

BBSR-
Online-Publikation
47/2025

Berechnung der Tragsicherheit von gebrochenem EVA-VSG aus ESG

von

Geralt Siebert
Milica Slipcevic



Berechnung der Tragsicherheit von gebrochenem EVA-VSG aus ESG

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.45

Projektlaufzeit: 09.2021 bis 11.2024

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
Milica Slipcevic, M. Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Geralt Siebert (Projektleitung)
geralt.siebert@unibw.de

Redaktion

Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

Stand

Mai 2025

Gestaltung

Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

Bildnachweis

Titelbild: Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Alle weiteren Foto- und Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 22 f.

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Siebert, G.; Slipcevic, M., 2025: Berechnung der Tragsicherheit von gebrochenem EVA-VSG aus ESG. BBSR-Online-Publikation 47/2025. Bonn. <https://doi.org/10.58007/zfcp-kz31>

DOI 10.58007/zfcp-kz31
ISSN 1868-0097

Bonn 2025

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	7
Einführung	8
Problemstellung	10
Stand der Forschung und Praxis	12
Forschungslücke	13
Entwicklungsbedarf	14
Motivation für die Forschung	14
Zielstellung	16
Spezifische Projektziele	16
Gesamtziele und weiterreichender Beitrag	17
Forschungsdesign	19
Phase I: Materialmodellierung der EVA-Zwischenschicht	19
Phase II: Verhalten von Verbundglas nach Bruch	19
Phase III: Systemintegration und praktische Umsetzung des Entwurfs	20
Projektteam und Aufgaben	20
Kooperationspartner	21
Arbeitsplan und Meilensteine	21
Projektverlauf	22
WP 1 – Anforderungen und Machbarkeit der Proben	22
WP 2 – Nichtlineare Viskoelastizität von EVA-Zwischenlagen	22
WP 3 – Verhalten nach Bruch und Wechselwirkung von Glasfragmenten	22
WP 4 – Numerische Modellierung von LSG nach Bruch	22
WP 5 – Kleinskalige Kriechversuche	23
WP 6 – Parametrische Simulationen und Konstruktionswerkzeuge	23
Begründung der Änderungen	23
Experimente mit EVA-Zwischenschicht	24
Kurzbeschreibung eines Versuchsprogramms	24
Spannung bis zum Bruch	26
Belastung bis zum Hochlastbereich und Entlastung	31
Langfristige Auswirkungen nach den Tests	32
Zyklische Belastung mit mehreren Relaxationsstufen	34
Mathematische Formulierung und numerische Umsetzung in Ansys	37
Mathematische Formulierung des Materialmodells	37
Überprüfung der Ergebnisse	43
Zugversuche am gebrochenen VSG	47
Vorbereitung der Probe	47
Uniaxialer Zugversuch bis zum Bruch	48

Planare einachsige Prüfungen bis zum Bruch	57
Bewertung der Ergebnisse	66
Quantifizierung der aussteifenden Wirkung von Glasfragmenten	67
Numerische Modellierung nach durchgeführten Experimenten	68
Ansatz der Versteifungswirkung der Glasfragmente im Rahmen einer numerischen Berechnung	71
Kombination des Materialmodells für die reine Zwischenschicht mit der aussteifenden Wirkung der Glasfragmente	72
Großflächige Kriechversuche unter Berücksichtigung statischer Randbedingungen zur Validierung des numerischen Modells	75
4-Punkt-Biegeversuch Beschreibung	75
Groß angelegter Biegeversuch an einer Verbundglasscheibe (1 × 1 m, 2 × 6 mm + 1,52 mm EVA)	81
Validierung der numerischen Ergebnisse	86
Parametrische Studie	89
Ergebnisse der Linienlagerung	90
Ergebnisse der Punktlagerung	96
Vorhergesagte Durchbiegungen für die Linien- und Punktlagerung	100
Zusammenfassung	103
Ausblick	104
Offene Forschungsfragen	105
Mitwirkende	106
Kurzbiographien	107
Literaturverzeichnis	108
Abbildungsverzeichnis	109
Tabellenverzeichnis	111
Anlagen	112

Kurzfassung

Dieses Forschungsprojekt untersucht das mechanische Verhalten von Verbundsicherheitsglas (VSG) unter verschiedenen Lastbedingungen. Der Schwerpunkt liegt auf den Reaktionen vor und nach dem Bruch, wobei besonderes Augenmerk auf den Beitrag des Zwischenlagenmaterials (EVA) sowie dessen Wechselwirkungen mit gebrochenen Glassplittern gelegt wird. Die experimentellen Untersuchungen umfassen uniaxiale, biaxiale und Vierpunkt-Biegeversuche an verschiedenen Glas-Zwischenschicht-Konfigurationen. Auf Grundlage experimenteller Daten werden Materialmodelle entwickelt und in Ansys für numerische Simulationen implementiert.

Verbundsicherheitsglas (VSG) ist in architektonischen Anwendungen, in denen Festigkeit und Bruchsicherheit von entscheidender Bedeutung sind, unverzichtbar. Ziel dieses Projekts ist es, das Verhalten von VSG unter mechanischer Belastung zu verstehen und zu simulieren. Die Studie gliedert sich in zwei Hauptteile. Zunächst liegt der Schwerpunkt auf der Charakterisierung der Ethylen-Vinylacetat-Zwischenschicht (EVA) durch uniaxiale Zugversuche sowie auf der Entwicklung eines geeigneten Materialmodells für die Finite-Elemente-Analyse. Dieses Modell wird in Ansys implementiert und validiert.

Der zweite Teil befasst sich mit dem Verhalten von VSG nach einem Bruch und konzentriert sich dabei auf die mechanische Wechselwirkung zwischen gebrochenen Glassplittern und der Zwischenschicht. Es wurde eine Reihe von einachsigen und zweiachsigen Zug- und Vierpunkt-Biegeversuchen an vorgebrochenen Verbundglasproben mit unterschiedlichen Zwischenschichtdicken und Glaskonfigurationen durchgeführt. Es wurden vereinfachte und effiziente Materialmodelle entwickelt, um das Verhalten nach einem Bruch in strukturellen Anwendungen zu simulieren.

Das Versuchsprogramm des Projekts konzentrierte sich dabei auf Raumtemperatur und relative Luftfeuchtigkeit. Für die Entwicklung eines realitätsnahen und belastbaren Modells ist jedoch die Einbeziehung variabler Temperatur- und Feuchtebedingungen erforderlich.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung leisten einen Beitrag zum vertieften Verständnis der Tragfähigkeit von LSG nach einem Bruch und unterstützen die Entwicklung genauerer Simulationswerkzeuge für sicherheitskritische Glasstrukturen, deren Versagen ein unmittelbares Risiko für Personen oder erhebliche Sachschäden darstellen kann.

Abstract

This research project investigates the mechanical behaviour of laminated safety glass (LSG) under various loading conditions. It focuses on pre- and post-fracture responses, paying particular attention to the contributions of the interlayer material (EVA) and its interactions with fractured glass fragments. Experimental studies include uniaxial, biaxial, and four-point bending tests on different glass–interlayer configurations. Based on the experimental data, material models are developed and implemented in Ansys for numerical simulations.

Laminated safety glass (LSG) is crucial in architectural applications where strength and post-fracture integrity are vital. This project aims to understand and simulate the behaviour of LSG under mechanical loading conditions. The study is divided into two main parts. First, the focus is on characterising the ethylene-vinyl acetate (EVA) interlayer through uniaxial tension tests and developing an appropriate material model for finite element analysis. This model is implemented and validated in Ansys.

The second part addresses the post-fracture performance of LSG, focusing on the mechanical interaction between fractured glass fragments and the interlayer. A series of uniaxial and biaxial tension and four-point bending tests were conducted on pre-fractured laminated glass specimens with varying interlayer thicknesses and glass configurations. Simplified and efficient material models were developed to simulate the post-fracture behaviour in structural applications. The results of this research enhance the understanding of the load-bearing capacity of LSG after fracture and support the development of more accurate simulation tools for safety-critical glass structures.

Einführung

Verbundsicherheitsglas (VSG) ist ein wesentliches Bauelement in der modernen Bau- und Fahrzeugtechnik, insbesondere in Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Personensicherheit, die Resttragfähigkeit und die Bruchsicherheit. Es handelt sich um einen mehrschichtigen Werkstoff, bei dem zwei oder mehrere Glasscheiben durch eine Polymer-Zwischenschicht – häufig aus Ethylvinylacetat (EVA) oder Polyvinylbutyral (PVB) – dauerhaft miteinander verbunden sind. Im Falle eines Glasbruchs verhindert die Zwischenschicht das Auseinanderfallen der Bruchstücke, reduziert die Verletzungsgefahr und gewährleistet eine gewisse Resttragfähigkeit. Damit unterscheidet sich VSG grundlegend von monolithischem Glas und nimmt eine Schlüsselrolle in sicherheitsrelevanten Verglasungen ein, z. B. bei Überkopferverglasungen, Absturzsicherungen oder Fahrzeugverglasungen.

Zudem könnte zu Beginn die Einleitung mit der Einordnung des Projektes in den Bereich VSG noch genauer ausgeführt werden: Das vorliegende Forschungsprojekt ist im Bereich der mechanischen Charakterisierung und Modellierung von VSG angesiedelt. Es untersucht systematisch das Tragverhalten von VSG sowohl vor als auch nach dem Bruch – mit besonderem Fokus auf das Zusammenspiel zwischen Glasbruchstücken und Zwischenschichtmaterial sowie auf die realitätsnahe Abbildung dieses Verhaltens in numerischen Simulationen.

Das Forschungsgebiet dieser Arbeit liegt im Schnittbereich zwischen experimenteller Mechanik, Bruchmechanik und computergestützter Modellierung eines glasbasierten Verbundwerkstoffs. Gegenstand der Untersuchung ist VSG, bestehend aus zwei vorgespannten Einscheiben-Sicherheitsglasscheiben (ESG), die mit EVA-Folien unterschiedlicher Dicke laminiert sind. Die Arbeit befasst sich sowohl mit dem mechanischen Verhalten im intakten Zustand als auch mit dem Tragverhalten nach Glasbruch unter verschiedenen Belastungsbedingungen, darunter ein- und mehrachsige Zugversuche sowie 4-Punkt-Biegeversuche.

Aktuelle Bemessungsverfahren und Normen greifen häufig auf stark vereinfachte Annahmen zurück oder arbeiten mit empirisch abgeleiteten Sicherheitsfaktoren. Diese erfassen jedoch die komplexen mechanischen Wechselwirkungen im gebrochenen Zustand nur unzureichend. Dies kann entweder zu überdimensionierten Konstruktionen oder zu Fehleinschätzungen der tatsächlichen Sicherheitsreserven führen. Besonders das viskoelastische und nichtlineare Verhalten von EVA unter mehrachsiger Beanspruchung sowie die Wirkung der Glasbruchstücke im Verbund sind bislang nur unvollständig erfasst.

Im Rahmen des Projekts wurden zunächst experimentelle Untersuchungen an EVA-Folien durchgeführt, um das Spannungs-Dehnungs-Verhalten zu charakterisieren und geeignete Materialmodelle für die

Finite-Elemente-Analyse (FEA) abzuleiten. Darauf aufbauend folgten ein- und mehrachsige Zugversuche sowie 4-Punkt-Biegeversuche an vorgebrochenen VSG-Proben mit unterschiedlichen Interlayerdicken und Glasaufbauten. Diese Experimente liefern entscheidende Erkenntnisse über die Nachbruchmechanismen und die Resttragfähigkeit solcher Systeme.

Ziel der Arbeit ist es, realistische, numerisch effiziente Materialmodelle zu entwickeln, die das Nachbruchverhalten von VSG präzise abbilden können. Diese Modelle sollen zur Verbesserung von Simulationswerkzeugen zur Auslegung sicherheitskritischer Glasstrukturen beitragen und so eine genauere Beurteilung der Strukturtragfähigkeit nach einem Glasbruch ermöglichen.

Problemstellung

Im Bereich des Glasbaus und der Anwendung von Glas als Bauelement muss die Sicherheit stets im Vordergrund stehen, da Glas als Baustoff sehr spröde ist und ohne Vorwarnung sofort zerbricht. Die Verwendung von Verbundglas sorgt für ein zuverlässigeres Bauelement, da die Zwischenschicht aus einem Polymermaterial besteht, das sich hinsichtlich des mechanischen Verhaltens von dem des Glases unterscheidet. In der täglichen Ingenieurpraxis gibt es einige Zwischenschichten wie PVB, EVA, Ionoplast usw. Hauptsächlich wird PVB verwendet. Polyvinylbutyral (PVB) ist nach wie vor weltweit die Standard-Zwischenschicht für Architektur- und Automobilverbundwerkstoffe, unterstützt durch eine breite Lieferantenbasis (z. B. Eastman/Saflex, Kuraray/Trosifol...) und eine große Auswahl an Qualitäten (Standard, akustisch, „strukturelles“ PVB). EVA hat einen geringeren Anteil an der Gebäudeverglasung, ist jedoch beliebt, wenn autoklavenfreie Verarbeitung, hohe Haftung und Solarlamine gewünscht sind. Die Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung und Feuchtigkeit hängt von der Zusammensetzung und der Exposition ab. Ionoplast-Zwischenschichten (z. B. SentryGlas) sind aufgrund ihrer deutlich höheren Steifigkeit und Feuchtigkeitsfestigkeit ein schnell wachsender Nischenmarkt für strukturell anspruchsvolle oder offene Kantenanwendungen - etwa Balustraden, Vordächer, punktgehaltene Konstruktionen, Hurrikan-/Explosionsschutz.

Alle genannten Zwischenschichten sind Polymere, ihre chemische Zusammensetzung ist jedoch unterschiedlich, sodass sich ihre mechanischen Eigenschaften unter Belastung und in Kombination mit Glas unterscheiden.

Es gibt verschiedene Gründe, warum PVB die am häufigsten verwendete Zwischenschicht ist; dennoch hat jede Einzelne in bestimmten Umgebungen und unter bestimmten Belastungsbedingungen Vor- und Nachteile. Hier liegt der Schwerpunkt auf EVA als Zwischenschicht, da es unter den gleichen Bedingungen anders reagiert als andere Zwischenschichten. Dies kann Empfehlungen für Einsatzbereiche von EVA liefern. Die folgenden Bemerkungen sind zusammengefasste Forschungsergebnisse, die mit EVA durchgeführt wurden. EVA verhält sich bei höherer Luftfeuchtigkeit besser und sorgt im Vergleich zu PVB für eine elastischere Reaktion des Verbundglases.

Die EVA-Zwischenschicht ist ein polymeres Elastomer (Schwarzl 1990) mit einer chemischen Zusammensetzung, die von der häufig verwendeten PVB-Zwischenschicht abweicht. Ethylen und Vinylacetat (EVA) sind zwei Monomere, die während der Polymerisation (Bergström 2015) miteinander verbunden werden, wobei sie chemisch zu einem EVA-Copolymer verschmelzen. Aus diesem Grund unterscheidet sich der Laminierungsprozess von EVA von dem von PVB. Zur Herstellung von Verbundglas mit EVA-Zwischenschicht werden nur Temperaturen bis zu 160 °C verwendet, was sich

deutlich vom Autoklaven im Laminierungsprozess mit PVB-Zwischenschicht unterscheidet. Detaillierte Informationen zum Laminierungsprozess finden Sie bei Kraus (2019). Im Allgemeinen bietet die EVA-Zwischenschicht die gleichen mechanischen Eigenschaften wie andere gängige Zwischenschichten (Sable et al. 2019) und ist darüber hinaus feuchtigkeitsbeständig und weist bessere Eigenschaften auf, wenn sie Temperaturzyklen ausgesetzt ist (Martín et al. 2020; Centelles et al. 2020a). Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften lässt sich die EVA-Zwischenschicht mit anderen Arten von Zwischenschichten vergleichen; jedoch lässt sich dieser Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Spezifikationen (und Zusammensetzungen) der Zwischenschichten, die hauptsächlich vom Hauptzweck der LG abhängen, nicht ohne Weiteres verallgemeinern.

Basierend auf früheren Forschungen und Tests zeigte die EVA-Zwischenschicht einige Vorteile hinsichtlich ihres Beitrags zur Trag- und Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas.

Vor diesem Hintergrund verfolgt der vorliegende Forschungsantrag das Ziel, den Einsatz von Verbundsicherheitsglas (VSG) weiter zu verbessern. Der Nachweis der Resttragfähigkeit von VSG aus Einscheibensicherheitsglas (ESG) soll durch ein vereinfachtes Berechnungskonzept erfolgen, um wirtschaftlichere VSG-Lösungen zu ermöglichen. Untersucht werden VSG-Aufbauten aus zwei ESG-Scheiben mit einer Zwischenschicht aus Ethylen-Vinyl-Acetat (EVA). Aufgrund der im Vergleich zu teilvorgespanntem Glas (TVG) und nicht vorgespanntem Floatglas (FG) höheren Bruchfestigkeit von ESG sind im Verbund dünnere und leichtere VSG-Scheiben denkbar. Beim Ersatz der konventionell verwendeten Polyvinylbutyral-Zwischenschicht (PVB) durch EVA wird zudem eine erhöhte Resttragfähigkeit nach einem Glasbruch erwartet.

Der Nachweis dieser Resttragfähigkeit muss derzeit durch zeit- und kostenintensive Bauteilversuche im Originalmaßstab erfolgen. Diese Versuche sollen durch eine valide numerische Abbildung ersetzt werden. Hierfür ist eine experimentelle Charakterisierung der Zwischenschicht erforderlich, um die nichtlineare Viskoelastizität der EVA-Folie realitätsnah zu erfassen. Geplant sind hierzu uni- und biaxiale Kriech- bzw. Relaxationsversuche, auf deren Grundlage ein Materialmodell kalibriert wird.

Das übergeordnete Förderziel ist eine ingenieurmäßig belastbare rechnerische Abbildung des (Rest-)Tragverhaltens gebrochener VSG-Scheiben aus ESG, sodass eine effektive, materialsparende VSG-Verglasung auf Basis einer Modellberechnung ausgelegt werden kann. Die Modellierung wird in eine FEM-Software integriert und soll künftig aufwendige Bauteilversuche ersetzen. Durch den Einsatz der EVA-Zwischenschicht sollen die dort erkannten Potenziale für die Resttragfähigkeit systematisch gesteigert werden.

Zur Materialbeschreibung der EVA-Zwischenschicht wird ein invariantenbasiertes hyperelastisches Energiepotenzial (erweiterter Mooney-Rivlin-Ansatz auf Basis der Invarianten I_1 und I_2) in Kombination mit einer viskoelastischen Erweiterung verwendet. Die Parameter werden aus Zug- und Kriechversuchen ermittelt. Das resultierende numerische Modell bildet die gemessenen Spannungs-Dehnungs-Kurven bis in hohe Dehnungen sehr gut ab (vgl. Abbildung 19, 30 „Numerisches Modell“), sodass eine verlässliche Prognose des Trag- und Resttragverhaltens von VSG mit EVA möglich ist.

Stand der Forschung und Praxis

Verbundsicherheitsglas (VSG) mit Ethylvinylacetat (EVA)-Zwischenschicht wird aufgrund seiner Resttragfähigkeit nach einem Glasbruch häufig in der Verglasungstechnik eingesetzt. Zahlreiche Studien haben das Verhalten von Verbundglas unter statischer und dynamischer Belastung vor und nach dem Bruch untersucht. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die Zwischenschicht eine entscheidende Rolle für die Erhaltung der Integrität des Glasverbunds nach einem Bruch spielt.

Frühere Untersuchungen, beispielsweise von Serafinavicius et al. und Kraus et al., haben das mechanische Verhalten und die zeitabhängige Reaktion von EVA und anderen Zwischenschichten unter verschiedenen thermischen und mechanischen Belastungsbedingungen untersucht. Darüber hinaus ist die Verwendung numerischer Simulationen zur Nachbildung des experimentellen Verhaltens mittlerweile Standard, wobei hyperelastische und viskoelastische Modelle eingesetzt werden, um die komplexen mechanischen Reaktionen der Zwischenschichtmaterialien zu erfassen.

- **Lokaler Brückeneffekt von gebrochenem Verbundglas mit EVA-Zwischenschichten:** Eine experimentelle Studie von Zemanova et al. untersuchte die Haftungseigenschaften der EVA-Zwischenschichten in der Phase nach dem Bruch mithilfe des Durchbruchzugversuchs (TCT). Die Untersuchung zeigte, dass EVA-Zwischenschichten eine wichtige Rolle bei der Erhaltung der strukturellen Integrität nach einem Glasbruch spielen.
- **Verhalten nach Bruch unter dynamischer Belastung:** In einer Studie von Hooper et al. wurden experimentelle Ergebnisse zum Verhalten von laminierten, wärmebehandelten Glaselementen nach Bruch unter dynamischer Belastung untersucht und Diagramme zur effektiven Steifigkeit im gebrochenen Zustand erstellt.
- **Einfluss der Zwischenschicht-Eigenschaften auf das Aufprallverhalten:** Eine Studie untersuchte die Auswirkungen von PVB- und EVA-Zwischenschichten auf das Aufprallverhalten von Verbundglas bei niedrigen Geschwindigkeiten und zeigte, wie unterschiedliche Zwischenschichtmaterialien die Rissbildung und -ausbreitung beeinflussen.

- **Strukturanalyse des Versagensverhaltens:** Die Forschung analysierte das Versagensverhalten von Verbundglas mit verschiedenen Zwischenschichtmaterialien, darunter EVA, unter unterschiedlichen Belastungsbedingungen und trug so zu einem besseren Verständnis der strukturellen Leistungsfähigkeit nach einem Bruch bei.

Diese Studien unterstreichen die entscheidende Rolle von Zwischenschichtmaterialien, insbesondere von EVA, für das Verhalten von Verbundglas nach einem Bruch.

Trotz dieser Fortschritte konzentrieren sich die meisten bestehenden Studien entweder auf das Verhalten im intakten Zustand (vor dem Bruch) oder auf das allgemeine Verhalten nach dem Bruch unter idealisierten Annahmen. Häufig wird die verstärkende Rolle kleiner Glasfragmente im Zustand nach dem Bruch übersehen oder vereinfachend behandelt. Dies führte zu einer kritischen Lücke bei der genauen Modellierung des Übergangsverhaltens zwischen Glasbruch und vollständiger Abhängigkeit von der Zwischenschicht. Darüber hinaus wurde das Verhalten im Maßstabsmodell unter realistischen Randbedingungen, wie Punkt- oder Linienstützen, durch experimentell kalibrierte Modelle nur unzureichend validiert.

Forschungslücke

Die größte Forschungslücke besteht in der quantitativen Bewertung und Modellierung des Versteifungseffekts von Glasfragmenten nach einem Bruch. Es ist zwar bekannt, dass Fragmente zur Reststeifigkeit und Tragfähigkeit beitragen, jedoch wurden eine systematische experimentelle Quantifizierung sowie die Einbeziehung dieses Verhaltens in numerische Simulationen bislang noch nicht umfassend untersucht.

Darüber hinaus gibt es nur wenige Daten darüber, wie unterschiedliche Zwischenschichtdicken und Auflagbedingungen die Leistung von gebrochenem Verbundglas in realen strukturellen Szenarien beeinflussen. Dies ist besonders wichtig für die Konstruktionsprüfung in Anwendungen, in denen Resttragfähigkeit und Duktilität wesentliche Sicherheitsparameter sind, etwa bei punktbefestigten Fassadensystemen oder explosionsgeschützten Verglasungen.

Schließlich fehlen den meisten validierten numerischen Modellen bisher die Kalibrierung anhand hochauflösender mechanischer Daten aus einachsigen und planaren Zugversuchen nach dem Bruch. Außerdem wurden sie nicht auf das Verformungsverhalten unter Dauerbelastung im Maßstabsmodell getestet.

Entwicklungsbedarf

Angesichts der oben genannten Punkte besteht ein klarer Bedarf an

- **Experimentelle Quantifizierung des Beitrags von Glasfragmenten** zur strukturellen Leistungsfähigkeit von Verbundsicherheitsglas nach einem Bruch.
- **Entwicklung und Validierung vereinfachter, zugleich physikalisch fundierter Materialmodelle** (z. B. bilineare Elastoplastizität mit perfekter Plastizität), die das Verhalten nach dem Bruch in Standard-Engineering-Software wie ANSYS realistisch simulieren können.
- **Überbrückung der Lücke zwischen kleinen Laborversuchen und Anwendungsszenarien in Originalgröße**, unter Berücksichtigung von Geometrie, Auflagerbedingungen und zeitabhängigen Belastungseffekten (Kriechen).
- **Die Integration realistischer Modelle für das Verhalten nach einem Bruch in Konstruktionsnormen und technischen Verfahren wird eine genauere Konstruktion und Sicherheitsbewertung von Verbundglassystemen ermöglichen.**

Diese Forschung trägt direkt zur Entwicklung sichererer und zuverlässigerer Glasstrukturen bei, indem sie einen praktischen Rahmen für die Bewertung der Integrität nach einem Bruch bietet und die Entwicklung hochleistungsfähiger Verbundglassysteme erleichtert.

Motivation für die Forschung

Verbundsicherheitsglas (VSG) ist in modernen strukturellen Anwendungen von entscheidender Bedeutung, insbesondere wenn die Integrität nach einem Bruch für die Sicherheit von Personen und die Zuverlässigkeit des Systems unerlässlich sind. Obwohl umfangreiche Forschungsarbeiten das Verständnis des Verhaltens von VSG nach einem Glasbruch verbessert haben – einschließlich des Beitrags von Glasspliterrückständen und der Rolle viskoelastischer Zwischenschichten –, besteht nach wie vor eine kritische Lücke zwischen akademischen Erkenntnissen und der technischen Praxis.

Aktuelle Konstruktionsnormen und Softwaretools basieren nach wie vor auf konservativen Annahmen, wobei die Tragfähigkeit gebrochenen Glases nach einem Bruch oft außer Acht gelassen wird. Zwar wurden vereinfachte Materialmodelle zur Simulation dieses Verhaltens vorgeschlagen, doch ist ihre praktische Umsetzung in realen Konstruktionssystemen nach wie vor begrenzt. Zu den größten Herausforderungen zählen die Variabilität der Randbedingungen und der Geometrie sowie zeitabhängige Effekte wie Kriechen, und die mangelnde Integration solcher Modelle in allgemein anerkannte Konstruktionsnormen.

Darüber hinaus konzentrierte sich die bisherige Forschung hauptsächlich auf kleine Testproben unter idealen Bedingungen. Im Gegensatz dazu sind reale Verglasungssysteme größer, komplexer und über lange Zeiträume hinweg dynamischer und umgebungsbedingter Belastungen ausgesetzt. Um eine zuverlässige und effiziente Verwendung von VSG in der Tragwerksplanung zu gewährleisten, müssen dringend validierte, skalierbare und benutzerfreundliche Modellierungsansätze entwickelt werden, die das Verhalten von VSG nach dem Bruch unter praktischen Bedingungen erfassen können.

Diese Forschung befasst sich mit der Notwendigkeit, grundlegende Erkenntnisse in zuverlässige Ingenieurwerkzeuge zu übertragen, indem physikalisch fundierte, zugleich vereinfachte Modelle entwickelt, über verschiedene Maßstäbe und Bedingungen hinweg validiert und die Grundlage für ihre Integration in Konstruktionsnormen geschaffen werden. Die Überbrückung dieser Lücke wird eine sicherere, wirtschaftlichere und nachhaltigere Verwendung von Verbundglas in der Bauindustrie ermöglichen.

Zielstellung

Das zentrale Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, das mechanische Verhalten von Verbundsicherheitsglas (VSG) nach einem Bruch zu verstehen, zu quantifizieren und zu modellieren, das Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) und EVA-Zwischenschichten umfasst. Das übergeordnete Ziel ist es, validierte Daten und zuverlässige Modellierungsansätze bereitzustellen, die die Konstruktion, Simulation und Sicherheitsbewertung struktureller Glaselemente in technischen Anwendungen verbessern.

Diese Arbeit befasst sich explizit mit dem mechanischen Verhalten von gebrochenem Verbundglas unter einachsiger und planarer Zugbeanspruchung sowie unter Biegung, wobei der Schwerpunkt auf der Resttragfähigkeit der Zwischenschicht und der Glasfragmente liegt. Durch detaillierte Experimente und die Entwicklung vereinfachter, physikalisch fundierter Materialmodelle trägt das Projekt zu realistischeren Simulationsstrategien und zu einem besseren technischen Verständnis des Verhaltens nach dem Bruch bei.

Spezifische Projektziele

- **Experimentelle Untersuchung**

Um das Materialverhalten in der Phase nach dem Bruch zu erfassen, wurden kontrollierte Zug- und Biegeversuche an gebrochenen VSG-Proben mit unterschiedlichen Geometrien und Auflagerbedingungen durchgeführt.

- **Quantifizierung des Beitrags der Fragmente**

Messung und Bewertung der verstärkenden Wirkung von Glasfragmentrückständen in der Zwischenlage und Bestimmung ihres Einflusses auf die Zugsteifigkeit und Restfestigkeit.

- **Materialmodellierung**

Entwicklung und Validierung numerischer Materialmodelle (z. B. bilineare Elastoplastizität mit perfekter Plastizität), die das experimentelle Spannungs-Dehnungs-Verhalten, insbesondere für gebrochene Verbundsysteme, genau widerspiegeln.

- **Numerische Validierung**

Implementierung und Test dieser Modelle in Finite-Elemente-Simulationen mit ANSYS, um Versuchsaufbauten und Belastungsbedingungen, einschließlich Biege- und Kriechversuchen im Maßstab 1:1, nachzubilden.

- **Parametersensitivität und strukturelle Empfehlungen**

Analyse, wie Variationen der Zwischenschichtdicke, der Probengeometrie und der Randbedingungen die Leistung beeinflussen, um praktische Konstruktionsempfehlungen abzuleiten.

Gesamtziele und weiterreichender Beitrag

Die übergeordneten Ziele des Projekts reichen weit über die experimentelle Charakterisierung hinaus. Diese Forschung leistet einen Beitrag hinsichtlich:

- **Verbesserte Sicherheit bei der Konstruktion von Strukturglas**

Durch die Bereitstellung validierter Daten und zuverlässiger Bruchmodelle können Ingenieure mit größerer Sicherheit hinsichtlich der Restleistung von Verbundglas konstruieren.

- **Verbesserte numerische Modellierungswerkzeuge**

Die Implementierung experimentell untermauerter Materialmodelle in gängige Engineering-Software wie ANSYS verbessert die Genauigkeit und die Zugänglichkeit von Glasstruktursimulationen.

- **Unterstützung bei der Standardisierung und Normenentwicklung**

Die Ergebnisse bieten eine wissenschaftliche Grundlage für die Weiterentwicklung technischer Normen zur Konstruktion von Verbundglas (z. B. EN 16612), insbesondere für die Bewertung des Verhaltens nach einem Bruch und die Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit.

- **Grundlagen für weitere wissenschaftliche Arbeiten**

Diese Forschungsarbeiten schaffen eine solide Grundlage für zukünftige Doktorarbeiten und Publikationen, insbesondere in den Bereichen Hybridwerkstoffe, Bruchmechanik und Modellierung von Strukturglas.

Forschungsdesign

Phase I: Materialmodellierung der EVA-Zwischenschicht

- **Versuchsprogramm:**
 - Einachsige Zugversuche bis zum Versagen und zyklische Versuche an zwei EVA-Varianten (28 % und 30 % Vinylacetatgehalt).
 - Das unmittelbare und langfristige Rückstellverhalten wurde untersucht, um die viskoelastischen und plastischen Komponenten zu bewerten.
- **Mathematisches Modell:**
 - Ein Mooney-Rivlin-Hyperelastizitätsmodell mit neun Parametern wurde an die Spannungs-Dehnungs-Daten angepasst.
 - Die Funktion wurde aus dem Dehnungsenergiepotenzial als Funktion der ersten und zweiten Invarianten für einachsige Zustände abgeleitet.
 - Es wurde eine hohe Genauigkeit erreicht: Bestimmungskoeffizienten $R^2 > 0,99$, was die hervorragende Modellgenauigkeit bestätigt.
- **ANSYS-Implementierung:**
 - Das Modell wurde für die Verwendung mit Solid187-Elementen in ANSYS codiert, die aufgrund ihrer Eignung für hyperelastische Probleme mit großen Verformungen ausgewählt wurden.
 - Die Validierung umfasste:
 - Simulation der einachsigen Spannung auf 12×12 mm und der Geometrien in Originalgröße.
 - Spannungs-Dehnungs-Reaktion, die weitgehend mit den experimentellen Daten übereinstimmen (Abweichung ≤ 4 % für EVA 2, ~ 19 % für EVA 1 aufgrund von Steifigkeitsunterschieden).
 - Das validierte EVA-Modell wird nun als Grundlage für die Simulation des Verhaltens von LSG nach einem Bruch in Phase II verwendet.

Phase II: Verhalten von Verbundglas nach Bruch

- **Versuchsprogramm:**
 - Vorgebrochene LSG-Proben wurden unter einachsiger, zweiachsiger und 4-Punkt-Biegung getestet, um die Restfestigkeit zu ermitteln.

- Es wurden mehrere Glasdicken und Zwischenschichtkonfigurationen untersucht, um typische Fassaden- und Bodensysteme darzustellen.
- **Entwicklung eines Materialmodells:**
 - Erweiterung des bestehenden EVA-Modells zur Untersuchung der Wechselwirkung mit Glasspliterrückständen.
 - Entwicklung eines vereinfachten elastoplastischen bilinearen Modells für den technischen Einsatz, welches anhand von High-Fidelity-Simulationen und experimentellen Trends kalibriert wurde.
- **Validierungsstrategie:**
 - Vergleich der Simulationsergebnisse mit experimentellen Last-Verformungs-Kurven und Versagensmodi.
 - Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Zwischenschichtdicke, der Fragmentbegrenzung und der Randbedingungen.

Phase III: Systemintegration und praktische Umsetzung des Entwurfs

- **Hochskalierung:**

Simulation von Verglasungssystemen in Originalgröße, einschließlich Punktbefestigungen, Rahmen

Projektteam und Aufgaben

Aufgabe	Verantwortungsbereich
Hauptforscher	Wissenschaftliche Leitung, Integration von Modellen und Validierung
Leiter EVA-Test und Modellierung	Mathematische Modellierung, Parameteranpassung und ANSYS-Implementierung
LSG-Tests nach Bruch	Durchführung und Analyse von Zerstörungstests an gebrochenem Glas
Simulationsingenieur	Großraummodellierung, Sensitivitätsstudien und Skalierbarkeit
Forschungsassistenten	Datennachbearbeitung, Skripting, Dokumentation
Industriepartner	Eingabe von Daten aus Praxistests, Feedback zur Benutzerfreundlichkeit des Konstruktionsworkflows

Kooperationspartner

- **Materialzulieferer** – liefern Glas- und EVA-Muster mit bekanntem VA-Gehalt und technischen Daten.
- **Glaserhersteller** – unterstützen bei der Herstellung laminiertes Muster unter realen Bedingungen.
- **Akademische Partner** – kooperieren bei der Entwicklung fortschrittlicher Modellierungs- und statistischer Validierungstechniken.

