Schlussbericht

NEMA

Ergänzung einer Norm für Einscheiben-Sicherheitsglas um spannungsoptische Messmethoden und Analysekonzepte zur Reduzierung zerstörender Prüfungen

Addition of photoelastic methods and analysis concepts to a standard for tempered safety glass to reduce destructive testing

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderung	WIPANO-Förderschwerpunkt „Wissenstransfer durch Normung und Standardisierung“
Förderkennzeichen	03TN0037A-E
Projektkonsortium	Hochschule München, Labor für Stahl- und Leichtmetallbau
	TU Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion
	INTERPANE Glasgesellschaft mbH Plattling
	Glas Trösch GmbH Mengen
	Sicherheitsglastechnik Oelsnitz (Vogtl.) GmbH
	softsolution GmbH
Projektlaufzeit	01.10.2022 bis 31.12.2024
Datum	27.06.2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Projektkonsortium.

Forschungsvorhaben NEMA

Ergänzung einer Norm für Einscheiben-Sicherheitsglas um spannungsoptische Messmethoden und Analysekonzepte zur Reduzierung zerstörender Prüfungen

Hochschule München, Labor für Stahl- und Leichtmetallbau
M.Eng. Lena Efferz
Prof. Dr.-Ing Christian Schuler

TU Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion
Dr.-Ing. Miriam Schuster
M.Eng. Kerstin Thiele
M.Sc. Henrik Riedel
Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider

INTERPANE Glasgesellschaft mbH Plattling
Andreas Strobel

Glas Trösch GmbH Mengen
Bernhard Gammenthaler
Martin Siegler
Moritz Frank

Sicherheitsglastechnik Oelsnitz (Vogtl.) GmbH
Christian Groth

Assoziierter Partner: Softsolution GmbH
Thomas Schuller
Peter Pfannenstill

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung 1
1 Aufgabenstellung und Zielsetzung 1
1.1 Motivation 1
1.2 Ziele des Projekts 1
2 Voraussetzungen 2
3 Planung und Ablauf des Vorhabens 3
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 4
4.1 Thermisch vorgespanntes Glas im Bauwesen 4
4.2 Qualitätskontrolle von ESG 5
4.3 Grundlagen der Spannungsoptik 5
4.4 Spannungsoptische Messungen im Glas 6
4.5 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden 7
4.6 Verwendete Fachliteratur 7
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 8
II. Eingehende Darstellung 9
1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 9
1.1 Anforderungsprofil 9
1.2 Experimentelle Untersuchungen an Kleinbauteil-Probekörpern 9
1.2.1 Probekörper 9
1.2.2 Versuchsablauf 11
1.2.3 Messung und Ergebnisse der Kantenmembranspannung 12
1.2.4 Messung und Ergebnisse der Oberflächendruckspannung 18
1.2.5 Bruchbilduntersuchungen 20
1.2.6 Vierschneiden-Verfahren zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit 22
1.3 Vergleich von simulierten Glasbruchmustern mit realen Bruchbildern 24
1.4 Ermittlung von spannungsoptischen Grenzwerten 27
1.4.1 Vorgehensweise 27
1.4.2 Korrelation mit Oberflächendruckspannung 29
1.4.3 Korrelation mit Kantenmembranspannung 31
1.4.4 Spannungsoptische Grenzwerte 32
1.5 Experimentelle Untersuchungen an Großbauteil-Probekörpern 32
1.5.1 Probekörper 33
1.5.2 Versuchsablauf 33

1.5.3 Ergebnisse der Großbauteilversuche 34
1.6 Prüfverfahren und Normentwurf 37
1.7 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 39
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 41
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 42
4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses 43
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 44
6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen 44
7 Literaturverzeichnis 45

I. Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

1.1 Motivation

Der erhöhte architektonische Anspruch an moderne Fassaden führt dazu, dass immer größere Glasflächen in Bauwerken eingesetzt werden. Damit einhergehend steigen die mechanischen Beanspruchungen auf die Glaselemente, wodurch häufiger hochfeste Gläser verwendet werden müssen. In diesem Zusammenhang haben die Anwendung und Produktion von thermisch vorgespanntem Glas in den letzten Jahren stetig zugenommen.

Im Bauwesen unterliegt das Bauprodukt Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) spezifischen Anforderungen, um das erforderliche Sicherheitsniveau zu gewährleisten. Die beiden wichtigsten Eigenschaften sind dabei die mechanische Biegezugfestigkeit und die Bruchstruktur. Die entsprechenden zerstörenden Prüfverfahren zur Sicherstellung dieser Eigenschaften basieren auf der europäischen Produktnorm EN 12150-1 (2020), die seit ihrer Erstveröffentlichung im Jahr 1996 unverändert geblieben ist. Laut Norm werden zerstörende Prüfungen an begleitend produzierten Kleinformatproben mit den Abmessungen 360 mm x 1100 mm durchgeführt, um die Bruchstruktur und Biegezugfestigkeit zu bewerten. Dies bedeutet, dass die tatsächlich ausgelieferte Produktion nicht individuell geprüft wird, sondern lediglich eine Übertragung der Prüfergebnisse auf die gesamte Produktion erfolgt. Zudem wird dieser Übertrag in der Praxis oft von den geprüften Kleinformatscheiben auf immer größer werdende Bauteilgeometrien vorgenommen. Da eine Bruchbilduntersuchung an Originalscheiben in vielen Bauprojekten nicht vorgesehen ist, kann dies zu wirtschaftlichen Einbußen führen.

Für die werkseigene Produktionskontrolle erlaubt die Norm EN 12150-1 (2020) zwar die Messung der Oberflächendruckspannung mittels spannungsoptischer Messgeräte als Nachweis der Biegefestigkeit, doch ohne einen allgemeingültigen Grenzwert anzugeben. Zudem ist diese Methode zeitintensiv, da sie nur an diskreten Punkten erfolgt. Eine direkte Übertragung dieses punktuellen Messverfahrens in ein kontinuierliches Inline-Verfahren ist aus physikalischen Gründen nicht möglich (Dix and Schuler 2018).

Eine vielversprechende Alternative stellt die Messung der Kantenmembranspannung dar. Während dieses Verfahren bereits in der amerikanischen Norm ASTM C1279 (2023) als zulässige Methode zur Verifizierung der Biegefestigkeit innerhalb der werkseigenen Produktionskontrolle anerkannt ist, findet sie in den nationalen und europäischen Normen bislang keine Anwendung. Die Einführung dieser Messmethode könnte jedoch eine effizientere und produktspezifischere Qualitätssicherung ermöglichen und damit sowohl den Produktionsprozess als auch die Sicherheit der Endprodukte optimieren.

1.2 Ziele des Projekts

Das Hauptziel des Projekts ist die Erweiterung der europäischen Norm EN 12150-1 um spannungsoptische Messmethoden und Analysekonzepte, um zerstörende Prüfungen zur Bestimmung der Vorspannqualität von thermisch vorgespanntem Einscheiben-Sicherheitsglas zu reduzieren. Dies soll eine genauere und effizientere Bestimmung der Biegezugfestigkeit und der Bruchstruktur ermöglichen.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden folgende Teilziele verfolgt:

1. Entwicklung eines Messverfahrens der Kantenmembranspannung mit Eignung als Online-Verfahren

2. Untersuchung der Korrelationen zwischen spannungsoptischen Messungen und zerstörenden Tests
    - Analyse der Zusammenhänge zwischen Kantenmembranspannung und Biegezugfestigkeit
    - Analyse der Zusammenhänge zwischen Oberflächendruckspannung und Bruchstruktur
3. Vergleich von simulierten Glasbruchmustern mit realen Bruchbildern
4. Entwicklung von standardisierten, zerstörungsfreien Prüfverfahren
    - Nutzung etablierter und neuer spannungsoptischer Messverfahren
    - Bewertung der Übertragbarkeit von Messwerten zwischen verschiedenen Glasdicken und Kantenbearbeitungen
    - Erarbeitung einer wissenschaftlichen Grundlage für eine mögliche Anpassung der europäischen Norm EN 12150-1
5. Optimierung der werkseigenen Produktionskontrolle
    - Verbesserte Prozesskontrolle durch Online-Verfahren
    - Prüfung der Vorspannqualität an realen Bauteilgrößen

Mit der Umsetzung dieser Ziele soll die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der Qualitätskontrolle von ESG verbessert und eine Grundlage für eine zukünftige Integration in europäische Normen geschaffen werden.

2 Voraussetzungen

Die Hochschule München mit dem Labor für Stahl- und Leichtmetallbau (LSL) sowie die Technische Universität Darmstadt mit dem Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D) verfügen über langjährige Erfahrung im Bereich der Spannungsoptik und der Qualitätssicherung von thermisch vorgespanntem Glas im Kontext des Glas- und Fassadenbaus. Im Projekt „Gläsernes Glas“ (FKZ: ZF4051701GM5) (Schuler et al. 2017), welches in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Softsolution durchgeführt wurde, entwickelte die Hochschule München ein Online-Prüfsystem zur flächigen und zerstörungsfreien Qualitätskontrolle thermisch vorgespannter Glasscheiben.

Ein weiterer Zugang zur Bewertung der Qualität von Einscheibensicherheitsglas liegt in der Analyse der Bruchstruktur. Dieser Ansatz basiert auf Grundlagen der Bruchmechanik und moderner Bildanalyseverfahren. Bereits seit den Pionierarbeiten von Griffith zur Bruchmechanik von Glas (Griffith, A., A. 1921) im Jahr 1920 beschäftigen sich zahlreiche Studien mit dem Zusammenhang zwischen Eigenspannungszustand, Glasdicke und Fragmentierungsverhalten bei thermisch vorgespanntem Glas (Lee et al. 2012, Mognato et al. 2017, Pourmoghaddam and Schneider 2018a).

Die TU Darmstadt entwickelte das Modell „Bayesian Reconstruction and Prediction of Glass Fracture Patterns (BREAK)“ (Pourmoghaddam and Schneider 2018b, Kraus et al. 2019, Kraus 2019, Pourmoghaddam et al. 2019). Dieses Modell kombiniert ein Energiekriterium der linearelastischen Bruchmechanik mit der statistischen Analyse realer Bruchbilder. Dadurch können die zwei wesentlichen Merkmale – Bruchstückgröße und Bruchstückintensität – innerhalb eines Beobachtungsfeldes erfasst und zur Charakterisierung des Bruchbildes herangezogen werden. Die Modellierung basiert auf der Annahme, dass nach dem Bruchvorgang im Glas noch ein residualer Spannungszustand existiert, der gespeicherte elastische Energie enthält.

