	1,50	0,36	1,58	1,78	0,26	1,74	2,66	0,58	2,58	4,05	1,56	3,94	5,67	2,62
	1:2	ϵ_x	0,07	0,49	0,58	0,13	0,66	1,06	0,39	1,05	1,49	0,64	1,47	2,20	1,18	2,62	4,17	2,70	5,07	5,11	-
	1:1	ϵ_y	-0,15	0,10	0,00	-0,33	0,02	0,24	-0,18	0,22	0,29	-0,20	0,26	0,88	0,27	0,79	1,02	0,36	0,99	1,10	-
	2:1	ϵ_y	-0,17	-0,25	0,03	0,12	0,02	0,17	0,32	0,21	0,27	0,51	0,36	0,29	0,62	0,36	0,10	0,48	0,17	-0,22	0,38
	1:2	ϵ_y	0,24	0,36	0,42	0,34	0,44	0,38	0,33	0,44	0,54	0,45	0,59	0,34	0,27	0,39	0,11	0,09	0,16	0,12	-
WEZ	1:1	ϵ_x	0,43	0,98	1,11	0,55	1,29	1,52	0,61	1,66	2,48	1,25	2,53	3,47	2,10	3,57	4,50	2,92	4,57	5,03	-
	2:1	ϵ_x	0,44	1,25	1,07	0,28	1,31	1,65	0,48	1,71	2,19	0,63	2,13	3,23	1,12	3,12	4,64	2,14	4,54	6,25	3,30
	1:2	ϵ_x	0,09	0,70	0,55	-0,16	0,66	0,97	-0,12	0,91	1,48	0,03	1,34	2,48	0,78	2,79	5,06	2,85	6,20	6,36	-
	1:1	ϵ_y	0,00	0,57	0,79	0,11	0,91	1,58	0,66	1,57	2,16	1,11	2,20	2,57	1,33	2,57	3,06	1,67	3,08	3,23	-
	2:1	ϵ_y	-0,13	-0,09	-0,22	-0,31	-0,22	-0,41	-0,49	-0,39	-0,58	-0,62	-5,70	-0,91	-0,85	-0,86	-1,25	-1,21	-1,22	-1,60	-1,67
	1:2	ϵ_y	0,23	0,36	0,33	0,23	0,34	0,28	0,23	0,35	0,44	0,34	0,50	0,30	0,21	0,32	-0,08	-0,10	-0,09	-0,15	-
MA	1:1	ϵ_x	-0,02	0,48	0,83	0,23	1,02	1,41	0,49	1,55	2,39	1,18	2,45	3,32	2,00	3,41	4,25	2,71	4,28	4,58	-
	2:1	ϵ_x	0,44	1,19	1,20	0,46	1,40	1,34	0,25	1,39	1,61	0,18	1,62	2,47	0,44	2,37	3,82	1,39	3,71	5,30	2,53
	1:2	ϵ_x	0,29	1,12	1,31	0,38	1,51	2,21	0,64	2,20	3,71	1,58	3,65	5,79	3,21	5,67	8,13	5,13	7,96	8,31	-
	1:1	ϵ_y	0,23	0,87	1,04	0,37	1,26	1,89	0,66	2,02	3,13	1,60	3,23	4,39	2,68	4,57	5,55	3,65	5,75	6,31	-
	2:1	ϵ_y	-0,02	0,05	-0,08	-0,18	-0,08	-0,16	-0,31	-0,12	-0,24	-0,39	-0,23	-0,30	-0,44	-0,25	-0,08	-0,30	-0,04	0,10	-0,10
	1:2	ϵ_y	0,00	0,07	-0,04	-0,11	-0,02	-0,10	-0,18	-0,11	-0,39	-0,47	-0,42	-0,76	-0,87	-0,80	-1,23	-1,28	-1,26	-1,41	-

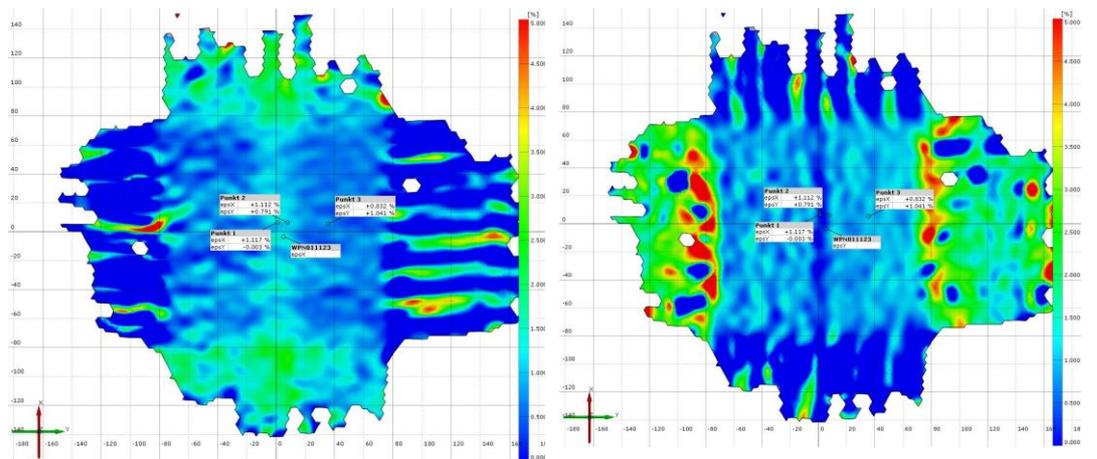
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1



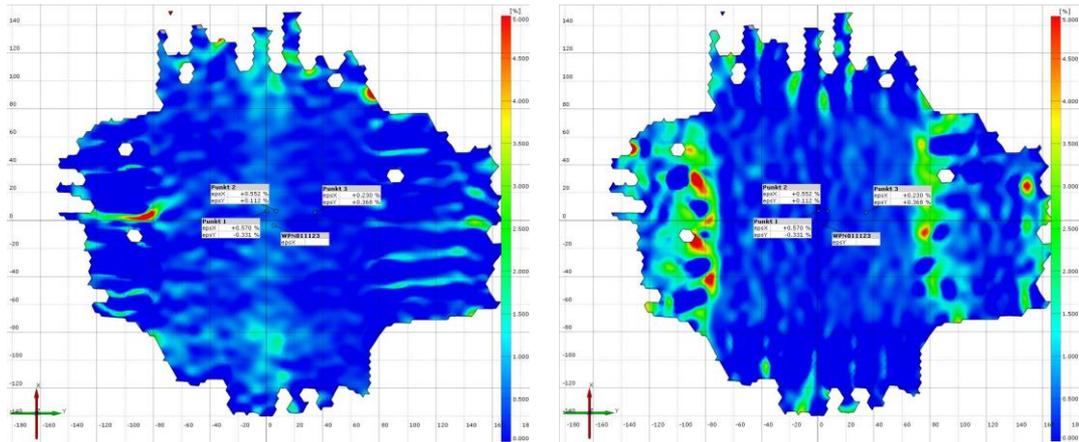
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Vorspannphase (4 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



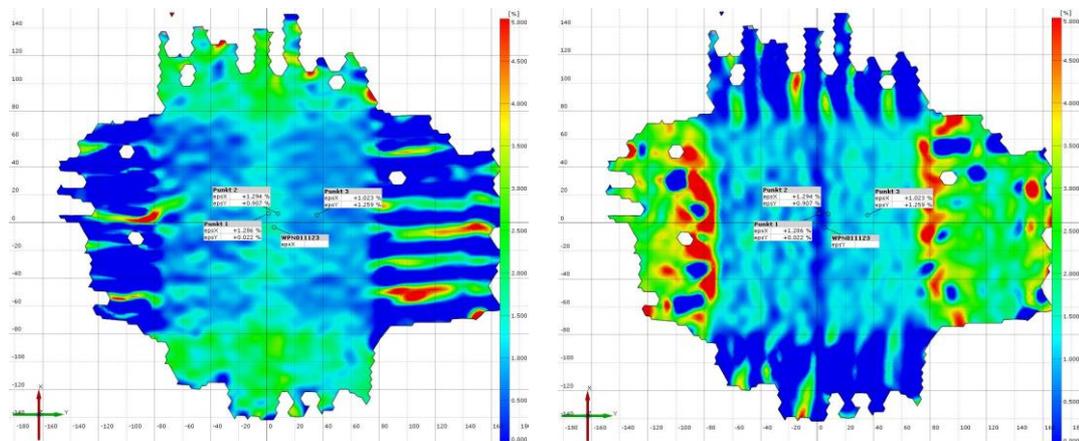
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 1. Lastniveaus (15 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



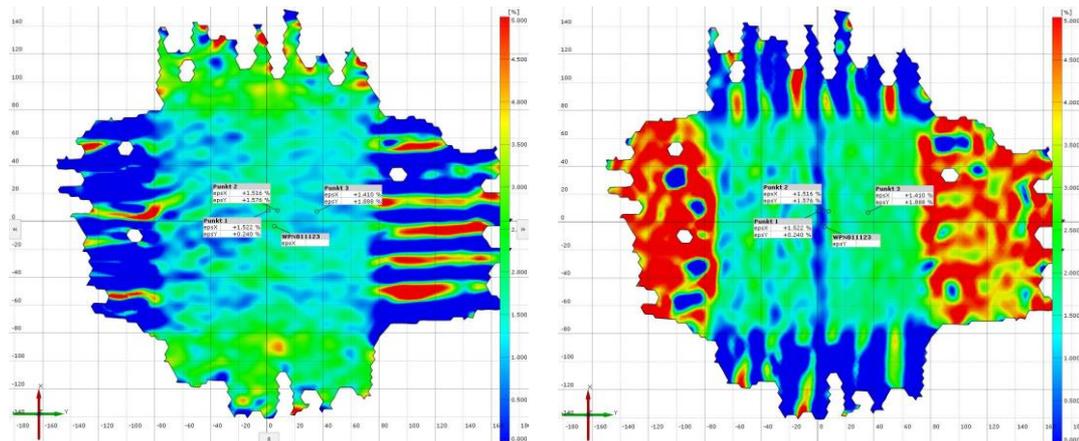
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 1. Lastniveaus (15 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



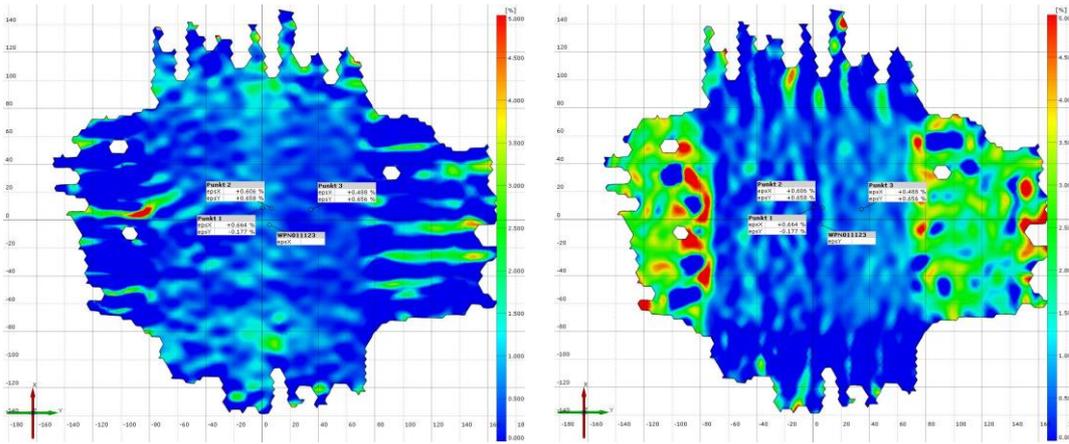
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 1. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