Arbeitsplan und Meilensteine

Phase	Phase	Meilenstein
Phase I	EVA-Tests, Modellformulierung und Validierung in ANSYS	Validiertes nichtlineares Materialmodell für EVA
Phase II.a	Tests nach Bruch und Analyse von Glassplittern	Datensatz zur Leistung von gebrochenem LSG
Phase II.b	Entwicklung und Implementierung eines vereinfachten bilinearen Materialmodells	ANSYS-kompatibles Tool zur Simulation nach Bruch
Phase III.a	Vollsystemsimulation mit Grenz- und Zeiteffekten	Realistische Simulationen der strukturellen Leistung
Phase III.b	Erstellung von Konstruktionsdiagrammen, Empfehlungen und Arbeitsabläufen für Ingenieure	Übertragung der Forschungsergebnisse in die praktische Anwendung
Verbreitung	Abschlussbericht, Veröffentlichung in Fachzeitschriften, Zusammenarbeit mit Normungsgremien	Vorschläge zur Aufnahme in Normen und Richtlinien

Projektverlauf

Das Projekt wurde planmäßig durchgeführt, wobei nahezu alle Arbeitspakete und Aufgaben abgeschlossen wurden. Trotz des Mangels an spezialisierten Geräten für biaxiale Tests an reinen EVA-Zwischenschichten hatte das Team ein robustes Materialmodell auf Grundlage biaxialer und planarer Daten erstellt und validiert. Somit wurden keine wesentlichen Ziele beeinträchtigt.

WP 1 – Anforderungen und Machbarkeit der Proben

- Die numerische Simulation potenzieller Probengeometrien und die Auswahl der Testmethoden wurden abgeschlossen.
- Mehrere uniaxiale Testaufbauten zur Erfassung des Abstandshalter- und Glasverhaltens wurden ausgewertet

WP 2 – Nichtlineare Viskoelastizität von EVA-Zwischenlagen

- Umfangreiche einachsige und planare Tests wurden durchgeführt, einschließlich zyklischer und hochdehnungsbehafteter Verformung.
- Ein nichtlineares 9-Parameter-Mooney-Rivlin-Hyperelastizitätsmodell wurde anhand einachsiger Daten kalibriert.
- Das Modell wurde in ANSYS implementiert und anhand von Experimenten mit hoher Korrelation validiert.
- Biaxiale Versuche an EVA wurden nicht durchgeführt, da keine geeigneten Geräte zur Verfügung standen. Diese waren jedoch nicht erforderlich, um die Modellierungsziele zu erreichen.

WP 3 – Verhalten nach Bruch und Wechselwirkung von Glasfragmenten

- Eine Reihe von uniaxial Zugversuche und Kriechversuchen an Verbundglas nach Bruch wurden abgeschlossen.
- Der mechanische Beitrag der zurückgebliebenen Glasfragmente wurde quantifiziert.
- Es wurde eine signifikante Steifigkeit nach dem Bruch nachgewiesen, die fortgeschrittene strukturelle Simulationen ermöglicht.

WP 4 – Numerische Modellierung von LSG nach Bruch

- Integration des EVA-Materialmodells mit den Auswirkungen gebrochenen Glases.

-
- Entwicklung eines vereinfachten bilinearen elastoplastischen Modells für praktische Simulationen im ingenieurtechnischen Kontext.
 - Die vollständige Implementierung in ANSYS ermöglicht die skalierbare Analyse von kleinen Coupons bis hin zu vollständigen Verglasungsplatten.

WP 5 – Kleinskalige Kriechversuche

- 4-Punkt-Biegeversuche an Verbundglas (360 × 1100 mm) abgeschlossen.
- Unterstützung der Validierung des langfristigen zeitabhängigen Verhaltens in gerissenen LSG-Systemen.

WP 6 – Parametrische Simulationen und Konstruktionswerkzeuge

- Simulationskampagnen zu verschiedenen Abmessungen, Stützbedingungen und Belastungsszenarien sind im Gange.
- Die Ergebnisse unterstützen die Definition von Grenzfällen und liefern zukünftige Empfehlungen für Normen.

Begründung der Änderungen

Die biaxiale Prüfung an der reinen EVA-Zwischenschicht (AP 2.3, 2.6) wurde aufgrund der Nichtverfügbarkeit der erforderlichen Prüfmaschine nicht durchgeführt. Die Auswirkung war minimal, da das Materialmodell erfolgreich aus uniaxialen und planaren Daten abgeleitet worden war und eine ausgezeichnete Simulationsgenauigkeit sowie eine robuste Vorhersagefähigkeit aufwies. Somit waren die Kernziele der Modellierung, Simulation und der praktischen Anwendung auch ohne zusätzliche Testdaten vollständig erreicht worden.

Experimente mit EVA-Zwischenschicht

Kurzbeschreibung eines Versuchsprogramms

Im Rahmen des Versuchsprogramms werden uniaxiale Zugversuche an zwei Gruppen von EVA-Zwischenschichten mit unterschiedlichem Vinylacetatgehalt durchgeführt. Die Proben EVA 1 enthalten 28 % Vinylacetat (VAC), die Proben EVA 2 30 % VAC; die Proben stammen von zwei verschiedenen Herstellern (Folienwerk Wolfen - evguard® EVA und Glaast – EV100). Alle Proben werden in einem Vakuumlaminierofen (vernetzt) einem Aushärtungsprozess unterzogen, der einen realistischen Zustand der EVA-Zwischenschicht gewährleistet, ähnlich dem im Element von LG. Die Proben jeder Gruppe müssen die erforderlichen Eigenschaften des Zwischenlagenmaterials erfüllen (Abbildung 1). Der typische Bereich der Materialeigenschaften für jede Gruppe sowie die Standardwerte sind in Tabelle 1 aufgeführt. Diese Eigenschaften werden als vernetzte Proben bezeichnet. Das Versuchsprogramm umfasst einachsige Zugversuche mit konstanter Dehnungsgeschwindigkeit und unterschiedlichen Belastungsverfahren: (i) Zug bis zum Bruch, (ii) Belastung bis zu 400 % Dehnung und anschließende Entlastung. Für alle Versuche wird die exakte Geometrie der Proben verwendet (Becker 2009), siehe Abbildung 2, wobei die Dicke aller Proben 0,76 mm beträgt.

Properties	Test method	non cross-linked	cross-linked*
Density	ISO 1183	0.95–0.97 g/cm ³	
Optical appearance		colourless translucent	colourless transparent
Tensile strength	ISO 527-3	MD > 5 N/mm ² CD > 5 N/mm ²	MD > 20 N/mm ² CD > 20 N/mm ²
Elongation at break	ISO 527-3	MD > 700 % CD > 700 %	MD > 400 % CD > 400 %
Hardness	DIN 53505	> 65 Shore A	
Thermal expansion coefficient	DIN 52328	1–10 ⁻⁴ K ⁻¹	
Refractive Index		1.48	
Light transmission (400–750 nm)		> 85 %	
UV cut-off		365 nm	

* values depend on appropriate lamination

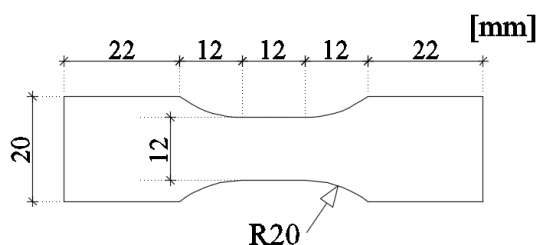
Abbildung 1. Herstellerangaben zur EVA-Zwischenschicht Evguard (Angaben der Folienwerke Wolfen GmbH, [Folienwerke Wolfen, 2018])

Tabelle 1.
Verschiedene Proben für EVA-Tests

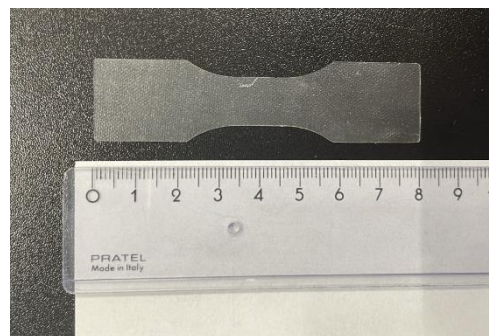
Eigenschaften	EVA 1	EVA 2
VAC	28 %**	30 %**
Dichte	0.95 – 0.97 g/cm ³ *	
Elastizitätsmodul	10 MPa	10 MPa
Poisson-Zahl	0.3-0.49*	0.3-0.49*

Quelle: *(Sable et al. 2019; Pankhardt 2008; Serafinavičius et al. 2013)

**Daten vom Lieferanten für beide Proben



a) Abmessungen der Probe



b) Abmessungen der Probe

Abbildung 2. Geometrie des Probekörper

Alle Tests wurden bei einer Temperatur von $21,5 \pm 1$ °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40 ± 10 % durchgeführt. Der Aufbau beider Tests ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Prüfmaschine war eine Z2.5 von Zwick-Roell mit einer maximalen Belastungskraft von 2,5 kN. Während der Prüfungen wurden die Dehnung und die Dehnungsgeschwindigkeit mit mechanischen Wegaufnehmern gemessen und kontrolliert, die an den Kanten des parallelen Teils in der Mitte der Probe in einem Abstand von 12 mm angebracht wurden (Abbildung 2). Die Prüfmaschine maß die Kraft bei einer definierten Dehnungsgeschwindigkeit.



a) Der Testaufbau zu Beginn



b) Der Testaufbau zu Beginn

Abbildung 3. Versuch mit der EVA-Probe mit Z2,5 der Zwick-Roell-Maschine

Spannung bis zum Bruch

Die Tests wurden an zwei Gruppen von Proben mit den Bezeichnungen EVA 1 und EVA 2 durchgeführt, wobei eine Dehnungsrate von 0,01 1/s bis zum Bruch angewendet wurde. Der Bruch wurde festgestellt, als die gemessene Kraft (Spannung) auf 80 % unter ihren Spitzenwert fiel. In jeder Gruppe wurden fünf Proben bei Raumtemperatur von $21,5 \pm 1$ °C getestet. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die Spannungs-Dehnungs-Diagramme nach jedem Versuch, wobei die Dehnung in der Mitte des Probekörpers (siehe Abbildung 2b) gemessen wurde und auf 12 mm bezogen ist.

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse für die erste Gruppe EVA 1 dargestellt; die Ergebnisse sind bis auf die letzte Verfestigungszone weitgehend homogen. Im ersten Teil der Kurven bis zu einer Spannung von $\approx 1,0$ MPa zeigt das Material ein lineares Verhalten, und der Dehnungswert am Ende des linearen Abschnitts beträgt weniger als 9 %. Dieser Bereich deckt aufgrund der Geometrie der Zwischenlagen die meisten regulären Anwendungen von Zwischenlagen im intakten Zustand von LG-Strukturen ab (Wu et al. 2022; Callewaert et al. 2012). Der gemessene Wert des Elastizitätsmoduls im linearen Abschnitt ist daher höher als der in der Literatur angegebene Wert. Nach einem kurzen Übergang vom linearen Teil (im Intervall 1,0 – 2,5 MPa) kommt es bei einer Spannung von etwa 2,5 MPa zu einer deutlichen Abnahme der Steifigkeit, gefolgt von einer ausgeprägten Fließplateauphase, die von 20 % bis zu 300 % Dehnung reicht, woraufhin eine exponentielle Verfestigung einsetzt. Die Streckgrenze in allen EVA 1-Proben (definiert als Knickpunkt) beträgt etwa 3,2 MPa, während die Verfestigung in Spannungsintervallen von

6,0 bis 8,0 MPa einsetzt. Die Bruchdehnung liegt zwischen 400 und 500 % Dehnung bei einer technischen Spannung von 25 bis 33 MPa.

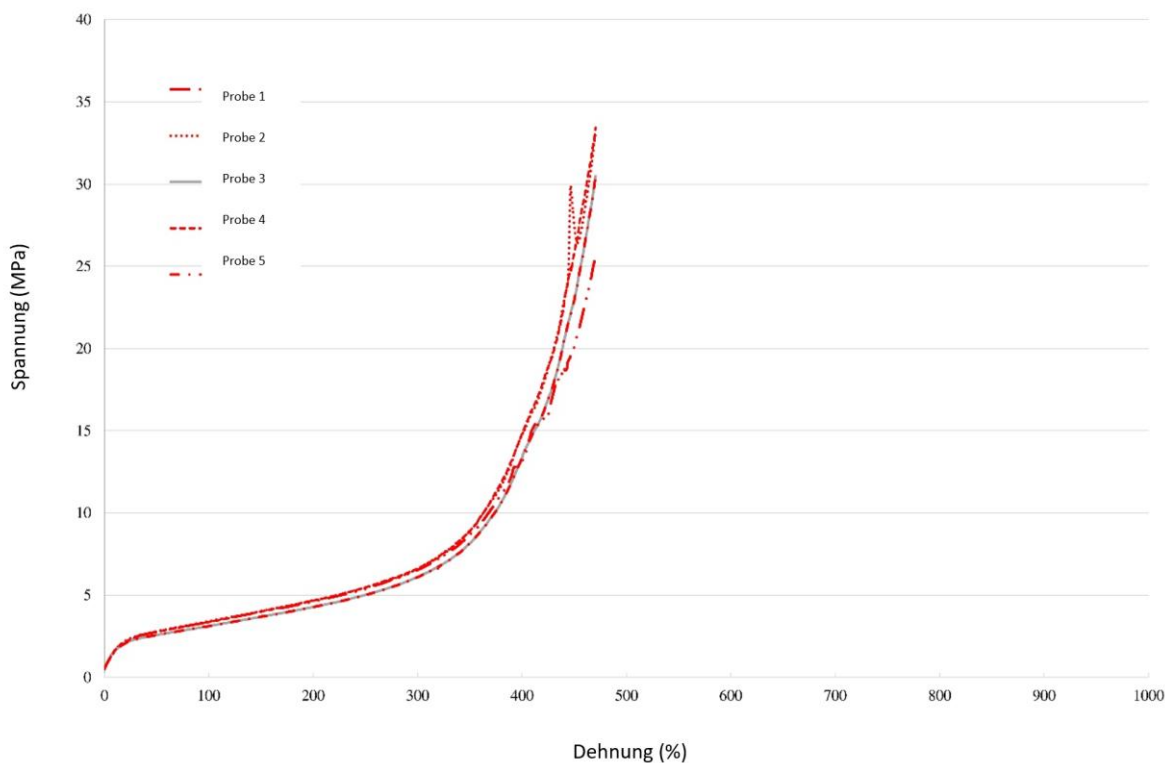


Abbildung 4. Spannungs-Dehnungs-Diagramm für einachsige Zugprüfung bis zum Bruch – EVA 1 (0,76 mm)

Die Prüfergebnisse der zweiten Gruppe von Proben (EVA 2) sind in Abbildung 4 dargestellt. Im ersten Teil des Diagramms, bis zu einer Spannung von 1,0 MPa, zeigt das Material ein lineares Verhalten, ähnlich wie bei den EVA 1-Proben, mit dem Unterschied, dass der lineare Bereich bei einer Dehnung von ≈ 11 % endet, was etwas höher ist als in der ersten Gruppe. In dieser Gruppe beträgt der gemessene Wert des Elastizitätsmoduls. Bei einer Spannung von 3,0 MPa beginnt ein Streckplateau, das jedoch weniger steil ist als bei den EVA 1-Proben. Die Steigung von EVA 1 beträgt etwa 1,57 %, während die des Plateaus für EVA 2-Proben bei etwa 1,13 % liegt. Der Wendepunkt liegt bei einer Spannung von 3,7 MPa. Aufgrund der geringeren Steigung ist die Verfestigung weniger ausgeprägt, und das Fließplateau deckt Dehnungen von 20 % bis 600 % ab. Der Verfestigungsabschnitt beginnt bei einer Dehnung von 600 % bis 650 %, was doppelt so hoch ist wie die Dehnung, bei der die EVA 1-Proben in die exponentielle Verfestigungszone eintreten. Die Bruchdehnung liegt zwischen 900 % und 1000 % bei einer technischen Spannung von 18 bis 21 MPa.

Die in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellten Grafiken zeigen, dass die EVA 1-Proben ein steiferes Verhalten aufweisen. Für beide Probengruppen können die Grafiken bis zu einer Dehnung von 170 % verglichen werden; an diesem Punkt steigt die Steigung des Fließplateaus der EVA 1-Probe an, während bei der EVA 2-Probengruppe bei einer Dehnung von 600 % eine deutliche Änderung der Steigung auftritt. Das steifere Verhalten der EVA 1-Proben zeigte sich auch in einer höheren Endfestigkeit, siehe Tabelle 2 Die Proben aus EVA 2 mit einem VAC-Gehalt von 30 % weisen im Vergleich zu EVA 1 mit einem VAC-Gehalt von 28 % eine doppelt so große Bruchdehnung auf. Die bei Bruch auftretende technische Spannung ist bei den Proben der EVA 1-Gruppe höher. Außerdem sind die Dehnungen deutlich geringer, was die höhere Steifigkeit bestätigt. Die EVA 2-Proben erreichen vor dem Bruch 64–72 % der technischen Spannungen von EVA 1. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve für beide Gruppen deutet auf ein hyperelastisches Verhalten hin, die Form der Kurven mit den zugehörigen Zonen ist aufgrund unterschiedlicher Werte jedoch abweichend. Die Dehnungen, die das Auftreten des Fließplateaus für beide Probengruppen (>20 %) charakterisieren, treten nur in beschädigten LG-Elementen auf, wenn die Bruchfestigkeit der Elemente nach dem Bruch getestet wird. Bei LG-Elementen in intaktem Zustand und bei durchschnittlichen Umgebungstemperaturen sind die Dehnungen, denen die Zwischenlagen ausgesetzt sind, deutlich geringer.

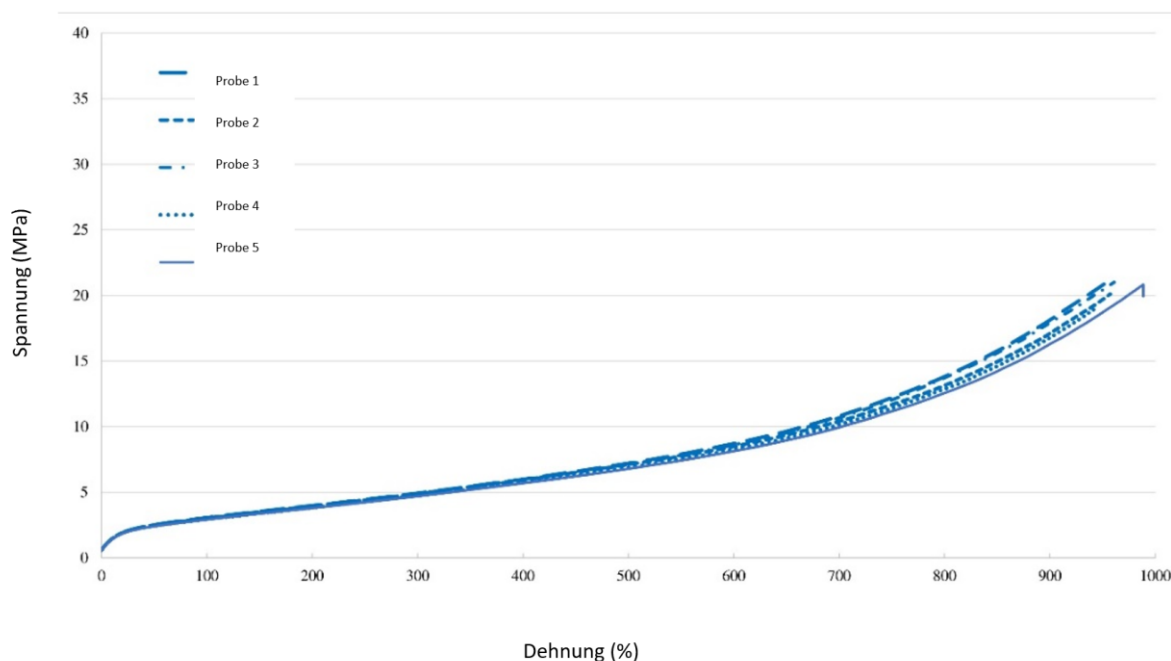


Abbildung 5. Spannungs-Dehnungs-Diagramm für einachsigen Zugversuch bis zum Bruch - EVA 2 (0,76 mm)

Tabelle 2.
Ergebnisse für die beiden Gruppen von EVA-Zwischenschichten mit unterschiedlichem VAC-Gehalt

	EVA 1	EVA 2
VAC	28 %	30 %
Gesamtdehnung	400-500 %	900-1000 %
Technische Beanspruchung MPa	25-33 MPa	18-21 MPa

Gemäß der Literatur (Abbildung 7) und den Erfahrungen wurden zwei unterschiedliche Dehnungsraten untersucht. Die Dehnungsrate von 0,01 1/s ist die höchste, mit der die Maschine arbeiten kann. Um den Einfluss der unterschiedlichen Dehnungsraten zu ermitteln, wurde auch die anwendbare Rate von 0,0018 1/s verwendet, die 50 % langsamer ist als die schnellstmögliche. Eine Reduzierung der Dehnungsrate auf 0,001 1/s ist möglich, jedoch weniger geeignet, da sich die Testzeit erheblich verlängert und der Unterschied in den Ergebnissen vernachlässigbar ist (siehe Abbildung 6).

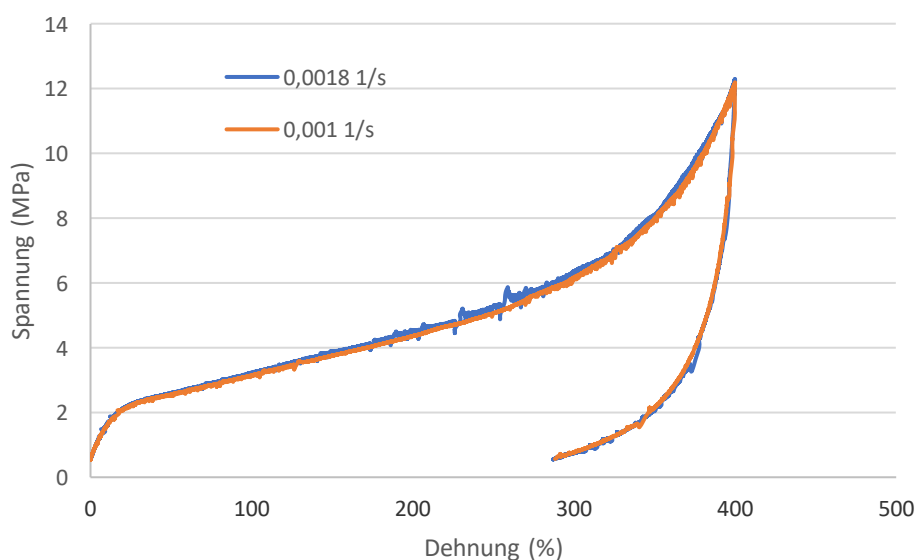


Abbildung 6. Einfluss der Dehnungsrate

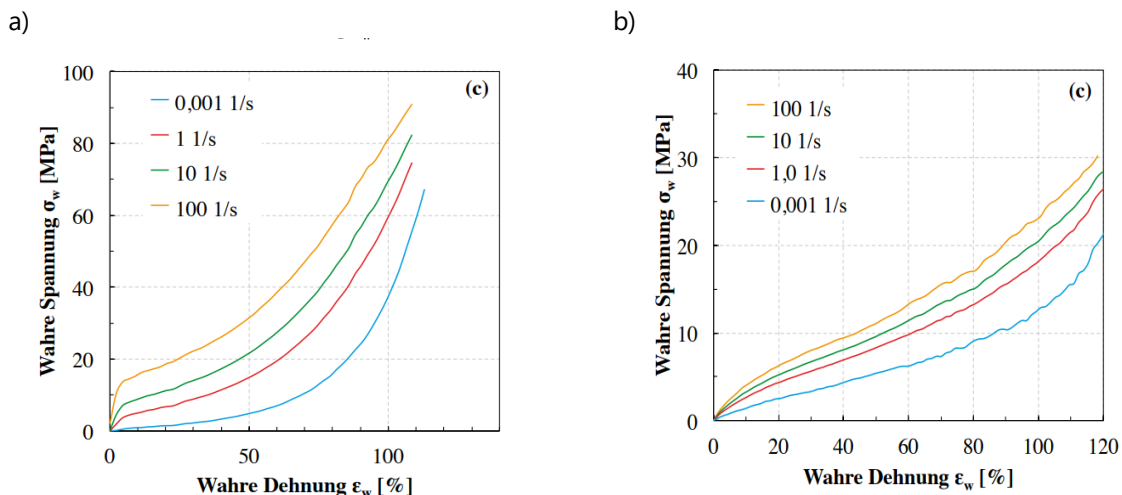


Abbildung 7. Ergebnisse der uniaxialen Zugversuche an EVA: G71 bei konstanten Dehnraten (a), Ergebnisse der uniaxialen Zugversuche an PVB: BG bei konstanten Dehnraten (b)

Die Dicke der Zwischenschicht wurde untersucht, um zu prüfen, ob sie das mechanische Verhalten beeinflusst. In Abbildung 8 ist zu erkennen, dass die Dicke der Zwischenschicht keinen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten hat. Die Materialkurve zeigt dasselbe Verhalten.

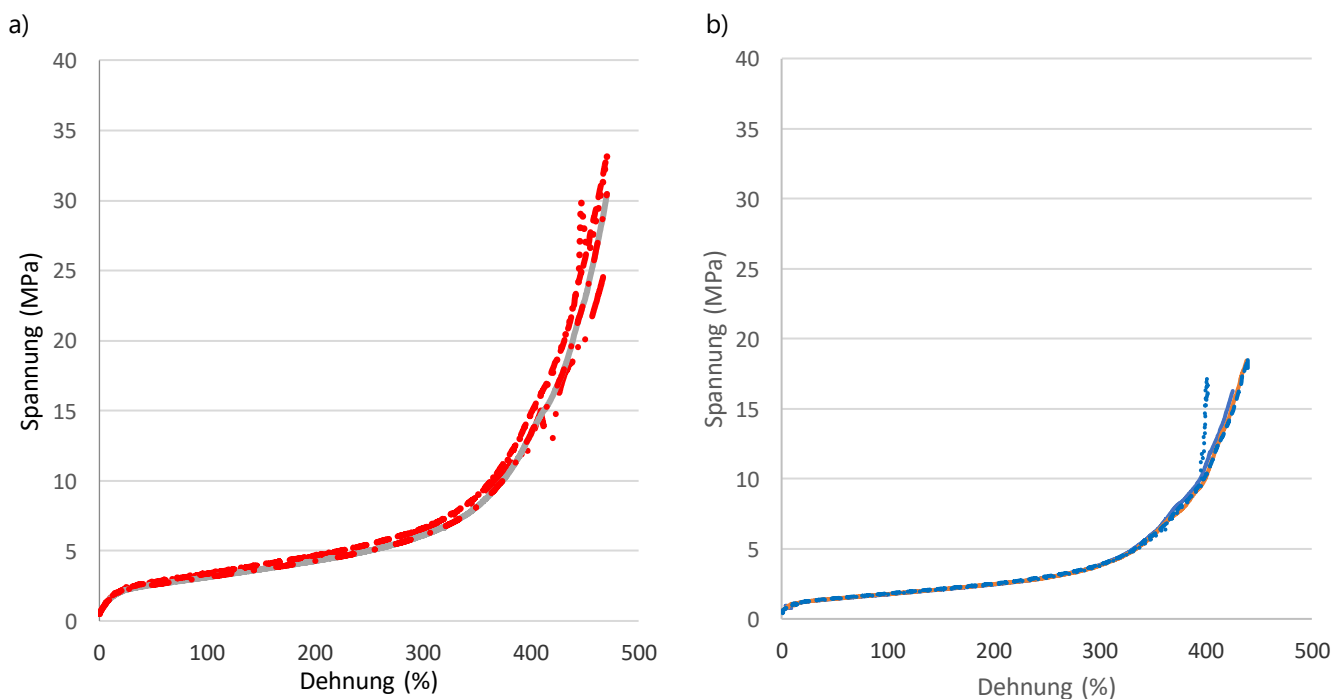


Abbildung 8. EVA 1 – Einachsige Zugprüfung bis zum Bruch: Probenstärke 0,76 mm (a), Probenstärke 0,38 mm (b)

Belastung bis zum Hochlastbereich und Entlastung

Die Tests mit Be- und Entlastung bei einer Dehnungsrate von 0,01/s wurden durchgeführt, um die kurzfristige elastische und plastische Kapazität des Materials zu untersuchen. Um sicherzustellen, dass die Proben während des Belastungszyklus nicht brechen, wurde die maximale Dehnung auf 400 % der technischen Dehnung festgelegt. Dieser Wert stellt sicher, dass das Material in die Zone der plastischen Verformung eintritt, ohne zu brechen. Die Entlastung der Proben wurde auf eine Kraft von 5 N begrenzt, da die Proben an Stabilitätsproblemen litten. In Abbildung 9 sind die Ergebnisse von fünf Probekörpern der EVA 1-Gruppe dargestellt. Bei der kurzzeitigen Entlastung liegt die unmittelbare elastische Erholung bei etwa 130 % der Dehnung. Die kurzfristige plastische Dehnung beträgt 270 %.

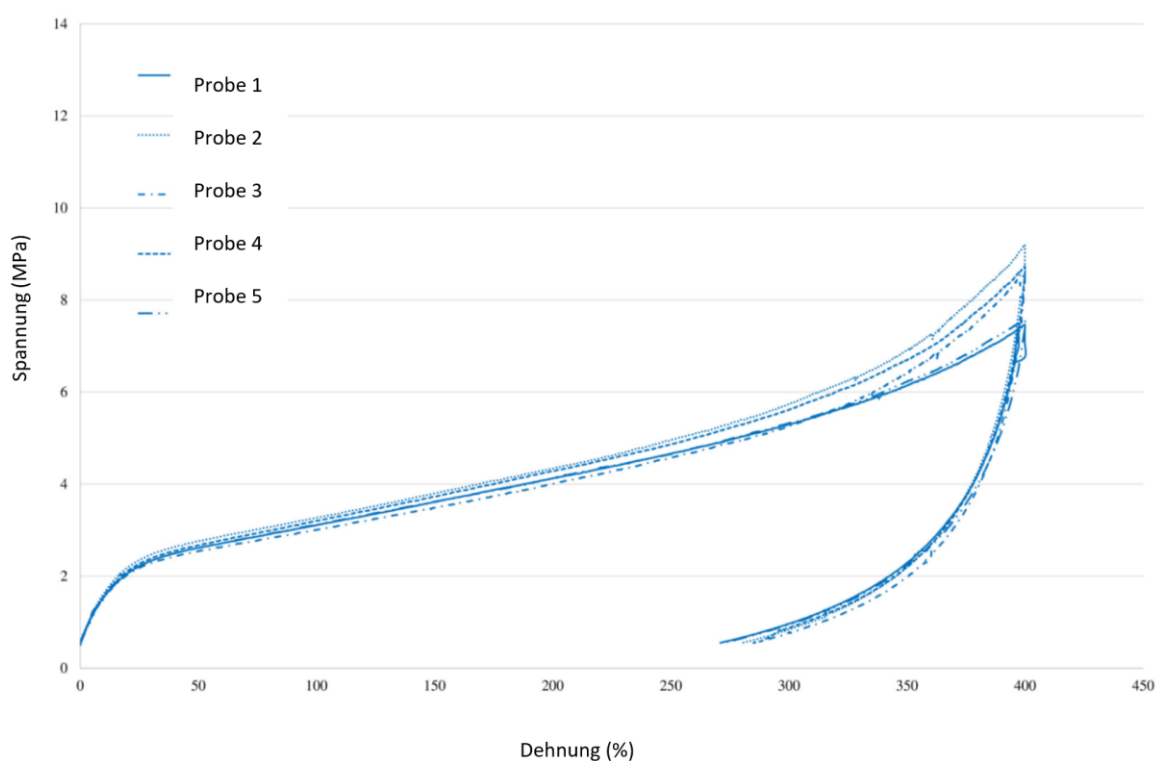


Abbildung 9. EVA 1 - Be- und Entlastungszugversuch mit Dehnungsgeschwindigkeit 0,01 1/s

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse von 5 Proben der EVA 2-Probengruppe, die ebenfalls mit einer Dehnungsrate von 0,01 1/s geprüft wurden. Es ist zu beobachten, dass die Spannung bei 400 % Dehnung bei EVA 2 mit höherem Vinylacetatgehalt (5,3 MPa–6,0 MPa) geringer ist und die elastische Erholung im Entlastungszustand bei etwa 140 % Dehnung liegt. Das Ausmaß der sofortigen elastischen Erholung ist in beiden Probengruppen ähnlich, und in diesem Bereich lässt sich schlussfolgern, dass die kurzfristige plastische Verformung nicht von der VAC abhängig ist. Bei beiden EVA-Proben lag die plastische

Dehnung zwischen 260 und 280 %. Diese Werte werden als sofortige Dehnungen bezeichnet, aber EVA-Proben weisen zusätzlich eine zeitabhängige elastische Erholung auf, und um dies zu testen, werden die Proben über einen bestimmten Zeitraum beobachtet.