Für die praktische Umsetzung des Projekts waren zudem die Kompetenzen der beteiligten Glasveredlungsunternehmen SGT, AGC Interpane und Glas Trösch essenziell. Die drei Glasunternehmen verfügen über eine hohe anwendungstechnische Expertise beim thermischen Vorspannen und in der Qualitätssicherung von Einscheibensicherheitsglas. Die Kombination

aus wissenschaftlicher Methodik und realen Fertigungsbedingungen in den Unternehmen schuf die Voraussetzung für ein praxistaugliches, anwendungsnahes Forschungsvorhaben mit hoher Relevanz für die Glasveredelungsbranche.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war ursprünglich für eine Laufzeit von 24 Monaten angesetzt. Aufgrund der umfangreichen Anzahl an Probekörpern und der damit verbundenen zusätzlichen Mess- und Auswertungsaufwände wurde die Projektdauer um drei Monate verlängert, sodass das Vorhaben insgesamt 27 Monate umfasste. Das Projekt erstreckte sich somit über einen Zeitraum vom 1. Oktober 2022 bis zum 31. Dezember 2024.

Die zusätzlichen drei Monate ermöglichten eine umfassendere Analyse der Messergebnisse und eine verbesserte statistische Auswertung, um die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Messmethoden sicherzustellen.

Das Projekt gliederte sich in neun Arbeitspakete (AP), die aufeinander abgestimmt waren, um Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Qualitätskontrolle von Einscheibensicherheitsglas zu entwickeln. Die Arbeitspakete sind in Abbildung 1 dargestellt. Abbildung 2 zeigt die detaillierte zeitliche Planung und Verteilung der Arbeitspakete auf die Projektbeteiligten im Zeitbalkendiagramm.

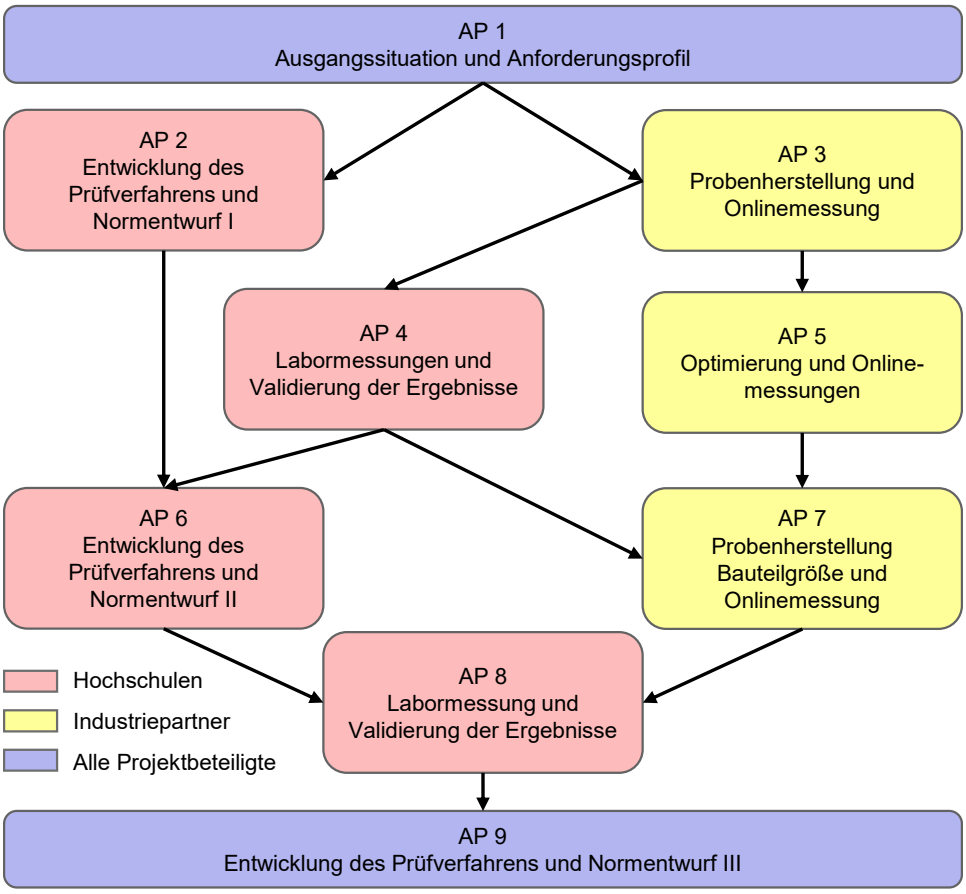


Abbildung 1: Arbeitspakete des Forschungsprojekts NEMA

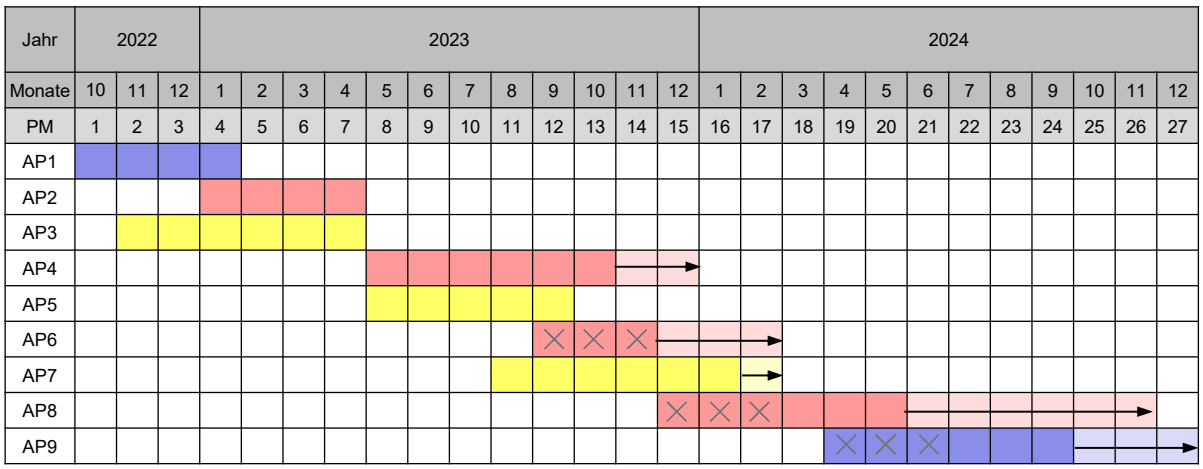


Abbildung 2: Zeitbalkendiagramm des Forschungsprojekts NEMA mit Kennzeichnung der Verzögerungen

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

4.1 Thermisch vorgespanntes Glas im Bauwesen

Floatglas stellt in der Glasindustrie ein wichtiges Basiserzeugnis dar und dient als Ausgangsmaterial für zahlreiche Anwendungen, insbesondere für Fensterverglasungen und Veredelungsprozesse wie das thermische Vorspannen. Während der Herstellung wird das geschmolzene Gemenge im Floatprozess langsam abgekühlt, um eine plane, homogene Materialstruktur und Glasdicke zu gewährleisten. Um die mechanischen Eigenschaften von Floatglas zu verbessern, insbesondere die Biegefestigkeit, wird das Glas in einem speziellen thermischen Prozess vorgespannt. Die charakteristische Biegefestigkeit von Floatglas beträgt etwa 45 N/mm². Durch das thermische Vorspannen entstehen die zwei Produkte Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) mit einer erhöhten Biegefestigkeit von ca. 120 N/mm² und teilvorgespanntes Glas (TVG) mit einer Biegefestigkeit von ca. 70 N/mm².

Im Herstellungsprozess des thermischen Vorspannens wird die Glasscheibe unter kontrollierten Bedingungen abhängig von Glasdicke, Scheibenformat und Belegung des Ofens auf über 600 °C erhitzt. Anschließend wird das Glas durch schnelles Abkühlen mit Luftdüsen schockartig abgekühlt. Dies führt zur Entstehung von Druckspannungen an den Glasoberflächen, während im Inneren des Glases Zugeigenspannungen verbleiben. Diese Druckspannungen haben zwei wesentliche Effekte:

- Erhöhung der Bruchfestigkeit: Oberflächenschäden wie Mikrorisse werden überbrückt, wodurch die Biegespannung erheblich gesteigert wird.
- Verändertes Bruchverhalten: Im Falle eines Bruchs zerfällt ESG in kleine, stumpfkantige Fragmente, die das Verletzungsrisiko im Vergleich zu normalem Floatglas reduzieren.

Der Herstellungsprozess von teilvorgespanntem Glas (TVG) ähnelt dem von ESG, jedoch erfolgt das Abkühlen nach dem Erhitzen langsamer. Dadurch entstehen geringere Druckspannungen an den Oberflächen als bei ESG. Die Biegefestigkeit und die Temperaturwechselbeständigkeit von TVG liegen zwischen den Werten von Floatglas und ESG. Das Bruchverhalten von TVG unterscheidet sich ebenfalls von ESG. Beim Bruch entstehen lange Risse, die von der Bruchstelle bis zum Glasrand verlaufen. Dieses Bruchbild bietet Vorteile in bestimmten Anwendungen, insbesondere in Verbundglas-Konstruktionen. Aufgrund der großflächigen Bruchstücke weist die Verglasung eine Resttragfähigkeit nach dem Bruch auf, was insbesondere bei sicherheitsrelevanten Anwendungen von Bedeutung ist.

Als Bewertungsgrundlage für die Festigkeit von ESG und TVG dienen die europäischen Produktnormen EN 12150 (EN 12150-1 2020) und EN 1863 (EN 1863-1 2012). Neben dem Nachweis der Festigkeit ist auch ein Nachweis des Bruchbildes erforderlich. ESG soll über die gesamte Scheibe ein feinkrümeliges Bruchbild aufweisen, was auf eine ausreichend hohe thermische Vorspannung hinweist. Bei TVG muss die thermische Vorspannung hingegen begrenzt werden, da hier aus Gründen der Resttragfähigkeit bei Verbundsicherheitsglas aus TVG ein grobes Bruchbild gewünscht ist.