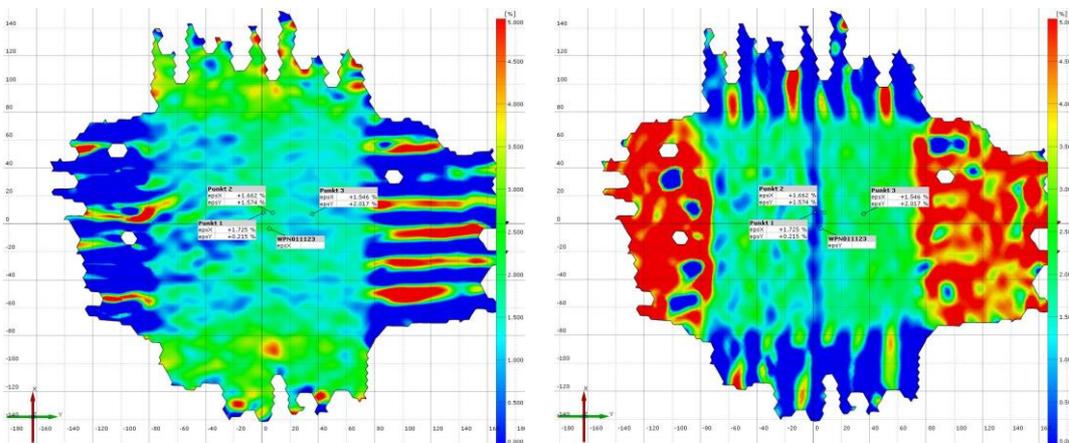
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 2. Lastniveaus (18 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



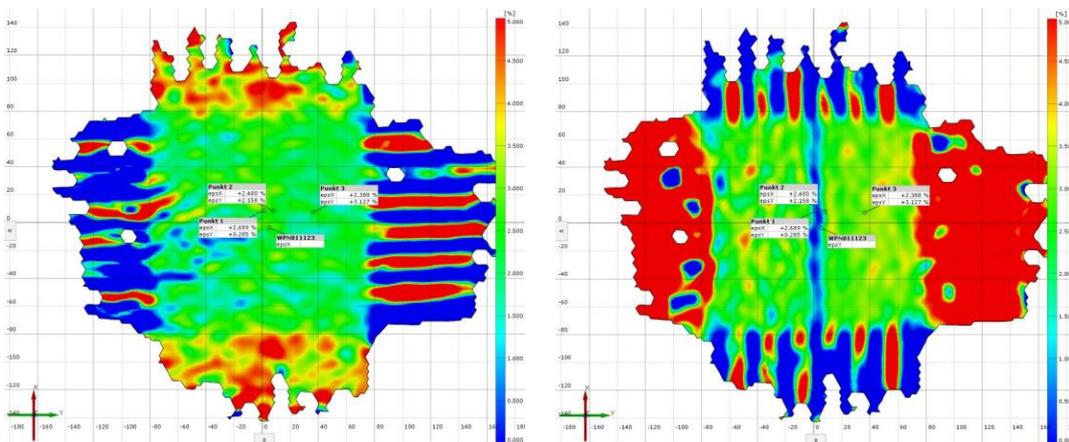
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 2. Lastniveaus (18 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



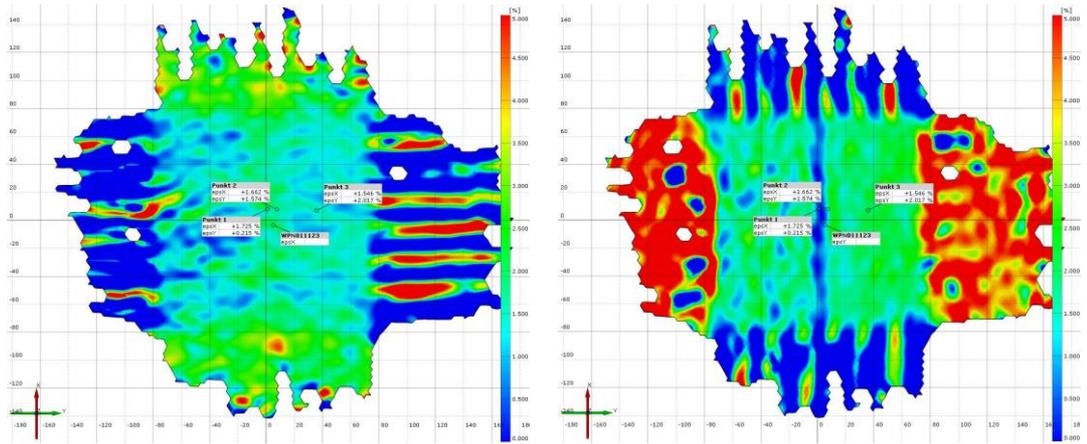
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 2. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



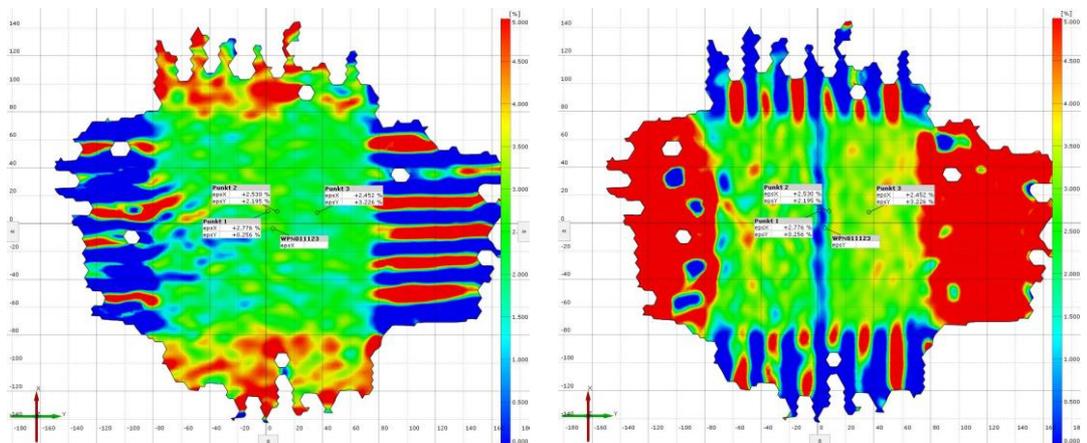
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 3. Lastniveaus (20 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



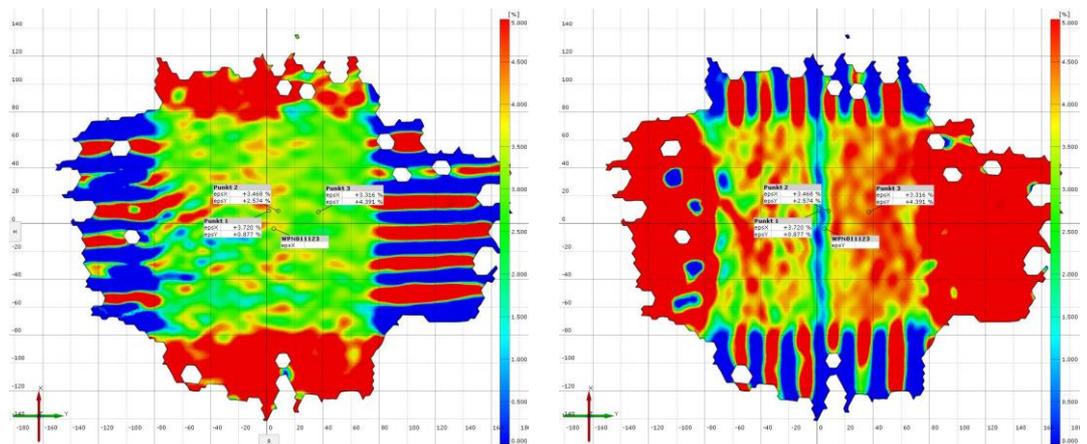
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 3. Lastniveaus (20 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



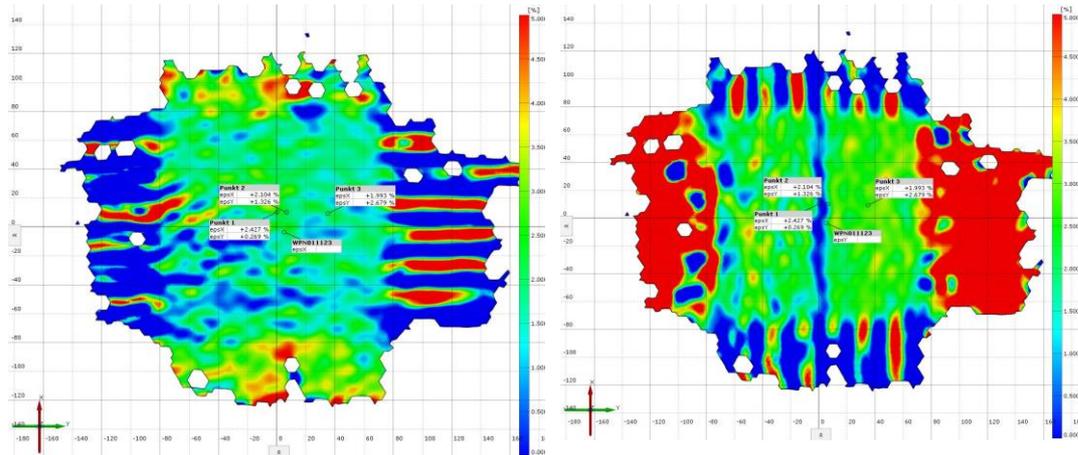
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 3. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