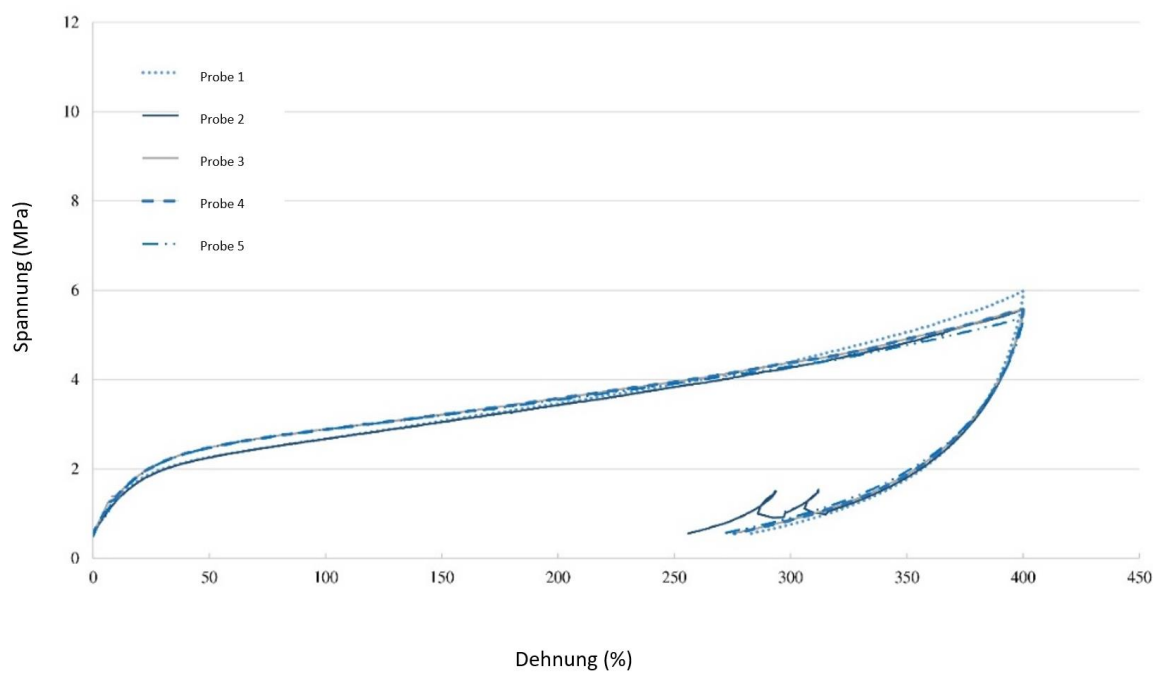


Abbildung 10. EVA 2- Be- und Entlastungszugversuch mit Dehnungsgeschwindigkeit 0,01 1/s

Langfristige Auswirkungen nach den Tests

Nach der Prüfung wurden die Proben flach gelagert und die Schrumpfung im Laufe der Zeit qualitativ gemessen. Es konnte festgestellt werden, dass auch nach mehreren Tagen noch eine erhebliche Verformung vorhanden war. Im Folgenden wird das Verhalten der EVA 2-Proben nach dem einachsigen Zugversuch bis zum Bruch sowie nach einer Belastung von bis zu 400 % und einer anschließenden Entlastung analysiert. Das Verhalten beider Probengruppen ist sehr ähnlich, sodass nur eine Probe vorgestellt wird, um das Langzeitkriechverhalten nach der Entlastung zu beobachten. Diese Ergebnisse werden für Proben in voller Länge dargestellt.

Abbildung 11 zeigt die Länge von fünf Proben im Zeitraum von 7 Tagen nach der Spannung bis zum Bruchversuch. Ziel war es, das Ausmaß der permanenten und reversiblen Verformung zu erfassen. Wie auf dem Foto zu sehen ist, entspricht der Abstand zwischen den mit „Tag 1“ gekennzeichneten Linien und der beobachteten Länge der Probe (grüne Linie) der Kriechverformung, die in den Tagen nach dem Zugversuch aufgetreten ist. Die dargestellten Verformungen traten bei einer Temperatur von $21,5 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $40 \pm 10 \%$ auf. Von links nach rechts: Die Länge der Probe 1 betrug direkt nach der Prüfung 24,5 cm und nach 7 Tagen 16,5 cm, was einer Differenz von 8 cm entspricht. Die Länge der Probe 2 betrug nach der Prüfung 23,5 cm und nach 7 Tagen 16 cm, was einer Differenz von 7,5 cm entspricht usw. Der Mittelwert der absoluten Kriechverformung für fünf Proben beträgt $\Delta l \approx 7,7$ cm und entspricht damit 30 % des Mittelwerts der Länge am Ende des Zugversuchs. Dies bestätigt eine ausgeprägte elastische Erholung der EVA 2-Zwischenschicht nach der Entlastung. Die Probenlänge vor der Prüfung betrug 8 cm (siehe Abbildung 2). Die durchschnittliche Dehnung nach der Prüfung betrug 24,3 cm, was einer Dehnung von 200 % entspricht. Die verbleibende plastische Verformung betrug bis zu 100 % Dehnung, was etwa 16,2 cm entspricht. Abbildung 12 zeigt die Länge von fünf Probekörpern im Zeitraum von 7 Tagen nach einer Belastung um bis zu 400 % und einer anschließenden Entlastung. Auch hier stellt der Abstand zwischen den mit "Tag 1" beschrifteten Linien und der beobachteten Länge der Probe (grüne Linie) die Kriechverformung dar, die im Zeitraum von einem Tag nach der Prüfung auftrat. Die durchschnittliche Dehnung der Probe unmittelbar nach dem Versuch betrug 20,1 cm, was einer Dehnung von 151,25 % entspricht (nach der Entnahme aus der Kraftmessdose trat eine zusätzliche Erholung von 5,0 N auf 0,0 N ein). Die dargestellten Verformungen traten über einen Zeitraum von 7 Tagen bei einer Temperatur von $21,5 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ auf.

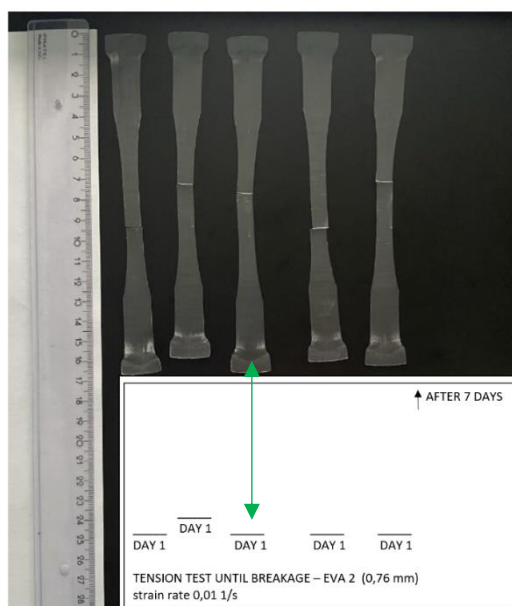


Abbildung 11. Fotografie der Proben nach 7 Tagen vom Zugversuch bis zum Bruch

Probe 1 war direkt nach dem Test 22 cm lang und nach 7 Tagen 15 cm lang, was einer Differenz von 7 cm entsprach. Probe 2 hatte nach der Prüfung eine Länge von 19,5 cm, und nach 7 Tagen betrug sie 14 cm, was einer Differenz von 5,5 cm entsprach. Der Mittelwert der absoluten elastischen

Rückstellverformung für fünf Proben beträgt $\Delta l \approx 5,8$ cm, was 29 % des Längenwerts am Ende des Zugversuchs entspricht. Somit betrug die durchschnittliche elastische Verformung der EVA-2-Proben 72,5 % der ursprünglichen Länge der Proben. Die verbleibende plastische Verformung nach 7 Tagen elastischer Erholung betrug etwa 78,75 % der Dehnung. Diese Werte beziehen sich auf die Gesamtlänge jeder Probe. Die früh analysierten Dehnungswerte (Abbildung 4 und 5) wurden in der Mitte der Probe mit einer Länge von 12 mm gemessen, während die Dehnungsaufnehmer die Verformungen während der Prüfungen erfassten (siehe Abbildung 2).

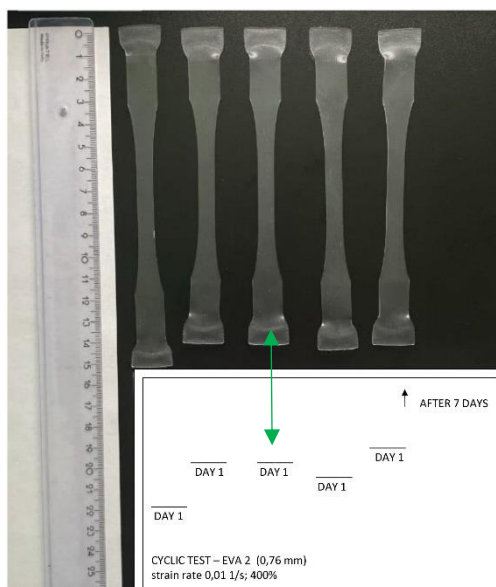


Abbildung 12. Fotografie der Proben nach 7 Tagen des Be- und Entlastungstests

Be- und Entlastungsversuche zeigten, dass das Material nicht rein hyperelastisch ist und die verbleibende kurzfristige plastische Verformung nach der Entlastung nicht vernachlässigbar ist. Dennoch kann das Verhalten der EVA-Zwischenschicht im Bereich von Interesse (Dehnung, die in typischen LG-Strukturen auftritt) als hyperplastisch beschrieben werden (Bergström 2015 ; Kraus 2019; Kraus et al. 2017) .

Zyklische Belastung mit mehreren Relaxationsstufen

Um das Gleichgewichtsverhalten des Werkstoffs zu untersuchen, wurde eine zyklische Belastung mit mehreren Relaxationsschritten durchgeführt. Das Prüfverfahren umfasste 10 Belastungsschritte, gefolgt von einer Relaxation von 300 s, und zwei Entlastungsschritte, ebenfalls mit einer Relaxation von 300 s. Die Belastungsschritte von 0 % technischer Dehnung bis 400 % Dehnung wurden in Schritten von 25 %

erhöht. Die restlichen Schritte wurden in Schritten von 250 % Dehnung erhöht oder verringert. Der jeweilige Prüfablauf ist in Abbildung 13 dargestellt.

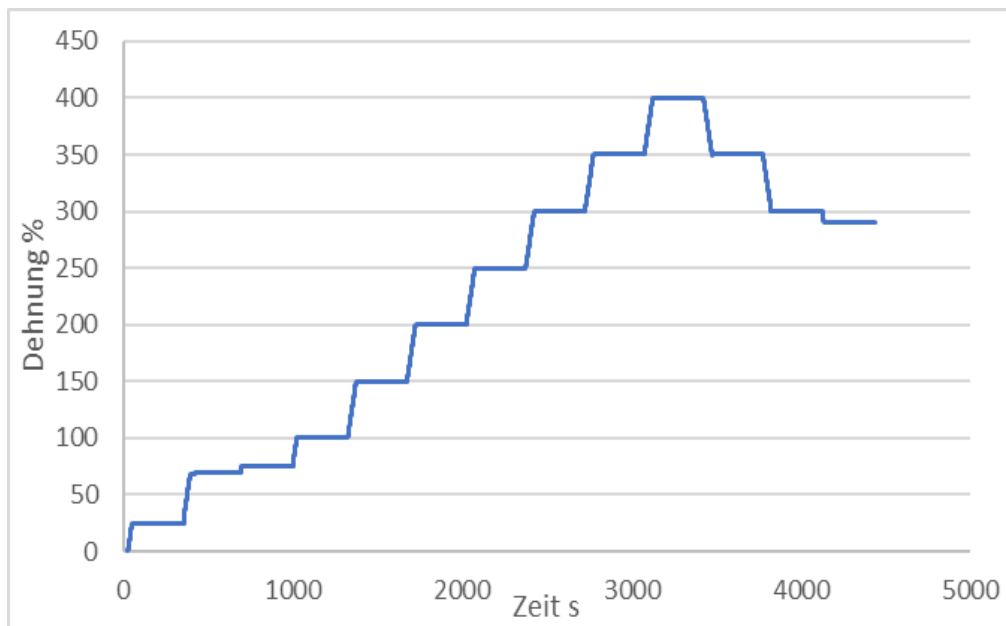


Abbildung 13. Versuchsablauf der zyklischen Belastung mit Relaxationsschritten

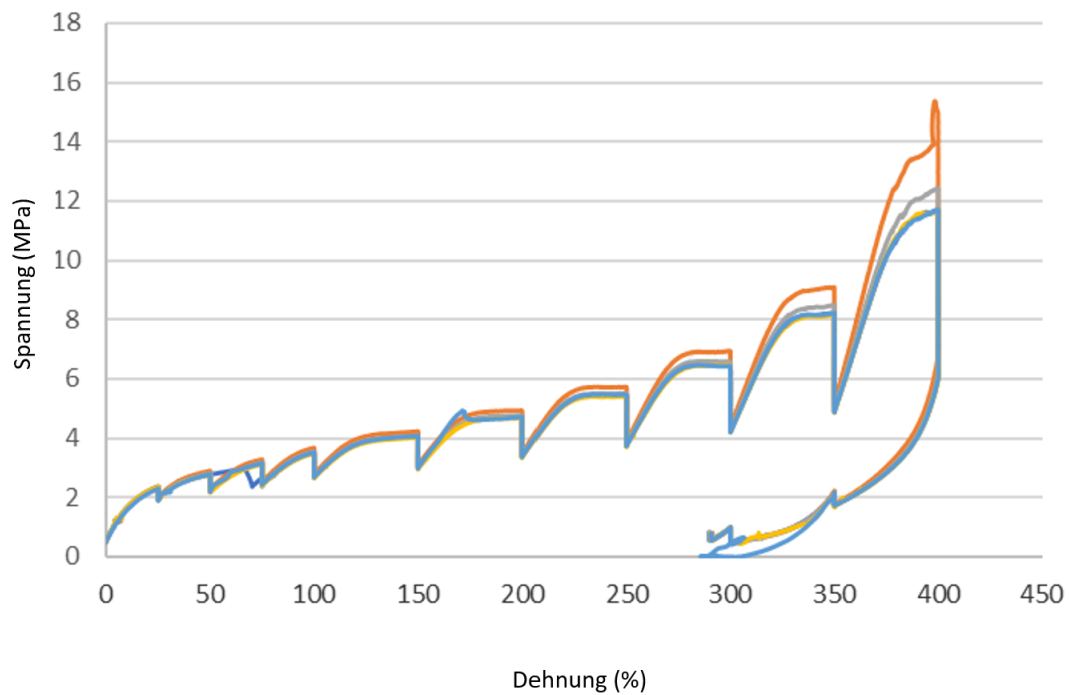


Abbildung 14. EVA 1 - Treppentest unter Berücksichtigung der Dehnung

Die Ergebnisse in Abbildung 14. zeigen, dass sich das Material bis zu einem bestimmten Zeitpunkt entspannt und anschließend gegen unendlich tendiert. Die Schritte des Be- und Entlastungszyklus scheinen einander anzunähern. Wenn man jedoch bedenkt, dass nach der Entlastung irreversible Verformungen in der Probe verbleiben, könnte man zu dem Schluss kommen, dass das Material zur Gleichgewichtshysterese neigt.

Auf Grundlage von Experimenten, die mit EVA bei einer Raumtemperatur von $21,5 \pm 1 \text{ °C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit durchgeführt wurden, zeigt EVA nicht nur ein hyperplastisches, viskoelastisches mechanisches Verhalten, sondern auch eine viskoplastische Reaktion.

Mathematische Formulierung und numerische Umsetzung in Ansys

Mathematische Formulierung des Materialmodells

Auf Grundlage der experimentellen Daten wird ein mathematisches Modell des EVA-Materials erstellt. Dieses Modell wird in numerischen Simulationen verwendet, um experimentelle Tests zu simulieren und seine Genauigkeit zu bestätigen. Mathematische Modelle, die mit numerischen Modellen verbunden sind, bilden die Grundlage für die Entwicklung starker numerischer Modelle von LG-Elementen, die alle Einflüsse simulieren können, ohne dass eine experimentelle Untersuchung erforderlich ist. Die mathematische Formulierung basierte auf einem einachsigen Zugversuch bis zum Bruch. Das hyperelastische Mooney-Rivlin-Modell wird als potenziell gute Anpassung an die experimentellen EVA-Ergebnisse betrachtet (Bergström 2015 ; Kraus 2019). Um ein Modell zu erstellen, wird zunächst der linear-elastische Teil der Kurve extrapoliert, um den Elastizitätsmodul E des EVA-Materials zu bestimmen. Um die Grenze zwischen dem linearen Teil der Kurve und dem Beginn des nichtlinearen Verhaltens zu bestimmen, wird die Bedingung der Steigung der Tangente (erste Ableitung) an der Sekante verwendet. Bei der Betrachtung der Steigung der Tangente gilt die Differenz zwischen Tangente und Sekante von bis zu 5 % als Kriterium für eine lineare Grenze. Diese Bedingung stellt sicher, dass jede Linie, die weniger als 5% Abweichung aufweist, akzeptiert wird und einen linearen elastischen Bereich des Materials darstellt. Die gewählten Kriterien für den nichtlinearen Bereich sind eine Abweichung der Tangenten und der Sekantensteigungen von mehr als 5%. Das gemessene Elastizitätsmodul unterscheidet sich zwischen den beiden Probengruppen. Für die Probennummer 2 beträgt das E-Modul von EVA2 und $E_{EVA2} \approx 11,99$ MPa. Ein weiterer Schritt in der mathematischen Formulierung ist die Definition der charakteristischen Punkte (Fließgrenze und Bruchgrenze) für jede Probe (siehe Abbildungen A und B in den Anlagen). In Abbildung 15 und 16 ist für jede Probe von EVA 1 und 2 eine Definition der Basispunkte auf der Kurve dargestellt.

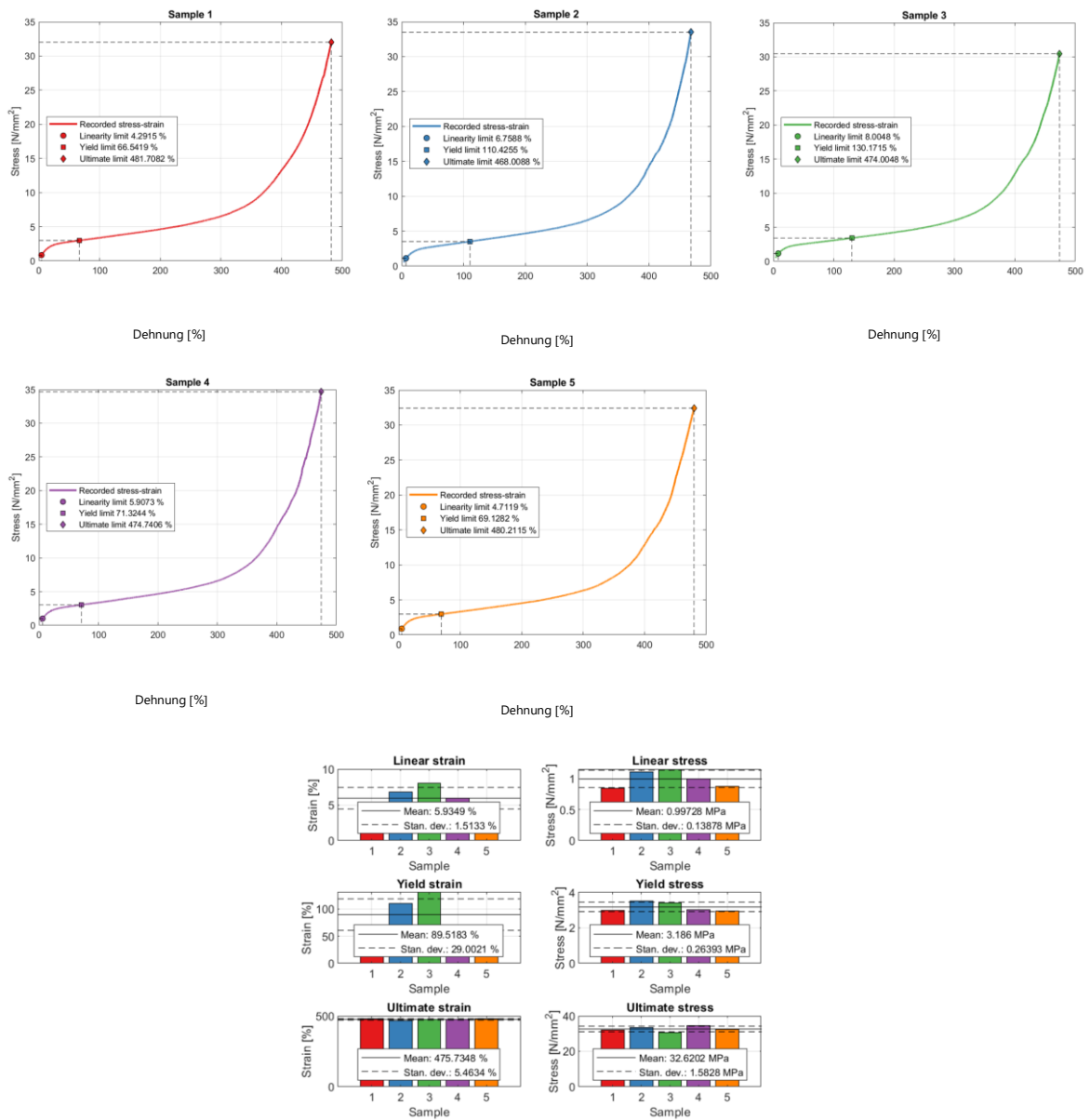


Abbildung 15. EVA 1 Versuchsdaten mit charakteristischen Punkten

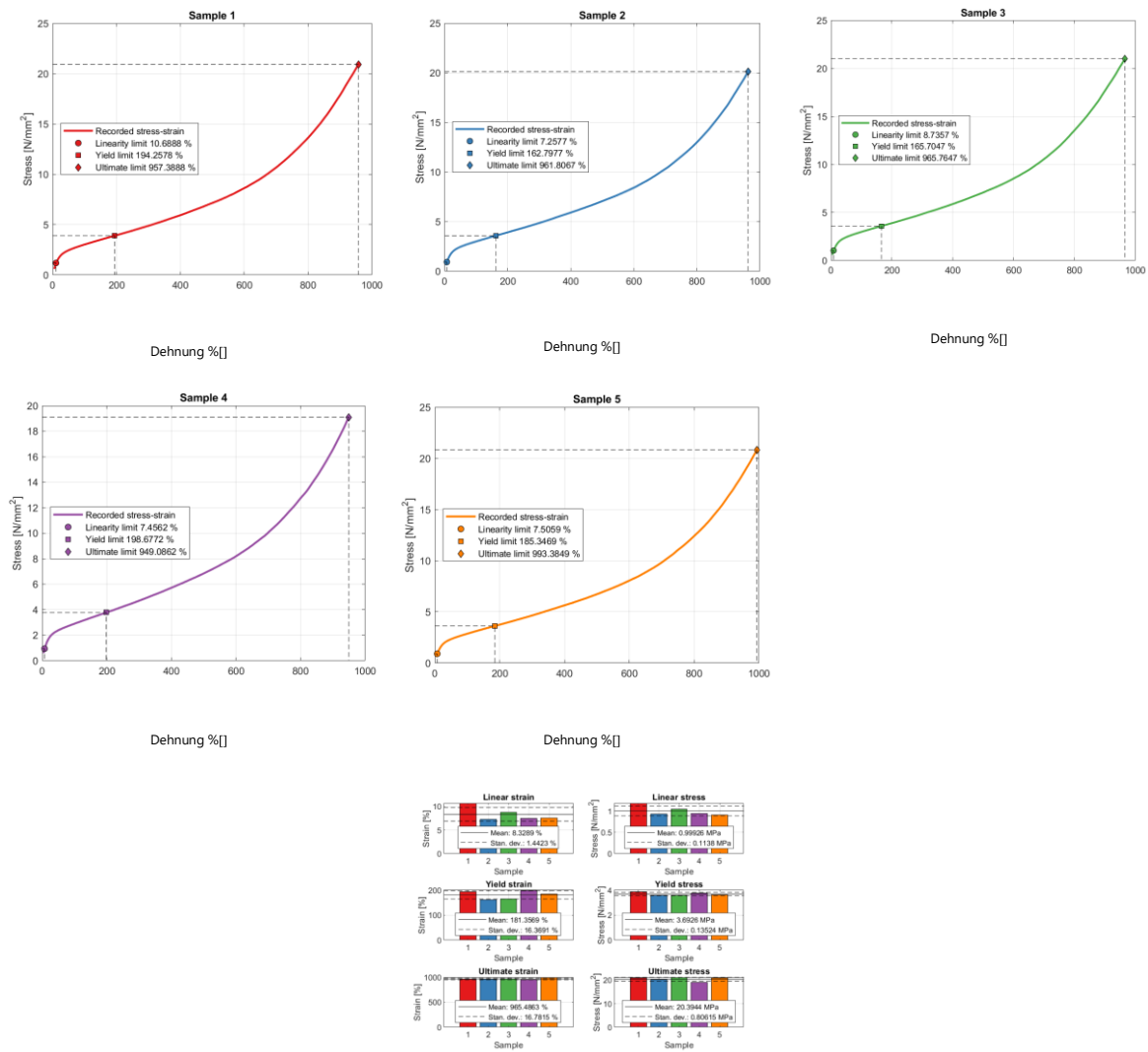


Abbildung 16. EVA 2 Versuchsdaten mit charakteristischen Punkten

$$\begin{aligned}
 W = & C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \\
 & + C_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + C_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + C_{03}(I_2 - 3)^3
 \end{aligned} \quad (1)$$

W – Dehnungsenergiegedichte

$C_{10}, C_{01}, C_{20}, C_{30}, C_{11}, C_{02}, C_{03}, C_{12}$ und C_{21} - Mooney-Rivlin Parameter

I_1 und I_2 - Invarianten des Cauchy-Green-Tensors

Genauer: I_1 und I_2 sind die ersten beiden Hauptinvarianten des linken Cauchy-Green-Tensors $\mathbf{B} = \mathbf{F}\mathbf{F}^T$ (äquivalent: des rechten Tensors $\mathbf{C} = \mathbf{F}^T\mathbf{F}$):

$$I_1 = \text{tr } \mathbf{B} = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2,$$

$$I_2 = \frac{1}{2} [(\text{tr } \mathbf{B})^2 - \text{tr}(\mathbf{B}^2)] = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2,$$

$$I_3 = \det \mathbf{B} = (\det \mathbf{F})^2 = J^2.$$

Für inkompressible Materialien gilt $J = \det \mathbf{F} = 1 \Rightarrow I_3 = 1$.

Die Terme $(I_1 - 3)$ und $(I_2 - 3)$ verschwinden im undeforinierten Zustand, sodass dort $W = 0$.

Beispiel (einachsige Dehnung, inkompressibel): $\lambda_1 = \lambda$, $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$. Dann

$$I_1 = \lambda^2 + 2/\lambda, \quad I_2 = 2\lambda + 1/\lambda^2.$$

Abbildung 17. M.A.Krauss, Machine Learning Techniques for the Material Parameter Identification of Laminated Glass in the Intact and Post-Fracture State

Die Funktion zur Anpassung aller Proben wird aus der Gleichung für die Dehnungsenergiedichte $W(1)$ gemäß den Invarianten des einachsigen Versuchs abgeleitet. Die Herausforderung besteht darin, die Koeffizienten der Gleichung zu bestimmen, die die Materialeigenschaften beschreiben. In der Regel werden Prüfungen in drei Verformungsmodi durchgeführt und die hyperelastischen Koeffizienten kalibriert oder anhand von Kurven angepasst. Diese drei Verformungsarten werden durch einachsige Spannung, planare und biaxiale Verformung beschrieben. Darüber hinaus können Druckversuche zur Berechnung der volumetrischen Reaktion durchgeführt werden. Diese vier Datensätze bilden einen vollständigen Datensatz, der zur genauen Kalibrierung hyperelastischer Materialien erforderlich ist. Bei Materialien, die entweder vollständig oder nahezu inkompressibel sind, wie z.B. EVA-Polymer-Zwischenlagen, kann man die volumetrischen Daten außer Acht lassen und davon ausgehen, dass das Material vollständig inkompressibel ist. Auf diese Weise lässt sich das hyperelastische Modell anhand von Prüfdaten in nur einer der drei Verformungsarten kalibrieren. In dieser Forschungsarbeit werden einachsige Prüfdaten verwendet. Die Kalibrierung des Materialmodells umfasst die Auswahl des hyperelastischen Modells und dessen Kurvenanpassung an die verfügbaren Versuchsdaten. Die Beispielanpassung und die dazugehörigen Werte der Residuen sind im Anhang A dargestellt. Als Ergebnis werden die Konstanten bestimmt, die als Materialeigenschaften gelten (Tabelle 3 und 4). Durch die Kurvenanpassung wird die kumulative Fehlanpassung zwischen experimentellen Daten und der Modellvorhersage berechnet und der Wert für einen optimalen Satz an Materialkonstanten minimiert. Der minimierte Wert dieser Fehlerfunktion wird als Residuum bezeichnet und kann zum Vergleich der Anpassungsqualität zwischen zwei verschiedenen Modellen verwendet werden. Der Variabilitätsbereich zwischen den Eingangsvariablen und der Ausgabe wird durch das Bestimmtheitsmaß (R^2) definiert; eine

gute Variabilität ist bei einem Bestimmtheitsmaß von über 0,8 anzunehmen. In diesem Fall ist der Bestimmungskoeffizient sehr hoch, was auf die gute Zuverlässigkeit des gewählten Modells hinweist (Tabelle 3 und Tabelle 4). Das Mooney-Rivlin-Modell erzielte die beste Anpassung mit neun Parametern (Abbildung 17). Die Parameter C10, C01, C20, C30, C11, C02, C03, C12 und C21 wurden für jede Probe angepasst, sodass die Werte den Erwartungen entsprechen.

Tabelle 3.
MR-Parameter für EVA 1

M.R. Parameter	1	2	3	4	5	Funktion fit- alle Proben
C01	-120.494056	-262.551302	-161.079861	-157.566834	-196.125207	-73.286394
C02	277.812723	744.469181	373.884016	347.264719	532.668665	-26.200049
C03	64.303344	206.708800	88.533365	77.435816	143.167291	-50.618604
C10	126.169435	268.601633	165.858783	162.864862	201.980094	77.727790
C11	-484.951761	-1339.712724	-658.888553	-606.674220	-952.778958	88.917783
C12	-138.347207	-418.941196	-191.228791	-169.961497	-293.334422	72.263127
C20	20.682411	50.052926	27.415955	26.489961	36.467859	5.211022
C21	-6.531028	-14.059948	-8.424352	-8.540243	-10.454315	-3.723394
C30	0.136700	0.275883	0.172991	0.180086	0.207294	0.096333
R2	0.999996	0.999987	0.999992	0.999995	0.999994	0.990442
RMSE	0.013172	0.024321	0.017478	0.015981	0.015702	0.645300

Tabelle 4.
MR-Parameter für EVA 2

M.R. Parameter	1	2	3	4	5	Funktion fit- alle Proben
C01	-13.089775	-9.681831	-20.943615	-7.176159	-7.451632	-32.260878
C02	-33.450349	-27.716050	-61.227860	-16.363103	-20.003077	-94.846460
C03	-22.018047	-18.093685	-37.927998	-11.948429	-13.596284	-57.912459
C10	16.125087	13.192390	23.704573	10.775313	10.854537	34.660842
C11	71.688971	60.890858	128.452903	37.957943	44.845694	197.890432
C12	32.304379	27.354029	56.961684	17.524453	20.298240	87.584031
C20	-0.946789	-0.801465	-1.853474	-0.421349	-0.564331	-2.894146
C21	0.032221	0.023328	0.103064	-0.007674	0.010231	0.171468
C30	-0.000007	0.000083	-0.000765	0.000406	0.000182	-0.001462
R2	-13.089775	-9.681831	-20.943615	-7.176159	-7.451632	-32.260878
RMSE	-33.450349	-27.716050	-61.227860	-16.363103	-20.003077	-94.846460

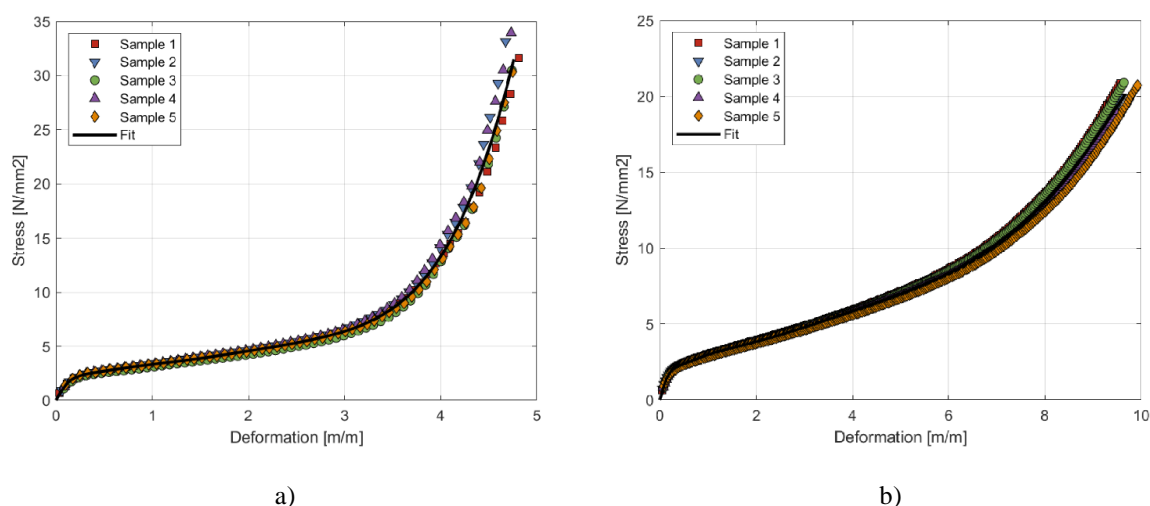


Abbildung 18. a) EVA 1 und b) EVA 2 Versuchsdaten und Modellanpassung

Überprüfung der Ergebnisse

Numerisches Beispiel - Zugversuch

Mit dem Softwarepaket ANSYS wurde ein numerisches Modell erstellt, um den Zugversuch bis zum Bruch zu simulieren. Es werden zwei Geometrien verwendet, die erste ist quadratisch, 12 mm x 12 mm (Abbildung 18a), um experimentelle Ergebnisse, die mit einem Extensometer gemessen wurden, mit numerischen Spannungs-Dehnungs-Diagrammen zu vergleichen. Die Ergebnisse dieser Geometrie werden zuvor zur Erstellung der Materialmodelle (Dehnungsmessergebnisse) verwendet. Die zweite Geometrie simuliert die gesamte Probe (Abbildung 18b) und wird für den Vergleich mit experimentellen Daten aus der Gerätetraverse in Kraft-Weg-Werten verwendet. Der zweite Vergleich misst die Genauigkeit der Ergebnisse, wenn das Materialmodell auf verschiedene Geometrien, in diesem Fall auf die gesamte Probe, erweitert wird. Alle Probekörper haben eine Dicke von 0,76 mm.