4.2 Qualitätskontrolle von ESG

Die Biegefestigkeit von Glas stellt eine statistische Größe dar, die mit der Bruchwahrscheinlichkeit und der Art der Belastung verknüpft ist. Ein in der Praxis etabliertes Verfahren in der Produktionskontrolle zur Bestimmung der Biegefestigkeit ist der Vier-Punkt-Biegeversuch gemäß EN 1288-3 (2000). Hierbei wird die Glasprobe mit den Abmessungen von 360 mm x 1100 mm auf zwei drehbar gelagerten Rollen im Abstand von 1000 mm aufgelegt und über zwei weitere Rollen mit einem Abstand von 200 mm bis zum Bruch belastet. Aus der Bruchkraft wird in Abhängigkeit von der Geometrie der Probe und dem Eigengewicht der Scheibe die Biegespannung berechnet. Zur statistischen Absicherung fordert EN 12150-1 (2020) die Prüfung von mindestens zehn Proben je Charge thermisch vorgespannten Glases nach dem Aufbau gemäß EN 1288-3. Die charakteristische Biegefestigkeit ist über das 5%-Quantil mit einer Vertrauensniveau von 95 % nachzuweisen und hängt vom erreichten Vorspannungslevel ab. Für ESG aus Floatglas liegt der anzustrebende charakteristische Festigkeitswert, wie bereits erwähnt, bei mindestens 120 MPa.

Die Qualitätskontrolle erfolgt zusätzlich über die Prüfung des Bruchbilds, bei der kontrolliert wird, ob das charakteristische Bruchverhalten nach EN 12150-1 (2020) erfüllt ist. Dafür werden fünf ESG-Scheiben der Abmessungen 360 mm x 1100 mm ohne Bohrungen oder Ausschnitte geprüft. Die Bruchauslösung erfolgt mit einem scharfkantigen Stahlwerkzeug durch Anschlag auf die Längsseite, 13 mm vom Rand entfernt. Die Proben liegen dabei spannungsfrei in einem Rahmen, um ein unkontrolliertes Wegspringen von Bruchstücken zu verhindern, ohne die Ausdehnung der Scheibe zu behindern. Im Anschluss wird das Bruchbild bewertet: Hierzu wird das Fragmentierungsverhalten im gröbsten Bereich innerhalb einer 50 mm x 50 mm Auswertemaske gezählt, wobei ein Bereich von 100 mm rund um den Schlagpunkt sowie Randstreifen von 25 mm Breite ausgenommen sind. Bruchstücke, die nur teilweise innerhalb der Auswertemaske liegen, werden als halbe Fragmente gezählt. Die Bewertung erfolgt innerhalb von fünf Minuten nach Bruch. ESG der Glasdicken von 4–12 mm gilt in diesem Zusammenhang als normgerecht, wenn sich in der Auswertemaske mindestens 40 Fragmente befinden. Zusätzlich darf die Länge des längsten Bruchstücks im verbleibenden Bereich der Scheibe – ohne Rand- und Schlagzonen – 100 mm nicht überschreiten.

4.3 Grundlagen der Spannungsoptik

Beim Abkühlprozess des Glases entstehen Eigenspannungen, welche die Festigkeit und Verarbeitbarkeit von Glas und auch dessen optische Eigenschaften beeinflussen. Durch die Messmethode der Spannungsoptik können diese eingeprägten Spannungen sichtbar gemacht werden. Elektromagnetische Wellen, wie Lichtstrahlen, verändern beim Durchdringen eines transparenten Mediums ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit. Den Faktor, um den die Phasengeschwindigkeit der Lichtstrahlung kleiner als im Vakuum wird, nennt man Brechzahl oder Brechungsindex. Dehnt man ein Material mechanisch in eine Richtung, wird die Entfernung der Moleküle zueinander und damit auch die Geschwindigkeit des Lichts größer, wodurch die Brechzahl abnimmt, während sie senkrecht dazu nahezu unverändert bleibt. Die Brechzahl kann also in verschiedenen Richtungen variieren. Man spricht hier von einer Doppelbrechung.

Die physikalischen Grundlagen der Spannungsoptik im Kontext von Glas sind umfassend in der Fachliteratur beschrieben (Aben et al. 2010, Mognato et al. 2018, Pourmoghaddam and Schneider 2018a, Mognato et al. 2020). Im Polariskop wird bei doppelbrechenden Objekten ein polarisierter Lichtstrahl im ebenen Spannungszustand in jedem Punkt in zwei Komponenten parallel zu den Hauptspannungs-richtungen aufgespalten. Diese beiden Teilstrahlen besitzen bei Inhomogenität unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten im doppelbrechenden Medium, woraus sich eine Verzögerung (nm) als Wegdifferenz zweier Wellen ergibt. Die Messgröße der Verzögerung steht dabei über das Wertheim'sches Gesetz in direktem Zusammenhang mit der Differenz der Hauptspannungen im Material. Dieses Gesetz beschreibt die relative Retardation δ, die entsteht, wenn linear polarisiertes Licht mit Wellenlänge λ senkrecht auf eine Glasplatte der Dicke *t* mit materialtypischer spannungsoptische Konstante *C* trifft und sich in zwei orthogonal polarisierte Komponenten aufspaltet:

$$\delta = \frac{C}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2)t$$

Es gibt Materialien, die auch ohne das Vorhandensein von mechanischen Spannungen doppelbrechend sind, zum Beispiel viele Kristalle. Glas hingegen ist optisch isotrop, d. h. im entspannten Zustand ist die Brechzahl in jeder Raumrichtung gleich. Wenn Glas unter Spannung steht, wie es bei thermisch vorgespanntem Glas der Fall ist, wirkt es jedoch ebenfalls doppelbrechend. Für die Messung der thermischen Vorspannung von TVG oder ESG kann man sich diese Eigenschaft zunutze machen. Die im Glas eingebrachten Spannungen führen zu optischen Doppelbrechungseffekten, die mit geeigneten spannungsoptischen Messsystemen visualisiert und quantifiziert werden können.

4.4 Spannungsoptische Messungen im Glas

Die Spannungsoptik ermöglicht die zerstörungsfreie Untersuchung thermisch vorgespannter Gläser anhand der in der Vorspannung induzierten Eigenspannungen. Während des Vorspannprozesses entstehen infolge der raschen Abkühlung Druckspannungen in den Rand- und Oberflächenbereichen und Zugspannungen im Glasinneren. Diese Spannungsverteilung erstreckt sich über die Glasdicke typischerweise in parabolischer Form. Durch die dreidimensionale Abkühlung und die zusätzliche Randfläche bildet sich entlang der Glaskanten eine ausgeprägte Membranspannung, die sich in hohen Verzögerungswerten äußert.

Die Europäische Produktnorm EN 12150-1 (2020) erlaubt im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle die Messung der Oberflächenspannung mittels Streulichtverfahren als indirekten Nachweis der Biegefestigkeit. Der Zusammenhang zwischen der Oberflächendruckspannung und der Bruchstückanzahl wurde bereits in mehreren Studien untersucht (Mognato et al. 2011, Lee et al. 2012, Pourmoghaddam and Schneider 2018a, Pour-Moghaddam 2020). Lee et al. (2012) analysierten kleinere und dünnere Glasproben (500 mm x 500 mm und 600 mm × 1100 mm) mit Dicken von 2,1 mm, 2,5 mm, 2,8 mm und 3,2 mm. Die ermittelten Oberflächenspannungen lagen dabei im Bereich von etwa 90 MPa bis 140 MPa. Pourmoghaddam und Schneider (2018a) untersuchten Proben im Standardformat (360 mm x 1100 mm) mit unterschiedlichen Dicken (4 mm, 8 mm, 12 mm) und variierenden Oberflächenspannungen von etwa 50 MPa bis 120 MPa. Beide Studien kamen zu dem Ergebnis, dass bei dünnerem Glas höhere Oberflächenspannungen erforderlich sind, um eine vergleichbare Fragmentierungsdichte zu erreichen.

Mognato et al. (2011) analysierten thermisch vorgespanntes Einscheibensicherheitsglas im Standardformat (360 mm x 1100 mm) mit Dicken von 4 mm bis 15 mm und Oberflächenspannungen im Bereich von ca. 75 MPa bis 120 MPa. Im Gegensatz zu den zuvor genannten Autoren stellten sie fest, dass der Zusammenhang zwischen Oberflächenspannung und Bruchstückanzahl im Allgemeinen unabhängig von der Glasdicke ist – mit Ausnahme von Gläsern

mit einer Dicke über 10 mm. Für Gläser mit einer Dicke ≤ 10 mm wurde eine Mindest-Oberflächenspannung von 90 MPa und für Dicken ≥ 12 mm ein Mindestwert von 85 MPa identifiziert, um ein „sicheres“ Bruchbild gemäß EN 12150 zu gewährleisten. Darüber hinaus leiteten Mognato et al. (2011) lineare Beziehungen zwischen Bruchstückanzahl und Oberflächenspannung ab. Die Punktmessung der Oberflächendruckspannung über das Streulichtverfahren erfordert jedoch einen hohen zeitlichen Aufwand und ist nur eingeschränkt für die Integration in Fertigungsprozesse geeignet.

Eine praktikable Alternative stellt die Messung der Kantenspannung dar, insbesondere im Hinblick auf ihre erhöhte Retardation und flächige Ausprägung. Im amerikanischen Standard ASTM C 1048 (2018) ist die Messung der Kantenspannung bereits als Verfahren zur Verifizierung der Biegefestigkeit im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle zugelassen. Neben einer Oberflächenspannung von mindestens 69 MPa wird dort auch ein Mindestwert der Kantenspannung von 67 MPa für vollständig vorgespanntes Glas gefordert – entsprechend dem thermisch vorgespannten Sicherheitsglas gemäß EN 12150-1 (2020). In der europäischen Norm ist die Messung der Kantenspannung bisher nicht vorgesehen.

4.5 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Bei den Recherchen wurden keine Patente gefunden, die der in diesem Projekt angestrebten Lösung im Wege stehen.

4.6 Verwendete Fachliteratur

Für die Recherchen zum Stand der Wissenschaft und Technik wurden Literatur- und Patentrecherchen im Bereich der zerstörungsfreien Qualitätskontrolle bei thermisch vorgespanntem Glas durchgeführt. Anbei einen Ausschnitt der wichtigsten Literatur. Die vollständige Liste der verwendeten Literatur ist im Literaturverzeichnis nach Teil II angegeben.