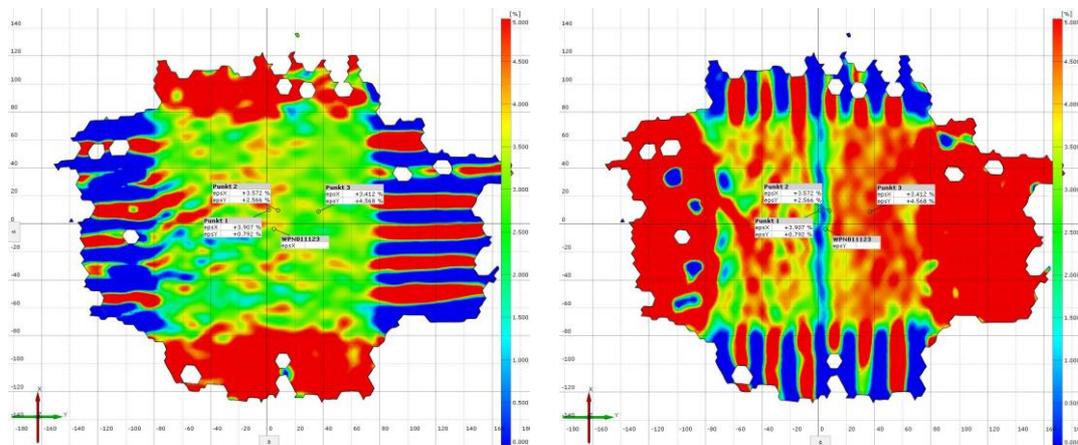
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 4. Lastniveaus (22 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



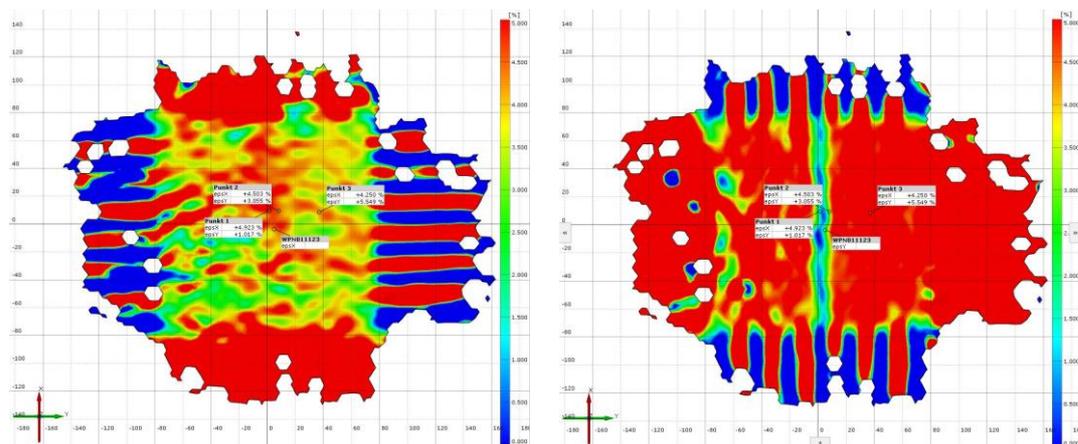
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 4. Lastniveaus (22 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



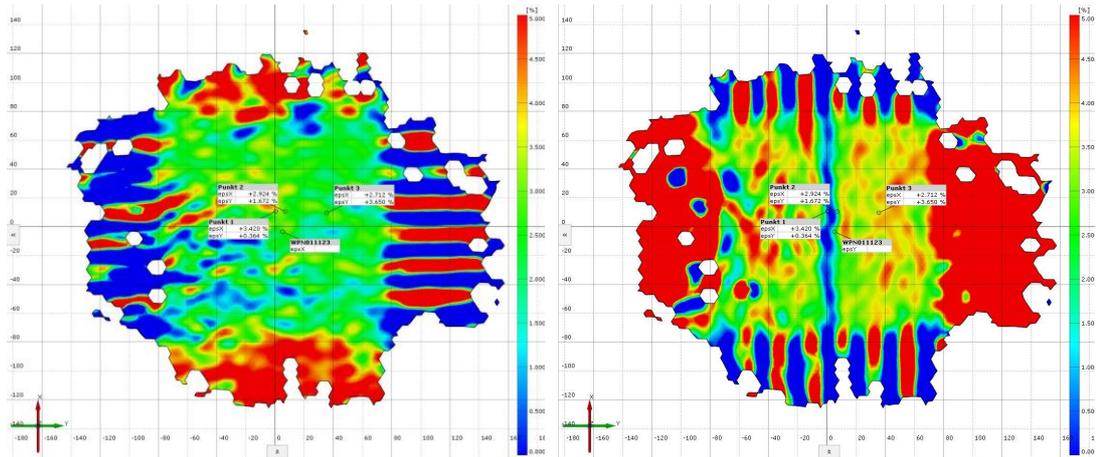
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 4. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



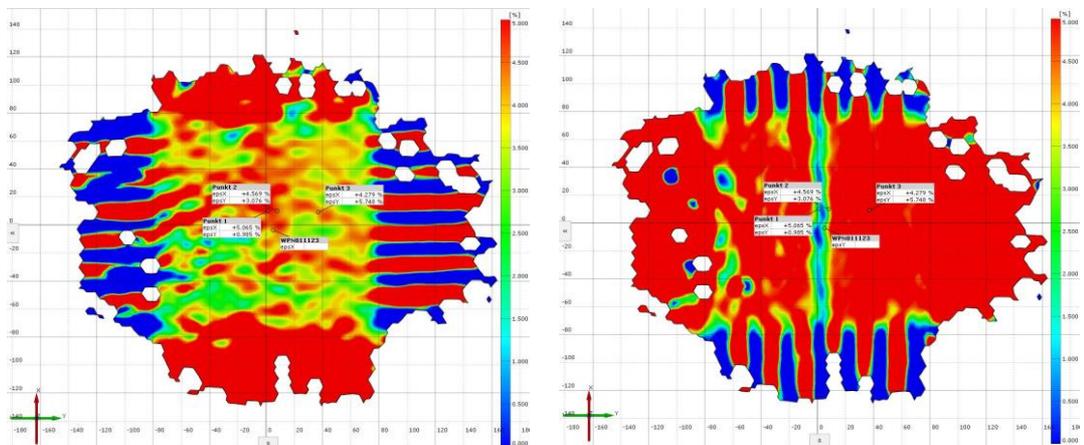
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 5. Lastniveaus (24 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



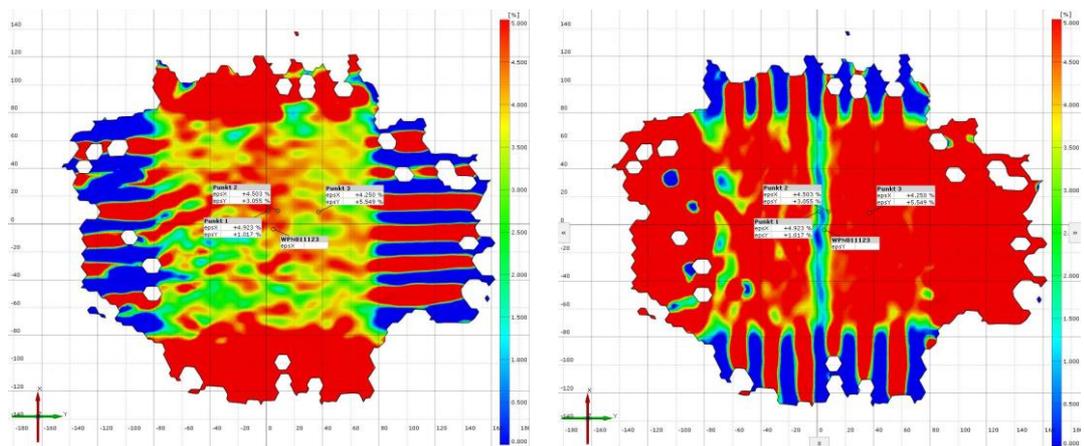
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 5. Lastniveaus (24 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 5. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung

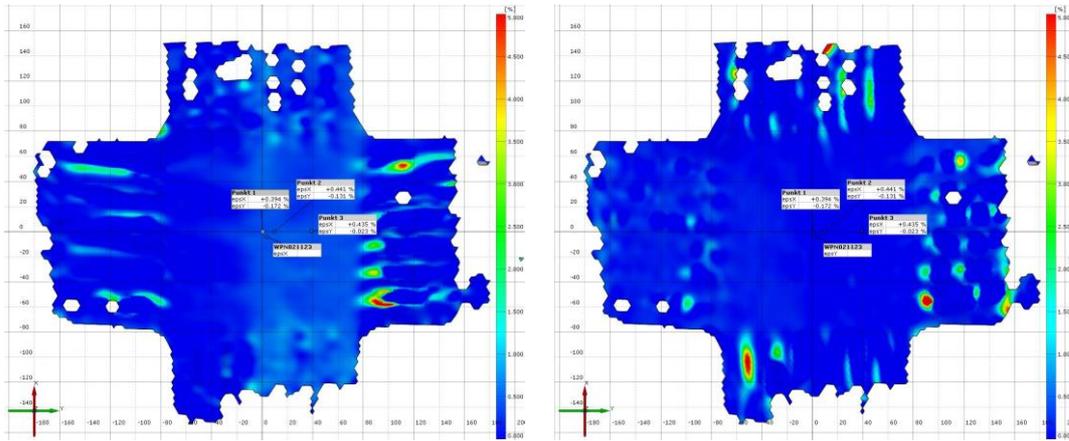


Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 6. Lastniveaus (26 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung

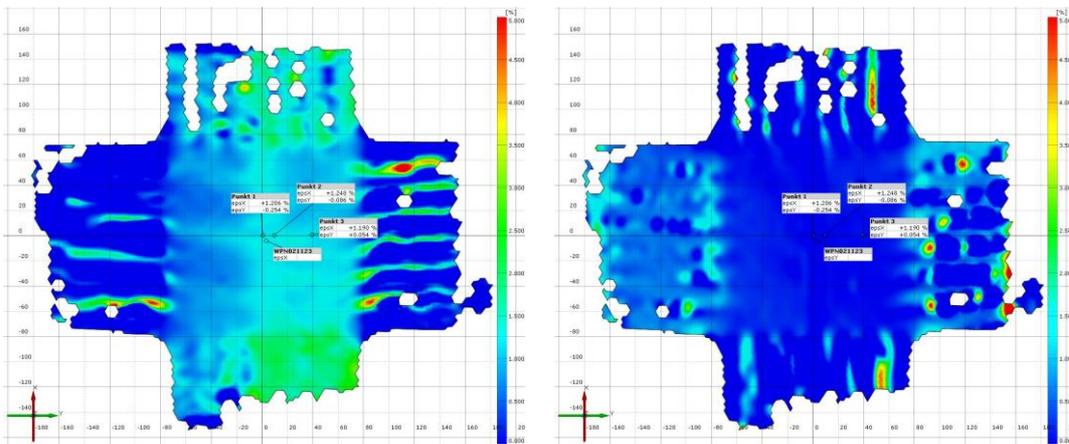


Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:1, Dehnungsaufnahme am Bruch der Probe im 6. Lastniveau (26 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung

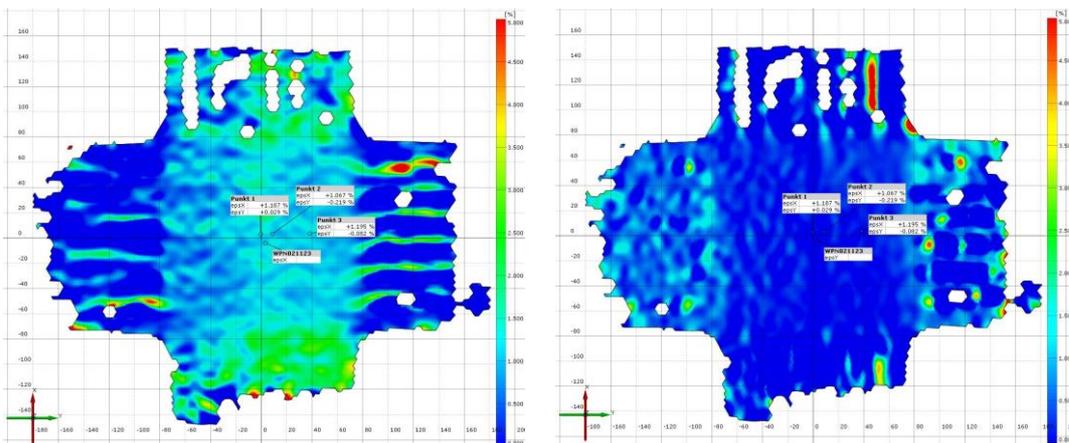
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1 (ED:TD)



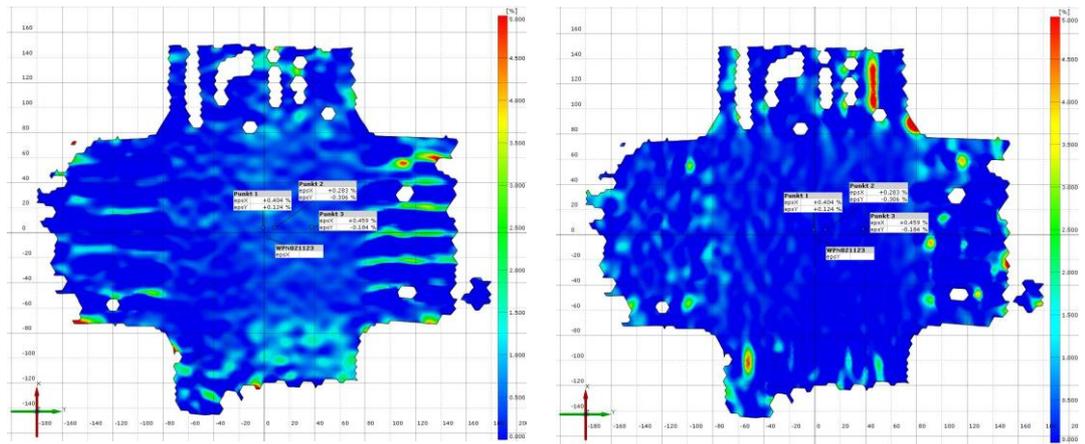
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Vorspannphase (4 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



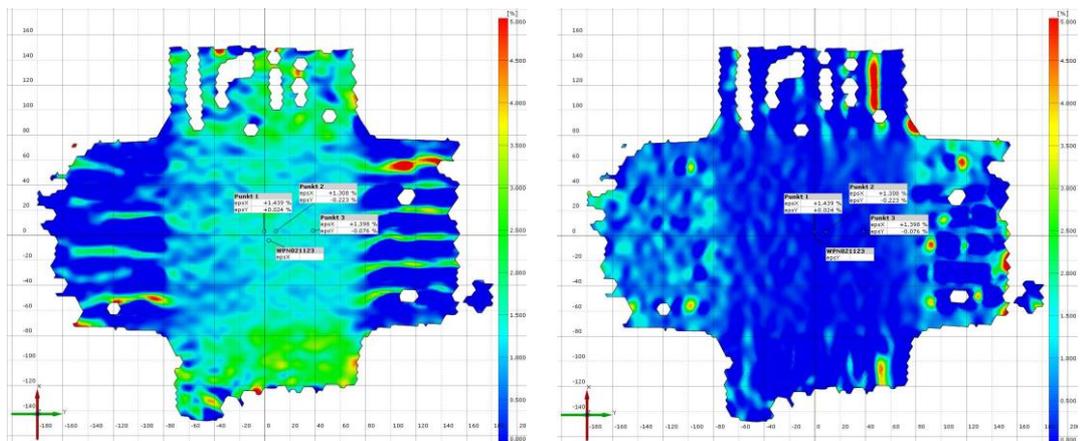
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 1. Lastniveaus (15 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



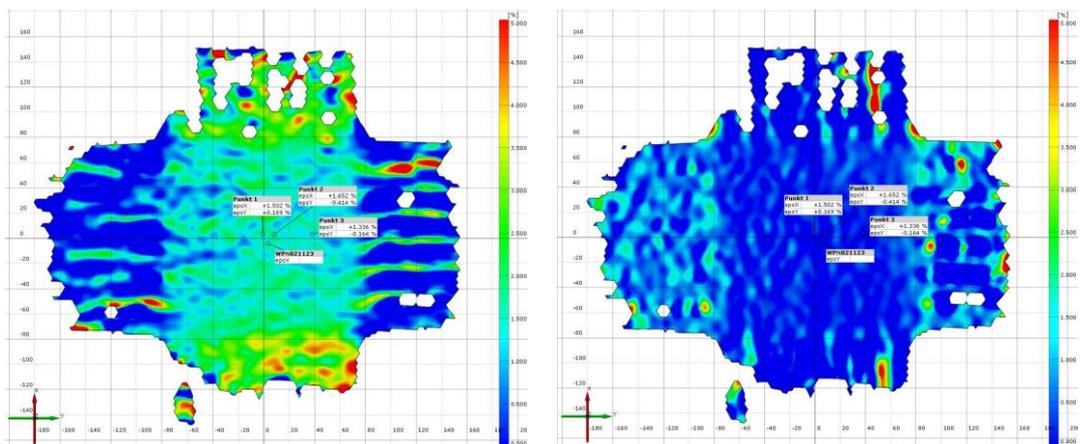
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 1. Lastniveaus (15 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



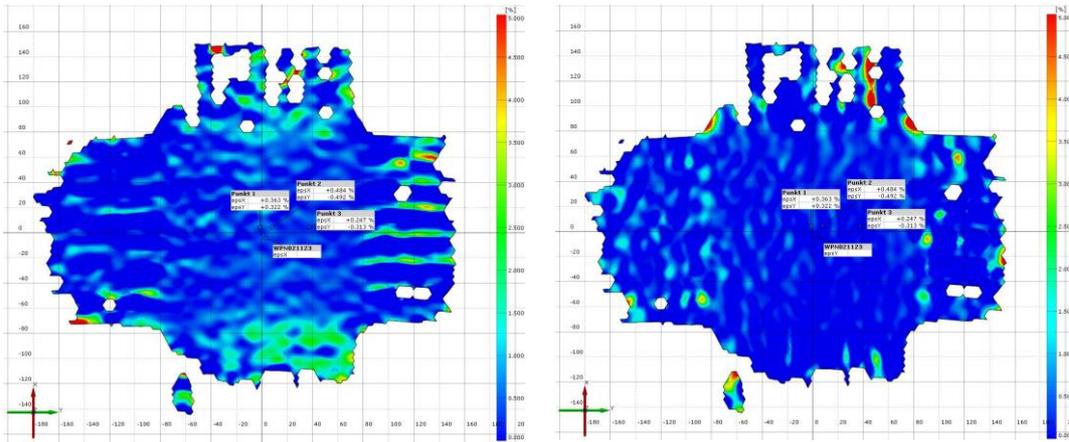
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 1. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



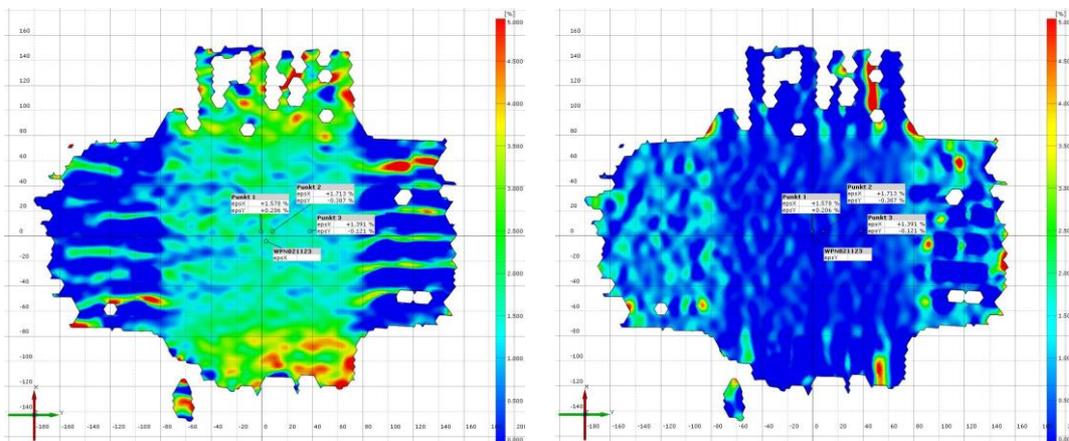
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 2. Lastniveaus (18 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



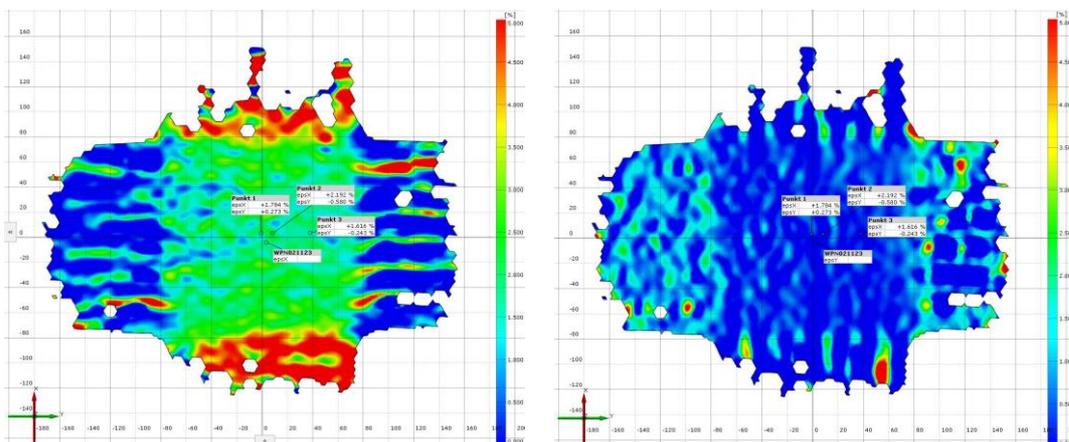
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 2. Lastniveaus (18 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