Das Materialmodell für die EVA-Zwischenschicht wird anhand einer mathematischen Funktion definiert, einem hyperelastischen modifizierten Mooney-Rivlin-Materialmodell mit neun Parametern, siehe Abbildung 17. Zusätzliche Informationen sind die Dichte $\rho = 9700 \text{ kg/m}^3$ und die Poissonzahl $\nu = 0,33$. Die nichtlinearen Analysen werden an einem 3D-Finite-Elementen-Modell durchgeführt, und die Simulation der EVA-Zwischenschicht, die einer einachsigen Zugkraft ausgesetzt ist, erfolgt mit einer festen Seite der Zwischenschicht. Im Gegensatz dazu wird auf der gegenüberliegenden Seite Zugkraft aufgebracht (Abbildung 18b). Es wird davon ausgegangen, dass die Belastungsbedingungen entlang der Kante gleichmäßig sind.

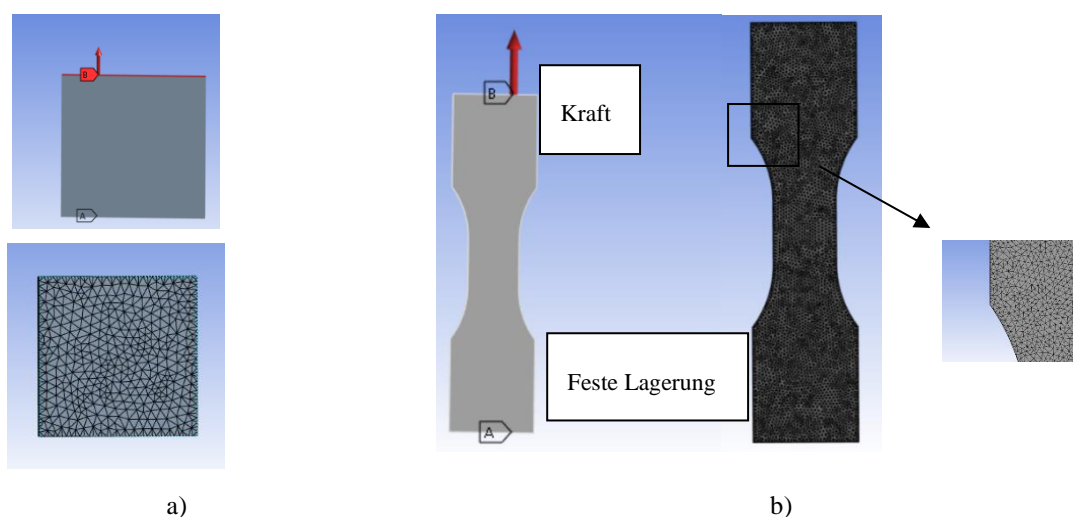


Abbildung 19. Numerische Modelle für den Zugversuch a) kleine Geometrie b) Geometrie in Originalgröße

ANSYS wird verwendet, um die nichtlinearen Gleichungen, die das Verhalten des Systems bestimmen, mithilfe der Methode der finiten Elemente (FEM) zu lösen. Das Modell wird mit finiten Elementen diskretisiert, die große Verformungen erfassen und ein hyperelastisches Material modellieren können. Die Volumina werden importiert und mit tetraedrischen 10-Knoten-Elementen (Solid 187) diskretisiert. Dieses Element eignet sich für die Modellierung unregelmäßiger Netze. Das Element wird durch 10 Knoten mit drei Freiheitsgraden an jedem Knoten definiert: Translationen in den Knotenrichtungen x , y und z . Zusätzlich verfügt es über die Fähigkeit, eine gemischte Formulierung zu verwenden, um die Dehnungen von nahezu inkompressiblen elastoplastischen Materialien und vollständig inkompressiblen hyperplastischen Materialien zu simulieren. In Abbildung 19 werden die numerischen Ergebnisse von EVA 1 mit den experimentellen Spannungs- und Dehnungsergebnissen verglichen. Um die experimentelle Prüfung genauer zu simulieren, wird dieser Vergleich auf eine Probe mit einer Geometrie von $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ und Extensometerdaten aus dem Bereich der Mitte der Probe (Ausgangslänge 12 mm) angewandt.

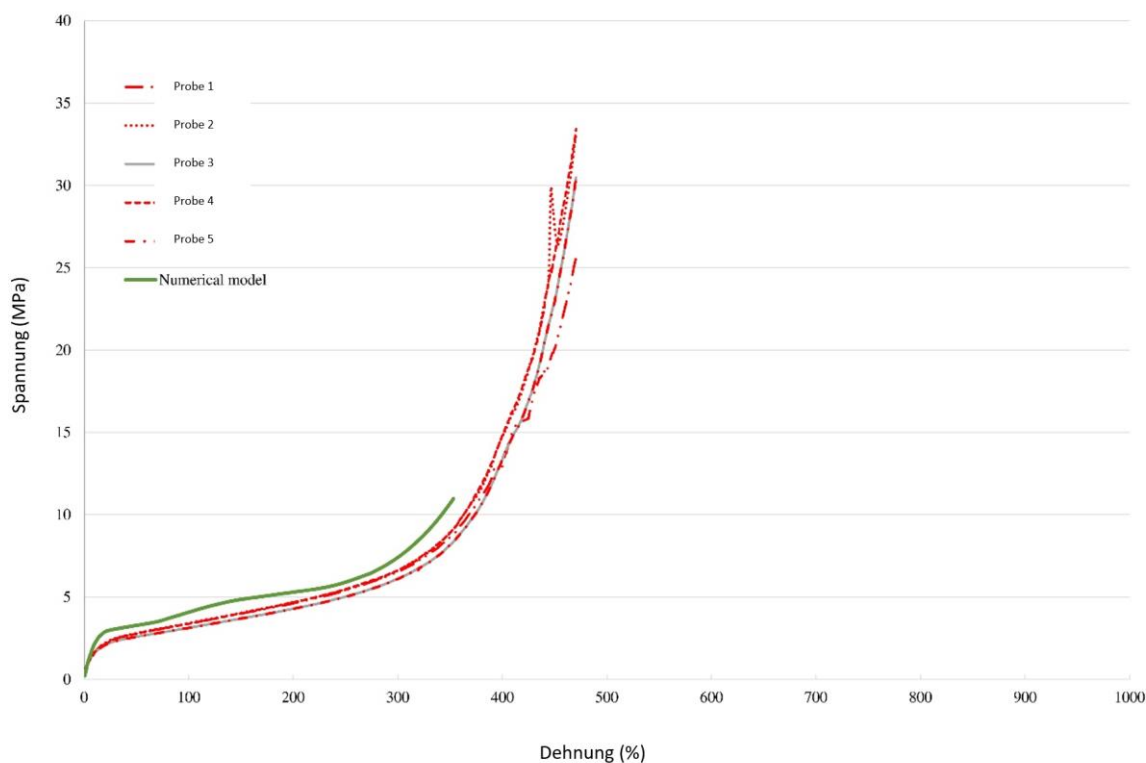


Abbildung 20. Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse für den einachsigen Zugversuch an EVA 1-Proben

Die numerische Simulation deckt sich mit der Form der experimentellen Kurve, wobei die Spannung tendenziell überschätzt wird. Der Unterschied zwischen den numerischen und experimentellen Ergebnissen der Spannungsvorhersage beträgt etwa 19 %, wobei der experimentelle Mittelwert der Spannung überschätzt wird. Diese Differenz verteilt sich über die gesamte Kurve im nichtlinearen Bereich. Die Ergebnisse des numerischen Modells liegen auf der sicheren Seite.

In Abbildung 21 wird ein Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse für die EVA-2-Zwischenschicht dargestellt. Der Vergleich wird erneut für die Probe mit einer Geometrie von 12 mm x 12 mm durchgeführt. Die numerische Vorhersage stimmt dabei gut mit den experimentellen Ergebnissen überein. Der Unterschied zwischen den numerischen und experimentellen Ergebnissen der Spannungsvorhersage beträgt etwa 3,9 %, wobei die numerischen Ergebnisse eine höhere Spannung als das experimentelle Mittelwertwert der Spannung (aus 5 Proben) vorhersagen. Dieser Unterschied ist geringer als die Diskrepanz der experimentellen Ergebnisse bei den fünf Proben.

Diese Ergebnisse belegen, dass das hyperelastische 9-Parameter-Mooney-Rivlin-Materialmodell das Verhalten der EVA-Zwischenschicht genau beschreibt. Das von dieser Näherung abgedeckte Dehnungsintervall ist deutlich höher als die Dehnung, die in intakten LG-Elementen auftritt. Für beide Probengruppen erreichten die Simulationen den Verfestigungsteil der experimentellen Spannungs-

Dehnungs-Kurve, und etwa 75 % der endgültigen Dehnung wurden mit einem numerischen Modell simuliert. Diese Dehnungsintervalle decken das Verhalten der Zwischenschicht im Nachbruchregime von LG-Strukturen ab.

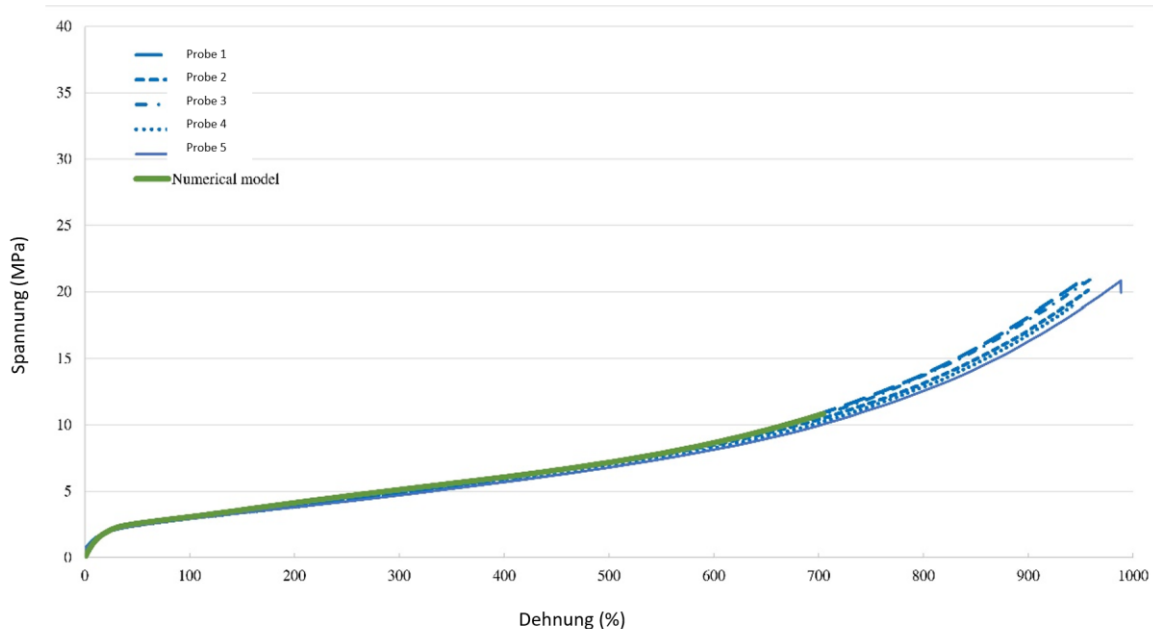


Abbildung 21. Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse für den einachsigen Zugversuch an EVA-2-Proben

Zugversuche am gebrochenen VSG

Das dritte Projektpaket konzentriert sich auf die Bestimmung des Verhaltens von gebrochenem Verbundglas in einachsigen und flächigen Zugversuchen. Abbildung 22 zeigt die Vorbereitung der Proben für den einachsigen Test (50 x 300 mm) und den Planar-Test (150 x 300 mm).

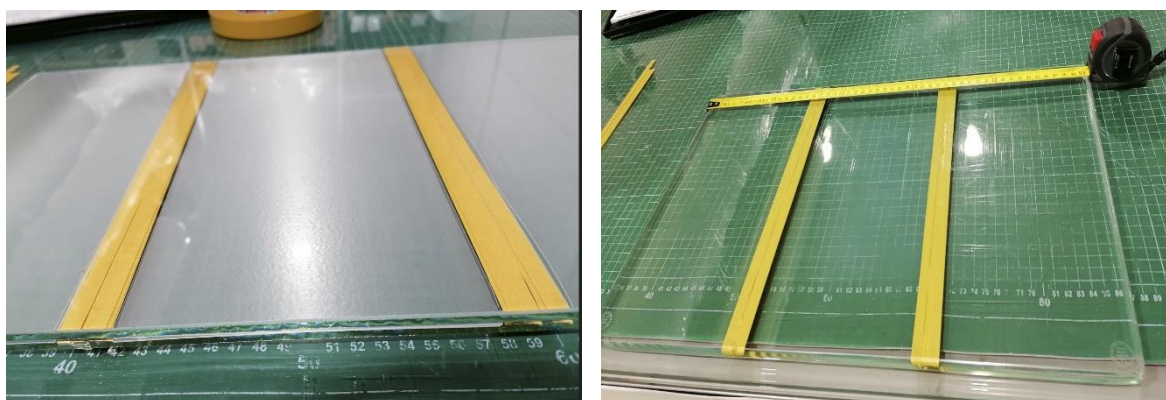


Abbildung 22. Probekörper VSG ESG 66,4 mm mit EVA 1,52 mm

Vorbereitung der Probe

Die Proben (Abbildung 22) zerbrachen in der Mitte durch einen Hammerschlag auf die frei gelagerten Proben. Nach dem Bruch wurden die Proben auf eine Größe von 50 x 300 mm (einachsige Proben) und 150 x 300 mm (ebene Proben) zugeschnitten. Das Schneiden erfolgte mit einem Winkelschleifer unter Verwendung einer in Wasser getauchten Trennscheibe, um die Erwärmung zu minimieren.

Nach dem Schneiden und Trocknen der Proben wurden deren Kanten verstärkt. Die 50 x 300 mm großen Elemente wurden mit einem 75 mm breiten Glasfaserband (Abbildung D in Anlagen) umwickelt, sodass eine aktive Testfläche von 50 x 150 mm entstand, einschließlich der 75 mm breiten Glasfasern mit einer spezifischen Masse von 315 g/m^2 . Die Glasfasern hatten eine Dicke von 0,4 mm. Zur Befestigung des Bandes am Querschnitt wurden elastische Gummibänder bzw. dünne Seile mit einem Durchmesser von 1,1 mm verwendet. Die Kanten der umwickelten Proben wurden mit Epoxidharz von West Systems (Abbildung C in den Anlagen) beschichtet, um eine vollständige Sättigung der Glas- und Bandporen zu gewährleisten. Im Durchschnitt wurden pro Probe etwa 25 ml Harz verwendet, wodurch eine durchschnittliche Dicke von 1,5 mm für die Kombination aus Harz und Glasfasern erreicht wurde. Nach dem Beschichtungsprozess wurden die Proben 3 bis 5 Tage lang getrocknet, um vollständig auszuhärten. Die Zugfestigkeit der Epoxidschicht beträgt etwa 50 MPa. Die Bilder der Proben sind in den Tabelle 6 bis 10 zu finden.

Uniaxialer Zugversuch bis zum Bruch

Die 50 × 150 mm großen Proben wurden direkt in hydraulische Spannbacken eingespannt. Verwendet wurde eine Maschine von Shimadzu AGX UTM (300 kN). Die Spannkraft betrug 25 kN. Die 50x150-mm-Proben wurden mit Stahlplatten und Elementen eingespannt, die eine freie Drehung ermöglichen. Beim Einspannen wurde an der Klemme eine Option eingebaut, die die durch das Einspannen entstehende Längskraft aufhebt, damit die Proben nicht überlastet werden. Die Prüfung wurde mittels kontrollierter Traversenbewegung durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,5 mm/s.

Die 50x150 mm Proben versagten in ähnlicher Weise - bei einem hohen Längskraftniveau, mit einem plastischen Bereich und einem leichten Kraftabfall vor dem plötzlichen Versagen durch Öffnen eines Bruchs in der Nähe der Klemme.

Zwei der 50x150-Proben versagten auf diese Weise: zwei Proben versagten aufgrund einer Kombination aus Biegung und Längskraft, eine aufgrund einer Biegung in der Ebene der Probe aufgrund einer überschüssigen Zwischenschicht am Rand der Probe, und eine weitere versagte aufgrund des Lösen des Klebers zwischen Glas und Stahlplatte. Alle 50x150-mm-Proben haben den elastischen Bereich überschritten und stimmen in diesem Bereich überein.

Tabelle 5.
Zugversuchsart

Versuchsart	Glasaufbau	Zwischenschicht	Temp.	Bruchzustand	Anzahl	Geometrie
Zugversuch (uniaxial)	2×6 mm ESG	EVA 1,52 mm	Raumtemp.	vorgebrochen	6	50x150 mm

Die folgenden Tabellen zeigen Fotos der Proben in den verschiedenen Phasen des Experiments.

Tabelle 6.
Probenphasen während der Prüfung - Muster FGA000

FGA000	Beschreibung
	<p>Beginn des Experiments</p> <p>Alle Glasstücke kleben auf der Zwischenschicht</p> <p>gleichmäßige Verteilung der gebrochenen Glasfragmente</p>
	<p>Mitte des Experiments</p> <p>Die meisten Glasstücke klebten an der Zwischenschicht</p> <p>Zwischenlage wird stark verformt (in der Nähe der Klemme)</p>
	<p>Vor dem Bruch</p> <p>Eine übermäßige Anzahl von Stücken ist vom Exemplar abgefallen</p> <p>Zwischenlage erreicht ihre maximale Zugfestigkeit (nahe der Klammer)</p>

Tabelle 7.
Probenphasen während der Prüfung - Muster FGA002


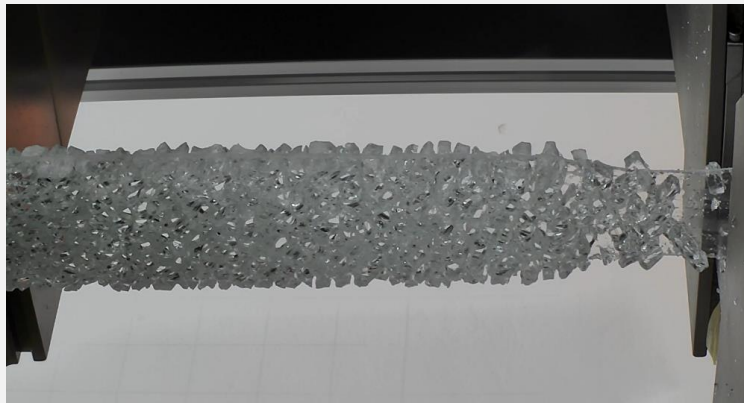
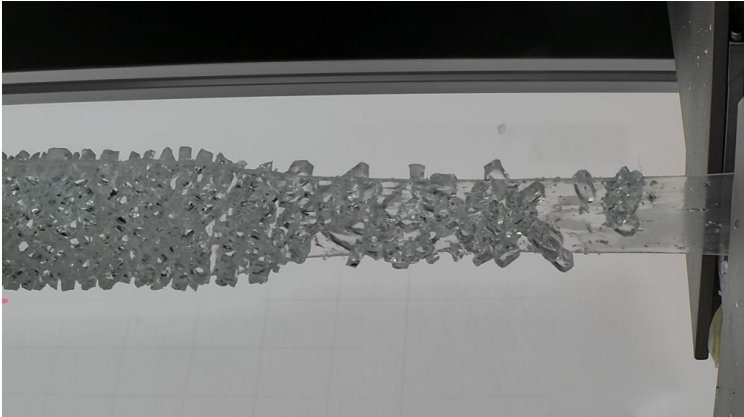
FGA002	Beschreibung
	<p>Beginn des Experiments</p> <p>Alle Glasstücke kleben auf der Zwischenschicht</p>
	<p>Mitte des Experiments</p> <p>Die meisten Glasstücke kleben an der Zwischenschicht</p> <p>Zwischenlage wird stark verformt (in der Nähe der Klemme)</p>
	<p>Vor dem Bruch</p> <p>Eine übermäßige Anzahl von Stücken ist vom Exemplar abgefallen</p> <p>Zwischenlage erreicht ihre maximale Zugfestigkeit (nahe der Klammer)</p>




Tabelle 8.
Probenphasen während der Prüfung - Muster FGA003

FGA003	Beschreibung
	<p>Beginn des Experiments</p> <p>Alle Glasstücke kleben auf der Zwischenschicht</p>
	<p>Mitte des Experiments</p> <p>Die meisten Glasstücke kleben an der Zwischenschicht</p> <p>Zwischenlage wird stark verformt (in der Nähe der Klemme)</p>
	<p>Vor dem Bruch</p> <p>Eine übermäßige Anzahl von Stücken ist vom Exemplar abgefallen</p> <p>Zwischenlage erreicht ihre maximale Zugfestigkeit</p>

Tabelle 9.
Probenphasen während der Prüfung - Muster FGA004

FGA004	Beschreibung
	<p>Beginn des Experiments</p> <p>Alle Glasstücke kleben auf der Zwischenschicht</p>
	<p>Mitte des Experiments</p> <p>Die meisten Glasstücke kleben an der Zwischenschicht</p> <p>Zwischenlage wird stark verformt (in der Nähe der Klemme)</p>
	<p>Vor dem Bruch</p> <p>Eine übermäßige Anzahl von Stücken ist vom Exemplar abgefallen</p> <p>Zwischenlage erreicht ihre maximale Zugfestigkeit</p>

Tabelle 10.
Probenphasen während der Prüfung - Muster FGA005

FGA005	Beschreibung
	<p>Beginn des Experiments Alle Glasstücke kleben auf der Zwischenschicht</p>
	<p>Mitte des Experiments Die meisten Glasstücke klebten an der Zwischenschicht Zwischenlage wird stark verformt (in der Nähe der Klemme)</p>
	<p>Vor dem Bruch Eine übermäßige Anzahl von Stücken ist vom Exemplar abgefallen Zwischenlage erreicht ihre maximale Zugfestigkeit</p>

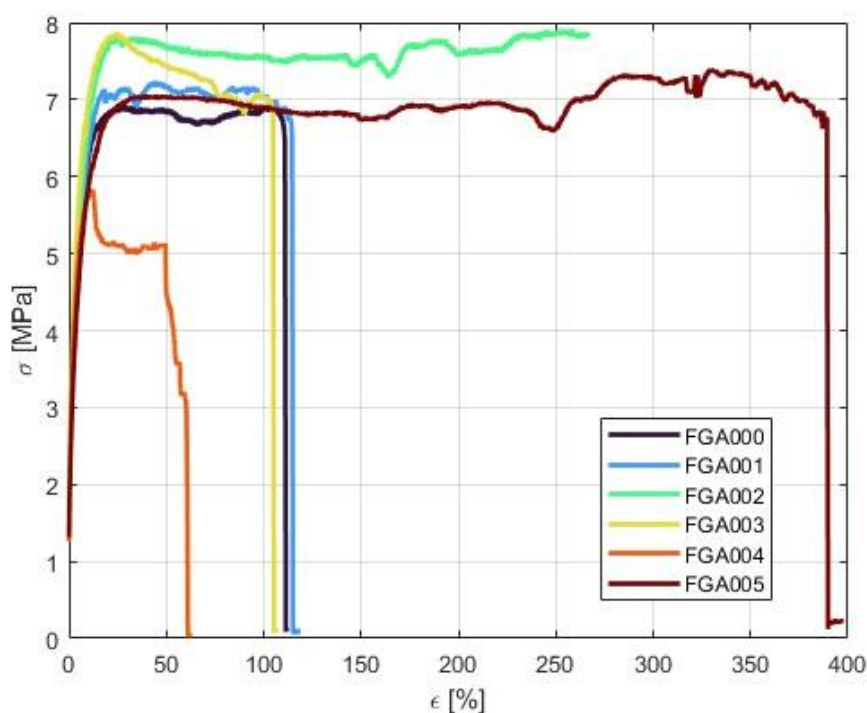


Abbildung 23. Das Sigma-Epsilon-Diagramm (σ - ϵ) für alle Proben

Das Sigma-Epsilon- $(\sigma$ - $\epsilon)$ -Diagramm (Abbildung 23) zeigt das Spannungs-/Dehnungsverhalten von Verbundglasproben unter einachsiger Spannung. Diese 50x150 mm großen Proben bestehen aus 2x6 mm ESG-Glas (vor der Prüfung gebrochen) und einer 1,52 mm dicken EVA-Zwischenschicht, die die Duktilität verbessert und die Lastübertragung unterstützt.

In der Studie werden die Auswirkungen kleiner Glasfragmente auf die Zugfestigkeit und das Verformungsverhalten von Verbundglas untersucht.

Die verschiedenfarbigen Kurven stellen verschiedene Proben dar, die jeweils ein unterschiedliches Spannungs-/Dehnungsverhalten aufweisen (von FGA000 bis FGA005). Mehrere Kurven zeigen eine anfängliche elastische Phase, gefolgt von plastischer Verformung und schließlich von Versagen. Die rote Kurve (FGA005) und die grüne Kurve (FGA003) zeigen eine lang anhaltende plastische Verformung, während die anderen (FGA000, FGA001) nach Erreichen der Höchstspannung versagen. Die anfängliche Steifigkeit ist vermutlich auf die EVA-Zwischenschicht zurückzuführen, die in erster Linie die Last trägt, bis die Glasfragmente die Lastübertragung unterstützen.

Das Spannungsplateau in bestimmten Kurven (FGA005) deutet auf eine gleichbleibende Belastbarkeit hin, wahrscheinlich aufgrund einer effizienten Spannungsverteilung zwischen den Glasfragmenten und dem EVA. Im Gegensatz dazu können die starken Abfälle in anderen Kurven (FGA000, FGA001) auf

Versagensmodi hinweisen, bei denen sich Glasfragmente ablösen oder die Belastungseffizienz beeinträchtigen. Die beobachteten erweiterten Dehnungswerte (bis zu 400 %) unterstreichen die erhebliche Duktilität von EVA, da es sich deutlich verformt, sobald die Glasfragmente keine strukturelle Unterstützung mehr bieten.

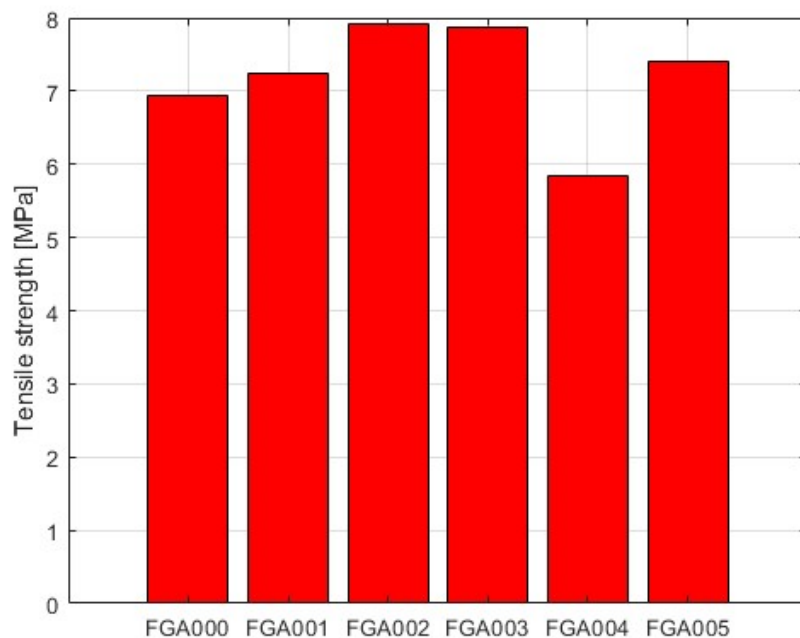


Abbildung 24. Zugfestigkeit

Das Balkendiagramm (Abbildung 24) zeigt die Zugfestigkeit (in MPa) verschiedener Proben mit den Bezeichnungen FGA000 bis FGA005. Die niedrigste Zugfestigkeit beträgt etwa 6 MPa (FGA004), die höchste etwa 8 MPa (FGA002).

Die repräsentative Zugfestigkeit kann mit 7 MPa angesetzt werden. FGA002 und FGA003 weisen die höchsten Werte auf, was möglicherweise auf eine bessere Bindung oder ein günstigeres Versagensmuster in der Verbundstruktur hinweist. Der Rückgang der Zugfestigkeit bei FGA004 könnte auf eine lokal schwächere Haftung oder auf Unterschiede in der Wechselwirkung zwischen den Glasfragmenten hindeuten.

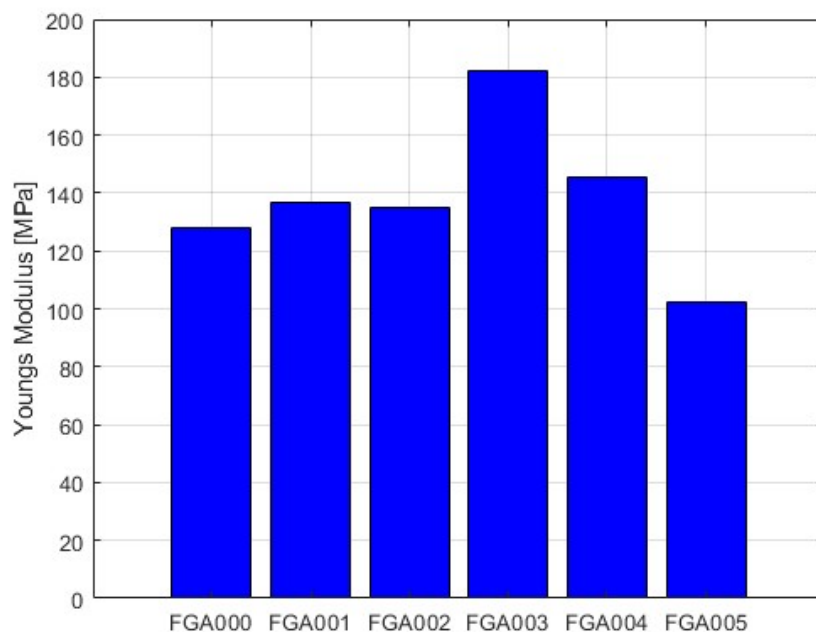


Abbildung 25. Elastizitätsmodul

Das Balkendiagramm (Abbildung 25) zeigt das Elastizitätsmodul (in MPa) für verschiedene Proben mit den Bezeichnungen FGA000 bis FGA005. Der niedrigste Elastizitätsmodul beträgt 100 MPa (FGA005). Der Höchste liegt bei etwa 190 MPa (FGA003).

Der repräsentative Elastizitätsmodul beträgt 140 MPa. FGA003 (+35,7%) und FGA005 (-25,0%) sind extreme Abweichungen. Die anderen vier Proben (FGA000, FGA001, FGA002, FGA004) bleiben innerhalb von $\pm 7,1$ % von 140 MPa. Dies bestätigt, dass 140 MPa ein angemessener zentraler Wert ist, da die meisten Proben um diesen Wert streuen. Der tatsächliche Elastizitätsmodul des Materials liegt voraussichtlich im Bereich von $139,5 \pm 8,06$ MPa bzw. bei ungefähr 131,4 bis 147,6 MPa bei einer Sicherheit von 95%.

Planare einachsige Prüfungen bis zum Bruch

Die 300 × 150 mm Elemente unterlagen einer anderen Präparationsmethode. Aufgrund des größeren Querschnitts war es nicht möglich, die Proben direkt an der Klemme zu befestigen, da die maximale Breite der Backen 70 mm beträgt. Es wurden dieselben Glasfasern und dasselbe Epoxidharz verwendet, jedoch wurde auf einer Seite eine T-förmige Stahlplatte eingefügt, über die die Last auf die Probe übertragen wurde. Die Verklebung erfolgte in zwei Schritten – zunächst wurde die Platte mit Epoxidharz auf die Glasprobe geklebt, anschließend wurde eine Schicht aus Glasfasern und Epoxidharz aufgebracht. Aufgrund der zweistufigen Verklebung betrug die Trocknungszeit etwas länger (4 bis 6 Tage). Tabelle 12 bis Tabelle 17 zeigen die Bilder der oben beschriebenen Proben.

Tabelle 11.
Zugversuchsart (planar)

Versuchsart	Glasaufbau	Zwischenschicht	Temp.	Bruchzustand	Anzahl	Geometrie
Zugversuch (planar)	2×6 mm ESG	EVA 1,52 mm	Raumtemp.	vorgebrochen	6	300x150 mm

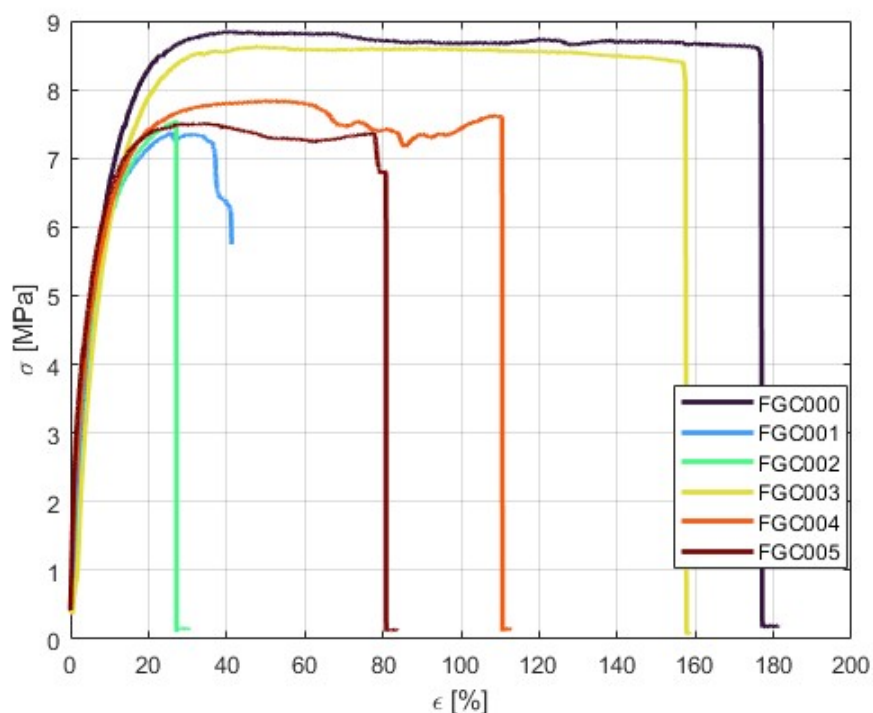


Abbildung 26. Das Sigma-Epsilon-Diagramm (σ - ϵ) für alle Proben

Laut Abbildung 26 versagten die Proben FGC001 und FGC002 bei einer relativ geringen Dehnung von etwa 30–40 %, was auf ein sprödes Versagen direkt neben der Klemme hinweist. Wenn man diese von der weiteren Analyse ausschließt, folgen die übrigen Kurven (FGC000, FGC003, FGC004 und FGC005) zunächst einem ähnlich steilen Anstieg, was auf ein anfängliches lineares elastisches Verhalten hinweist. Die meisten Proben erreichen 8 MPa vor dem Versagen, mit Ausnahme von FGC004, dessen Spitzenwert etwas niedriger ist. FGC000 und FGC005 zeigen nach dem Spitzenwert ein bemerkenswertes nichtlineares Verhalten, bei dem sich die Dehnung auf über 150 % ausdehnt, was auf eine starke Adhäsion und Energieabsorption durch die EVA-Zwischenschicht schließen lässt. FGC003 und FGC004 versagen früher, etwa bei 80–100 %, aufgrund vorzeitiger Delamination.