- L. Föppl und E. Mönch (1972) *Praktische Spannungsoptik*, Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- K. Ramesh, Digital Photoelasticity: Advanced Techniques and Application, Springer Verlag Berlin und New York. ISBN 9783540667957.
- J. Schneider, C. Schuler und M. Illguth, „Qualitätskontrolle thermisch vorgespannter Glasscheiben mittels spannungsoptischer Methoden,“ in *Forum Glastechnik - IAK Forschung & Technologie*, Frankfurt, 2013.
- M. Feldmann, C. Schuler und e. al., Flächige und zerstörungsfreie Qualitätskontrolle mittels spannungsoptischer Methoden, Berlin: Ernst und Sohn. ISBN: 978-3433-03171-1, April 2017.
- E. Mognato, S. Brocca, and F. Comiati (2018) *Which is the Right Reference Surface Compression Value for Heat Treated Glass? Challenging glass 6*, pp. 703–712.
- ASTM C 1279-23 (2023) Standard Test Method for Non-Destructive Photoelastic Measurement of Edge and Surface Stresses in Annealed, Heat-Strengthened, and Fully Tempered Flat Glass: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 1048 - 18 (2018) *Standard Specification for Heat-Strengthened and Fully Tempered Flat Glass*: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- DIN EN 12150-1:2020-07 (2020) EN 12150 Glas im Bauwesen - Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas - Teil 1: Definition und Beschreibung: Beuth, Berlin.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Forschungsprojekts NEMA zum Zusammenhang zwischen Kantenmembranspannung in vorgespanntem Flachglas und dem resultierenden Bruchbild kamen zwei hochspezialisierte Inspektionssysteme der Firma Softsolution zum Einsatz, die bereits bei den beteiligten Forschungseinrichtungen und Industriepartnern installiert waren und im diesem Zuge von der Firma Softsolution modifiziert wurden: der Inline-Anisotropy-LineScanner sowie ein erweiterten CulletScanner mit integrierter Polariskop-Funktion.

Der LineScanner der Hochschule München wurde speziell für dieses Projekt technisch adaptiert, um die Kantenmembranspannung entlang aller vier Glaskanten präzise zu erfassen. Für eine zuverlässige Berechnung dieses Spannungswerts wurde das System um eine hochauflösende Glasdickenmessung erweitert, die in Intervallen von 200 mm über die gesamte Glasbreite hinweg misst. Da die Verzögerung – also die durch Spannungsdifferenzen hervorgerufene Phasenverschiebung des polarisierten Lichts – proportional zur Glasdicke ist, stellt diese Messung eine zentrale Voraussetzung für die nachfolgende Spannungsanalyse dar.

Die Erfassung der Verzögerungswerte erfolgt über Polarisationsfilter, welche die durch Spannungen verursachte Doppelbrechung im Glas sichtbar machen. Zur Erhöhung des dynamischen Messbereichs und zur Minimierung spektraler Überlagerungseffekte wurde das optische System des LineScanners auf ein Drei-Wellenlängen-Prinzip erweitert. Neben der herkömmlichen Nutzung zirkular polarisierten Lichts im sichtbaren Bereich wurden hierbei drei gezielt gewählte Wellenlängen – typischerweise im Bereich von etwa 450 nm (blau), 550 nm (grün) und 620 nm (rot) – verwendet. Durch die spektrale Trennung kann die Verzögerung pro Wellenlänge einzeln bestimmt werden, was eine genauere Ableitung der Retardationswerte erlaubt – insbesondere bei höheren Spannungszuständen, bei denen klassische Ein-Wellenlängen-Systeme durch 2π-Ambiguitäten an ihre Grenzen stoßen. Die Kombination der drei spektralen Messwerte ermöglicht eine eindeutige Identifikation der tatsächlichen Verzögerung über den gesamten relevanten Spannungsbereich.

Zur Validierung der berechneten Kantenmembranspannung kam zusätzlich ein speziell entwickelter Messsensor zum Einsatz, der auch bei dünneren Gläsern zuverlässige Werte liefert und als Referenzsystem dient. Angemerkt sei, dass der LineScanner auch um eine detaillierte Ausgabeschnittstelle erweitert wurde, um die Messwerte mit den Positionen am Glas zu korrelieren und auch Verständnis darüber herzustellen, wie sich die Einzelmessungen entlang der Glaskanten verhalten.

Der ebenfalls modifizierte CulletScanner der TU Darmstadt wurde mit einer Polariskop-Funktion ausgestattet, um das Bruchbild hinsichtlich der Verteilung der Bruchstückgrößen und Restspannungen zu analysieren.

Dank dieser Entwicklungen leistete Softsolution einen essenziellen Beitrag zur messtechnischen Erfassung und wissenschaftlich fundierten Bewertung der Kantenmembranspannung sowie deren Einfluss auf die Bruchcharakteristik vorgespannten Glases.

II. Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Projekt „NEMA – Ergänzung einer Norm für Einscheiben-Sicherheitsglas um spannungsoptische Messmethoden und Analysekonzepte zur Reduzierung zerstörender Prüfungen“ werden experimentelle Untersuchungen an thermisch vorgespannten Gläsern in Klein- und Großformat durchgeführt, um spannungsoptische Grenzwerte zu ermitteln, welche die Tests innerhalb der zerstörenden Qualitätskontrolle ergänzen und reduzieren sollen.

Im Folgenden sind die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben aufgeführt. Zudem ist die Erreichung der Ziele aus den Arbeitspaketen kurz beschrieben.

1.1 Anforderungsprofil

Zu Beginn des Projekts wurde ein Anforderungsprofil festgelegt. Um die zerstörenden Prüfungen in der Qualitätskontrolle von thermisch vorgespanntem Glas zu reduzieren, sollen verlässliche, spannungsoptische Prüfverfahren entwickelt werden. Die Untersuchungen sollen an Probekörpern durchgeführt werden, die möglichst viele praxisrelevante Parameter abdeckt.

Ein wesentlicher Bestandteil soll die Entwicklung einer Messmethode der Kantenmembranspannung sein, welche die Möglichkeit bietet, die Spannungsverteilung am Glasrand aufzunehmen und im laufenden Produktionsprozess eingebunden zu werden. Die Untersuchungen sollen mit dem Softsolution Linescanner durchgeführt werden, da dieser bei den Industriepartnern bereits als Anisotropie-Scanner am Ende des Vorspannofens installiert ist.

Die Prüfverfahren, die in einem Normentwurf für die zerstörungsfreie Qualitätskontrolle von ESG münden, sollen die automatisierten Messung der Kantenmembranspannung sowie ein manuelles, punktuelles Messverfahren zur Oberflächendruckspannung beinhalten. Diese Kombination soll eine umfassende Bewertung der Messgenauigkeit, Reproduzierbarkeit und Praxistauglichkeit der unterschiedlichen Verfahren ermöglichen.

1.2 Experimentelle Untersuchungen an Kleinbauteil-Probekörpern

Die Untersuchungen an den Probekörpern in Kleinformat dienen dazu, einen Zusammenhang zwischen den zerstörungsfreien, spannungsoptischen Messungen der Kantenmembranspannung und der Oberflächendruckspannung mit den zerstörenden Tests der Bruchbilduntersuchungen und Biegezugfestigkeiten zu ermitteln.

1.2.1 Probekörper

In Arbeitspaket 03 produzierten die drei Glasveredler thermisch vorgespannte Kleinbauteil-Probekörper in den Abmessungen 360 mm x 1100 mm. An diesen Abmessungen werden die zerstörenden Tests der Produktionskontrolle von thermisch vorgespannten Gläsern gemäß EN 12150-1 und EN 1863-1 durchgeführt. Die Probekörper wurden in sechs Glasdicken hergestellt: 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm und 15 mm. Der Großteil der Probekörper besteht aus unbeschichtetem Clear Float Glas. Zusätzlich stellte ein Hersteller eingefärbtes, die anderen zwei Hersteller rand-entschichtetes Glas her. Die Glasdicken 4 mm, 6 mm, 12 mm wurden mit den zwei unterschiedlichen Kantenbearbeitungen KGS und KGN produziert, die restlichen Glasdicken besitzen die Kante KGN. Eine Prüfserie besteht aus 10 gleich produzierten Probekörpern.

Beim thermischen Vorspannprozess entstehen abhängig der Abkühldauer die beiden Glasarten ESG (Einscheibensicherheitsglas) und TVG (teilvorgespanntes Glas), die unterschiedliche Vorspanngrade und Bruchbilder aufweisen. Um mehr Parameter für die Kantenmembranspannung und Bruchbildbewertung zu erhalten, wurden die zwei Glasarten ESG und TVG auf vier Vorspanngrade aufgeteilt:

- ESG Standard (Einhaltung des Bruchbilds gemäß EN 12150-1)
- ESG hoch (Einhaltung des Bruchbilds gemäß EN 12150-1)
- TVG Standard (Einhaltung des Bruchbilds gemäß EN 1863-1)
- TVG hoch bzw. Zwischenstufe (Auf Einhaltung des Bruchbilds gemäß EN 1863-1 wird verzichtet)

Die „Standard“ vorgespannten Prüfreihen sollen den üblich verwendeten Vorspannparametern der Glasveredler entsprechen. Bei den „hoch“ vorgespannten soll der Vorspannprozess so angepasst werden, dass höhere thermische Eigenspannungen ins Glas eingebracht werden und somit ein feineres Bruchbild entsteht. Die unterschiedlichen Vorspanngrade waren notwendig, um verschiedene Abstufungen der Testverfahren zu erhalten und somit die spannungsoptischen Grenzwerte für die Festigkeit ermitteln zu können.

Die Prüfkörpermatrix mit der Anzahl der Variation an Parametern ist in Abbildung 3 dargestellt, die insgesamt 1300 Probekörper umfasst.

	Probekörper Clear Float						Eingefärbt		Randentschichtet		
	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm	15 mm	6 mm	8 mm	4 mm	6 mm	8 mm
Glasveredler	3	3	3	3	3	1	1	1	2	2	2
Kantenbearbeitung [KGS,KGN]	2	2	2	KGN	KGN	KGN	KGN	KGN	KGS	KGS	KGS
Vorspanngrad	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4
Anzahl Bruchbild [Stk.]	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Anzahl Biegefestigkeit [Stk.]	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Gesamt [Stk.]	**240**	**240**	**240**	**120**	**120**	**20**	**40**	**40**	**80**	**80**	**80**

Format:
360 x 1100 mm²

Interpane	400	Scheiben
Glas Trösch	440	Scheiben
SGT	460	Scheiben
Gesamt	**1300**	**Scheiben**

Abbildung 3: Probekörpermatrix der Kleinformatproben für die Herstellung für AP 03 und Untersuchung für AP 04

Die Forschungseinrichtungen besuchten die ersten Tage der Produktion der Kleinbauteile bei den Glasveredlern. Während dieser Produktionsbesuche kontrollierten die Forschungseinrichtungen die vier unterschiedlichen Vorspanngrade der Prüfscheiben durch die zerstörungsfreie Messung der Oberflächendruckspannung mit dem Messgerät SCALP-05, wie in Abbildung 4a gezeigt. Die Testscheibe wurde im Anschluss angeschlagen und somit zerstört, sodass das Bruchbild bewertet werden konnte (siehe Abbildung 4b). Bei Bedarf konnten die Ofenparameter zur Vorspannung der Glasscheiben angepasst werden. Die Scheiben wurden direkt nach dem thermischen Vorspannen mit dem Softsolution Linescanner inline gescannt. Die Daten der Onlinemessung wurden direkt von Softsolution abgegriffen und auf einen gemeinsamen Server zur Verfügung gestellt. Die zehn Probekörper je Serie wurden jeweils zur Hälfte an die beiden Forschungseinrichtungen verteilt.