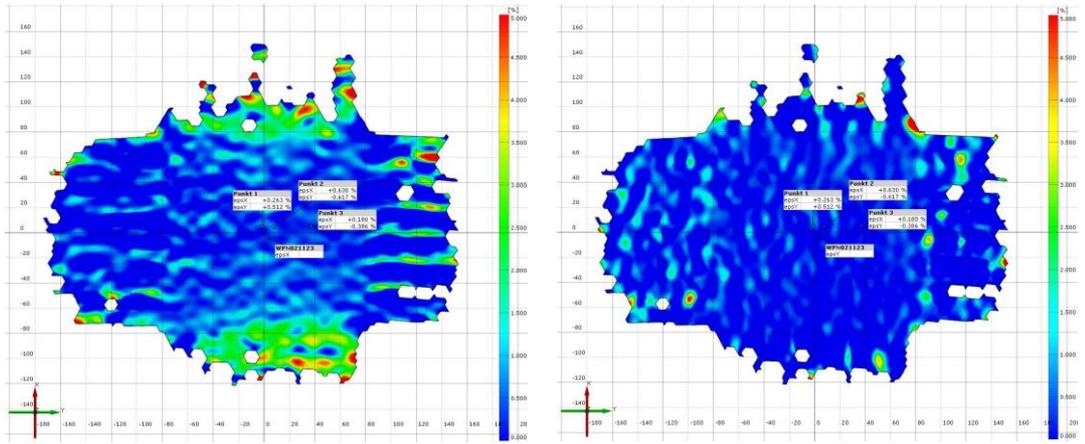
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 2. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



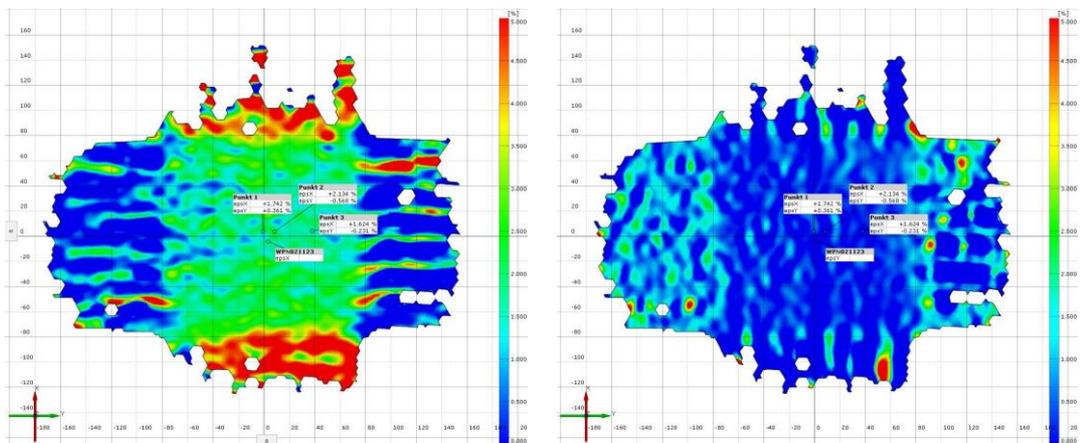
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 3. Lastniveaus (20 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



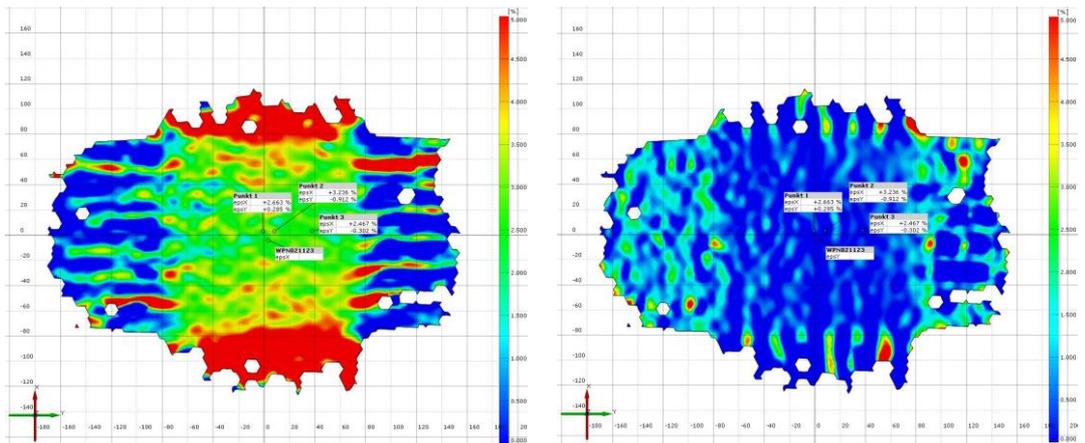
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 3. Lastniveaus (20 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



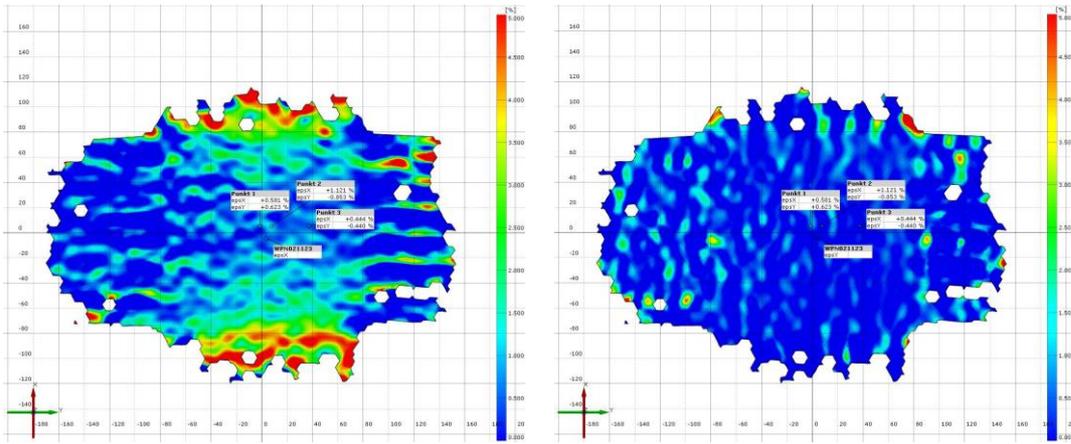
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 3. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



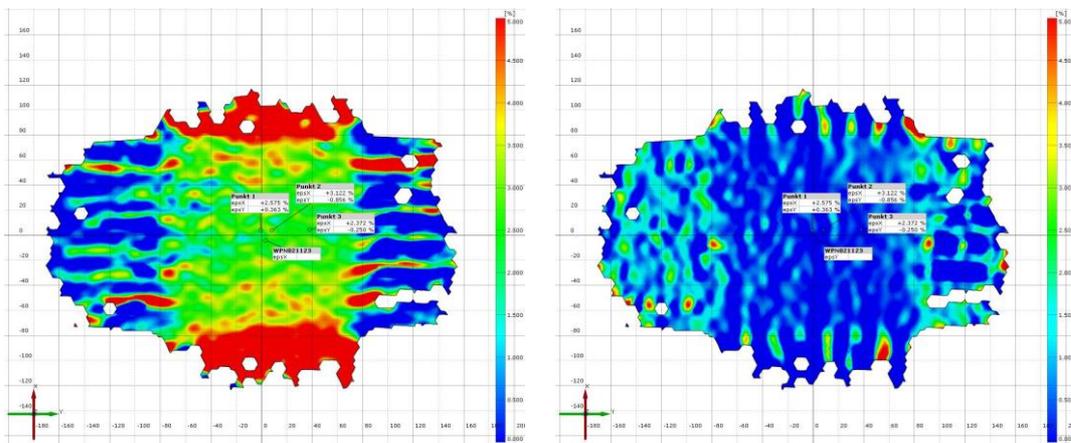
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 4. Lastniveaus (22 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



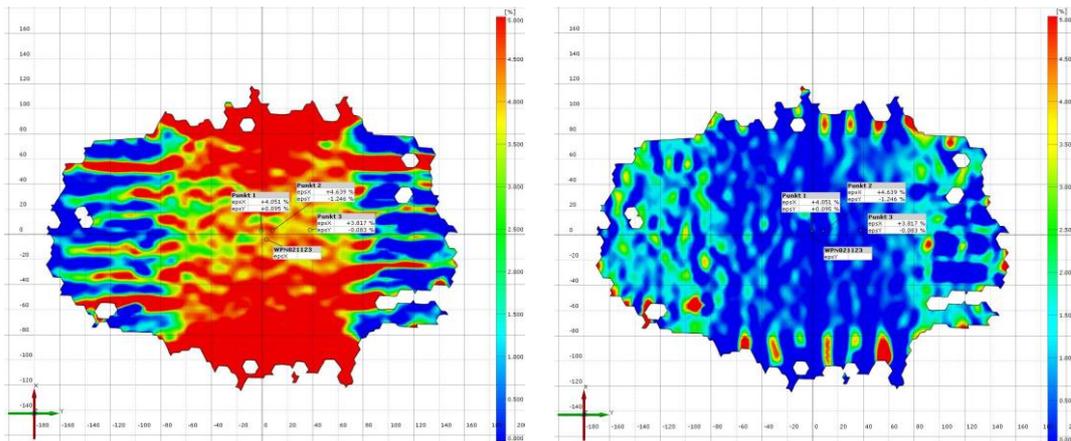
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 4. Lastniveaus (22 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



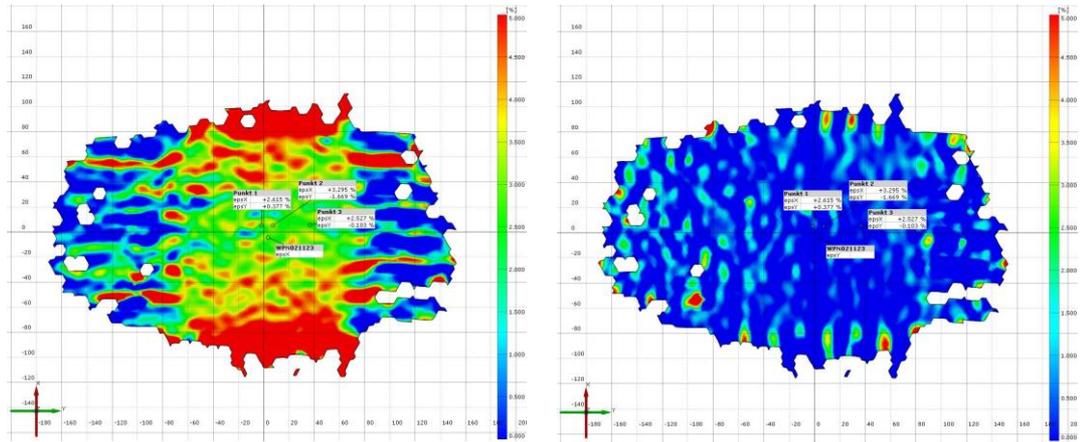
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 4. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