Frühere Versuchsergebnisse legen nahe, dass die EVA-Zwischenschicht eine entscheidende Rolle beim Verhalten nach dem Bruch spielt. Die Unterschiede in der Bruchdehnung deuten darauf hin, dass einige Proben eine bessere Adhäsion oder eine bessere Fragmentverriegelung aufwiesen als andere.

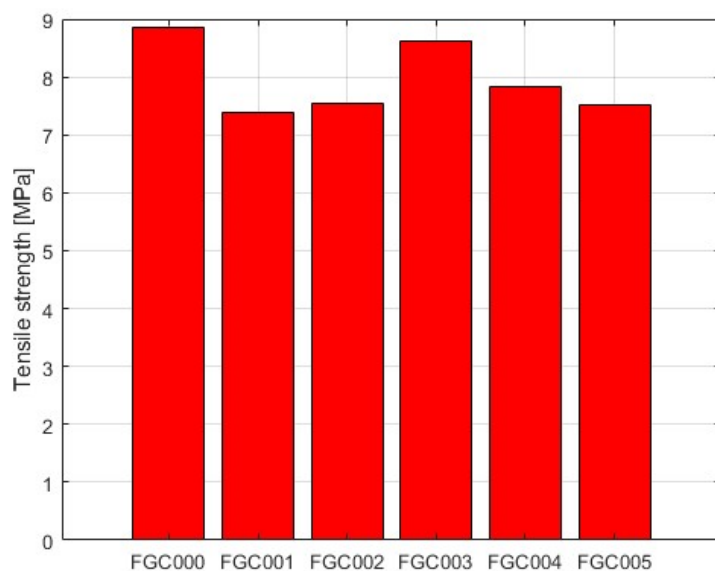


Abbildung 27 Zugfestigkeit

Das Balkendiagramm (Abbildung 27) zeigt die Zugfestigkeit (in MPa) verschiedener Proben mit den Bezeichnungen FGC000 bis FGC005. Die niedrigste Zugfestigkeit beträgt 7,8 MPa (FGC005), was auf eine etwas schwächere Zwischenschichthaftung hinweisen könnte. Der höchste Wert liegt bei 9 MPa (FGC000). Die Gesamtdifferenz beträgt 1,2 MPa und weist auf eine relativ einheitliche Leistung der getesteten Proben hin.

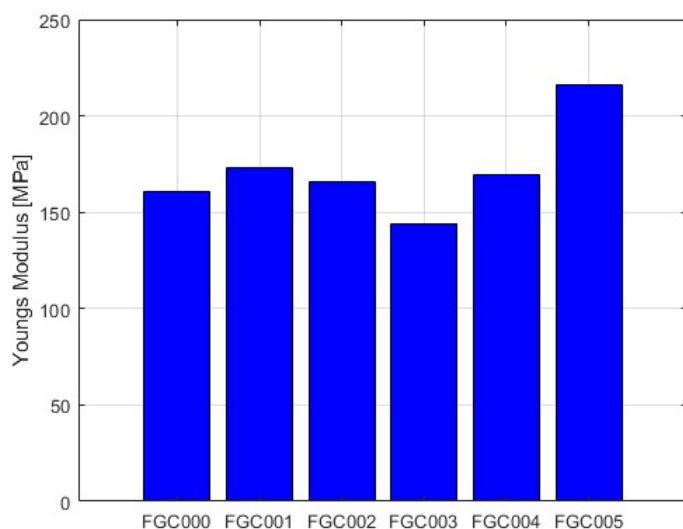


Abbildung 28. Elastizitätsmodul

Abbildung 28 Das Diagramm (Abbildung 28) zeigt den Elastizitätsmodul in MPa für die verschiedenen Proben FGC000 bis FGC005. Der Wertebereich liegt zwischen 145 und 218 MPa. Die Probe FGC000 hat den niedrigsten Wert von 145 MPa, und die Probe FGC005 den höchsten Wert von 218 MPa. Ein höherer Wert könnte auf eine bessere EVA- und Glashaftung hinweisen. Der Variationskoeffizient ist etwa 14 % größer als bei der Zugfestigkeit (ca. 5 %). Der durchschnittliche Elastizitätsmodul beträgt 174 MPa. Der Elastizitätsmodul spiegelt die anfängliche Steifigkeit wider, d.h. wie sehr das gebrochene Verbundglas einer Verformung bei geringer Belastung widersteht.

Tabelle 12.
 Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC000

FGC000	Beschreibung
	<p>Beginn des Experiments</p> <p>Alle Glasstücke kleben auf der Zwischenschicht</p>
	<p>Mitte des Experiments</p> <p>Die meisten Glasstücke klebten an der Zwischenschicht</p> <p>Zwischenlage wird stark verformt (in der Nähe der Klemme)</p>
	<p>Vor dem Bruch</p> <p>Eine übermäßige Anzahl von Stücken ist vom Exemplar abgefallen</p> <p>Zwischenlage erreicht ihre maximale Zugfestigkeit</p>

Tabelle 13.
 Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC001

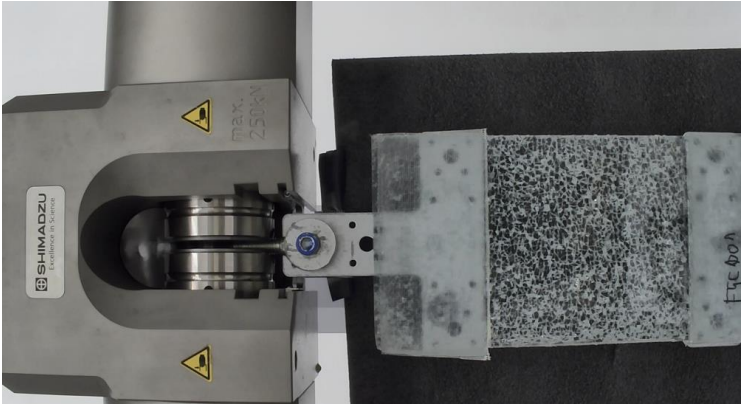
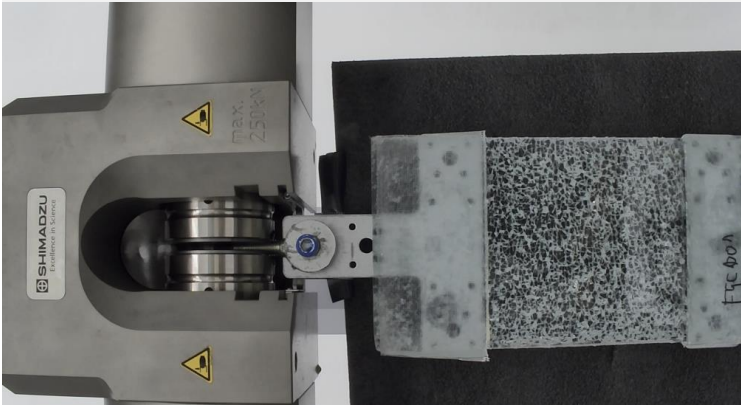
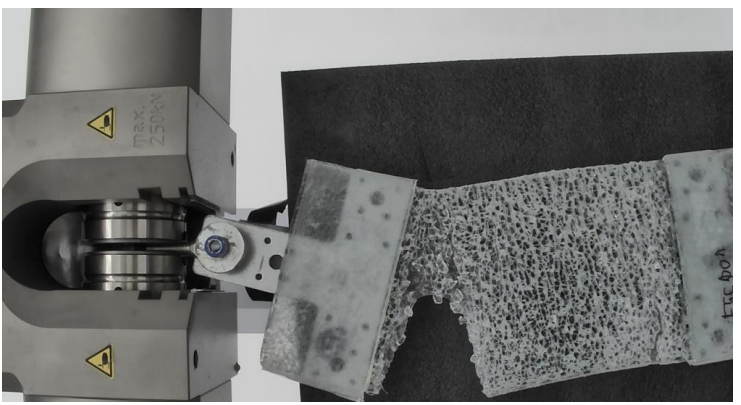
FGC001	Beschreibung
	<p>Beginn des Experiments</p> <p>Alle Glasstücke kleben auf der Zwischenschicht</p>
	<p>Mitte des Experiments</p> <p>Die meisten Glasstücke kleben an der Zwischenschicht</p> <p>Zwischenlage wird stark verformt (in der Nähe der Klemme)</p>
	<p>Vor dem Bruch</p> <p>Eine übermäßige Anzahl von Stücken ist vom Exemplar abgefallen</p> <p>Zwischenlage erreicht ihre maximale Zugfestigkeit</p>

Tabelle 14.
Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC002

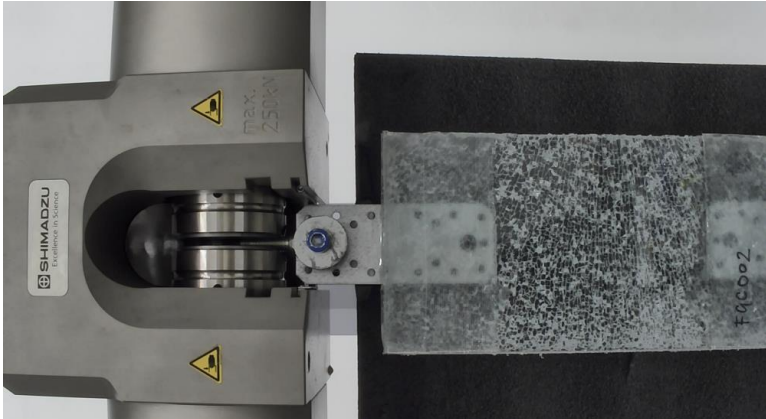
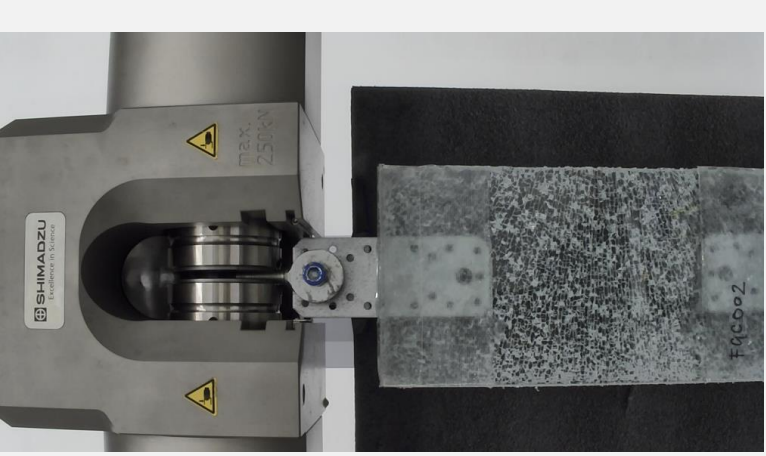
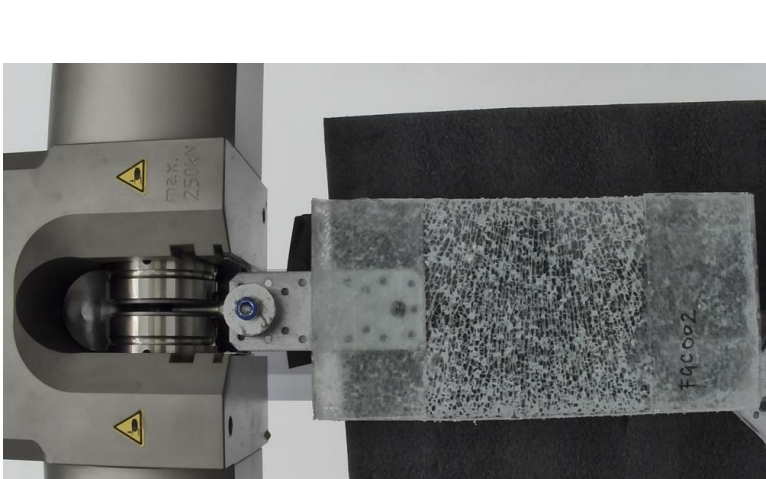
FGC002	Beschreibung
	<p>Beginn des Experiments</p> <p>Alle Glasstücke kleben auf der Zwischenschicht</p>
	<p>Mitte des Experiments</p> <p>Die meisten Glasstücke kleben an der Zwischenschicht</p>
	<p>Vor dem Bruch</p>

Tabelle 15.
 Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC003

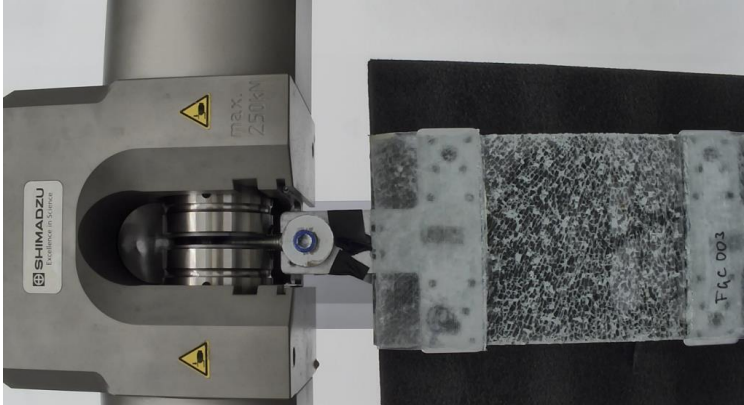
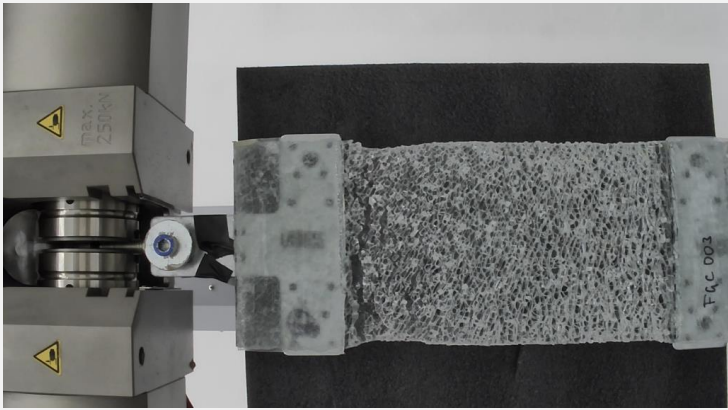

FGC003	Beschreibung
	<p>Beginn des Experiments</p> <p>Alle Glasstücke kleben auf der Zwischenschicht</p>
	<p>Mitte des Experiments</p> <p>Die meisten Glasstücke kleben an der Zwischenschicht</p> <p>Zwischenlage wird stark verformt (in der Nähe der Klemme)</p>
	<p>Vor dem Bruch</p> <p>Eine übermäßige Anzahl von Stücken ist vom Exemplar abgefallen</p> <p>Zwischenlage erreicht ihre maximale Zugfestigkeit</p>

Tabelle 16.
 Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC004

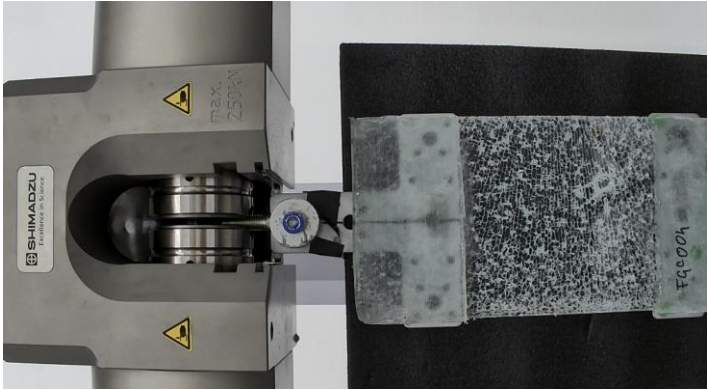
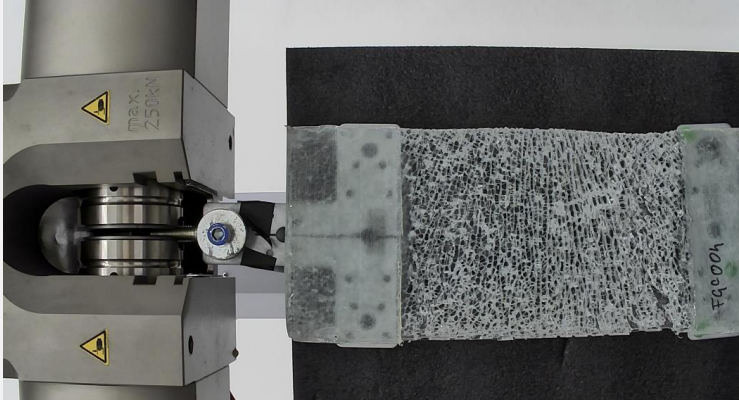
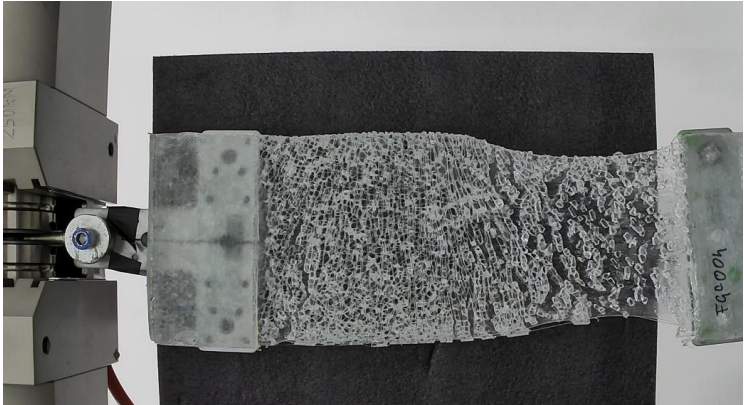
FGC004	Beschreibung
	<p>Beginn des Experiments</p> <p>Alle Glasstücke kleben auf der Zwischenschicht</p>
	<p>Mitte des Experiments</p> <p>Die meisten Glasstücke kleben an der Zwischenschicht</p> <p>Zwischenlage wird stark verformt (in der Nähe der Klemme)</p>
	<p>Vor dem Bruch</p> <p>Eine übermäßige Anzahl von Stücken ist vom Exemplar abgefallen</p> <p>Zwischenlage erreicht ihre maximale Zugfestigkeit</p>

Tabelle 17.
 Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC005

FGC005	Beschreibung
	<p>Beginn des Experiments</p> <p>Alle Glasstücke kleben auf der Zwischenschicht</p>
	<p>Mitte des Experiments</p> <p>Die meisten Glasstücke kleben an der Zwischenschicht</p>
	<p>Vor dem Bruch</p> <p>Eine übermäßige Anzahl von Stücken ist vom Exemplar abgefallen</p> <p>Zwischenlage erreicht ihre maximale Zugfestigkeit</p>

Bewertung der Ergebnisse

Tabelle 18.
Ergebnisse – Planare und Uniaxiale Prüfungen

	Planare Prüfungen		Uniaxiale Prüfungen	
Zugfestigkeit (MPa)	Mittelwert:	7,96	Mittelwert:	7,20
	Standardabweichung:	0,63	Standardabweichung:	0,77
	Bereich:	1,47	Bereich:	2,08
Youngs Modul (MPa)	Mittelwert:	0,175	Mittelwert:	1,30
	Standardabweichung:	0,112	Standardabweichung:	1,18
	Bereich:	0,297	Bereich:	3,31

Gemäß der Tabelle 18 weisen die Planarversuche eine etwas höhere durchschnittliche Zugfestigkeit (7,96 MPa) auf als die einachsigen Versuche (7,20 MPa). Dennoch ist die Standardabweichung bei den Planarversuchen geringer (0,63 MPa) als bei den einachsigen Versuchen (0,77 MPa). Dies könnte auf eine gleichmäßigere Leistung unter biaxialen Belastungsbedingungen hinweisen.

Der Elastizitätsmodul ist hingegen bei einachsigen Prüfungen im Durchschnitt wesentlich höher (1,30 MPa) als bei planaren Prüfungen (0,175 MPa). Die Standardabweichung der einachsigen Tests weist ebenfalls eine größere Streuung auf (1,18 MPa; der Bereich liegt bei 3,31 MPa), was auf eine höhere Variabilität bei den Steifigkeitsmessungen hinweisen könnte. Der Elastizitätsmodul aus planaren Tests ist niedriger und konsistenter, was auf unterschiedliche Lastverteilungen bei planaren Tests unter multiaxialen Spannungszuständen zurückzuführen sein könnte.

Dementsprechend ist die Restzugfestigkeit zur Gewährleistung der Integrität nach dem Bruch von entscheidender Bedeutung. Planare Prüfungen mit ihrer gleichmäßigeren Zugfestigkeit spiegeln möglicherweise besser die Leistung wider, wenn multiaxiale Belastungen auftreten (z. B. Windlasten oder Aufprallszenarien). Andererseits deutet der höhere und variabelere Elastizitätsmodul bei einachsigen Prüfungen darauf hin, dass die Steifigkeitsmessungen empfindlicher auf die Prüfkonfiguration und die genauen Merkmale des ursprünglichen Belastungsbereichs reagieren.

Quantifizierung der aussteifenden Wirkung von Glasfragmenten

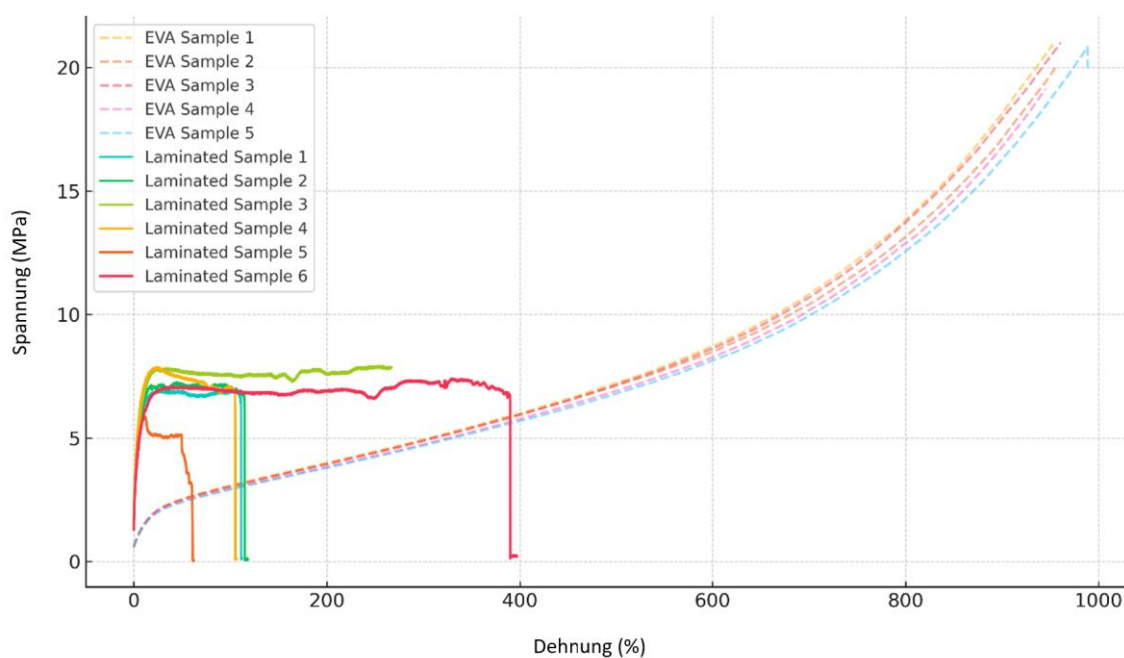


Abbildung 29. Spannungs-Dehnungs-Kurven

Zur Analyse des Verstärkungsbeitrags der Glasfragmente wurde die Anfangssteifigkeit (Elastizitätsmodul) sowohl für die EVA-Zwischenschicht als auch für die laminierten Proben berechnet (Abbildung 29). Dazu wurde innerhalb des anfänglichen Dehnungsbereichs von 5% eine lineare Regression der Spannungs-Dehnungs-Kurven durchgeführt, um das elastische Verhalten zu erfassen.

Tabelle 19.
Ergebnisse des Elastizitätsmoduls

Muster	Anfangsmodul (MPa)
EVA 1	0.156
EVA 2	0.130
EVA 3	0.112
EVA 4	0.109
EVA 5	0.069
Gebrochenes LSG 1	2.644

Muster	Anfangsmodul (MPa)
Gebrochenes LSG 2	1.713
Gebrochenes LSG 3	2.121
Gebrochenes LSG 4	2.282
Gebrochenes LSG 5	2.282
Gebrochenes LSG 6	0.820

Die EVA-Zwischenschichtproben wiesen einen niedrigen Anfangsmodul auf, der zwischen 0,07 und 0,16 MPa lag (Tabelle 19). Im Gegensatz dazu wiesen die Verbundglasproben mit gebrochenen Fragmenten eine deutlich höhere Anfangssteifigkeit auf, die in der Regel über den EVA-Werten lag. Dies zeigt die aussteifende Wirkung der gebrochenen Glasstücke, die die Lastübertragung bewirken und die Verformung der Zwischenschicht einschränken. Diese Ergebnisse unterstreichen die entscheidende Rolle des gebrochenen Glases bei der Aufrechterhaltung der strukturellen Leistungsfähigkeit auch nach dem Bruch und liefern Erkenntnisse für eine genaue Materialmodellierung und Versagenssimulation.

Numerische Modellierung nach durchgeführten Experimenten

Numerische Modellierung der Zwischenschicht

Mit dem Softwarepaket ANSYS wurde ein numerisches Modell erstellt, um den Zugversuch bis zum Bruch zu simulieren. Alle Probekörper haben eine Dicke von 0,76 mm.

Das Materialmodell für die EVA-Zwischenschicht wird anhand einer mathematischen Funktion definiert, nämlich eines hyperelastischen modifizierten Mooney-Rivlin-Materialmodells mit neun Parametern. Weiterhin wurde eine Dichte $\rho = 9700 \text{ kg/m}^3$ und eine Poissonzahl von $\nu = 0,33$ angesetzt. Die nichtlinearen Analysen werden mit einem 3D-Finite-Elemente-Modell durchgeführt, um die Simulation der EVA-Zwischenschicht, die einer einachsigen Zugkraft ausgesetzt ist, mit einer festen Seite der Zwischenschicht zu realisieren. Im Gegensatz dazu wird auf der gegenüberliegenden Seite eine Zugkraft aufgebracht. Es wird davon ausgegangen, dass die Belastungsbedingungen entlang der Kante gleichmäßig sind. ANSYS wird verwendet, um die nichtlinearen Gleichungen, die das Verhalten des Systems bestimmen, mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) zu lösen. Das Modell wird in ein Netz von Elementen diskretisiert, das in der Lage ist, die großen Verformungen für ein hyperelastisches

Materialmodell zu erfassen. Die Volumina wurden importiert und mit tetraedrischen 10-Knoten-Elementen (Solid 187) diskretisiert. Das Element weist ein quadratisches Verschiebungsverhalten auf und eignet sich gut zur Modellierung unregelmäßiger Netze. Das Element wird durch 10 Knoten mit drei Freiheitsgraden an jedem Knoten definiert: Translationen in den Richtungen x , y und z . Es kann auch gemischt formuliert werden, um Verformungen von nahezu inkompressiblen elastoplastischen und vollständig inkompressiblen hyperplastischen Materialien zu simulieren (Abbildung 30).

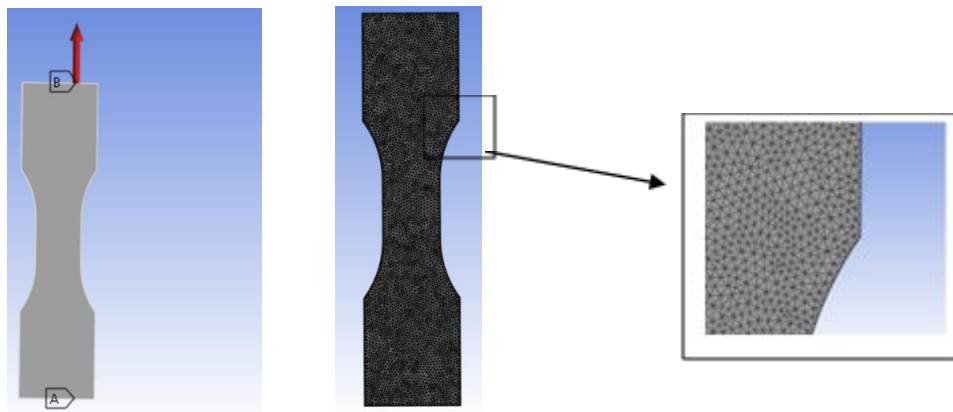


Abbildung 30. Numerisches Modell des Zugversuchs

Abbildung 31 werden die numerischen Ergebnisse von EVA 1 mit den experimentellen Spannungs- /Dehnungsergebnissen verglichen. Die numerische Simulation deckt sich mit der Form der experimentellen Kurve, wobei die Spannung leicht überschätzt wird. Der Unterschied zwischen den numerischen und experimentellen Ergebnissen bei der Spannungsvorhersage beträgt etwa 19 %, wobei der experimentelle Mittelwert der Spannung überschätzt wird. Diese Differenz ist über die gesamte Kurve im nichtlinearen Bereich verteilt. Die Ergebnisse des numerischen Modells liegen auf der sicheren Seite.

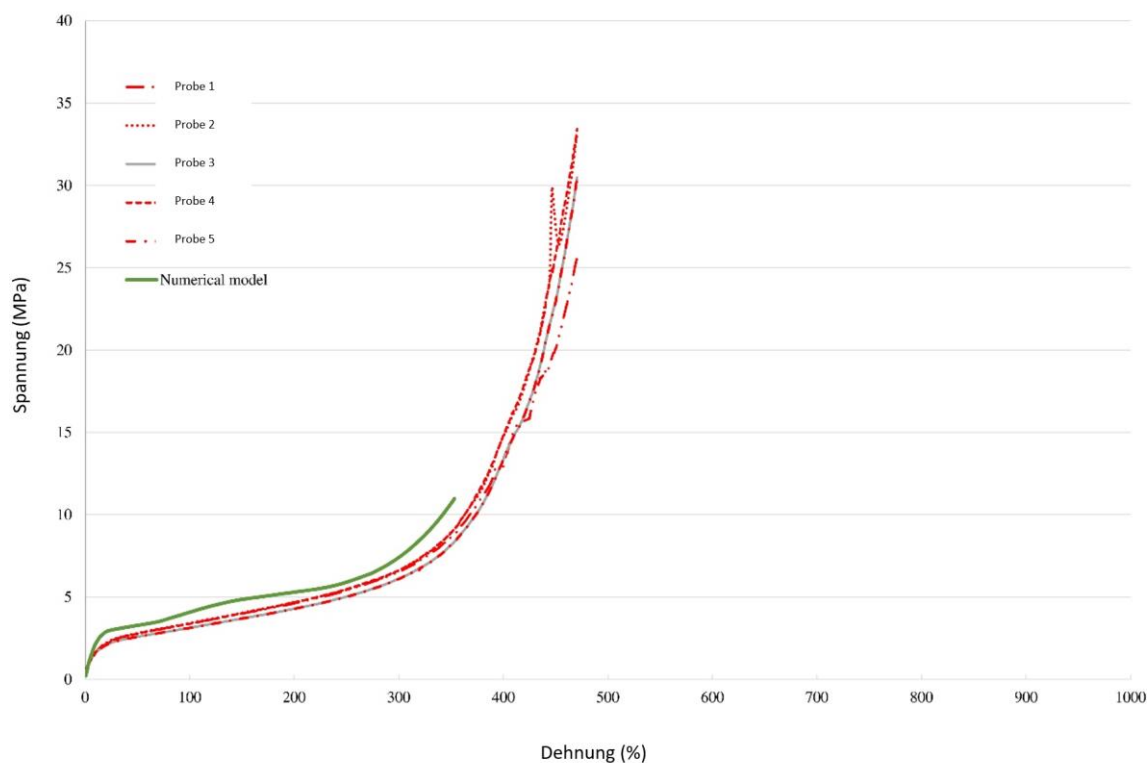


Abbildung 31. Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse für den einachsigen Zugversuch an EVA 1-Proben

In Abbildung 32 wird ein Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse für die EVA 2-Zwischenschicht dargestellt. Die numerische Vorhersage stimmt gut mit den experimentellen Ergebnissen überein. Der Unterschied zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen in Bezug auf die Spannungsvorhersage beträgt etwa 3,9 %, wobei die numerischen Ergebnisse eine höhere Spannung als das experimentelle Mittelwert der Spannung (aus 5 Proben) vorhersagen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass das hyperelastische 9-Parameter-Mooney-Rivlin-Materialmodell das Verhalten der EVA-Zwischenschicht genau beschreibt. Das von dieser Näherung abgedeckte Dehnungsintervall ist deutlich höher als die Dehnung, die in intakten LG-Elementen auftritt. Bei beiden Probengruppen erreichten die Simulationen den Verfestigungsteil der experimentellen Spannungs-Dehnungs-Kurve. Etwa 75 % der Enddehnung wurde mit einem numerischen Modell simuliert. Diese Dehnungsintervalle decken das Verhalten der Zwischenschichten nach dem Bruch der LG-Strukturen ab.