Abbildung 4: Kontrolle der Oberflächendruckspannung (links) und des Bruchbilds (rechts) beim Produktionsbesuch bei SGT in Oelsnitz

1.2.2 Versuchsablauf

Im Arbeitspaket 04 untersuchen die Forschungseinrichtungen die zuvor hergestellten Probekörper im Normformat von 360 mm x 1100 mm. Die Online-Messdaten, die bei der Produktion der Glasveredler erhoben wurden, werden von der Hochschule München teilweise eingelesen und verglichen. Zusätzlich werden die Probekörper bei den Forschungseinrichtungen mit dem Softsolution Linescanner und Softsolution Culletscanner gescannt, um Isochromatenaufnahmen für die zerstörungsfreie Messung der Kantenmembranspannung zu erhalten.

Der Softsolution Linescanner der Hochschule München wurde um Dickensensoren, die von der Fa. Softsolution beschafft und montiert wurden, ergänzt. Um die Kantenmembranspannung zu berechnen, ist die Angabe der realen Glasdicke notwendig. Mit den Dickensensoren kann die Glasdicke während des Scanprozesses gemessen und direkt in die Auswertung fließen. Die Labormessungen beinhalten zudem die spannungsoptische Messung der Oberflächendruckspannung und Kantenmembranspannung sowie die zerstörenden Tests des Vierschneiden-Verfahrens zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit und der Bestimmung des Bruchbilds mit Zählen der Bruchstückanzahl an insgesamt 1300 Probekörper im Normformat 360 mm x 1100 mm.

Tabelle 1: Aufgabenteilung der Labormessungen

Tätigkeit	Hochschule München	TU Darmstadt
Scan der Scheiben mit Linescanner bzw. Culletscanner zur Messung der Kantenmembranspannung	5x je Serie	5x je Serie
Messung der Oberflächendruckspannung	2x je Serie	2x je Serie
Vierschneiden-Verfahren zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit	5x je Serie	-
Bestimmung des Bruchbilds	-	5x je Serie

Die Labormessungen werden wie in Tabelle 1 dargestellt auf die Forschungseinrichtungen aufgeteilt, sodass jede Forschungseinrichtung die Untersuchungen an je 650 Probekörpern durchführt. Diese Untersuchungen waren entscheidend, um die Zuverlässigkeit der Produktionsprozesse für Glasveredler zu gewährleisten und die Qualität der Glasprodukte sicherzustellen. Das Vorgehen und Ergebnisse der einzelnen Labormessungen werden im Anschluss beschrieben.

1.2.3 Messung und Ergebnisse der Kantenmembranspannung

Ermittlung der Spannung an der Kante

In der Vorspannzone der Fläche, ungestört von Kanten, bildet sich eine parabolische Verteilung der Hauptspannungen über die Glasdicke aus, wie in Abbildung 5 dargestellt. Im Inneren herrscht Zug, während die Oberflächen unter Druckspannungen stehen. Mit der Vollfeldmethode können diese einzelnen Spannungsanteile nicht separat gemessen werden.

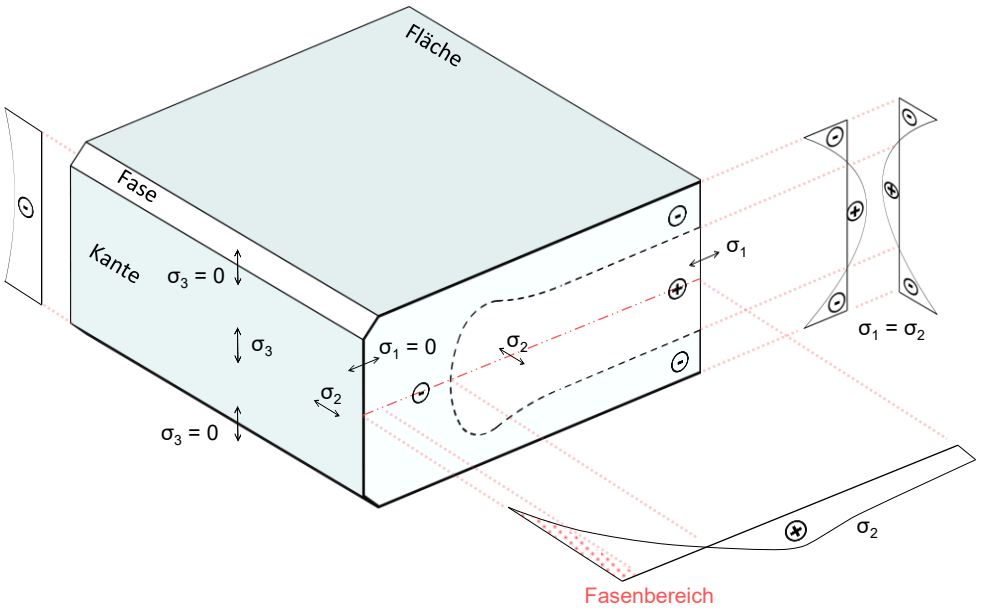


Abbildung 5: Spannungsverteilung der Vorspannzonen an der Glaskante und in der Fläche aus Efferz et al. (2024a)

Werden jedoch die Eigenspannungen an der Kante betrachtet, so bildet sich eine umlaufende Druckspannung um die Kanten aus. Aus Gleichgewichtsgründen wird eine der beiden Hauptspannung null. Die andere Hauptspannung ist wie in Abbildung 5 gezeigt die Kantenmembranspannung, die durch eine Umformung des Wertheim'schen Gesetzes (Aben and Guillemet 1993) berechnet werden kann. Die Berechnungsformel lautet:

$$\sigma_{edge} = \frac{\delta * \lambda}{t * C}$$

Dabei ist t die gemessene Dicke des Probekörpers, während die spannungsoptische Konstante C materialabhängig ist. In diesen Untersuchungen dieses Forschungsprojekts wurde – analog zur Messung der Oberflächenspannung – ein Wert von 2,7 Brewster verwendet (GlasStress Ltd. 2013). Die Wellenlänge λ entspricht dem Licht des spannungsoptischen Messgeräts, mit dem die relative Verzögerung δ an der Glaskante erfasst wird.

Messung mit Linescanner

Zur Bestimmung der Kantenmembranspannung innerhalb der Labormessungen wurde der Softsolution Linescanner der Hochschule München (siehe Abbildung 6) und der Softsolution Culletscanner der TU Darmstadt verwendet, um die zerstörungsfreien, spannungsoptischen Messungen der Glasscheiben mittels der Multiplen Wellenlängen Methode durchzuführen.

Die Multiple Wellenlängen Methode arbeitet mit der simultanen Erzeugung von Isochromatenaufnahmen, um Verzögerungen in der Glasfläche auf Basis von Intensitätsänderungen durch einen Auswerte-Algorithmus zu berechnen. Die Methode ist jedoch vorrangig für geringe Ver-

zögerungen innerhalb der Fläche effizient einsetzbar. Im Vergleich dazu zeigen sich Verzögerungen an den Kanten um ein Vielfaches erhöht, was die Auswertung nach dem vorhandenen Algorithmus nicht möglich macht.

Abbildung 6: Softsolution Linescanner der Hochschule München

Beispielhaft ist in Abbildung 7 eine Gegenüberstellung der zugeschnittenen Isochromatenbilder der Probekörper mit dem Vorspanngrad ESG Standard gezeigt. Es ist zu beobachten, dass mit ansteigender Dicke die Anzahl der Randisochromaten zunimmt. Die Oberflächendruckspannung ($\sigma_{surface}$) entspricht dem Vorspanngrad ESG Standard. Die Kantenmembranspannung (σ_{edge}) in der Abbildung stellt den automatisch berechneten Wert vom Softsolution Linescanner dar, der zu Anfang des Projekts bei dünnen Gläsern (4 mm, 6 mm) nicht ermittelt werden kann, da die wenigen Isochromaten für die zugrunde liegende Extrapolation zur Kante nicht ausreichen bzw. die Berechnung fehleranfällig ist.

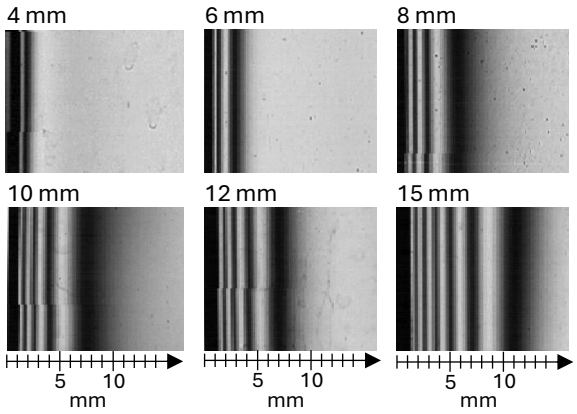


Abbildung 7: Vergleich der Randisochromaten für den Vorspanngrad ESG Standard über alle Dicken hinweg aus Efferz et al. (2024b)

Für die Auswertung der Kantenmembranspannung hat die Hochschule München eine Auswertemethode entwickelt, deren Vorgehen in Abbildung 8 dargestellt ist und im Detail in Efferz et al. (2024a) beschrieben ist. Der Linescanner erfasst pro Glasscheibe drei Isochromatenaufnahmen, welche von der jeweiligen Wellenlänge des Lichts (blau, grün und rot) abhängen. Ein

Beispiel einer vollflächigen Isochromatenaufnahme der Wellenlänge 442,35 nm zeigt Abbildung 8a. Anhand dieser Bilder werden die Intensitätsextrema der Randisochromaten an der Glaskante durch Abzählen ermittelt. Dabei wird aufgrund des Hellfeldsaufbaus des Linescanner mit der 0,5. Isochromate begonnen, welche schwarz dargestellt ist, siehe Abbildung 8b. Die Isochromatenordnungen werden entsprechend ihrer Wellenlänge zugeordnet, um die Verzögerung in Nanometer an diesem Punkt zu erhalten (Schaaf et al. 2017).