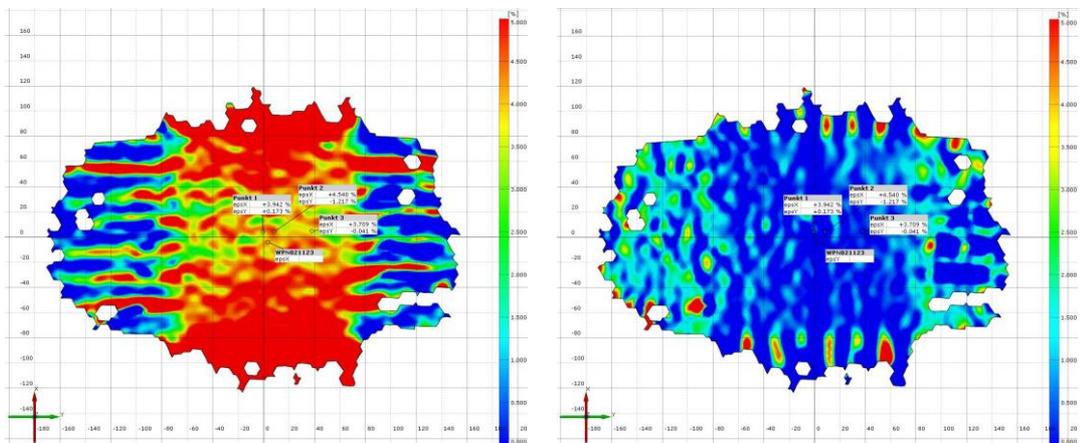
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 5. Lastniveaus (24 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



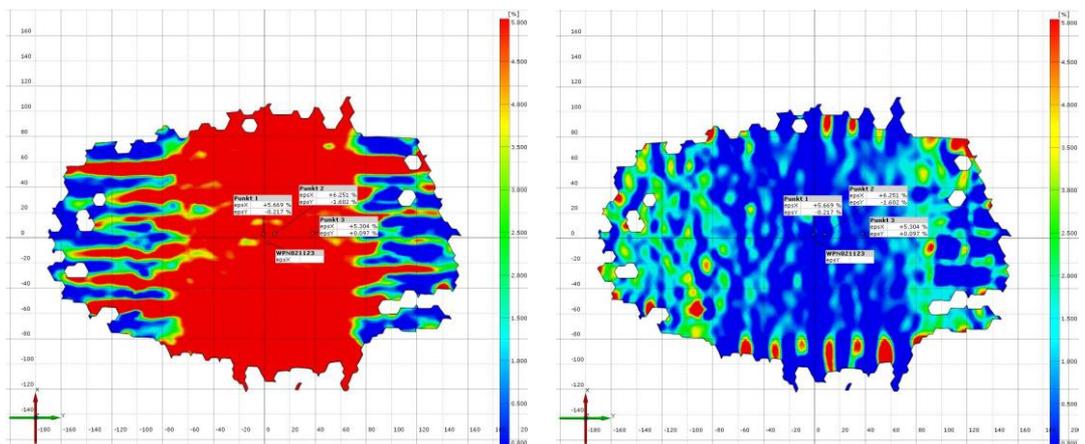
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 5. Lastniveaus (24 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



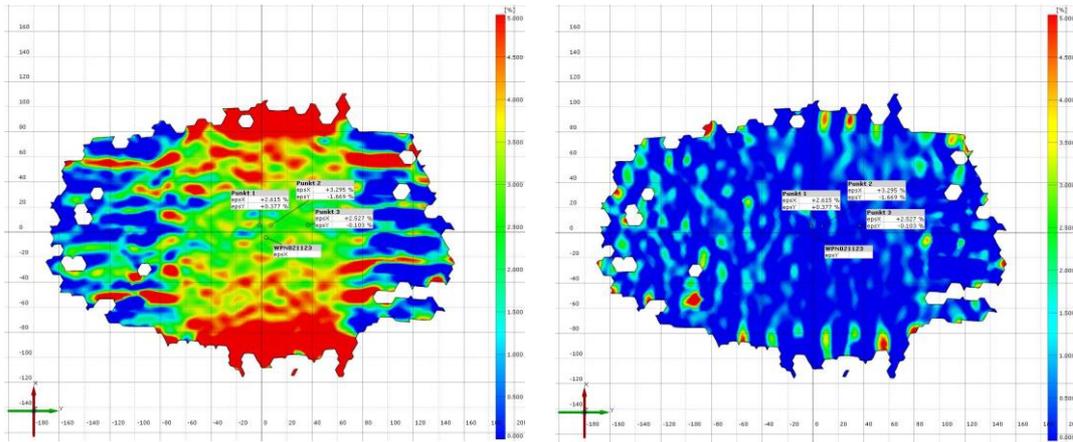
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 5. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 6. Lastniveaus (26 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung

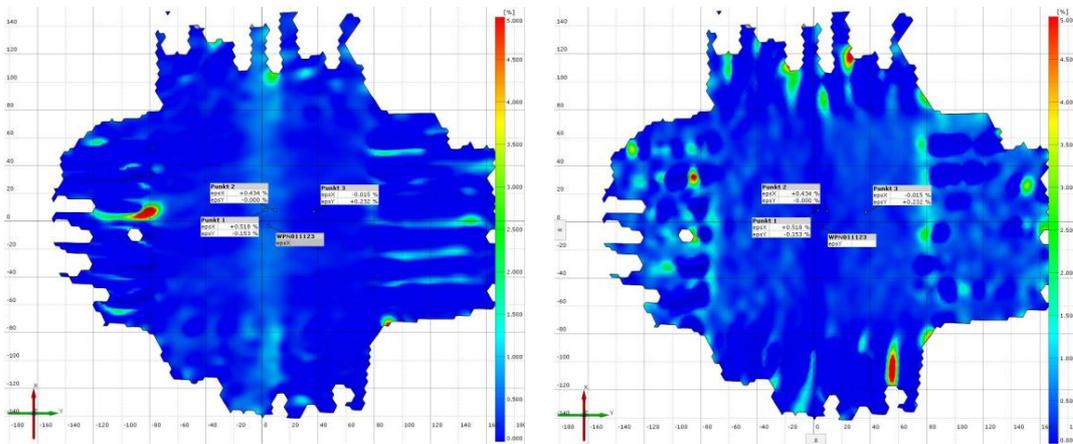


Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 6. Lastniveaus (26 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung

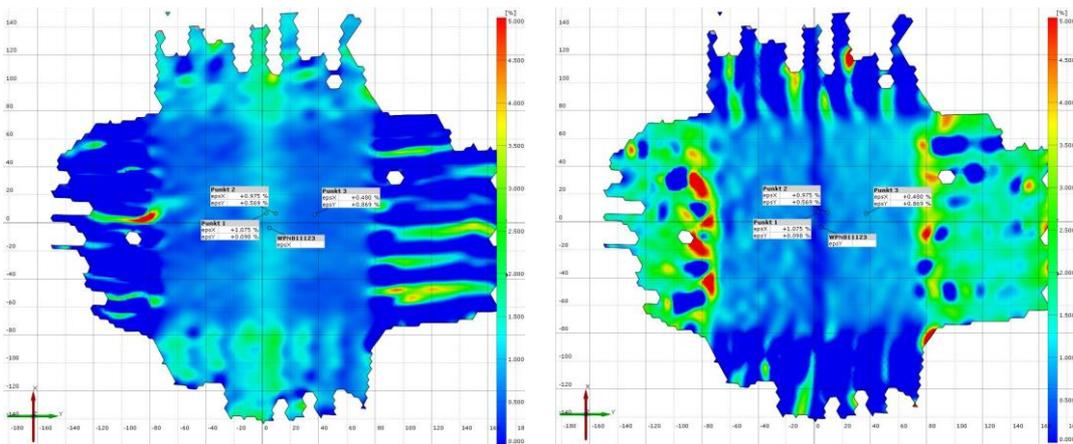


Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 2:1, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 6. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung

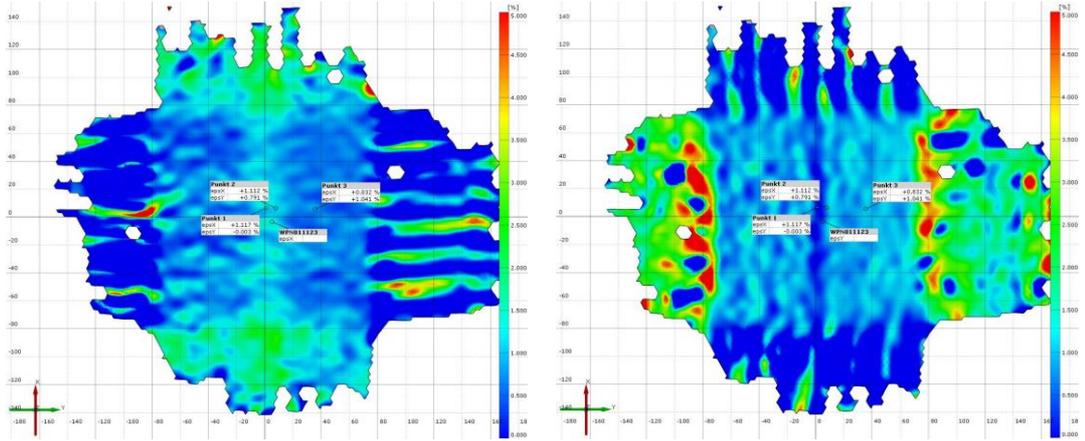
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2 (ED:TD)



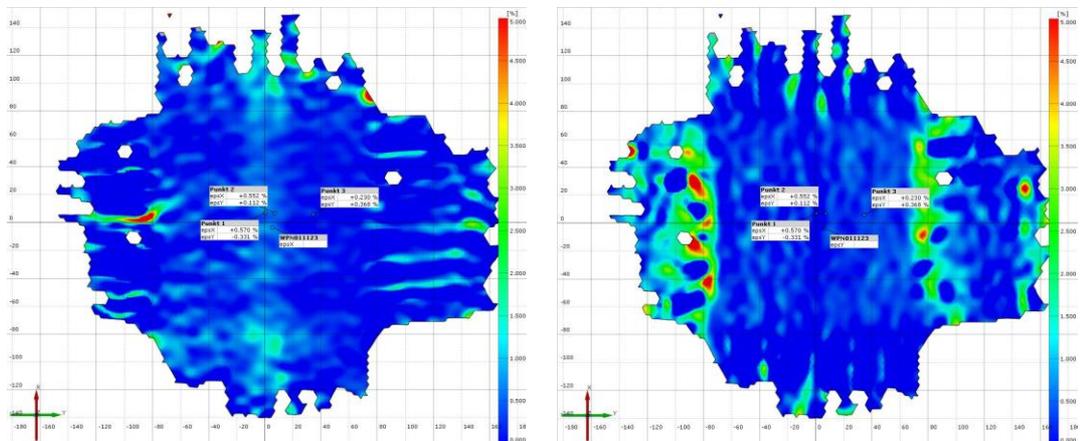
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am Ende der Vorspannphase (4 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