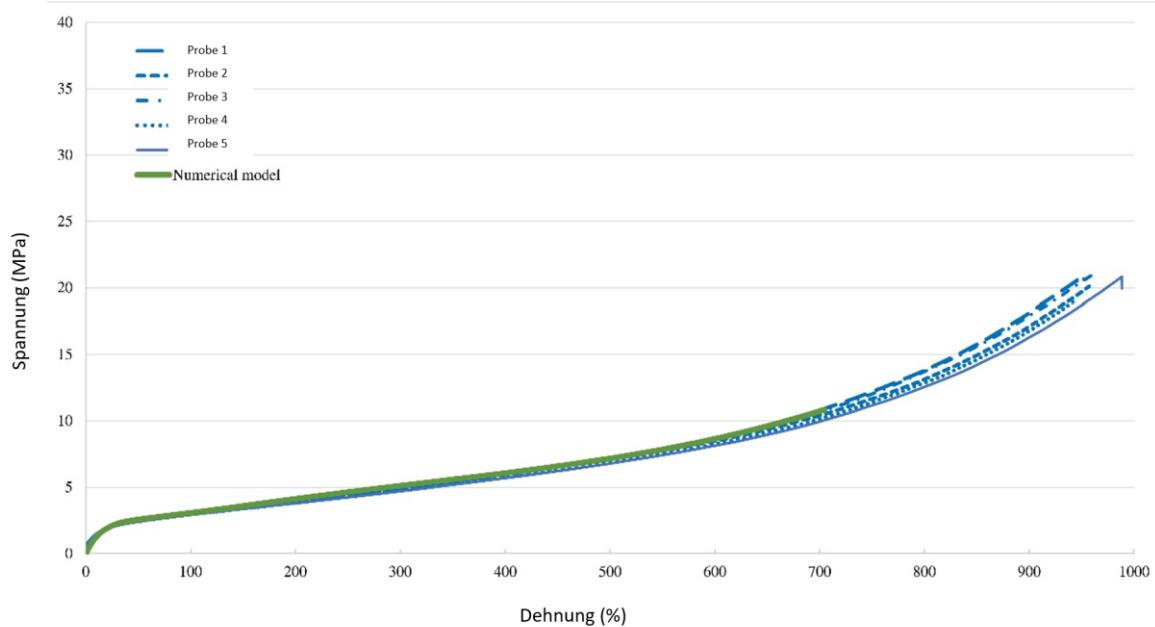


Abbildung 32. Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse für den einachsigen Zugversuch an EVA 2-Proben

Ansatz der Versteifungswirkung der Glasfragmente im Rahmen einer numerischen Berechnung

Ein bilineares Modell (Abbildung 33), das auf den Ergebnissen einachsiger Zugversuche basiert, wurde entwickelt, um das experimentell beobachtete Spannungs-/Dehnungsverhalten mit einem idealisierten Materialmodell zu vergleichen. Diese Probe zeigt das Nachbruchverhalten des Verbundsystems, bei dem die Zwischenschicht die Last nach der Glaszersplitterung trägt. Die experimentelle Kurve zeigt einen steilen anfänglichen Spannungsanstieg, gefolgt von einem langen, fast horizontalen Plateau.

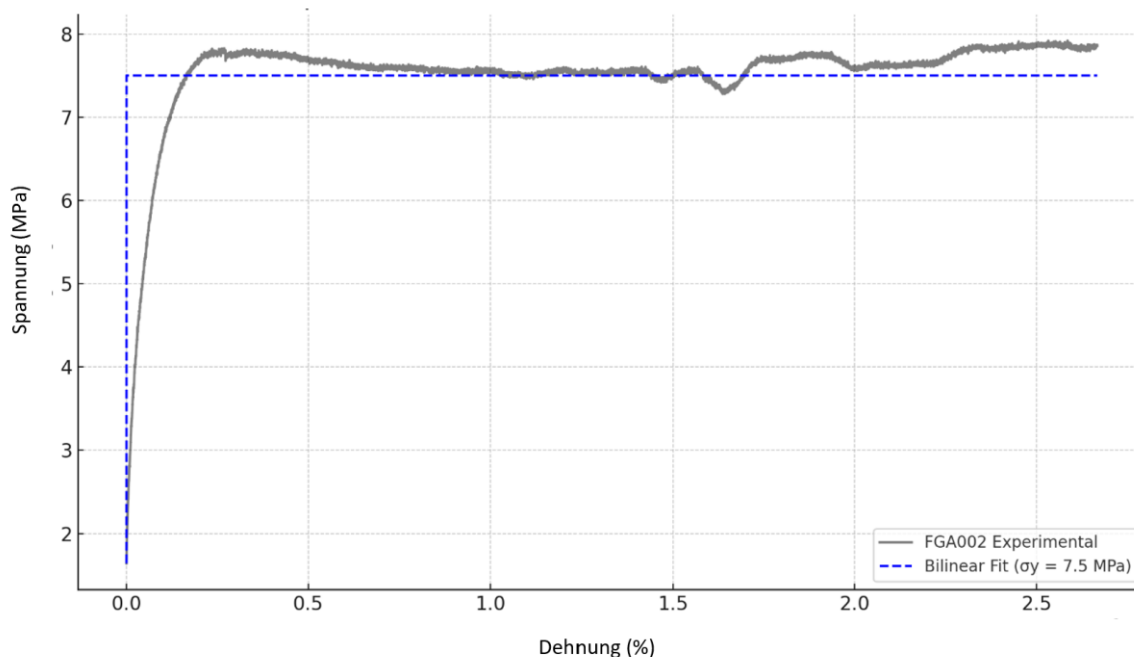


Abbildung 33. Materialmodell

Der Elastizitätsmodul des Materials wurde durch Anpassung einer linearen Regression an den steil ansteigenden Teil der Versuchskurve geschätzt. Dies lieferte eine realistische Darstellung der Materialsteifigkeit im elastischen Bereich. Eine Fließgrenze wurde manuell bei einer Dehnung von $15 \mu\epsilon$ und einer Spannung von 7,5 MPa definiert, was den ungefähren Übergang in den plastischen Bereich widerspiegelt. Jenseits dieses Punktes wurde angenommen, dass sich das Material vollkommen plastisch verhält und die Spannung bei zunehmender Dehnung konstant bleibt. Das sich daraus ergebende bilineare Modell, das aus dem angepassten elastischen Segment und dem Plateau nach der Dehnung zusammengesetzt ist, wurde zusammen mit den experimentellen Daten aufgetragen. Dieser Ansatz bietet ein vereinfachtes, zugleich physikalisch fundiertes Modell, das sich für die Implementierung in numerische Simulationen eignet.

Kombination des Materialmodells für die reine Zwischenschicht mit der aussteifenden Wirkung der Glasfragmente

Das mechanische Verhalten der Verbundglasproben nach dem Bruch lässt sich am besten durch ein bilineares elastoplastisches Materialmodell mit perfekter Plastizität beschreiben. Diese Schlussfolgerung stützt sich auf die Form der experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven, die einen deutlichen und steilen anfänglichen Spannungsanstieg zeigen, gefolgt von einer klar definierten Fließgrenze und einem anschließenden Plateau mit nahezu konstanten Spannungswerten. Insbesondere die Probe FGA002 zeigt dieses Verhalten deutlich mit einem elastischen Bereich, der sich bei einer

Fließspannung von 7,5 MPa bis etwa 15 $\mu\epsilon$ erstreckt. Jenseits dieser Fließgrenze bleibt die Spannung konstant, insbesondere trotz der zunehmenden Dehnung, was auf eine vernachlässigbare Verfestigung hindeutet und ein vollkommen plastisches Verhalten nach der Fließgrenze rechtfertigt.

Dieses bilineare Modell erfasst die anfängliche Steifigkeit des Systems aus Zwischenschicht und Glasfragment sowie die dauerhafte Tragfähigkeit nach dem Nachgeben. Die Implementierung in Finite-Elemente-Software wie Ansys unter Verwendung von Standarddefinitionen für elastoplastische Materialien ist ebenso unkompliziert.

Das bilineare elastoplastische Materialmodell mit perfekter Plastizität ist ein vereinfachtes konstitutives Modell, das üblicherweise zur Darstellung von Materialien verwendet wird, die ein anfängliches lineares elastisches Verhalten aufweisen, gefolgt von Fließen und plastischer Verformung ohne weitere Verfestigung. Es eignet sich besonders gut für Materialien, die nach Erreichen eines bestimmten Spannungsniveaus große Verformungen aufweisen, während die Spannung nahezu konstant bleibt. Dieses Verhalten entspricht weitgehend dem von Verbundglas nach einem Bruch.

Das vorgestellte Modell besteht aus zwei Segmenten:

1. Elastischer Bereich (lineare Reaktion):

Im Anfangsbereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve verhält sich das Material elastisch. Die Spannung nimmt nach dem hookeschen Gesetz linear mit der Dehnung zu:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1)$$

Mit:

- σ ist die Spannung [MPa]
- E ist der Elastizitätsmodul [MPa].
- ϵ ist die Dehnung [-]

Dieses lineare Verhalten setzt sich fort, bis das Material seine Streckgrenze erreicht.

2. Plastische Region (Perfekt plastische Reaktion):

Das Material geht in einen plastischen Zustand über, wenn die Fließspannung σ_y und die zugehörige Fließdehnung ϵ_y erreicht sind. In diesem Bereich bleibt die Spannung unabhängig von einer weiteren

Zunahme der Dehnung konstant. Dieses Verhalten entspricht einem perfekt plastischen Material ohne Verfestigung oder Erweichung, definiert als:

$$\sigma = \sigma_y \text{ für } \varepsilon > \varepsilon_y \quad (2)$$

Dieses Modell ist aufgrund seiner Einfachheit und Berechnungseffizienz besonders für numerische Simulationen vorteilhaft. Es erfasst die beiden kritischen Phasen der Verformung - Steifigkeit vor dem Nachgeben und Kapazitätserhalt nach dem Nachgeben - ohne die Notwendigkeit komplexer nichtlinearer oder zeitabhängiger Formulierungen.

Im Zusammenhang mit gebrochenem Verbundglas approximiert das bilineare elastoplastische Modell mit perfekter Plastizität die Reaktion des Verbundsystems aus Zwischenschicht und Glasfragment. Der elastische Teil bildet die anfängliche Verbindung zwischen Bruchstücken und Zwischenschicht. Gleichzeitig entspricht das plastische Plateau der Phase, in der sich die Zwischenschicht erheblich verformt, die Lastübertragung jedoch durch die fragmentierte Struktur aufrechterhält. Dieser Ansatz bietet eine physikalisch realistische und numerisch stabile Methode zur Modellierung des Nachbruchverhaltens in Glasbauteilen.

Es ist zu beachten, dass die vorgeschlagenen numerischen Modelle für EVA selbst und das Modell für zerbrochenes Glas als Ausgangsschritte zu betrachten sind, um im Laufe weiterer Forschungen ein zuverlässiges numerisches Modell zu erhalten. Dieser Projektrahmen basierte auf Raumtemperatur und ohne den Einfluss von Feuchtigkeit. Um ein gutes numerisches Modell zu erhalten, das in der täglichen Ingenieurpraxis angewendet werden kann, sind weitere Forschungen erforderlich. Das Vorliegen von Temperaturänderungen und einem Feuchtigkeitsanstieg beeinflusst das Verhalten der Zwischenschicht. Wenn es um die Reaktion des zerbrochenen Glases geht, sind beide Parameter entscheidend für die Ergebnisse. Dieser Teil der Forschung kann daher als Grundlage für weitere Untersuchungen in diesem Bereich mit EVA-Zwischenschicht dienen.

Großflächige Kriechversuche unter Berücksichtigung statischer Randbedingungen zur Validierung des numerischen Modells

(Resttragfähigkeitsversuche an gebrochenem Verbundsicherheitsglas)

4-Punkt-Biegeversuch Beschreibung

Zur Bewertung des Biegeverhaltens von Verbundglas wurden 4-Punkt-Biegeversuche an großformatigen Probekörpern mit den Abmessungen 360 mm × 1100 mm durchgeführt. Diese Prüfungen wurden nach EN 1288-3:2000 - *Glas im Bauwesen - Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Teil 3: Prüfung mit an zwei Punkten gelagerten Proben (Vier-Punkt-Biegung)* durchgeführt.

Die Proben bestanden aus zwei vollständig vorgespannten Glasschichten mit einer Nenndicke von 6 mm bzw. 8 mm, die mit Ethylvinylacetat (EVA)-Zwischenlagen von 0,76 mm bzw. 1,52 mm laminiert waren. Die folgenden vier Laminatkonfigurationen wurden getestet:

- 2 × 6 mm Glas + 0,76 mm EVA → getestet unter einer Last von 5 kg
- 2 × 6 mm Glas + 1,52 mm EVA → getestet unter einer Last von 5 kg
- 2 × 8 mm Glas + 0,76 mm EVA → getestet unter einer Last von 8 kg
- 2 × 8 mm Glas + 1,52 mm EVA → getestet unter einer Last von 8 kg

Alle Tests wurden bei Raumtemperatur unter Standard-Laborbedingungen durchgeführt.

Der 4-Punkt-Biegeaufbau umfasste zwei äußere Stützrollen und zwei innere Belastungsrollen, die symmetrisch angeordnet waren, um einen Bereich mit konstantem Moment in der mittleren Spannweite zu schaffen. Diese Konfiguration ermöglicht eine genaue Bewertung der Biegesteifigkeit, der Festigkeit und des Verhaltens des Verbundglases nach dem Riss (Abbildung 34).

Die Prüfkraften wurden so gewählt, dass sie innerhalb des elastischen Vorbruchbereichs der Proben lagen, um sicherzustellen, dass das Verhalten in erster Linie durch die Biegesteifigkeit und die Leistungsfähigkeit der Zwischenschicht bestimmt wurde. Die vertikale Durchbiegung wurde während der Prüfung aufgezeichnet, und es wurde eine visuelle Überwachung durchgeführt, um das Auftreten von Schäden oder Delaminierungseffekten zu erkennen.

Tabelle 20.
VSG ESG 2 x 8 mm mit EVA 1,52 mm

Konfiguration: 2 x 8 mm Glas + 1,52 mm EVA

Last: 8 kg

Durchbiegung entlang der Y-Achse gemessen

Muster	Maximale Durchbiegung [mm]	Anmerkungen
1	~80 mm	Kurve endet knapp unter 80 mm
2	~100 mm	Kurve endet genau bei 100 mm
3	~98 mm	knapp unter 100 mm
4	~98 mm	ähnlich wie Probe 3
5	~100 mm	Kurve erreicht die obere Gitterlinie
6	~100 mm	Kurve erreicht die obere Gitterlinie

Durchschnittliche maximale Durchbiegung: 96 mm

Tabelle 21.
VSG ESG 2 x 8 mm mit EVA 0,76 mm

Konfiguration: VSG ESG 2 x 8 mm mit EVA 0,76 mm

Last: 8 kg

Durchbiegung entlang der Y-Achse gemessen

Muster	Maximale Durchbiegung [mm]	Anmerkungen
1	~100 mm	Kurve endet an der oberen Gitterlinie
2	~100 mm	Kurve endet an der oberen Gitterlinie
3	~100 mm (kleiner Abfall)	zeigt kurzen Einbruch nahe dem Maximum

Durchschnittliche maximale Durchbiegung: 100 mm

Tabelle 22.
VSG ESG 2 x 6 mm mit EVA 0,76 mm

Konfiguration: VSG ESG 2 x 6 mm mit EVA 0,76 mm
Last: 5 kg
Durchbiegung entlang der Y-Achse gemessen

Muster	Maximale Durchbiegung [mm]	Anmerkungen
1	~100 mm	erreicht das obere Ende der Y-Achse
2	~85 mm	nahe dem oberen Ende der 90-mm
3	~85 mm	wie Probe 2

Durchschnittliche maximale Durchbiegung: 90 mm

Konfiguration: VSG ESG 2 x 6 mm mit EVA 1,52 mm
Last: 5 kg
Durchbiegung entlang der Y-Achse gemessen

Durchschnittliche maximale Durchbiegung: 50 mm

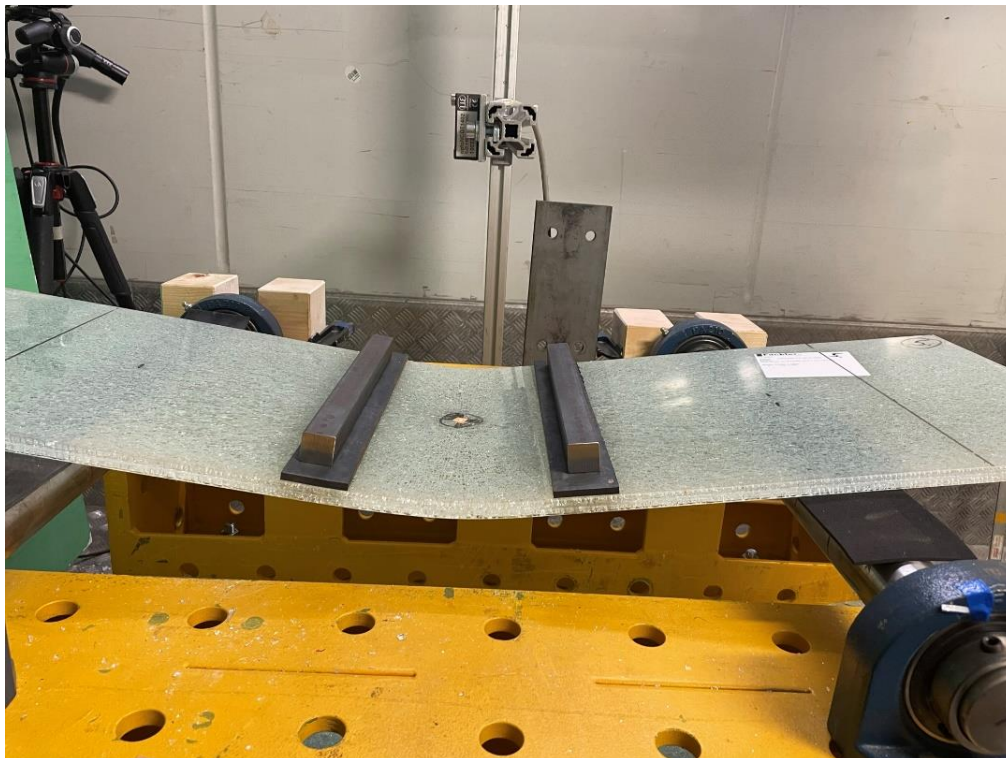
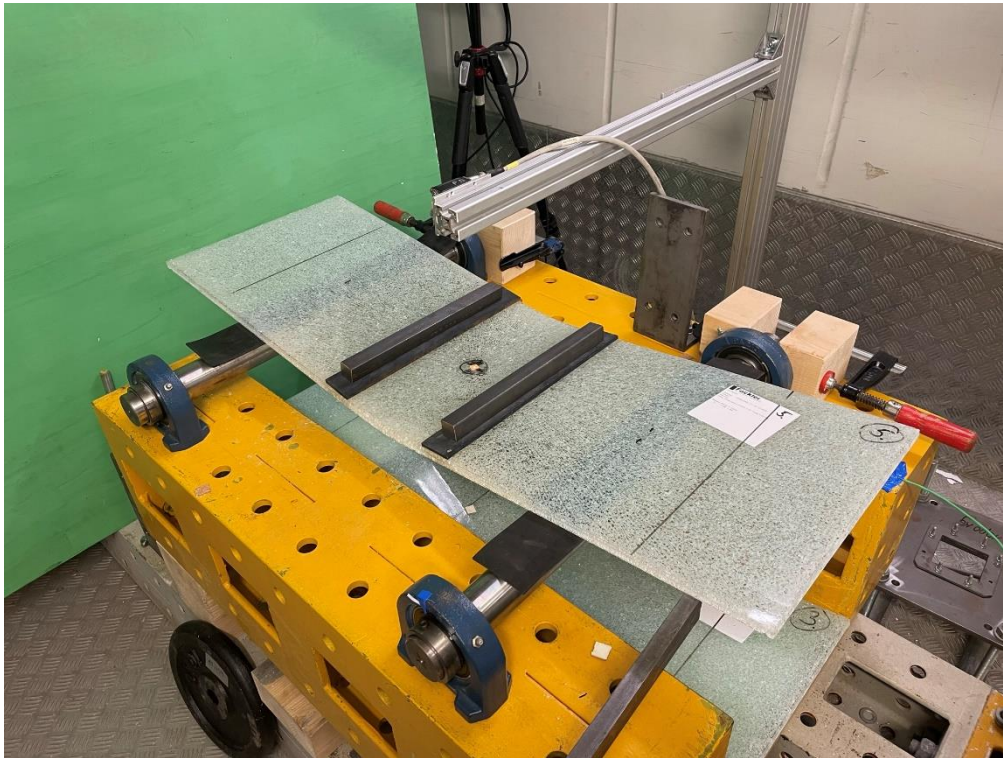
Eine Reihe von 4-Punkt-Biegeversuchen wurde an großformatigen Verbundglasproben durchgeführt, um den Einfluss der Glasdicke und der EVA-Zwischenschichtdicke auf die Biegeeigenschaften unter statischer Belastung zu untersuchen. Alle Tests wurden bei Raumtemperatur mit 360 mm × 1100 mm großen Glasscheiben durchgeführt. Die geprüften Konfigurationen umfassten Kombinationen aus 2 × 6 mm und 2 × 8 mm voll vorgespannten Glasscheiben, die mit 0,76 mm oder 1,52 mm dicken EVA-Zwischenlagen laminiert waren. Jede Probe wurde je nach Dicke mit 5 kg oder 8 kg vertikal belastet, und die maximale Durchbiegung in der Mitte der Spannweite wurde gemessen.

Sechs Proben wurden zur Konfiguration 2 × 8 mm Glas mit 1,52 mm EVA unter einer Last von 8 kg getestet. Die maximale Durchbiegung in der Mitte der Spannweite reichte von ~80 mm bis 100 mm; die meisten Werte lagen zwischen 98 und 100 mm, was eine durchschnittliche maximale Durchbiegung von etwa 96 mm ergab. Im Vergleich dazu zeigte die 2 × 8 mm große Scheibe mit 0,76 mm EVA, die ebenfalls unter 8 kg getestet wurde, eine etwas höhere Flexibilität; alle drei Proben erreichten eine maximale Durchbiegung von ~100 mm. Dies deutet darauf hin, dass eine dünnere EVA-Zwischenschicht bei

gleicher Belastung aufgrund ihrer geringeren Steifigkeit etwas mehr Verformung zulässt (Tabelle 20 und 21).

Die dünnere Glaskonfiguration, 2×6 mm mit 1,52 mm EVA, die mit einer Last von 5 kg getestet wurde, zeigte eine geringere durchschnittliche Durchbiegung von ~ 50 mm, was auf eine höhere Biegesteifigkeit aufgrund der geringeren angewandten Kraft und der dickeren Zwischenschicht hindeutet. Im Gegensatz dazu wiesen die 2×6 mm mit 0,76 mm EVA, die ebenfalls mit 5 kg getestet wurden, deutlich größere Durchbiegungen auf. Wobei die Höchstwerte zwischen ~ 85 und 100 mm lagen und der Durchschnitt bei ~ 90 mm lag. Dieser erhebliche Anstieg der Durchbiegung wird auf die Kombination aus dünnerem Glas und einer flexibleren EVA-Zwischenschicht zurückgeführt, die weniger zur Lastverteilung und Steifigkeit beiträgt (Tabelle 22).

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse den kombinierten Einfluss von Glaslagendicke und Zwischenlagendicke auf die Biegeeigenschaften des Verbundglas. Dickere EVA-Zwischenlagen verringern tendenziell die Verformung, insbesondere wenn sie mit dünnerem Glas verwendet werden, während dünnere Zwischenlagen unter denselben Belastungsbedingungen zu einer erhöhten Durchbiegung führen. Diese experimentellen Ergebnisse bilden einen wesentlichen Bezugspunkt für die Validierung numerischer Simulationen, wie sie beispielsweise in Ansys durchgeführt werden, in denen Konfigurationen und Belastungsniveaus modelliert wurden, um die Spannungsverteilung, das Verhalten der Zwischenlagen und die Leistung nach dem Bruch weiter zu untersuchen.



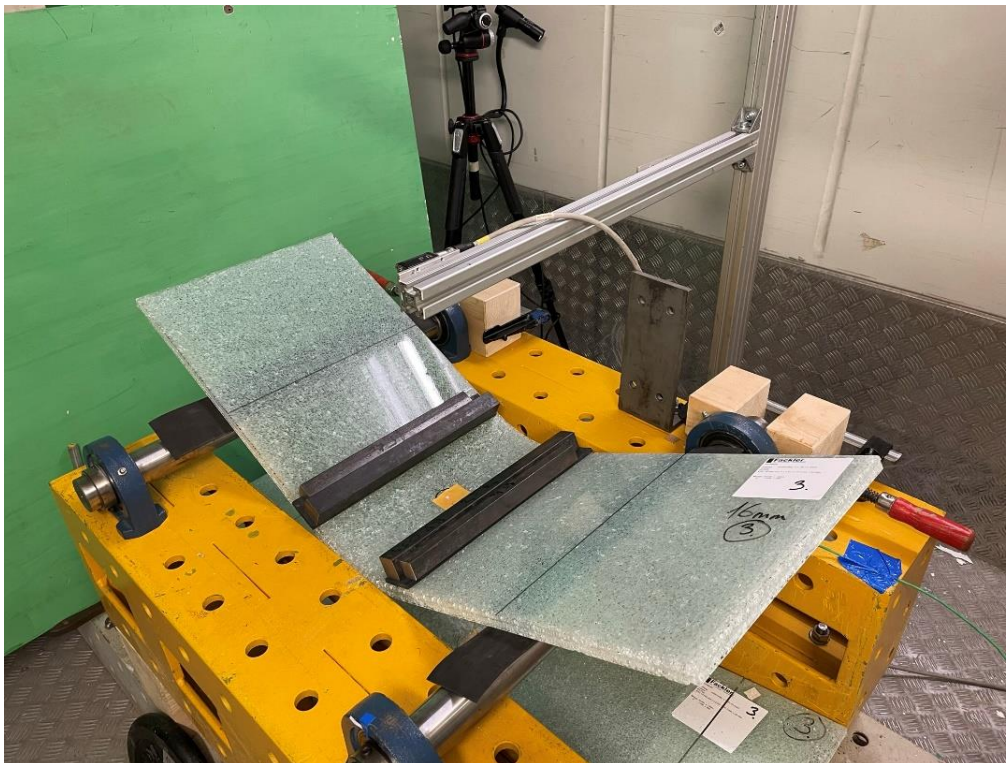


Abbildung 34. 4-Punkt-Biegeversuche

Groß angelegter Biegeversuch an einer Verbundglasscheibe (1 × 1 m, 2 × 6 mm + 1,52 mm EVA)

Um das globale Verformungsverhalten von Verbundglas unter realistischen Lager- und Belastungsbedingungen zu untersuchen, wurden Experimente in Originalgröße an quadratischen Platten mit den Abmessungen 1.000 mm × 1.000 mm durchgeführt. Jede Platte bestand aus zwei 6 mm dicken, voll vorgespannten Glasschichten, die durch eine 1,52 mm dicke EVA-Zwischenschicht verbunden waren. Die Versuche konzentrierten sich auf die Bewertung der Durchbiegungscharakteristik und der Lastverteilung unter zwei unterschiedlichen Randbedingungen.

In der ersten Konfiguration wurde die Glasscheibe in einem Stahlrahmen mit durchgehender linearer Einspannung entlang aller vier Kanten montiert, wodurch ein vollständig eingebetteter bzw. eingespannter Zustand simuliert wurde. In der zweiten Konfiguration wurde die Scheibe an ihren vier Ecken mit Punkthaltern gehalten, die den typischen architektonischen Anwendungen wie punktgehaltenen Verglasungssystemen ähneln.

Die Platten wurden einer zunehmenden Belastung außerhalb der Ebene ausgesetzt, beginnend mit einem mittig platzierten Sandsack von 25 kg, der schrittweise bis zu einer Höchstlast von 75 kg erhöht wurde. Nach Erreichen der Höchstlast wurde die Verformung beider Proben über 24 Stunden hinweg überwacht, um die Langzeitverformung (Kriecheffekte) zu erfassen und das zeitabhängige Verhalten bei anhaltender Belastung zu bewerten (Abbildung 36 und 37).

Die maximale zentrale Durchbiegung wurde für beide Auflagerbedingungen gemessen. Wie erwartet, wies die punktgestützte Scheibe aufgrund ihrer flexibleren Einspannbedingungen eine deutlich höhere Verformung auf. Im Gegensatz dazu wies die linear befestigte Scheibe eine deutlich geringere Durchbiegung auf, was auf eine höhere Steifigkeit aufgrund der Vollrandeinspannung hindeutet. Diese Messungen geben einen wertvollen Einblick in den kombinierten Einfluss der Einspannbedingungen und der Flexibilität der Zwischenschichten auf die strukturelle Leistung von Verbundglas unter anhaltenden Belastungen (siehe Abbildung 38 und 39).

In den beigefügten Abbildungen sind die Messanordnung und die Versuchsaufbauten detailliert dargestellt, wobei die Positionen der Auflager, der Sensorpunkte und der Spannsysteme angegeben sind (Abbildung 35). Die Daten aus diesen Tests bilden einen wertvollen Maßstab für die Validierung numerischer Modelle des Verhaltens von Verbundglas nach dem Bruch, insbesondere unter unterschiedlichen Randbedingungen.