Zur Bestimmung der Verzögerungen werden die Extrema mit angemessenem Abstand zur Ecke entlang von 50 definierten Schnitten ausgewertet (Abbildung 8a) und abhängig ihrer Position zur Kante in einem Diagramm abgebildet (Abbildung 8c). Die Fase, welche durch die Kantenbearbeitung des Glases entsteht, ist in den Isochromatenaufnahmen nicht transparent, da die schräge Fläche das Licht des Messgeräts streut. Der Fasenbereich wird stattdessen als schwarzer Balken dargestellt, siehe Abbildung 8b. Dies bedeutet, dass in diesem Bereich keine Isochromaten und somit kein Verzögerungswerte gemessen werden können. Daher wird über die Datenpunkte, die bis zur Fase ermittelt werden können, eine mathematische Fittingfunktion gelegt, die eine Extrapolation bis zur Kante ermöglicht. Danach kann an der äußersten Stelle die maximale Verzögerung abgelesen werden, um die Kantenmembranspannung zu berechnen.

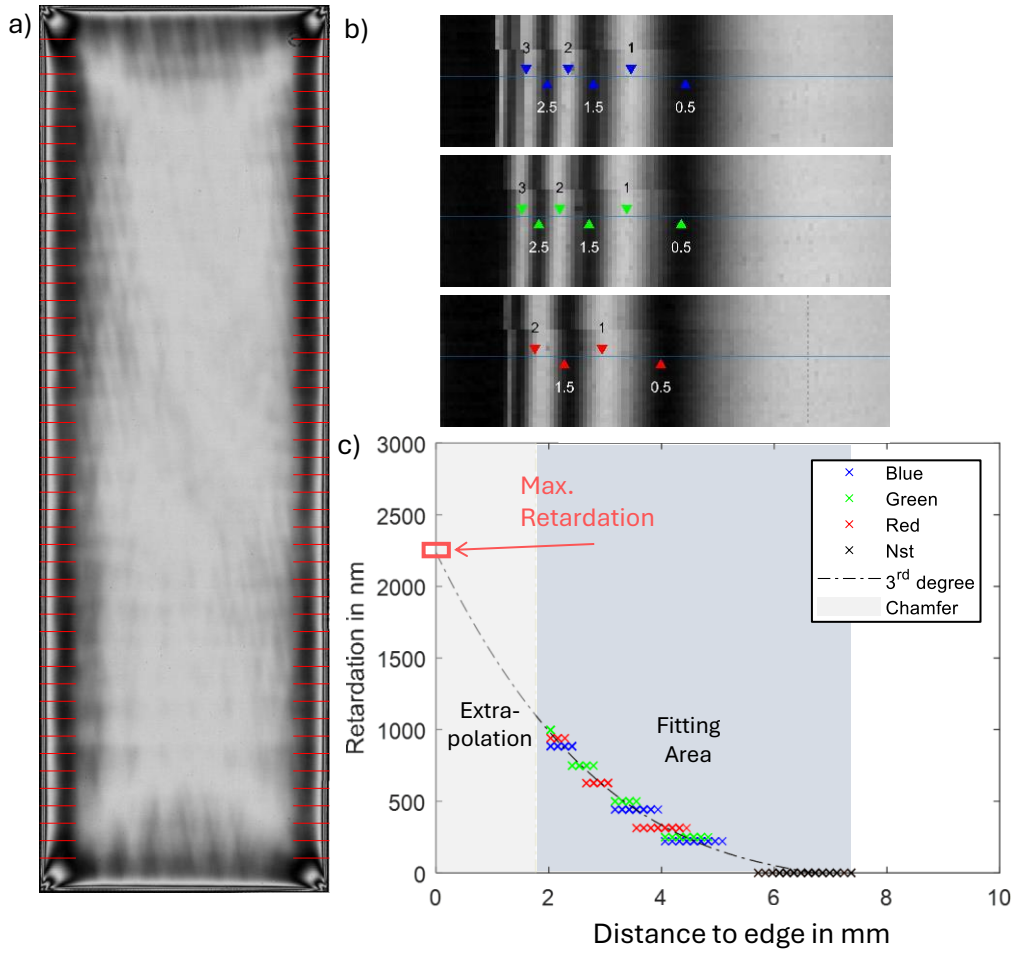


Abbildung 8: a) Auswerteschnitte an den Längskanten der Probekörper gezeigt an Isochromatenbild des Linescanners, b) Auswertemethode Abzählen der Intensitätsextrema der Randisochromaten der jeweiligen Wellenlänge, c) Diagramm zur Extrapolation und Ablesen der maximalen Verzögerung. Aus Efferz et al. 2024b, Efferz et al. 2024a.

Extrapolationsverhalten

Um die Genauigkeit der Extremamethode zu verifizieren, wurden mithilfe eines anderen Messgeräts StrainScope flex von ilis (siehe Abbildung 9a) Vergleichsuntersuchungen zur Kantenmembranspannung an den Probekörpern durchgeführt. Der StrainScope flex beruht auf dem phase-shifting Ansatz, der dabei nicht nur die Quantifizierung der Verzögerungen erfasst, sondern zusätzlich die Richtungen der Spannungen ermöglicht und zusätzlich einen größeren Messbereich aufweist. Im Gegensatz zum Linescanner können orthogonal zur Kante die Verzögerungen als annähernd kontinuierlicher Verlauf aufgenommen werden. Dies hat den Vorteil, dass durchgängig Messpunkte vorhanden sind, die den Verzögerungsverlauf realistischer abbilden. Allerdings kann der StrainScope flex nur zur punktuellen Messung bei einer Glasscheibe eingesetzt werden, da keine vollflächigen Aufnahmen möglich sind.

Die Fasenbearbeitung stellt auch dieses Messgerät vor Herausforderungen, da die Verzögerung an schrägen Oberflächen wie an der Fase nicht adäquat gemessen werden kann. Der Lichteinfall, der bei der Fase nicht senkrecht erfolgt, sorgt hier für Verfälschungen im Verlauf der Verzögerungen, die eine Auswertung an dieser Stelle nicht zulassen, wie Abbildung 9b im Bereich des grau hinterlegten Bereichs des Diagramms zeigt. Um die maximale Verzögerung an der Kante zu bestimmen, bilden die Messpunkte bis zur Fase die Basis der Fitting-Methode.

Zur verlässlichen Auswertung der Kantenmembranspannung wurde deshalb in Parameterstudien für verschiedene Glasdicken und Vorspanngrade eine geeignete Fitting-Methode gesucht. Basierend auf der vorangehenden Literaturrecherche wurden Polynome zweiten bis vierten Grades in Betracht gezogen. Die Polynome dritten Grades haben sich dabei als besonders robust herausgestellt. Sie können die gemessenen Verzögerungspunkte bis zur Fase genau nachbilden, ohne die große Streuungsanfälligkeit, die für Polynome vierten Grades charakteristisch ist, aufzuweisen. Folglich wird für die Erfassung der Messpunkte eine Fitting-Funktion dritten Grades herangezogen, die anschließend bis zur Kante extrapoliert wird, um die maximale Verzögerung zu ermitteln. Diese Extrapolation-Funktion wird auch für die Auswertung der Linescanner-Daten verwendet, die jedoch weniger Messpunkte als der kontinuierliche Verlauf des StrainScope flex beinhalten.

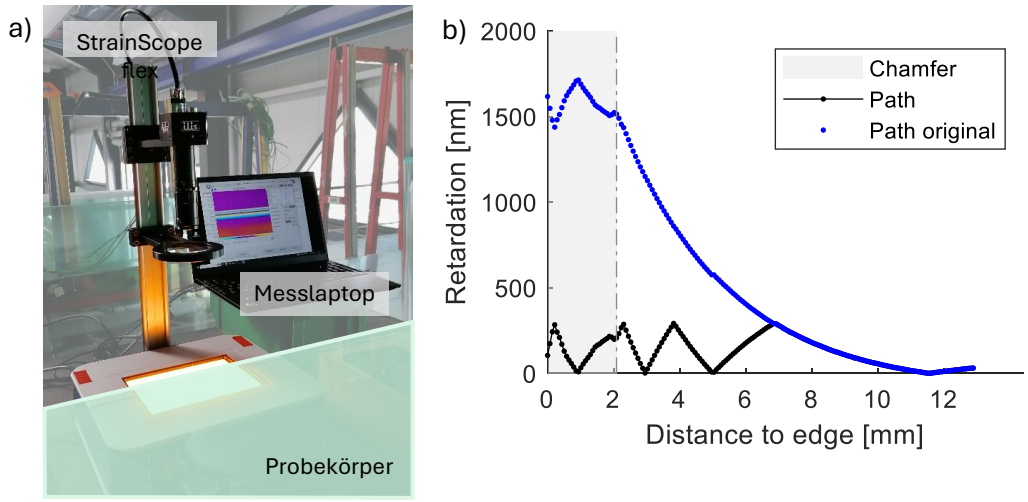


Abbildung 9: a) Messinstrument des StrainScope flex zur Messung der Kantenmembranspannung, b) Zeigen eines Schnitts durch die Scheibe mit Verlauf der Verzögerung und Verzerrungen im Bereich der Kante.

Das Polynom 3. Grades wird durch vier Koeffizienten p_1 bis p_4 bestimmt, die den Verlauf der Funktion durch Stauchung, Verschiebung und Kurvenverhalten definieren:

$$f(x) = p_1x^3 + p_2x^2 + p_3x + p_4$$

Die Koeffizienten wurden abhängig der Vorspannstufen und Glasdicken ermittelt und liefern nun die Basis, um die für die Extrapolation notwendigen Grenzbedingungen für die Auswertung der Linescanner-Daten festzulegen. Zusammenfassend ermöglicht die Anpassung der Fitting-Methode mittels eines Polynoms dritten Grades eine genauere und zuverlässigere Bestimmung der Kantenmembranspannung.

Ergebnisse

Die TU Darmstadt führte ihre Messungen zur Kantenmembranspannung mit dem Messgerät Softsolution Culletscanner, welches ein Messinstrument zur Erfassung von Bruchbildern von Glas ist, jedoch mit dem Softwarepaket “Linescanner” ebenfalls Anisotropien und Kantenmembranspannungen auswerten kann, durch. Das gegenwärtig implementierte Setup des Scanners an der TU Darmstadt ist auf die Aufnahme von lediglich zwei Wellenlängen begrenzt. Im Vergleich zur Hochschule München sind also keine Extremwerte der roten Wellenlänge vorhanden.