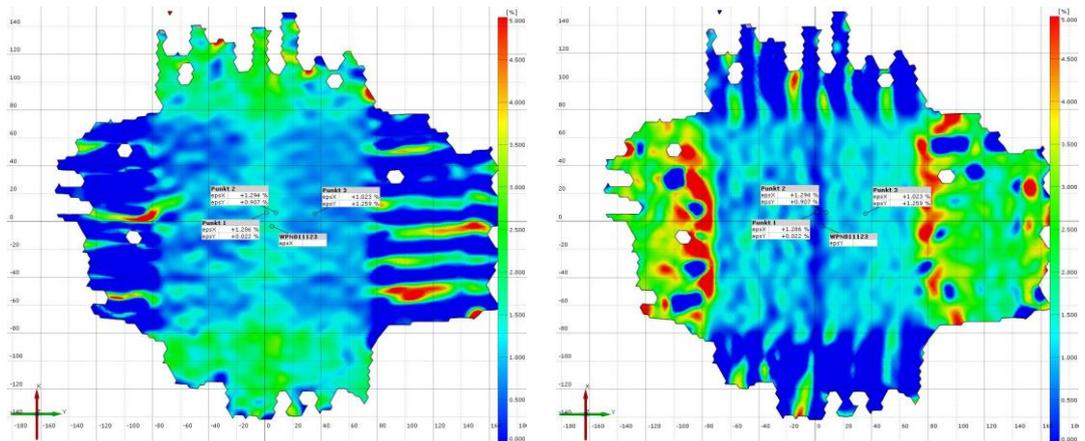
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 1. Lastniveaus (15 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



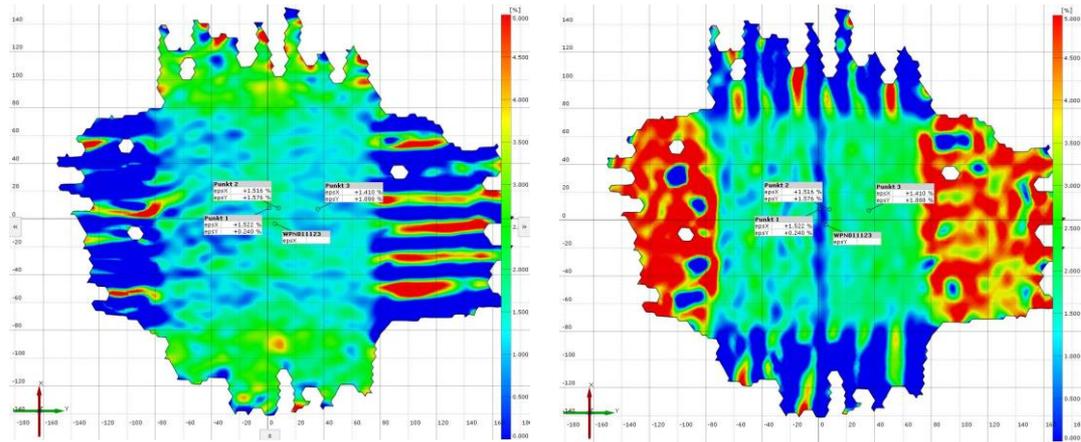
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 1. Lastniveaus (15 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



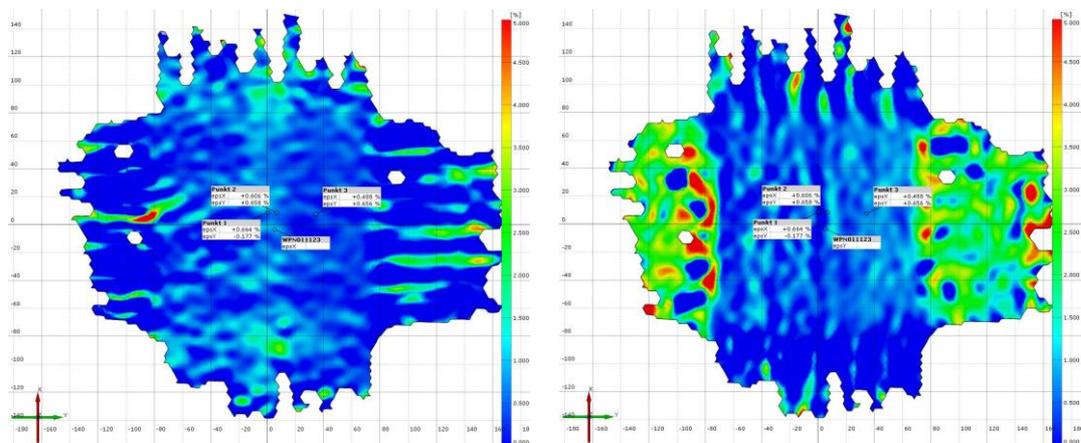
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 1. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



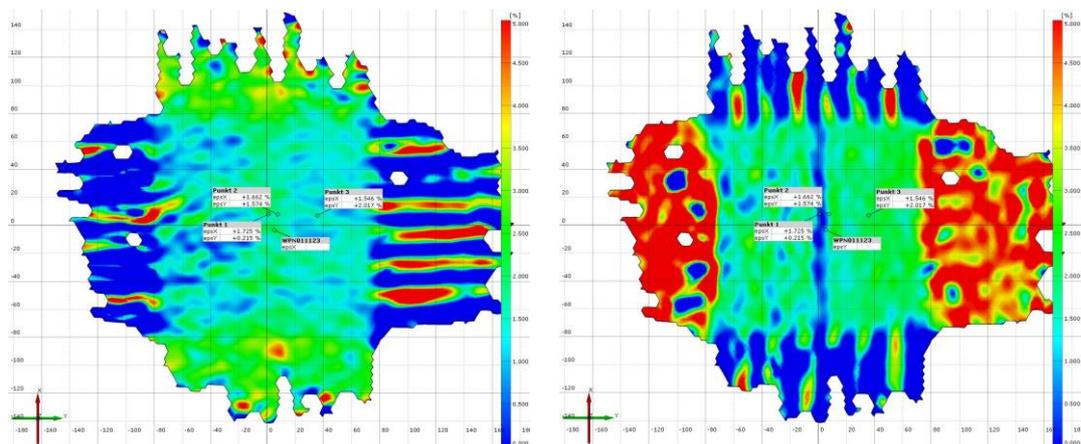
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 2. Lastniveaus (18 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



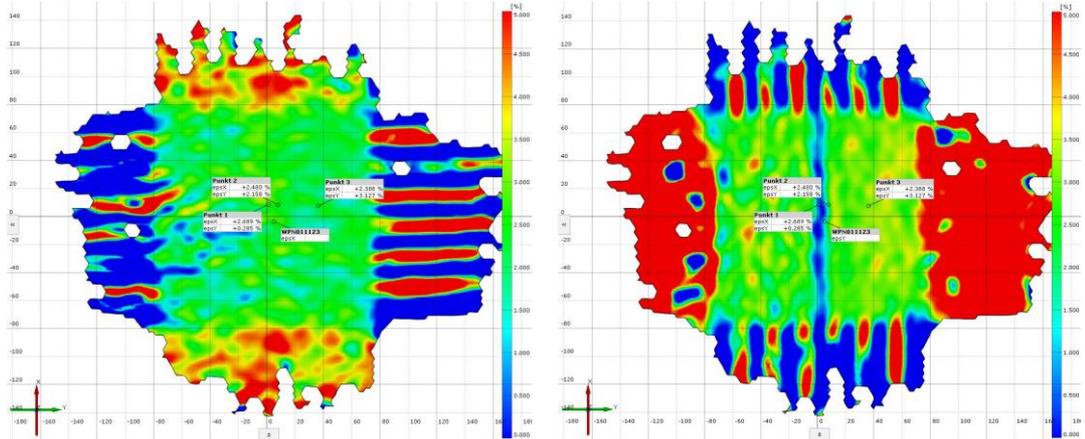
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 2. Lastniveaus (18 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



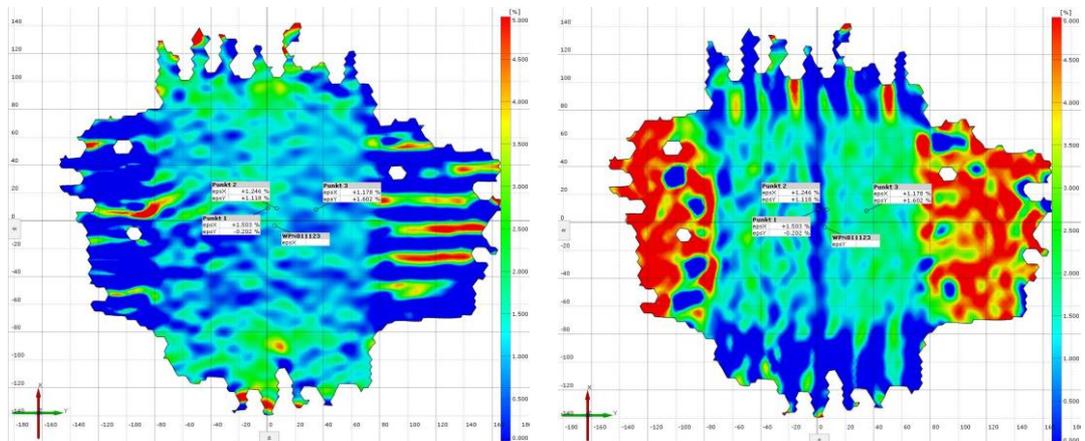
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 3. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



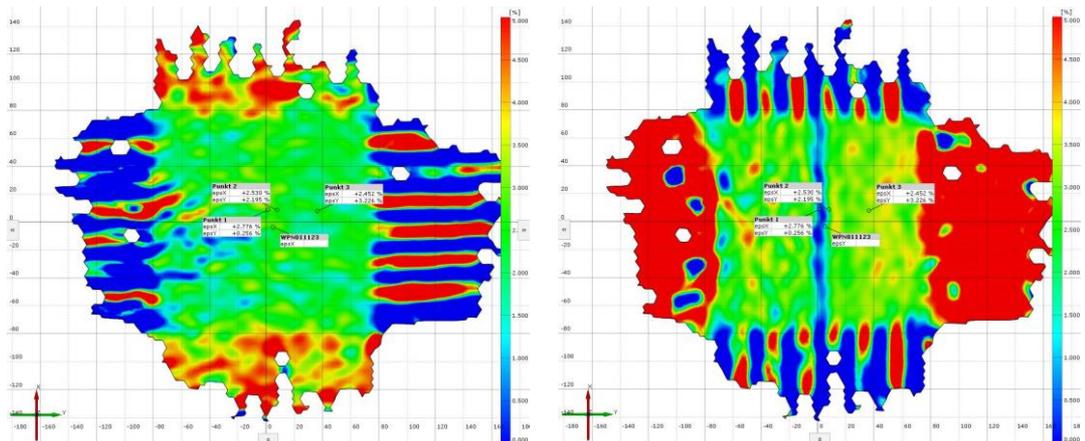
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 3. Lastniveaus (20 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