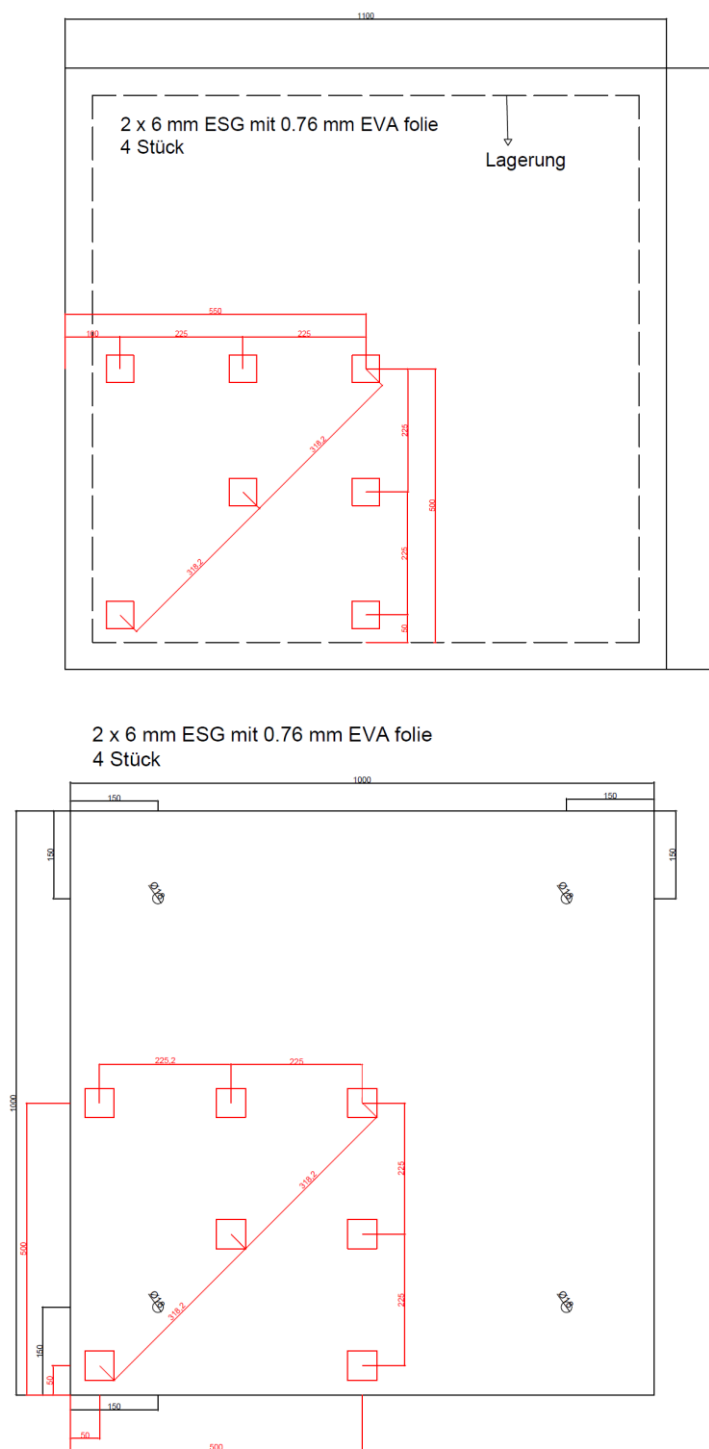


Abbildung 35. Schematische Zeichnung mit Laserpositionen

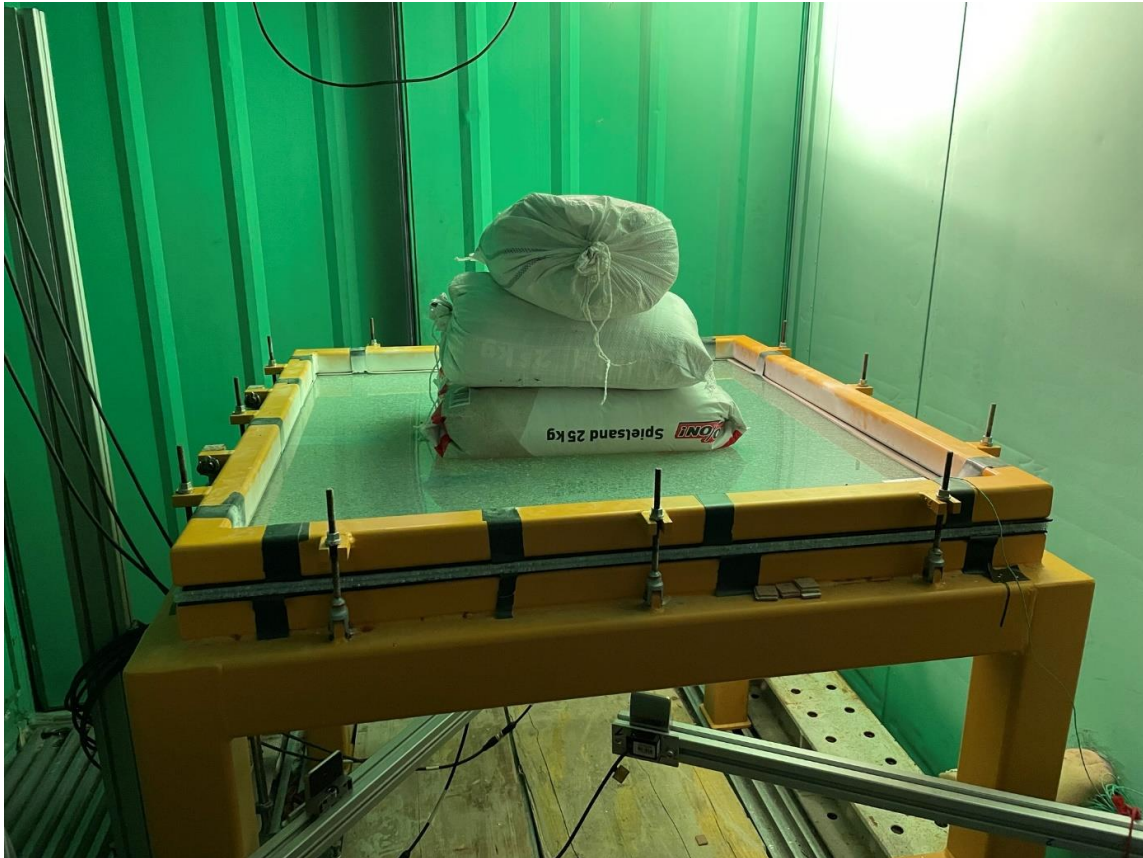


Abbildung 36. Linienlager – Stahlrahmen



Abbildung 37. Punktlagerung

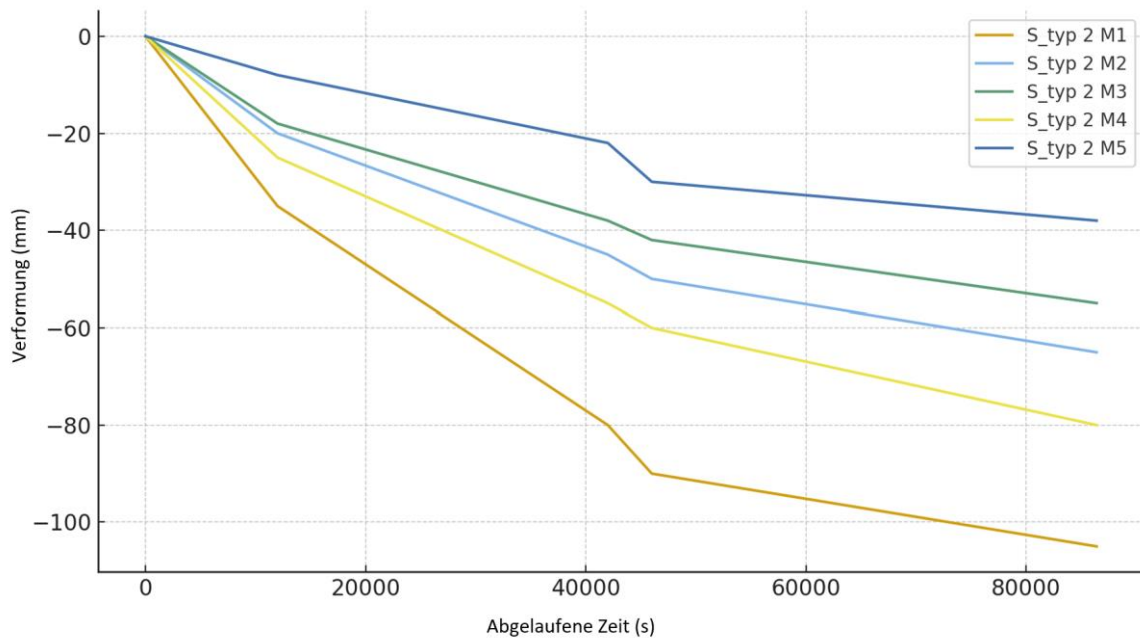


Abbildung 38. Verformungsergebnisse für die Probe der Linienhalterung

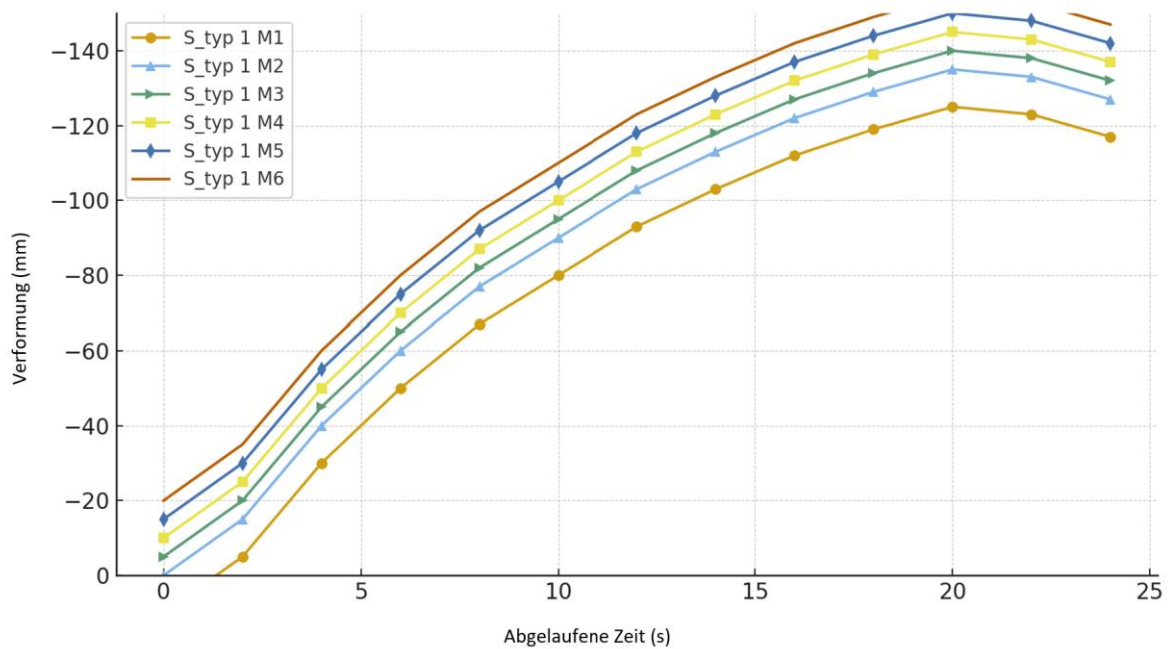


Abbildung 39. Verformungsergebnisse für die Punkthalterungsprobe

Validierung der numerischen Ergebnisse

Es wurde in Ansys ein Finite-Elemente-Modell entwickelt, um das mechanische Verhalten gebrochener Verbundglasscheiben unter Belastung zu simulieren. Ziel war es, die experimentellen Bedingungen aus der Prüfung von 1×1 m großen Verbundglasscheiben aus 2×6 mm großen, voll vorgespannten Glasschichten, die mit einer 1,52 mm dicken EVA-Zwischenschicht verbunden sind, in punkt- und linear gestützten Konfigurationen zu replizieren.

Das Modell wurde als 3D-Schichtkörper mit zwei Glasschichten und einer EVA-Zwischenschicht erstellt. Die Glasschichten wurden mit geeigneten linearen elastischen Eigenschaften definiert, während die Zwischenschicht auf der Grundlage experimenteller Daten mit einem benutzerdefinierten bilinearen elastoplastischen Materialmodell modelliert wurde. Es wurde ein Sechseck-Volumennetz mit verfeinerten Elementen in der zentralen Zone erstellt, um die Verformungsgradienten genau zu erfassen. Die Konvergenz des Netzes wurde durch den Vergleich der Verschiebungswerte bei unterschiedlichen Netzdichten nachgewiesen.

Der Bruchzustand des Glases wurde simuliert, indem der Steifigkeitsbeitrag in erster Linie der Zwischenschicht zugewiesen wurde, die durch die eingebetteten Glasfragmente verstärkt wird. Dieses Verhalten wurde mit einem bilinearen elastoplastischen Materialmodell mit idealer Plastizität für das gesamte Laminat modelliert:

Elastizitätsmodul (elastische Phase): 140 MPa

Streckspannung: 7,5 MPa

Materialverhalten nach vollendeter Belastung: vollkommen plastisch (keine Aushärtung)

Poisson-Zahl: 0,45 (um die Beinahe-Inkompressibilität von EVA darzustellen)

Das bilineare Modell wurde aus einachsigen Zugversuchen abgeleitet, die an gebrochenen laminierten Proben durchgeführt wurden, wobei eine Kurvenanpassung an die anfängliche Steigung und das Fließplateau herangezogen wurde.

Es wurden zwei Trägerkonfigurationen modelliert:

Lineare Unterstützung: Alle vier Plattenkanten wurden eingespannt, um die gleichen Randbedingungen wie bei dem während der Prüfung verwendeten Stahlrahmen darzustellen.

Punktuelle Abstützung: Die Platte wurde an den vier Ecken mit diskreten Punktauflagen abgestützt, die den mechanischen Klammern des physischen Testaufbaus nachempfunden waren.

Auf die Oberseite der Platte wurde eine zentrale Druckbelastung ausgeübt, um die Verteilung der im Versuch verwendeten Sandsäcke (bis zu 75 kg) nachzubilden. Die aufgebrachte Kraft wurde so skaliert, dass sie der Kontaktfläche der Sandsäcke entsprach. Die Simulation wurde als instationäre Analyse durchgeführt, sodass die zeitabhängige Reaktion bewertet werden konnte.

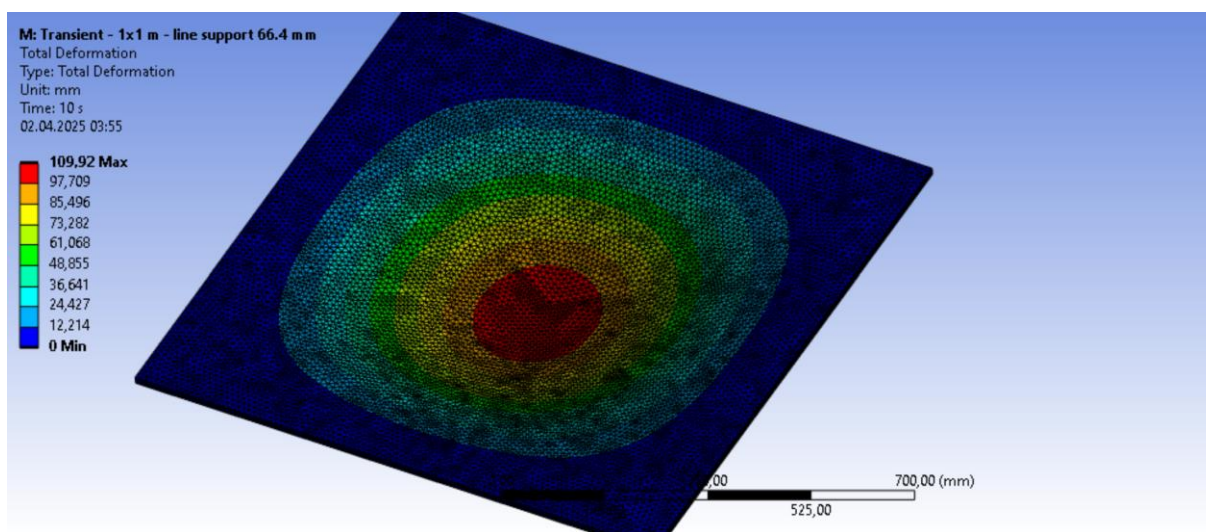


Abbildung 40. Numerische Ergebnisse für Linienunterstützung

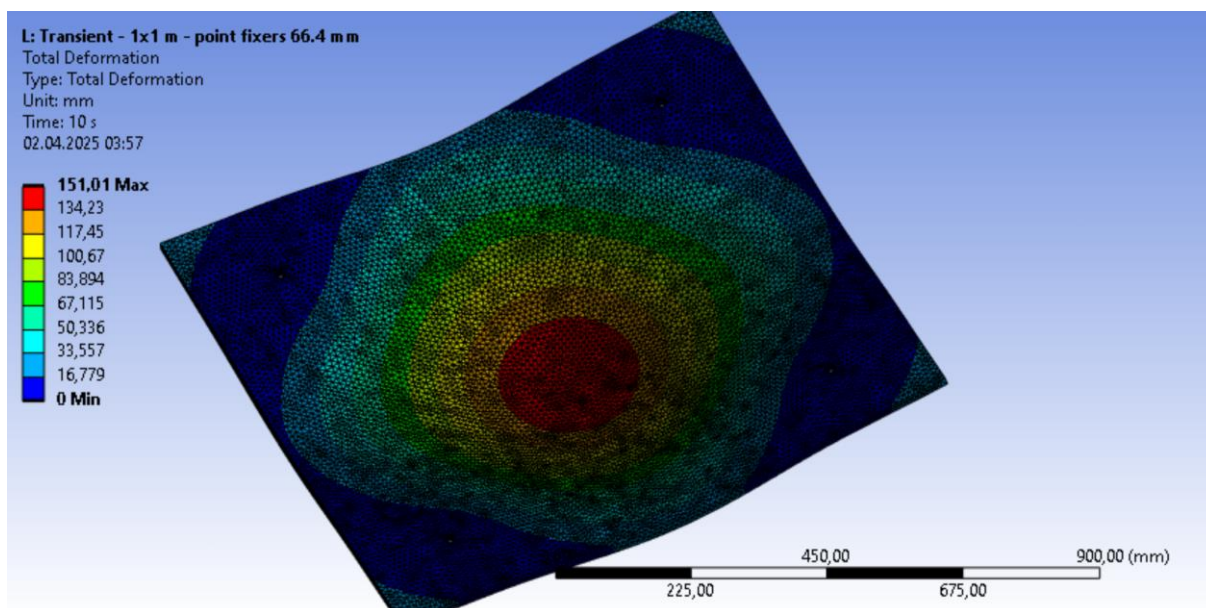


Abbildung 41. Numerische Ergebnisse für Punkthalterungen

Zur Validierung des in Ansys implementierten numerischen Modells wurden großmaßstäbliche Simulationen durchgeführt, die die Belastungs- und Lagerungsbedingungen der physikalischen Tests nachbildeten. Die Verbundglasplatten (1 × 1 m), die aus 2 × 6 mm Glasschichten mit 1,52 mm EVA bestehen, wurden unter zentraler Belastung und zwei Auflagertypen simuliert:

- Linienlagerung - Abbildung 40
- Punktlagerung - Abbildung 41

Für das Ansys-Modell wurde ein bilineares elastoplastisches Materialmodell verwendet, das auf einachsigen Zugversuchsdaten basiert, mit einem Elastizitätsmodul von 140 MPa und einer Fließspannung von 7,5 MPa. Die maximale vertikale Verschiebung wurde mit den experimentellen Werten verglichen.

Tabelle 23.
Vergleich von experimentellen und numerischen Ergebnissen

Art der Unterstützung	Experimentelle maximale Durchbiegung [mm]	Ansys Maximale Durchbiegung [mm]
Lineare Unterstützung	100 mm	109,9 mm
Punktuelle Unterstützung	160 mm	151,0 mm

Diese Ergebnisse (Tabelle 23) zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den numerischen und experimentellen Daten. Die Abweichung liegt bei ~6–9 %, was bestätigt, dass das gewählte Materialmodell und die Randbedingungen das mechanische Verhalten des gebrochenen Verbundglassystems unter anhaltender Belastung genau erfassen.

Dieses hohe Maß an Korrelation rechtfertigt die Verwendung des validierten numerischen Modells für weitere parametrische Studien und Konstruktionsbewertungen.

Parametrische Studie

Der Zweck der parametrischen Studie besteht darin, den Einfluss verschiedener Parameter auf das mechanische Verhalten gebrochenen Glases zu untersuchen. Die Ermittlung der Schlüsselparameter ist wichtig für die Optimierung in Simulationen und in realen Anwendungen.

In dieser parametrischen Studie lag der Schwerpunkt auf geometrischen Parametern. Es wurden verschiedene Glasdicken und Probengeometrien variiert, um den Einfluss des Seitenverhältnisses zu ermitteln.

Die parametrische Studie liefert Anhaltspunkte für die Untersuchung des Einflusses verschiedener Plattenabmessungen und Seitenverhältnisse auf die strukturelle Leistungsfähigkeit von Verbundglas in linien- und punktgestützten Systemen und unterstützt Konstruktionsentscheidungen sowie Metamodellierungsbemühungen durch die Identifizierung von Mustern oder kritischen Verhaltensweisen.

Da diese Studie zwei verschiedene Randbedingungen bewertet, werden sowohl punktförmige als auch linienförmige Stützen an allen vier Kanten verwendet. Die Belastungsrate ist auf eine quasi-statische Raumtemperatur festgelegt.

Zur Simulation verschiedener Probengeometrien wurde ein Ansys-Modell verwendet. Das Basismodell wurde als Referenzfall mit Glasschichten aus 2 x 6 mm ESG, einer Zwischenschicht aus 1,52 mm EVA und einer anfänglichen Probengröße von 1000 x 1000 mm definiert.

Das Basismodell kann anhand experimenteller Daten validiert werden. Im vorigen Kapitel wurde der Validierungsprozess des erstellten numerischen Modells ausführlich beschrieben. Es wurde eine Einzelparametervariation durchgeführt, bei der jeweils ein Parameter variiert wurde, während die übrigen konstant blieben.

Geometrievariationen:

- Quadratische Platten:

300 × 300 mm

600 × 600 mm

1200 × 1200 mm

1500 × 1500 mm

- Rechteckige Platten (Variation des Seitenverhältnisses):

300 × 600 mm

600 × 1200 mm

1000 × 1500 mm

1200 × 1800 mm

Variationen der Glasdicke:

2 × 4 mm

2 × 6 mm

2 × 8 mm

Zwischenschicht konstant bei 1,52 mm

Simulationen aus Experimenten mit einer Flächenbelastung von 75 kg Sandbeutel (statische Belastung)

Ergebnisse der Linienlagerung

Tabelle 24.
Linienlagerung Ergebnisse

Kraft (N)	Verformung (mm)	L (mm)	B (mm)	Unterstützungsart
735	2,8624	300	300	Linienlagerung
735	2,8728	300	600	Linienlagerung
735	11,879	600	600	Linienlagerung
735	37,229	600	1200	Linienlagerung
735	164,24	1200	1200	Linienlagerung
735	120	1000	1000	Linienlagerung
735	141,54	1000	1500	Linienlagerung
735	223,68	1200	1800	Linienlagerung

Kraft (N)	Verformung (mm)	L (mm)	B (mm)	Unterstützungsart
735	287,25	1500	1500	Linienlagerung

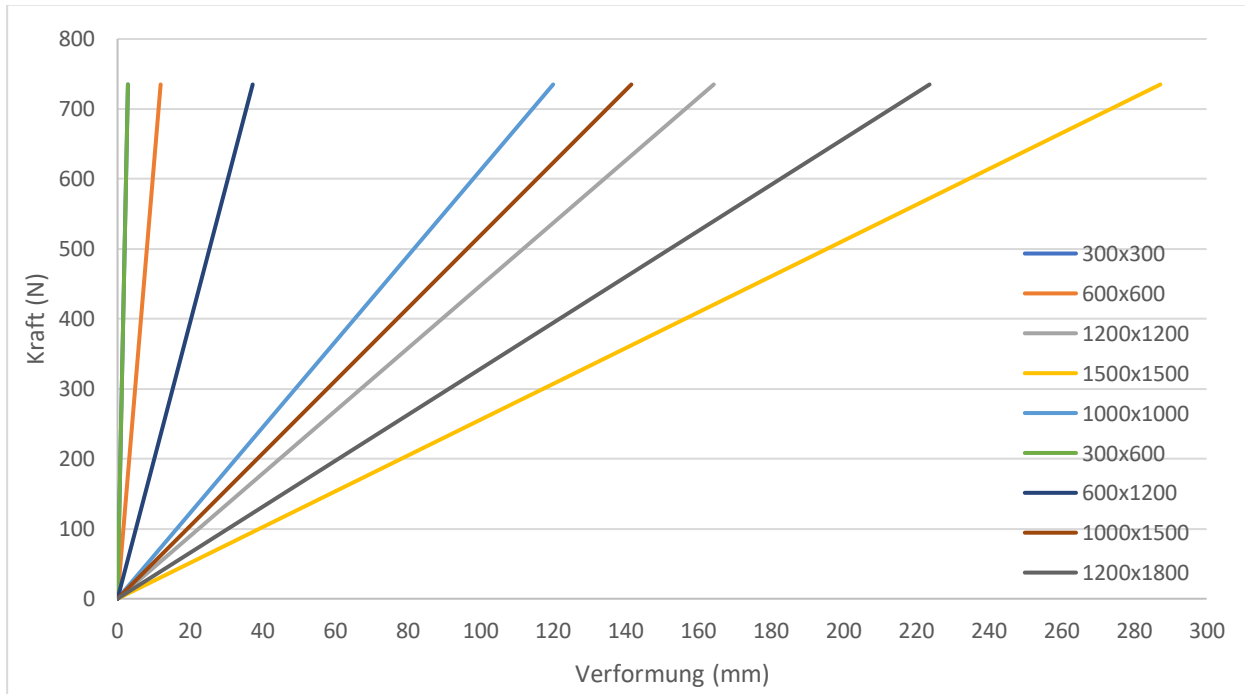


Abbildung 42. Ergebnisse für Linienlagerung

Alle Kurven verlaufen nahezu linear durch den Ursprung. In der Phase nach dem Bruch verhält sich EVA wie eine Membran mit konstanter Spannungsfähigkeit (ab dem MIH-Plateau).

Die Art der Stütze spielt eine große Rolle: Bei gleicher Größe ist eine Punktstütze deutlich steifer als eine Linienstütze.

Die Geometrie bestimmt die Steifigkeit: Größere Spannweiten ergeben geringere Neigungen; eher „quadratische“ Platten sind bei Punktstützen steifer als sehr lange.

In einem reinen Membranmodell:

$$\delta \approx \frac{F}{4\sigma_y t} \frac{L}{B} \quad (3)$$

- δ - Durchbiegung / Verformung in der Plattenmitte:

- σ_y - Streckgrenze / Fließspannung des Materials
- t - Dicke der Membran bzw. der wirksamen Schicht

Die Fläche $A = L * B$ sollte keine Rolle spielen, sofern das Seitenverhältnis B/L berücksichtigt wird. Basierend auf den Ergebnissen gibt es einen starken Größeneffekt (Flächeneffekt).

Daher erfolgt eine Potenzgesetz-Anpassung der Verformung gegenüber der Fläche Die Verformung δ ist proportional zu:

$$A^{1,58} \quad (R^2=0,96) \quad (4)$$

Nach der Geometrienormalisierung:

$$\delta^* \propto A^{1,57} \quad (R^2=0,98) \quad (5)$$

- α - Proportionalitätszeichen

Basierend auf den Ergebnissen sind größere Platten weicher als von der Membrantheorie vorhergesagt.

Anschließend erfolgt eine Rückwärtsberechnung der Membranformel auf die äquivalente Membrankapazität $T = \sigma_y t$ pro Breiten-Einheit:

$$T = \frac{K}{4} \frac{B}{L} \quad (6)$$

$$K = \frac{F}{\delta}$$

- T - Membrankapazität / Membranzugkraft je Breite
- K - Steifigkeit

Ausgedrückt als effektive Dicke $t_{\text{eff}} = T/\sigma_y$ ($\sigma_y \approx 7,55$ MPa aus biaxialer Mediananpassung):

$$t_{\text{eff}} \text{ (mm)} \approx 0,250 A^{-1,566} \quad (R^2 = 0,98) \quad (7)$$

- t_{eff} -effektive Dicke

F_N	Def_mm	L_mm	B_mm	area_m2	geom_factor
735	2,8624	300	300	0,09	1
735	2,8728	300	600	0,18	2
735	11,879	600	600	0,36	1
735	37,229	600	1200	0,72	2
735	164,24	1200	1200	1,44	1
735	120	1000	1000	1	1
735	141,54	1000	1500	1,5	1,5
735	223,68	1200	1800	2,16	1,5
735	287,25	1500	1500	2,25	1

K_N/mm	T_N/mm	t_eff_mm	t_eff_fit_mm	Def_pred_mm_from_fit
256,7775293	64,19438	8,502567	10,87185	2,238601
255,8479532	31,98099	4,235893	3,671017	3,314851
61,87389511	15,46847	2,048804	1,239565	19,63411
19,74267372	2,467834	0,326865	0,418555	29,07357
4,475158305	1,11879	0,148184	0,14133	172,2049
6,125	1,53125	0,202815	0,250199	97,27362
5,192878338	0,86548	0,114633	0,132576	122,3837
3,285944206	0,547657	0,072537	0,074888	216,6577
2,558746736	0,639687	0,084727	0,07025	346,4454

delta_star	Def_pred_star_mm	aspect_ratio
2,8624	2,238601	1
5,7456	6,629701	2
11,879	19,63411	1
74,458	58,14714	2
164,24	172,2049	1
120	97,27362	1
212,31	183,5756	1,5
335,52	324,9866	1,5
287,25	346,4454	1

Die Last wurde in allen Versuchen konstant bei $F = 735 \text{ N}$ gehalten. Geändert wurden nur die Scheibengeometrien – also Länge L , Breite B und damit die Fläche A . Für jede Geometrie wurde die Durchbiegung in der Mitte δ gemessen.

Aus diesen Messwerten wurden anschließend mehrere abgeleitete Größen berechnet:

Gesamtsteifigkeit (Gleichung 6)

Membrankraft je Breite

Über den in der Tabelle angegebenen Geometriefaktor (1; 2; 2,5 ...) wurde der Einfluss der Lagerungsgeometrie herausgerechnet, sodass eine vergleichbare Größe entsteht. Damit lassen sich verschiedene Plattenformen besser vergleichen (vgl. Gleichung 6).

Wirksame Dicke t_{eff}

Ausgehend von der bekannten Fließ- bzw. Plateauspannung der Zwischenschicht wurde aus der ermittelten Membrankapazität (T) eine äquivalente, wirksam eingespannte Schichtdicke berechnet. Diese entspricht derjenigen Dicke, bei der die Zwischenschicht die beobachtete Tragwirkung ausübt. Die berechneten Werte sind in der Spalte $t_{\text{eff_mm}}$ aufgeführt.

Vergleich mit dem Fit-Gesetz

Aus der vorherigen Geometriestudie ergibt sich ein allgemeines Gesetz für liniengelagerte Scheiben (vgl. Gleichung 7).

Mit diesem Gesetz wurde für jede geprüfte Geometrie auch ein vorhergesagter Wert der wirksamen Dicke berechnet ($t_{\text{eff_fit_mm}}$) und daraus eine vorhergesagte Durchbiegung ($\text{Def_pred_mm_from_fit}$) berechnet.

Die normalisierten Größen (delta_star , Def_pred_star_mm) dienen dazu, die Ergebnisse unabhängig von der Geometrie direkt miteinander zu vergleichen.

Ziel dieser Auswertung ist es, zu zeigen, dass die Durchbiegung mit zunehmender Fläche deutlich schneller ansteigt, als es allein aus der Geometrie zu erwarten wäre, dass sich dieser Trend mit einer Potenzfunktion in A gut beschreiben lässt und dass erkennbar wird, bei welchen Geometrien (z. B. sehr langgezogenen oder sehr großen Platten) die Abweichungen vom Fit am größten sind.

Wenn die Scheibe größer wird, scheint nur ein schmalerer Streifen der Zwischenschicht die Membranspannung zu tragen. Deshalb wächst die Verformung schneller als der Geometriefaktor allein.

Für die Fälle mit Linienstützen bei ähnlichen Belastungsniveaus lässt sich die Endverformung wie folgt vorhersagen (vgl. Gleichung 3, 7):

$$\delta \approx \frac{F}{4\sigma_y t_{\text{eff}}} \frac{L}{B} \quad (8)$$

$$t_{\text{eff}} = 0,250 A^{-1,566} \text{ (mm, A in m}^2\text{)}$$

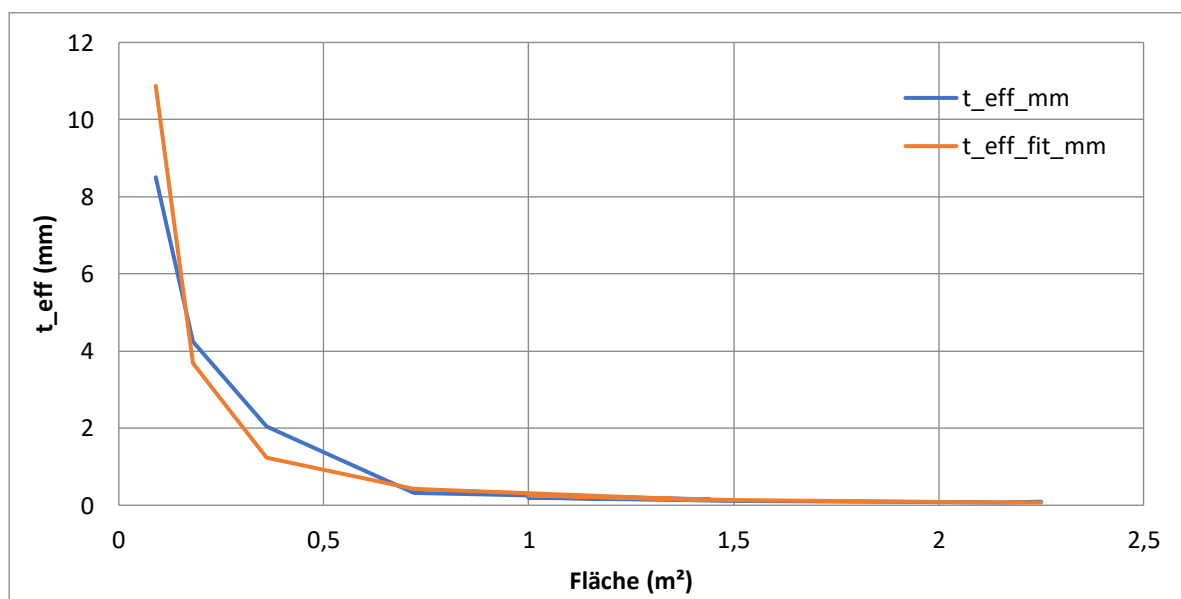


Abbildung 43. Effektive Dicke vs. Fläche

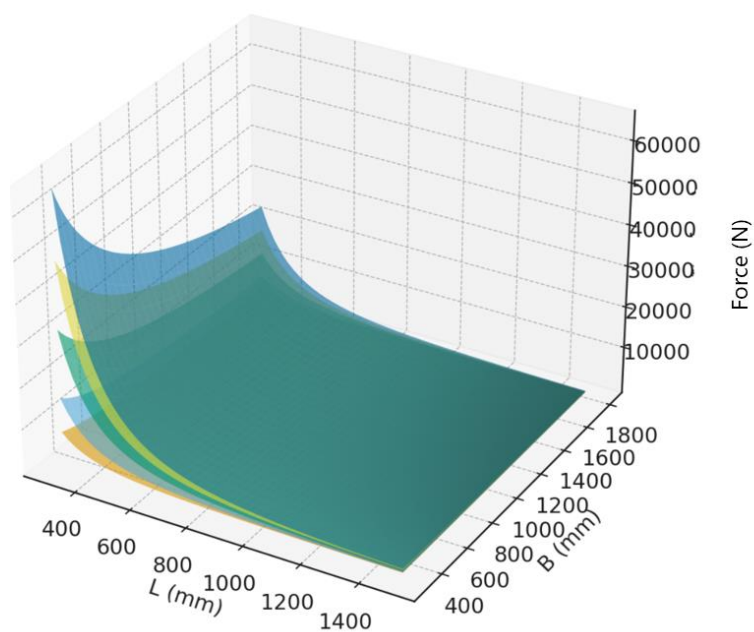


Abbildung 44. Isosurface - Linienlagerung

Ergebnisse der Punktlagerung

Tabelle 25.
Punktlagerung Ergebnisse

F (N)	Ver.(mm)	L (mm)	B (mm)	Unterstützungsart
735	2,8782	300	600	Punktlagerung
735	11,889	600	600	Punktlagerung
735	36,431	600	1200	Punktlagerung
735	162,12	1200	1200	Punktlagerung
735	139,68	1000	1000	Punktlagerung
735	160	1000	1500	Punktlagerung
735	221,11	1200	1800	Punktlagerung
735	284,4	1500	1500	Punktlagerung

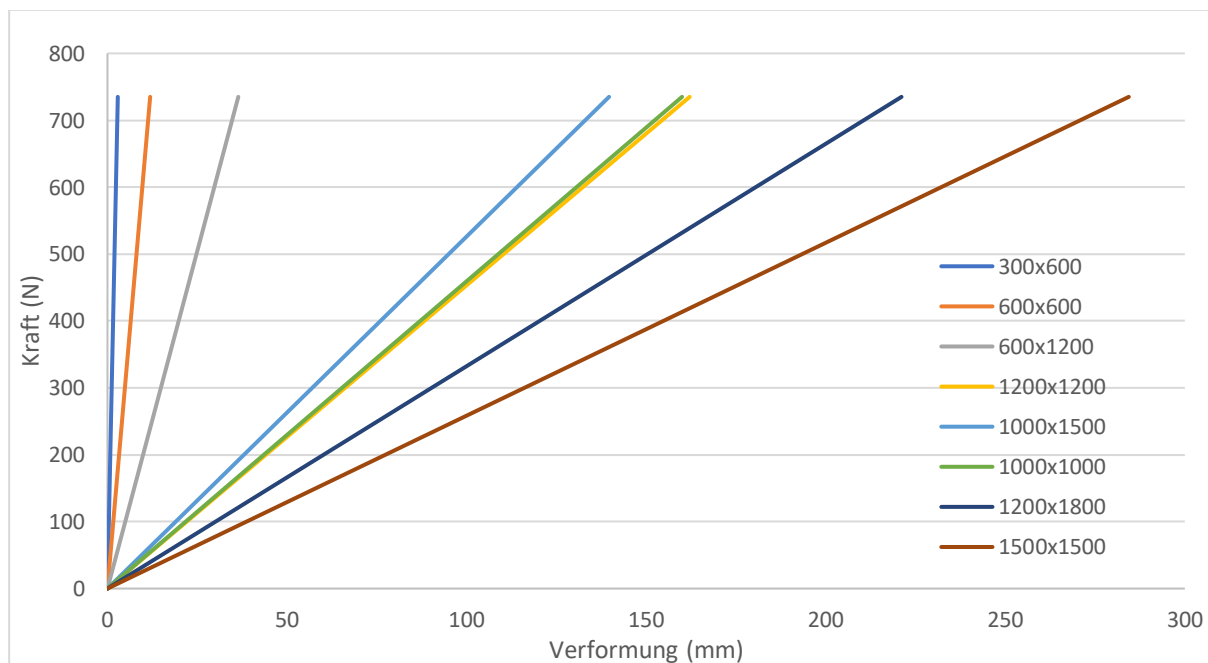


Abbildung 45. Ergebnisse für Punktlagerung

Verformung vs. Fläche:

$$\delta \propto A^{1,80} \quad (R^2 \approx 0,96) \quad (9)$$

Somit ergibt sich nach dem Entfernen der Geometrie:

$$g(r) = \frac{B}{L} + \frac{L}{B} \quad (10)$$

mit $\delta^* = \delta g(r)$

$$\delta^* \propto A^{1,75} \quad (R^2 \approx 0,97)$$

Größere Platten sind weicher, als es die ideale Membrantheorie vorhersagt. Aus der Punktmembranbeziehung ergibt sich:

$$K = \frac{F}{\delta} = 4 (\sigma_y t) \left(\frac{B}{L} + \frac{L}{B} \right) \quad (11)$$

$$T = \sigma_y t, \quad \sigma_y \approx 7,55 \text{ MPa}$$

$$t_{\text{eff}} = \frac{T}{\sigma_y}$$

$$t_{\text{eff}} \text{ (mm)} \approx 0,1507 A^{-1,746} \quad (A \text{ in m}^2, R^2 0,966)$$

F_N	Def_mm	L_mm	B_mm	area_m2	geom_factor
735	2,8782	300	600	0,18	2,50
735	11,889	600	600	0,36	2,00
735	36,431	600	1200	0,72	2,50
735	162,12	1200	1200	1,44	2,00
735	139,68	1000	1500	1,5	2,17
735	160	1000	1000	1	2,00
735	221,11	1200	1800	2,16	2,17
735	284,4	1500	1500	2,25	2,00

K_N_per_mm	T_N_per_mm	t_eff_mm	t_eff_fit_mm	Def_pred_mm_from_fit
255,3679	25,53679	3,382357	3,007819	3,236597
61,82185	7,727732	1,023541	0,896753	13,56992
20,17513	2,017513	0,26722	0,267359	36,41213
4,533679	0,56671	0,075061	0,07971	152,6634
5,262027	0,607157	0,080418	0,074227	151,3304
4,59375	0,574219	0,076055	0,150663	80,76893
3,324137	0,383554	0,050802	0,039271	286,0333
2,584388	0,323049	0,042788	0,036569	332,7607

delta_star	Def_pred_star_mm	aspect_ratio
7,1955	8,091493	2
23,778	27,13985	1
91,0775	91,03034	2
324,24	305,3268	1
302,64	327,8824	1,5
320	161,5379	1
479,0717	619,7389	1,5
568,8	665,5214	1

Hier wurde dasselbe für punktgelagerte (punktfixierte) Scheiben durchgeführt: Die Last wurde konstant bei $F = 735 \text{ N}$ gehalten, während nur die Scheibengeometrie (L , B , Fläche A) variiert wurde. Für jede Geometrie wurde die Durchbiegung δ gemessen und daraus zunächst die Gesamtsteifigkeit $K=F/\delta$ bestimmt. Mit Hilfe des zugehörigen Geometriefaktors der Punktlagerung wurde daraus eine vergleichbare Membrangröße (T) berechnet, sodass der Einfluss der Lagerart weitgehend herausgerechnet ist. Anschließend wurde aus T über die angenommene Fließspannung der Zwischenschicht eine wirksame Dicke t_{eff} ermittelt – also diejenige Dicke, die die gemessene Tragwirkung erklären würde. Diese gemessenen t_{eff} -Werte wurden danach mit dem allgemeinen Ansatz für Punktaufleger (Gleichung 11) verglichen; daraus ergeben sich die Spalten mit $t_{\text{eff,fit}}$ und den zugehörigen vorhergesagten Durchbiegungen.