In der komparativen Analyse seitens der Hochschule München mit den Ergebnissen, die unter Anwendung von drei Wellenlängen gewonnen wurden, wurde festgestellt, dass die Abwesenheit der roten Wellenlänge bedeutende Einschränkungen mit sich bringen kann, vor allem bei dünneren Glasdicken. Aufgrund der fehlenden roten Stützstellen muss die Basis der Fitting-Funktion mit wenigeren Punkten bestimmt werden. Die reduzierte Anzahl an Datenpunkten impliziert eine erhöhte Anfälligkeit für Streuungen in der Extrapolation der Messwerte. Diese Tendenz ist insbesondere bei der Betrachtung der ausgewerteten Kantenmembranspannungen im direkten Vergleich der Scandaten der TU Darmstadt und Hochschule München ersichtlich.

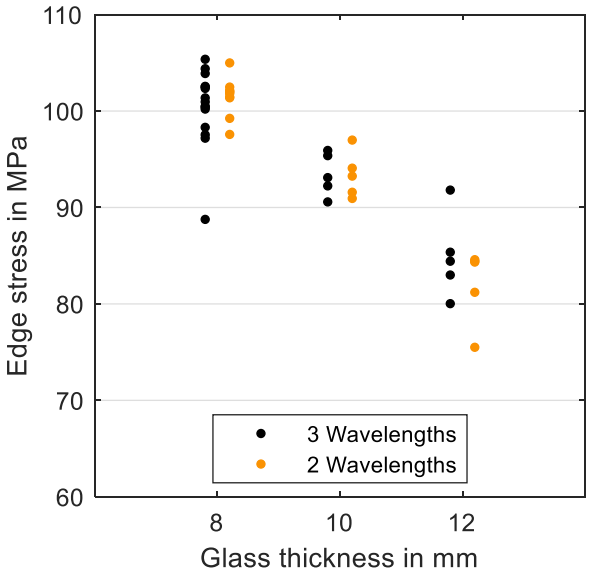


Abbildung 10: Vergleich der Kantenmembranspannungswerte abhängig der Messgeräte mit zwei und drei Wellenlängen bzw. Isochromatenaufnahmen mit ESG-Prüfkörpern des Herstellers B aus Efferz et al. (2024b)

Bei der Auswertung der Kantenmembranspannung zeigte sich, dass für bestimmte Proben keine verlässliche Auswertung möglich war:

- Bei den 4 mm dicken Probekörpern war eine Bestimmung der Kantenmembranspannung nicht durchführbar, da die Anzahl der Randisochromaten, die mit dem Scanner aufgenommen wurden, zu gering war. Dies führte zu unzureichenden Stützstellen, um

den Verzögerungsverlauf zuverlässig zu inter- und dann zu extrapolieren und somit die Spannung an der Kante zu ermitteln.

- Ebenso war für die rand-entschichteten und gefärbten Probekörper keine Auswertung möglich. In diesen Fällen wurde die Transmission durch die Beschichtung und Einfärbung verändert, sodass die Messergebnisse nicht mit den üblichen Auswerteverfahren interpretiert werden konnten. Diese Einschränkungen verdeutlichen, dass die Messbarkeit der Kantenmembranspannung stark von den optischen Eigenschaften der Probekörper abhängt und Anpassungen der Messmethodik erforderlich sein können.

Die restliche Auswertung wird daher für die unbeschichteten Clear Float Probekörper durchgeführt.

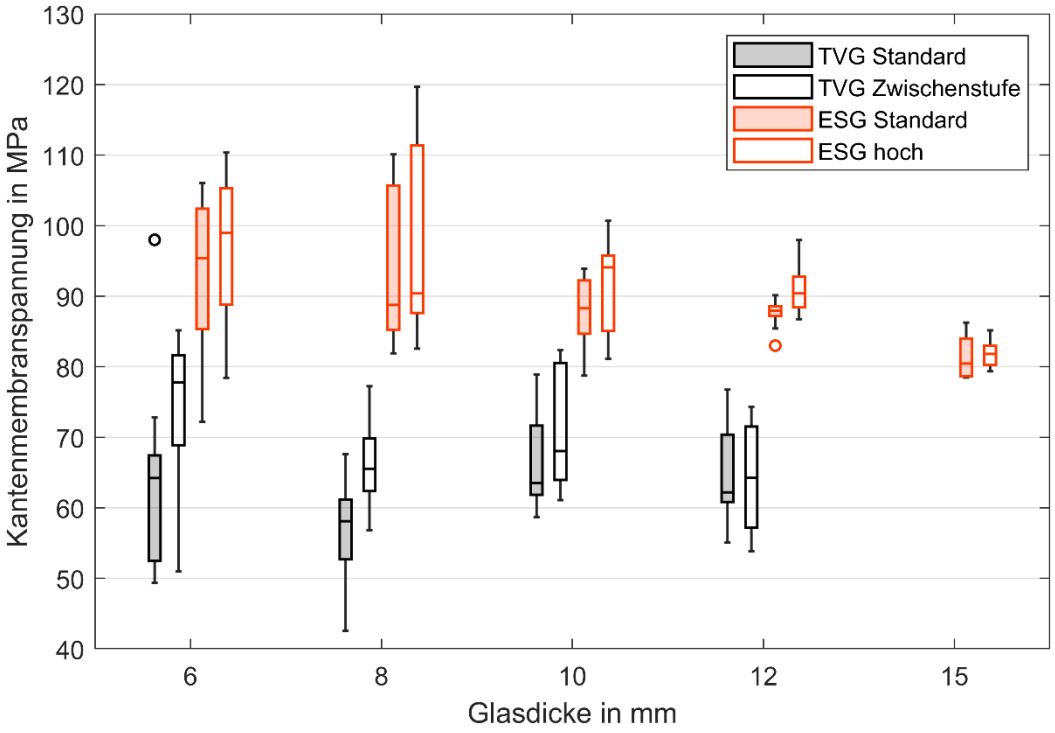


Abbildung 11: Kantenmembranspannung der unbeschichteten Probekörper

Abbildung 11 sind die Werte der Kantenmembranspannung der unbeschichteten Probekörper als Boxplots aufgeteilt nach Vorspanngrad dargestellt. Es ist eine klare Trennung zwischen den ESG und TVG-Probekörpern zu sehen. Innerhalb der Vorspanngrade von ESG ist zu beobachten, dass die sich die Vorspanngrade überlappen.

Abbildung 12 zeigt keinen wesentlichen Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Kantenmembranspannung.

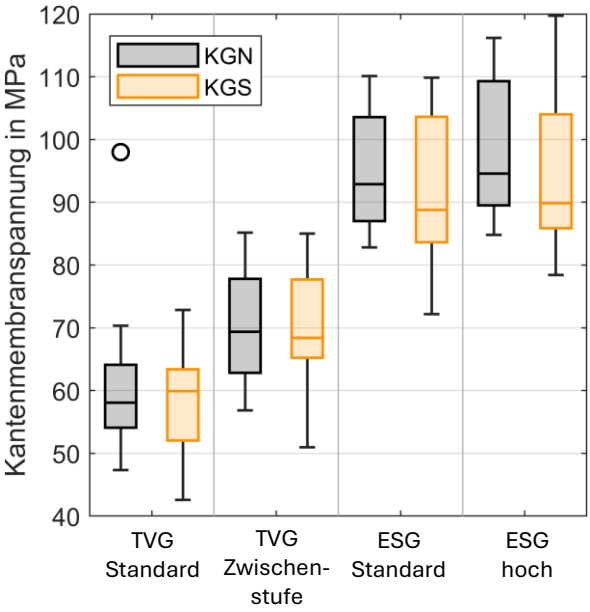


Abbildung 12: Kantenmembranspannung mit Unterscheidung nach Kantenbearbeitung KGN und KGS

1.2.4 Messung und Ergebnisse der Oberflächendruckspannung

Die Messungen der Oberflächendruckspannung werden mithilfe des Messgeräts SCALP von GlasStress Ltd (Abbildung 13a) an drei Messpunkten (Abbildung 13b) an mindestens zwei Scheiben je Prüfserie durchgeführt. Pro Messpunkt wird in mindestens drei Richtungen (Thiele et al. 2022, Efferz et al. 2024b) gemessen, um die Hauptspannungen σ_1 und σ_2 zu berechnen.

Die im Anschluss gezeigten Werte der Oberflächendruckspannung sind der Mittelwert der Hauptspannung σ_1 der drei Messpunkte je Probekörper.

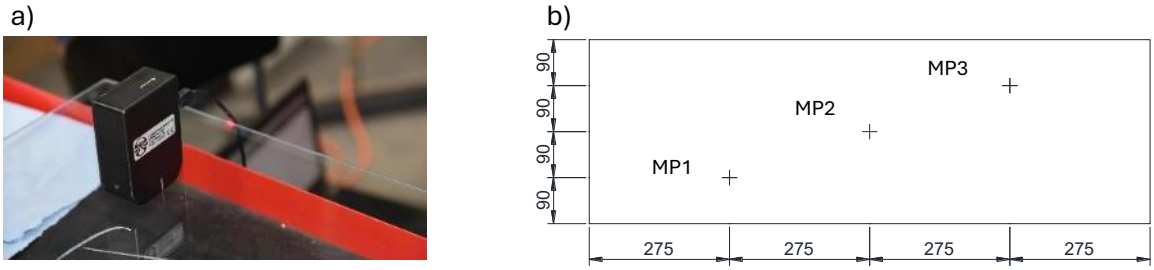


Abbildung 13: a) Messinstrument SCALP-05 zur Messung der Oberflächendruckspannung an den b) drei Messpunkten an den Probekörpern.