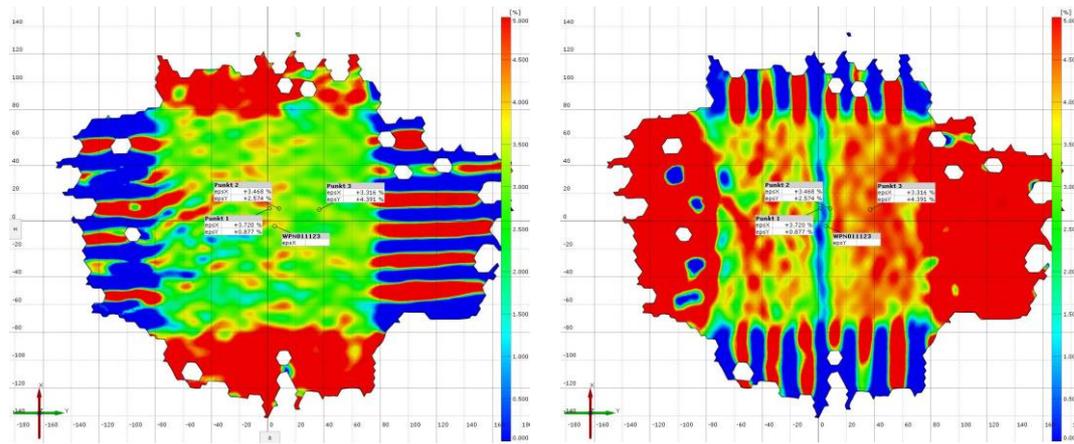
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 3. Lastniveaus (20 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



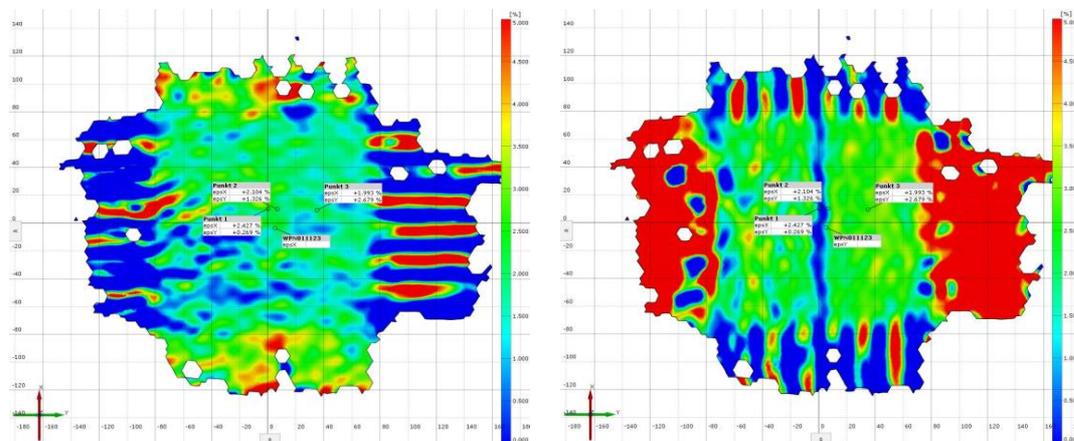
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 3. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



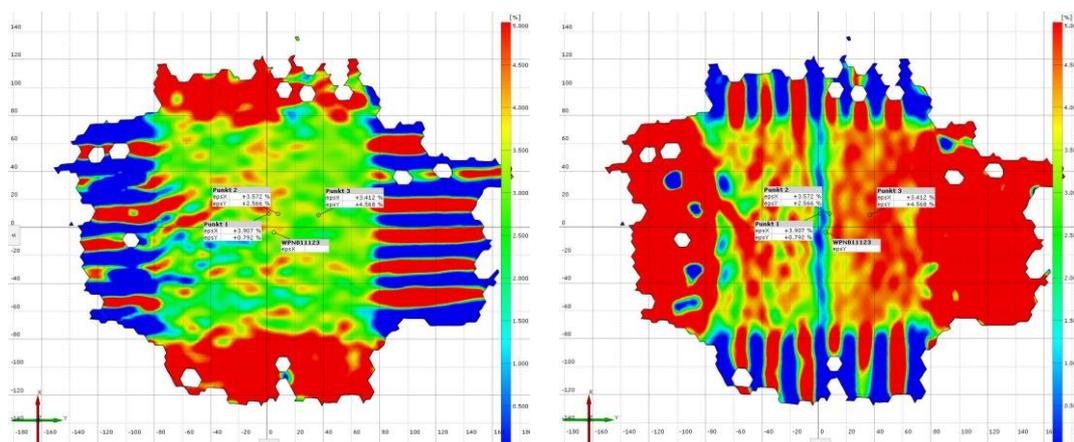
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 4. Lastniveaus (22 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



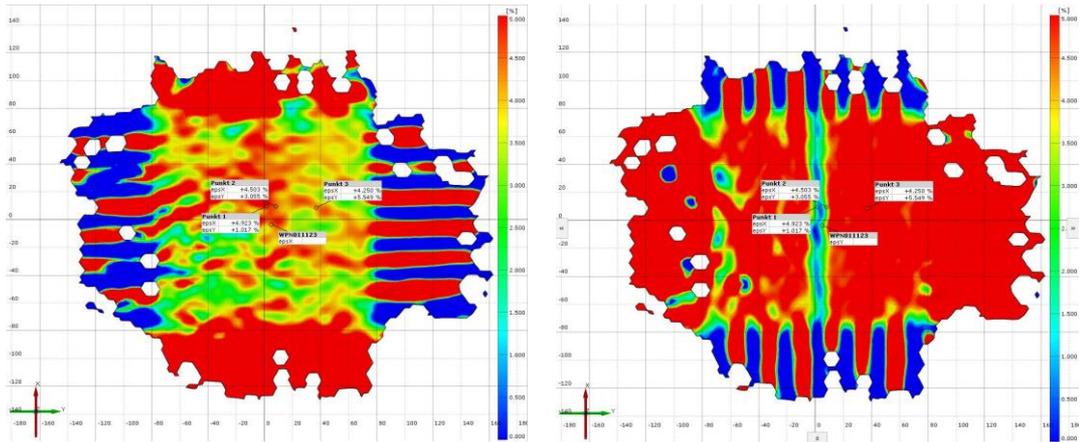
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 4. Lastniveaus (22 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



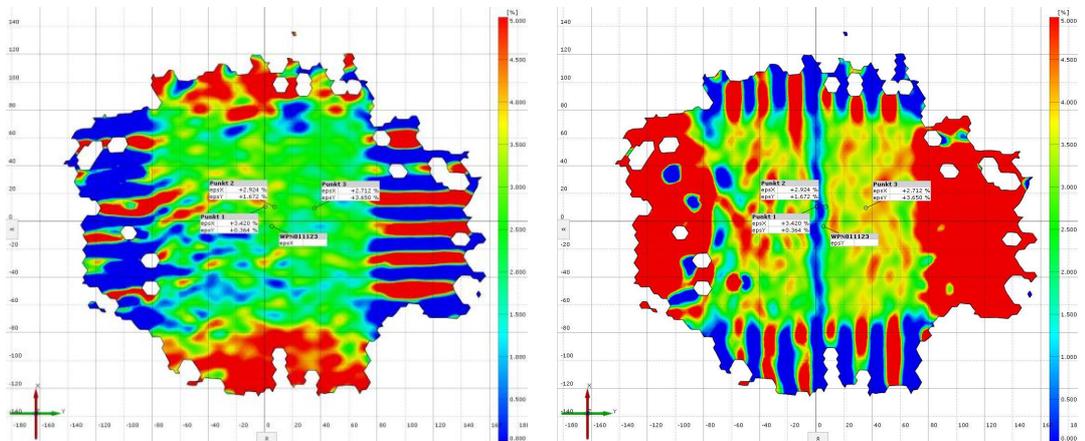
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 4. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



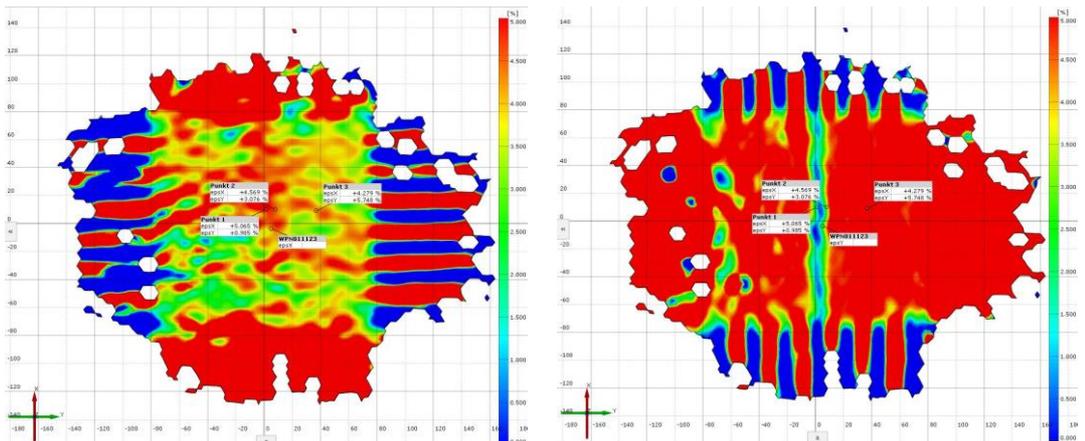
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 5. Lastniveaus (24 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



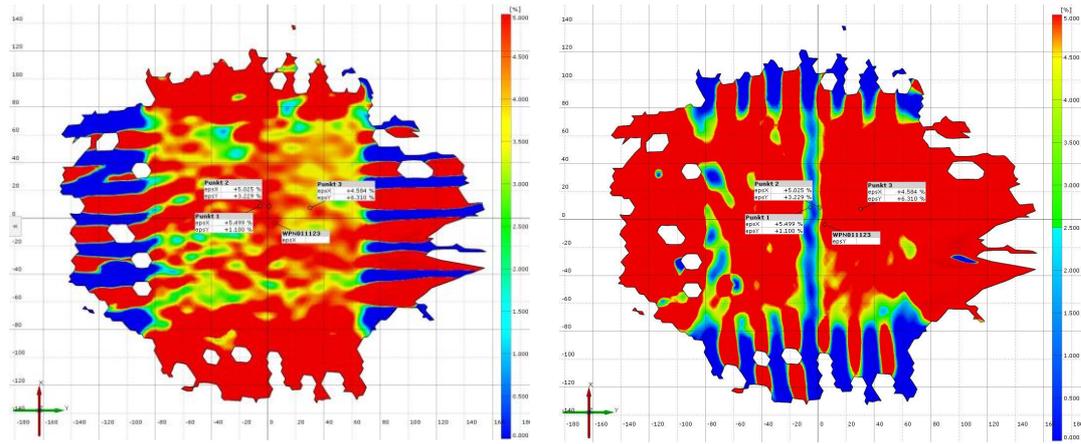
Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am letzten Maximum des 5. Lastniveaus (24 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am Ende der Entlastungsphase des 5. Lastniveaus; (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



Hysterese-Zugprüfung mit einem Spannungsverhältnis von 1:2, Dehnungsaufnahme am ersten Maximum des 6. Lastniveaus (26 MPa); (a) Dehnungen in X-Richtung, (b) Dehnungen in Y-Richtung



DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/81482

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20240202-114444-5

Alle Rechte vorbehalten.