Ziel ist auch hier zu zeigen, dass bei Punktauflagern die wirksam eingespannte Dicke mit zunehmender Plattengröße schneller abnimmt, als es die reine Geometrie erwarten lässt, und dass sich dieser Abfall mit einer Potenzfunktion des Flächeninhalts gut beschreiben lässt, wobei langgezogene bzw. sehr große Platten am stärksten vom Fit abweichen.

Unter Berücksichtigung dieses Größeneffekts ergibt sich für die Verformung bei Belastung F (vgl. Gleichung 11):

$$\delta \approx \frac{F}{4\sigma_y t_{eff}(A)} \frac{1}{\frac{B}{L} + \frac{L}{B}} \quad (12)$$

$$t_{eff} \text{ (mm)} = 0,1507 A^{-1,746}$$

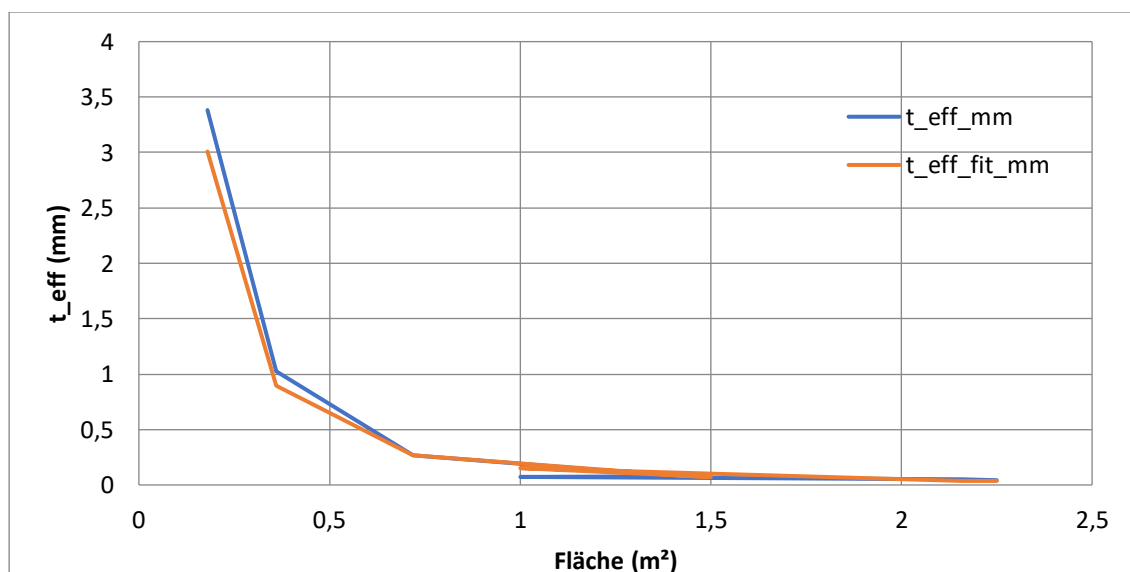


Abbildung 46. Effektive Dicke vs. Fläche

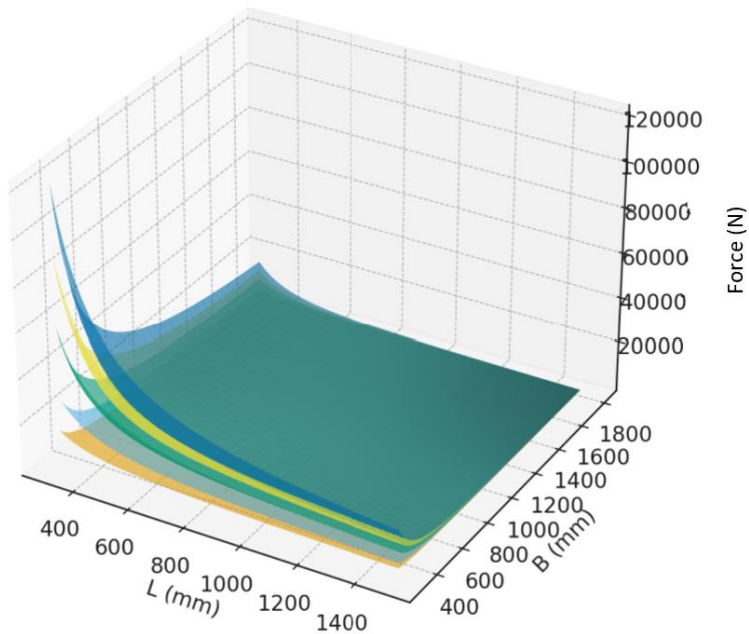


Abbildung 47. Isosurface - Punktlagerung

Vorhergesagte Durchbiegungen für die Linien- und Punktlagerung

sigma_y 7,55 MPa

Verbunddicke 13,52 mm

LINE support: $t_{\text{eff}}(A) = C * A^p$ [A in m²]

C_line 0,250199

p_line -1,56635

POINT support: $t_{\text{eff}}(A) = C * A^p$ [A in m²]

C_point 0,150663

p_point -1,74593

L_mm	B_mm	F_N	Area_m2	geom_line
300	600	735	0,18	2
1000	1000	735	1	1
1500	1500	735	2,25	1
300	300	735	0,09	1
600	600	735	0,36	1
600	1200	735	0,72	2
1200	1200	735	1,44	1
1200	1800	735	2,16	1,5
1000	1500	735	1,5	1,5

geom_point	t_eff_line_mm	t_eff_point_mm	Def_line_mm	Def_point_mm
2,5	3,671017	3,0078193	3,314851	3,236597
2	0,250199	0,1506628	97,27362	80,76893
2	0,07025	0,0365694	346,4454	332,7607
2	10,87185	10,08859	2,238601	1,206202
2	1,239565	0,8967533	19,63411	13,56992
2,5	0,418555	0,2673587	29,07357	36,41213
2	0,14133	0,0797105	172,2049	152,6634
2,166667	0,074888	0,039271	216,6577	286,0333
2,166667	0,132576	0,0742271	122,3837	151,3304

Die Geometriestudie auf Basis einer Verbunddicke von 13,52 mm zeigt einen ausgeprägten Größeneffekt: Die gemessene Durchbiegung nimmt mit zunehmender Plattengröße stärker zu, als es allein aus geometrischen Zusammenhängen zu erwarten wäre. Zur Beschreibung dieses Effekts wurden angepasste Beziehungen für die wirksam eingebundene Dicke t_{eff} entwickelt. Für Linienauflager ergibt sich t_{eff} gemäß Gleichung 7, für Punktauflager gemäß Gleichung 11. Dabei zeigt sich, dass Punktauflager bei gleicher Auflagerfläche eine geringere wirksame Dicke aufweisen als Linienauflager. Bei eher quadratischen Scheiben ($B/L \approx 1$) bleibt das Punktauflager aufgrund seines Geometriefaktors insgesamt steifer.

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Entwurfsregeln ableiten: Eine geringe Plattenfläche und ein Seitenverhältnis nahezu 1 begünstigen ein steiferes Verhalten; zudem sollte eine größere Zwischenschichtdicke gewählt und die Rand- bzw. Auflagerausbildung optimiert werden, um den Abfall von t_{eff} mit zunehmender Plattengröße zu reduzieren. Die Validierung der angepassten Gesetzesfunktionen zeigt, dass die meisten untersuchten Fälle innerhalb eines Abweichungsbereichs von

± 10 % bis ± 25 % liegen. Größere Abweichungen sind in den entsprechenden Diagrammen und Datenblättern vermerkt.

Größte Abweichungen (absoluter %-Fehler):

- Linienaufleger:
 - L = 600 mm, B = 600 mm → Rel. Fehler = $-39,50$ %
 - L = 600 mm, B = 1200 mm → Rel. Fehler = $28,05$ %
- Punktaufleger:
 - L = 1000 mm, B = 1000 mm → Rel. Fehler = $98,10$ %
 - L = 1200 mm, B = 1800 mm → Rel. Fehler = $-22,70$ %

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas unter verschiedenen mechanischen Beanspruchungen experimentell und numerisch untersucht. Die Versuchsreihen umfassten Zugversuche an der EVA-Zwischenschicht sowie an intakten und vorgebrochenen VSG-Proben unter ein- und mehrachsiger Belastung. Ergänzt wurden diese Untersuchungen durch 4-Punkt-Biegeversuche, um das Nachbruchverhalten unter praxisrelevanten Bedingungen zu analysieren.

Basierend auf experimentellen Daten wurden Materialmodelle für EVA entwickelt und erfolgreich in Finite-Elemente-Analysen implementiert. Die Modelle ermöglichen eine differenzierte Betrachtung der mechanischen Eigenschaften und tragen dazu bei, das Nachbruchverhalten von VSG realitätsnah abzubilden. Damit leistet die Arbeit einen Beitrag zur Verbesserung der Simulationsmethoden zur Bewertung der Resttragfähigkeit und strukturellen Sicherheit von Glasbauelementen.

Ausblick

Die in dieser Arbeit entwickelten Materialmodelle und Versuchsmethoden stellen eine belastbare Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Nachbruchperformance von Verbundsicherheitsglas (VSG) dar. Ein naheliegender nächster Schritt besteht in der Erweiterung der Modellierung um zeit- und temperaturabhängige Effekte, um das viskoelastische Verhalten der EVA-Zwischenschicht unter realitätsnahen Randbedingungen abzubilden. Ebenso bietet sich die Übertragung der Ansätze auf weitere Zwischenlagentypen (z. B. PVB, Ionoplast) an, um materialabhängige Unterschiede systematisch zu erfassen und vergleichend zu bewerten.

Bereits auf der jetzigen Entwicklungsstufe ist eine konkrete Nutzung möglich: Die Modelle können in etablierten FE-Umgebungen (z. B. Ansys) implementiert werden, um Bruchszszenarien von Verbund- und Isoliergläsern für bemessungsrelevante Anwendungen (Überkopfverglasungen, absturzsichernde Verglasungen) realitätsnäher zu simulieren und parametrische Studien (Glasaufbau, Zwischenschicht, Resttragfähigkeit) numerisch durchzuführen, wodurch der Versuchsaufwand reduziert werden kann. Darüber hinaus können die erarbeiteten Versuchskonzepte als standardisierbares Prüfprotokoll für industrielle Entwicklungsprozesse herangezogen werden, etwa zur Bewertung neuer Laminataufbauten vor der Markteinführung.

Schließlich eröffnet die Einbettung der Modelle in simulationsbasierte Bemessungskonzepte Perspektiven für eine stärkere Verzahnung mit der Normungsarbeit, um zukünftig nachbruchrelevante Nachweise für VSG simulationsgestützt, reproduzierbar und praxisnah zu formulieren.

Offene Forschungsfragen

Trotz der erzielten Fortschritte ergeben sich aus dieser Arbeit mehrere offene Fragen, die Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein könnten:

- Wie verändert sich das mechanische Verhalten der EVA-Zwischenschicht bei Langzeitbelastung, insbesondere unter Temperatureinfluss und UV-Exposition?
- Welche Rolle spielt die Fragmentgröße und -verteilung der gebrochenen Glasschicht für die Lastübertragung im Nachbruchzustand?
- Wie lässt sich die Interaktion zwischen mehreren gebrochenen Glasschichten in mehrlagigen VSG-Systemen realitätsnah modellieren?
- Wie kann das entwickelte Materialmodell effizient in großmaßstäbliche Strukturanalysen integriert werden, ohne die Rechenzeit signifikant zu erhöhen?
- Inwiefern können probabilistische Ansätze die Unsicherheiten im Nachbruchverhalten besser abbilden als deterministische Modelle?

Die Beantwortung dieser Fragen erfordert weitere interdisziplinäre Forschung im Zusammenspiel von Materialwissenschaft, Bruchmechanik und numerischer Simulation.

Mitwirkende

Autorin

Slipcevic, Milica (UniBw M, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau)

Siebert, Geralt (UniBw M, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau)

Fachliche Betreuung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“

Kurzbiographien



Milica Slipcevic

M.Sc. Milica Slipcevic ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität der Bundeswehr München und forscht zu Verbundglas und dessen strukturellen Anwendungen, insbesondere zu unterschiedlichen Zwischenschichten. Parallel arbeitet sie als Bauingenieurin in einem Ingenieurbüro und verbindet so Forschung und Praxis im Glasbau.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Geralt Siebert

Geralt Siebert ist seit 2003 Professor für „Tragwerksplanung und Bauphysik“ an der Universität der Bundeswehr München. Zuvor gründete und leitete er seit 1993 ein Ingenieurbüro als beratender Ingenieur. Im Glasbau ist er in nationalen und internationalen Normungs- und Fachausschüssen tätig. Seit mehreren Jahren leitet er als Vorsitzender den DIN-18008-Ausschuss.

Literaturverzeichnis

Bending behavior of structural glass laminated with different interlayers, T. Serafinavicius, A. K. Kvedaras, and G. Sauciuenas, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 49, No. 4, September, 2013 (Russian Original Vol. 49, No. 4, July-August, 2013)

Investigation on load bearing capacity of glass panes, Kinga Pankhardt, *Civil Engineering* 52/2 (2008) 73–82 doi: 10.3311/pp.ci.2008-2.03 web: <http://www.pp.bme.hu/ci> *c Periodica Polytechnica* 2008

Influence of EVA, PVB and Ionoplast Interlayers on the Structural Behaviour and Fracture Pattern of Laminated Glass, Liene Sable, David Kinsella, Marcin Kozłowski, *International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research* 2019, Volume 3: 62.78 DOI: 10.3844/sgamrsp.2019.62.78

Folienwerke Wolfen GmbH: Die EVA-Laminierfolie für Sicherheitsglas und dekoratives Verbundglas. 2018
Johannes K. Kuntsche, *Mechanisches Verhalten von Verbundglas unter zeitabhängiger Belastung und Explosionsbeanspruchung*

Investigations on the thermorheologically complex material behaviour of the laminated safety glass interlayer ethylene-vinyl-acetate, M.Schuster, M.Kraus, J.Schneider, G.Siebert, *Glass Struct. Eng.* (2018) 3:373–388

Thermorheologische Untersuchungen der Verbundglaszwischenichten PVB und EVA, Michael A. Kraus, Miriam Schuster, Martin Botz, Jens Schneider, Geralt Siebert, <https://doi.org/10.1002/cepa.639>

Grozdanić, G.; Galić, M.; Marović, P.; Some Aspects of the Analyses of Glass Structures Exposed To Impact Load. *Couple. Syst. Mech.* 2021, 10, 475–490.

EN 1288-3, "Glass in building. Determination of the bending strength of glass. Part 3: Test with specimen supported at two points (four-point bending)," European Committee for Standardization CEN, 3-12 (2000).

EN 16612:2019, Glass in building - Determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation

Kraus, M.A., Schuster, M., Kuntsche, J. *et al.* Parameter identification methods for visco- and hyperelastic material models. *Glass Struct Eng* **2**, 147–167 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40940-017-0042-9>

On pre- and post-fracture behaviour of laminated glass under bending, A. Zemanová, et al., *Int. J. Comp. Meth. and Exp. Meas.*, Vol. 8, No. 3 (2020) 195–207

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Herstellerangaben zur EVA-Zwischenschicht Evguard (Angaben der Folienwerke Wolfen GmbH, [Folienwerke Wolfen, 2018])	24
Abbildung 2. Geometrie des Probekörper	25
Abbildung 3. Versuch mit der EVA-Probe mit Z2,5 der Zwick-Roell-Maschine	26
Abbildung 4. Spannungs-Dehnungs-Diagramm für einachsige Zugprüfung bis zum Bruch – EVA 1 (0,76 mm)	27
Abbildung 5. Spannungs-Dehnungs-Diagramm für einachsigen Zugversuch bis zum Bruch - EVA 2 (0,76 mm)	28
Abbildung 6. Einfluss der Dehnungsrate	29
Abbildung 7. Ergebnisse der uniaxialen Zugversuche an EVA: G71 bei konstanten Dehnraten (a), Ergebnisse der uniaxialen Zugversuche an PVB: BG bei konstanten Dehnraten (b)	30
Abbildung 8. EVA 1 – Einachsige Zugprüfung bis zum Bruch: Probenstärke 0,76 mm (a), Probenstärke 0,38 (b)	30
Abbildung 9. EVA 1 - Be- und Entlastungszugversuch mit Dehnungsgeschwindigkeit 0,01 1/s	31
Abbildung 10. EVA 2- Be- und Entlastungszugversuch mit Dehnungsgeschwindigkeit 0,01 1/s	32
Abbildung 11. Fotografie der Proben nach 7 Tagen vom Zugversuch bis zum Bruch	33
Abbildung 12. Fotografie der Proben nach 7 Tagen des Be- und Entlastungstests	34
Abbildung 13. Versuchsablauf der zyklischen Belastung mit Relaxationsschritten	35
Abbildung 14. EVA 1 - Treppentest unter Berücksichtigung der Dehnung	35
Abbildung 15. EVA 1 Versuchsdaten mit charakteristischen Punkten	38
Abbildung 16. EVA 2 Versuchsdaten mit charakteristischen Punkten	39
Abbildung 17. M.A.Krauss, Machine Learning Techniques for the Material Parameter Identification of Laminated Glass in the Intact and Post-Fracture State	40
Abbildung 18. a) EVA 1 und b) EVA 2 Versuchsdaten und Modellanpassung	43
Abbildung 19. Numerische Modelle für den Zugversuch a) kleine Geometrie b) Geometrie in Originalgröße	44
Abbildung 20. Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse für den einachsigen Zugversuch an EVA 1-Proben	45
Abbildung 21. Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse für den einachsigen Zugversuch an EVA-2-Proben	46
Abbildung 22. Probekörper VSG ESG 66,4 mm mit EVA 1,52 mm	47
Abbildung 23. Das Sigma-Epsilon-Diagramm (σ - ϵ) für alle Proben	54
Abbildung 24. Zugfestigkeit	55
Abbildung 25. Elastizitätsmodul	56
Abbildung 26. Das Sigma-Epsilon-Diagramm (σ - ϵ) für alle Proben	57
Abbildung 27 Zugfestigkeit	58

Abbildung 28. Elastizitätsmodul	59
Abbildung 29. Spannungs-Dehnungs-Kurven	67
Abbildung 30. Numerisches Modell des Zugversuchs	69
Abbildung 31. Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse für den einachsigen Zugversuch an EVA 1-Proben	70
Abbildung 32. Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse für den einachsigen Zugversuch an EVA 2-Proben	71
Abbildung 33. Materialmodell	72
Abbildung 34. 4-Punkt-Biegeversuche	80
Abbildung 35. Schematische Zeichnung mit Laserpositionen	82
Abbildung 36. Linienlager – Stahlrahmen	83
Abbildung 37. Punktlagerung	84
Abbildung 38. Verformungsergebnisse für die Probe der Linienhalterung	85
Abbildung 39. Verformungsergebnisse für die Punkthalterungsprobe	85
Abbildung 40. Numerische Ergebnisse für Linienunterstützung	87
Abbildung 41. Numerische Ergebnisse für Punkthalterungen	87
Abbildung 42. Ergebnisse für Linienlagerung	91
Abbildung 43. Effektive Dicke vs. Fläche	95
Abbildung 44. Isosurface - Linienlagerung	96
Abbildung 45. Ergebnisse für Punktlagerung	97
Abbildung 46. Effektive Dicke vs. Fläche	99
Abbildung 47. Isosurface - Punktlagerung	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Verschiedene Proben für EVA-Tests	25
Tabelle 2. Ergebnisse für die beiden Gruppen von EVA-Zwischenschichten mit unterschiedlichem VAC-Gehalt	29
Tabelle 3. MR-Parameter für EVA 1	41
Tabelle 4. MR-Parameter für EVA 2	42
Tabelle 5. Zugversuchsart	48
Tabelle 6. Probenphasen während der Prüfung - Muster FGA000	49
Tabelle 7. Probenphasen während der Prüfung - Muster FGA002	50
Tabelle 8. Probenphasen während der Prüfung - Muster FGA003	51
Tabelle 9. Probenphasen während der Prüfung - Muster FGA004	52
Tabelle 10. Probenphasen während der Prüfung - Muster FGA005	53
Tabelle 11. Zugversuchsart (planar)	57
Tabelle 12. Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC000	60
Tabelle 13. Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC001	61
Tabelle 14. Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC002	62
Tabelle 15. Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC003	63
Tabelle 16. Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC004	64
Tabelle 17. Probenphasen während der Prüfung - Muster FGC005	65
Tabelle 18. Ergebnisse – Planare und Uniaxiale Prüfungen	66
Tabelle 19. Ergebnisse des Elastizitätsmoduls	67
Tabelle 20. VSG ESG 2 x 8 mm mit EVA 1,52 mm	76
Tabelle 21. VSG ESG 2 x 8 mm mit EVA 0,76 mm	76
Tabelle 22. VSG ESG 2 x 6 mm mit EVA 0,76 mm	77
Tabelle 23. Vergleich von experimentellen und numerischen Ergebnissen	88
Tabelle 24. Linienlagerung Ergebnisse	90
Tabelle 25. Punktlagerung Ergebnisse	96

Anlagen

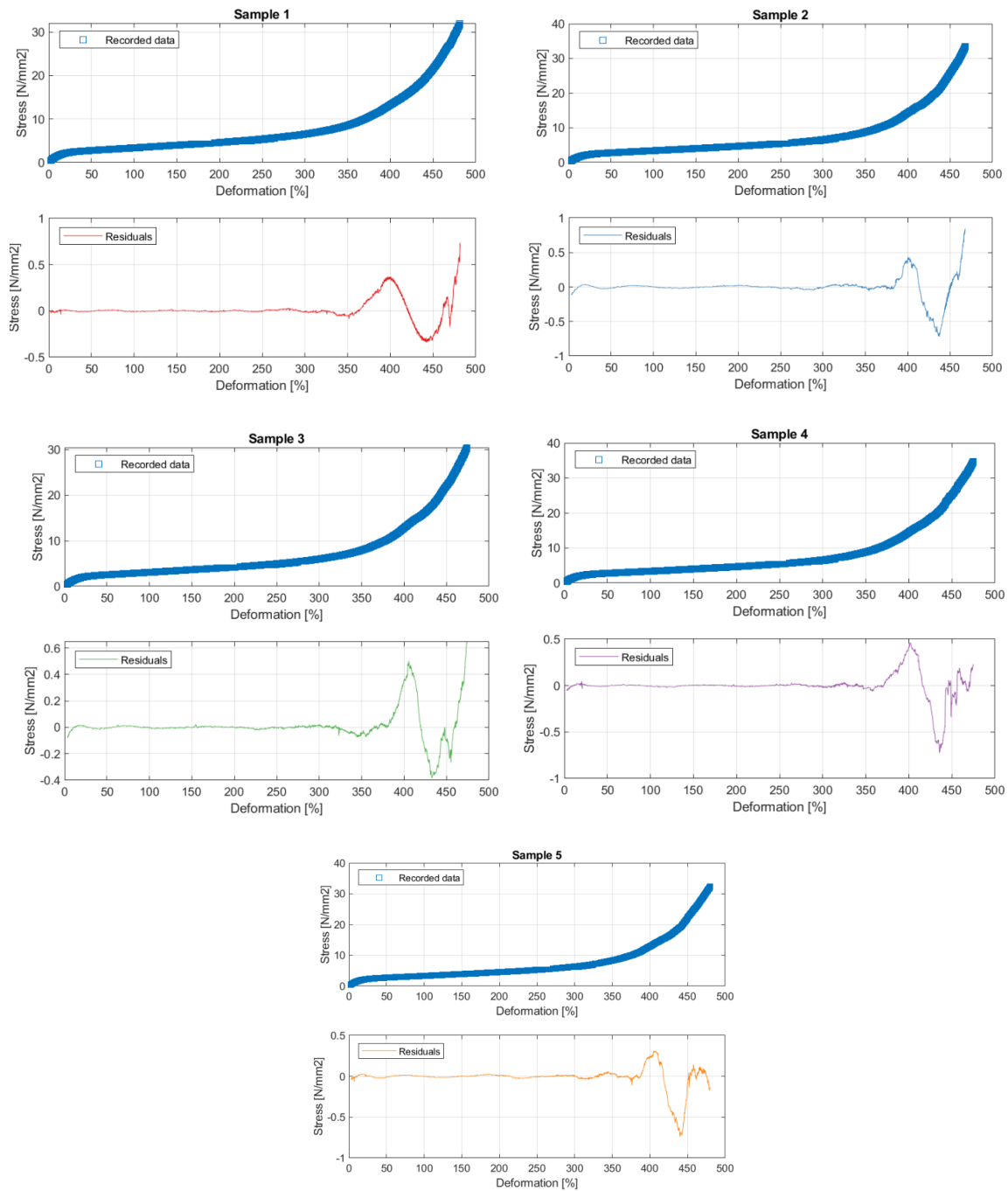


Abbildung A EVA 1

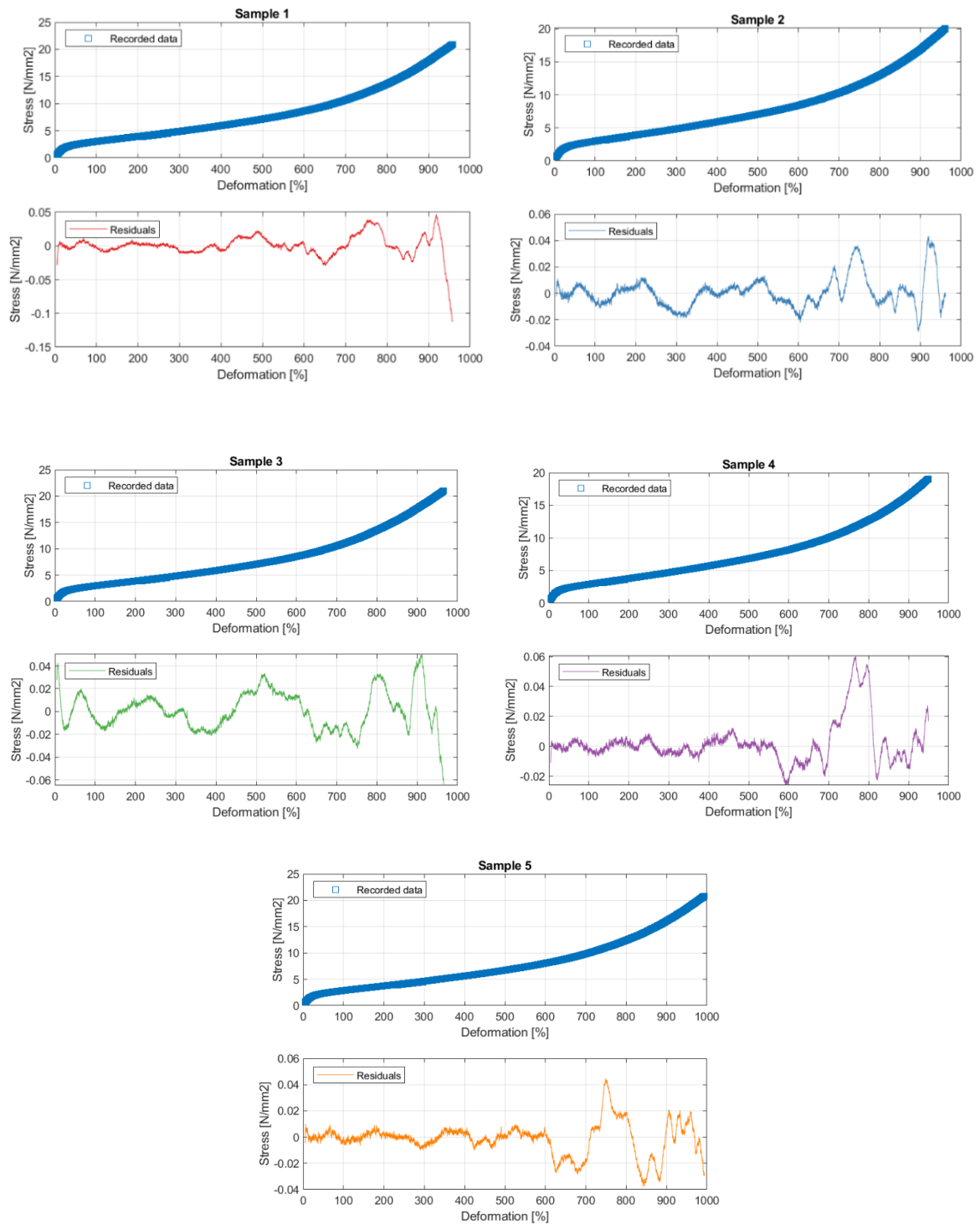


Abbildung B EVA 2



105 Epoxy Resin® / 206 Slow Hardener®

Technical Data Sheet

105 System 105/206

General Description

105/206 Epoxy is used for general coating and bonding applications when extended working and cure time are needed or to provide adequate working time at higher temperatures.

105/206 forms a high-strength, moisture-resistant solid with excellent bonding and barrier coating properties. It will wet out and bond to wood fiber, fiberglass, reinforcing fabrics, foam and other composite materials, and a variety of metals.

105/206 Epoxy can be thickened with WEST SYSTEM fillers to bridge gaps and fill voids and can be sanded and shaped when cured. With roller applications, it has excellent thin-film characteristics, allowing it to flow out and self-level without "fish-eyeing." Multiple coats of 105/206 Epoxy create a superior moisture barrier and a tough, stable base for paints and varnishes. It is formulated without volatile solvents resulting in a very low VOC content. It has a relatively high flash point, no strong solvent odor and does not shrink after curing. It is not intended for clear coating natural finished wood.

Handling Characteristics

Mix ratio by volume (300 Mini Pump ratio) 5 parts resin : 1 part hardener by weight 5.36 : 1
 Acceptable ratio range by weight 4.84 : 1 to 6.19 : 1
 Mix viscosity (at 72°F) ASTM D-2393 725 cps
 Pot life (100g at 72°F) 20 to 25 minutes
 Working time, thin film* 90 to 110 minutes
 Cure to a solid, thin film* 10 to 15 hours
 Cure to working strength 1 to 4 days
 Minimum recommended temperature 60°F (16°C)

*Epoxy cures faster at higher temperatures and in thicker applications.

Physical Properties of Cured Epoxy

Specific gravity 1.18
 Hardness (Shore D) ASTM D-2240 83
 Compression yield ASTM D-695 11,500 psi
 Tensile strength ASTM D638 7,300 psi
 Tensile elongation ASTM D-638 4.5%
 Tensile modulus ASTM D-638 4.60E+05psi
 Flexural strength ASTM D-790 11,800 psi
 Flexural modulus ASTM D-790 4.50E+05
 Heat deflection temperature ASTM D-648 123°F
 Onset of Tg by DSC 126°F
 Ultimate Tg 139°F

Storage/Shelf Life

Store at room temperature. Keep containers closed to prevent contamination. With proper storage, resin and hardeners should remain usable for many years. After a long storage, verify the metering accuracy of the pumps. Mix a small test batch to assure proper curing.

Over time, 105 Resin will thicken slightly and will therefore require extra care when mixing. Repeated freeze/thaw cycles during storage may cause crystallization of 105 Resin. Warm resin to 125°F and stir to dissolve crystals. Hardener may darken with age, but physical properties are not affected by color. Be aware of a possible color shift if very old and new hardener are used on the same project.

Gougeon Brothers, Inc.
 P.O. Box 908
 Bay City, MI 48707
 866-937-8797
 westsystem.com

Abbildung C Epoxy Resin

Fibreglass Tape – 315g/m²

Designed to be used with epoxy, polyester & vinylester to create hard parts of excellent strength and low weight. Supplied in roll widths of 25mm to 150mm weighing 315g m². Open weave is the most common and easiest to saturate with resin. Used as a convenient repair bandage. Also heat resistant with continuous use at temperatures up to 550°C

Features:

- Available in 25mm,50mm,75mm,100mm and 150mm widths
- High quality weave
- Quick to saturate
- Conforms well when wet out with resin

Properties	Value
Base Construction:	8 ends per cm / 5.5 x 2 picks per cm
Yarn Count:	EC9 300 tex warp / EC9 68 tex weft
Weave Type:	Plain
Fabric Thickness:	0.4mm
Weaving Widths	25mm - 150mm
Roll Length	50 Metres

Abbildung D Fibreglass Tape