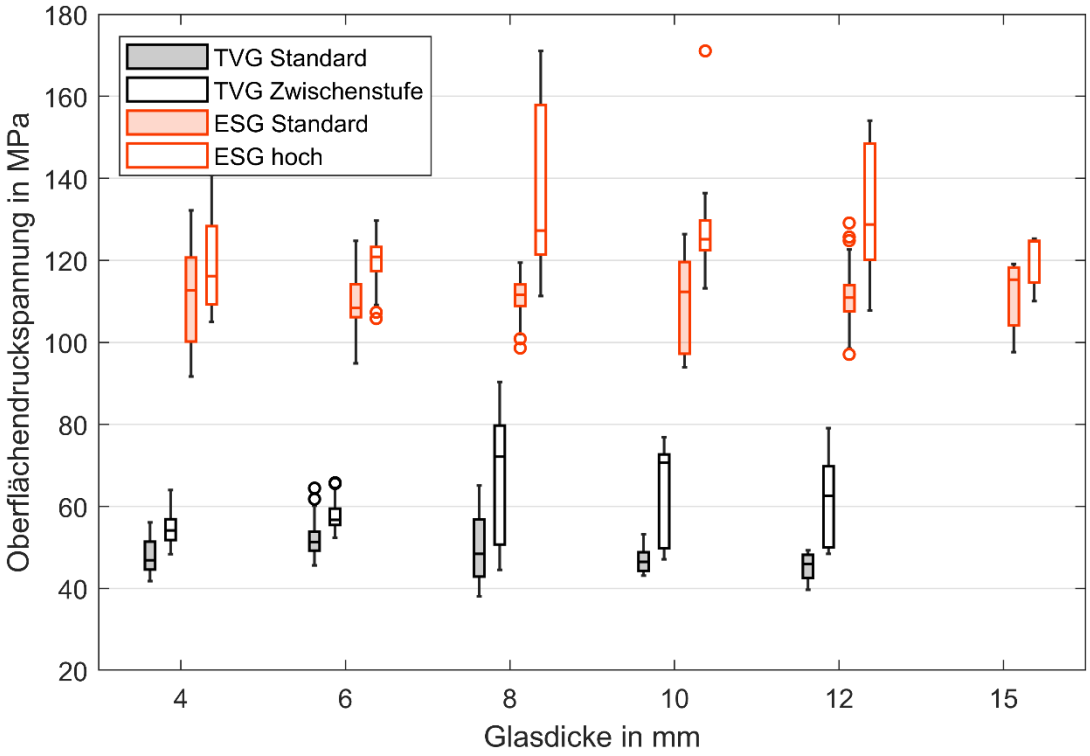


Abbildung 14: Oberflächendruckspannung der unbeschichteten Probekörper

In Abbildung 14 erkennt man einen deutlichen Unterschied in den Oberflächendruckspannungen von unbeschichtetem TVG und ESG. Auch die Abstufung zwischen “Standard” und “hoch” bei ESG bzw. “Standard” und “Zwischenstufe” bei TVG ist ab einer Glasdicke von 8 mm deutlich sichtbar. Bei geringeren Glasdicken (4 mm und 6 mm) sind die Unterschiede deutlich geringer.

In Abbildung 15 wird ersichtlich, dass sowohl die Kantenbearbeitung als auch die Glasart (clear, eingefärbt und rand-entschichtet) keinen erheblichen Einfluss auf die Oberflächendruckspannung haben.

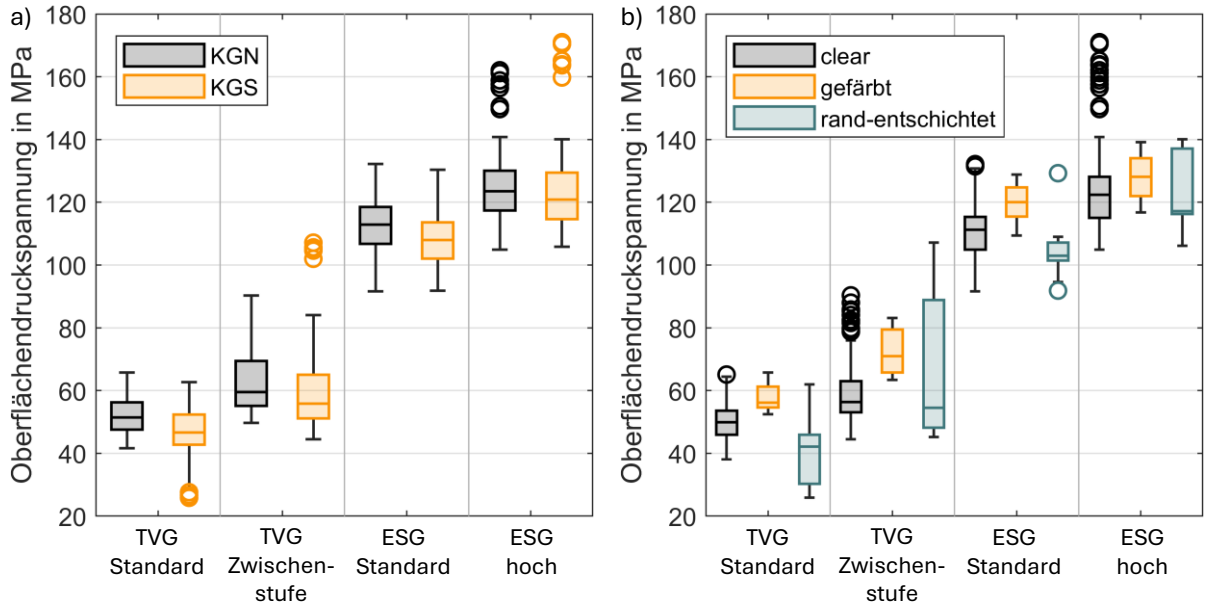


Abbildung 15: Oberflächendruckspannung mit Unterscheidung nach a) Kantenbearbeitung KGN und KGS; b) Glasart Clear Float, eingefärbt und rand-entschichtet

1.2.5 Bruchbilduntersuchungen

Die Bruchbilduntersuchungen wurden an fünf Probekörpern pro Serie durchgeführt. Zum Anschlagen des Bruchs wurde ein federgespannter Körner verwendet. Der Anschlagpunkt war entsprechend der Norm EN 12150-1 13 mm von der Kante entfernt. Die Auswertung des Bruchbildes erfolgte mit dem Culletscanner von Softsolution (siehe Abbildung 16). Bei den ESG-Probekörpern wird automatisch die Stelle mit dem gröbsten Bruchbild ermittelt und die Bruchstücke in einem Quadrat von 50 mm x 50 mm gezählt. Zusätzlich gibt das System die Länge und Position des längsten Bruchstücks aus.

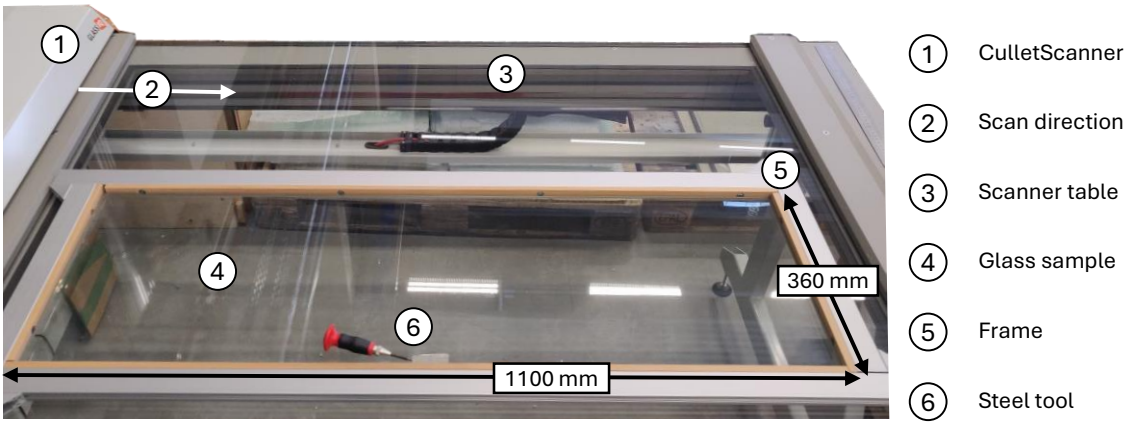


Abbildung 16: Scanner-Tisch des Softsolution Culletscanners mit Probekörper

Abbildung 17 zeigt exemplarisch das Bruchbild und die Position des Auszählquadrates im Bereich des gröbsten Bruchmusters.

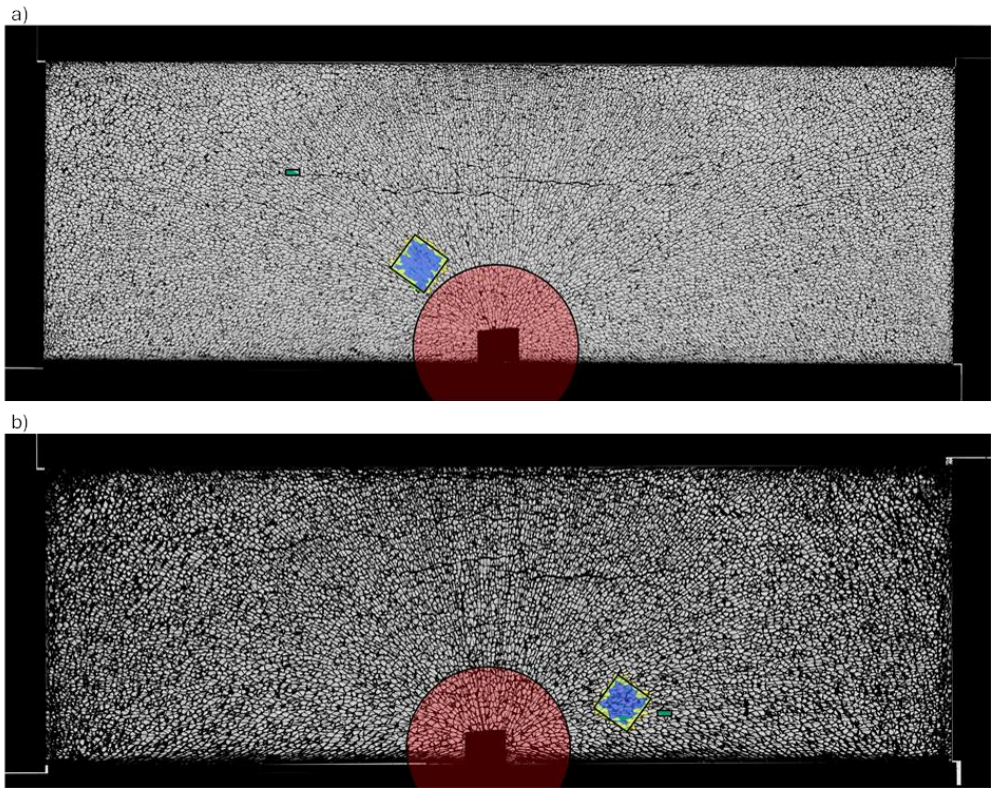


Abbildung 17: Bruchmuster a) eines 6 mm Probekörpers mit 97,5 Bruchstücken und einer Oberflächenspannung von 116 MPa; b) eines 12 mm Probekörpers mit 76,5 Bruchstücken und einer Oberflächenspannung von 110 MPa

Abbildung 18 zeigt, dass die “ESG hoch (E2)” Serien, die nach Norm für Nenn-Glasdicken zwischen 4 mm und 12 mm geforderten 40 Bruchstücke innerhalb der 50 mm x 50 mm Maske deutlich überschreiten. Die “ESG-Standard (E1)” Probekörper weisen vergleichsweise weniger Bruchstücke auf. Bis auf die 4 mm dicken Gläser, haben alle unbeschichteten ESG-Probekörper die Anforderung an die Bruchstückanzahl deutlich erfüllt.

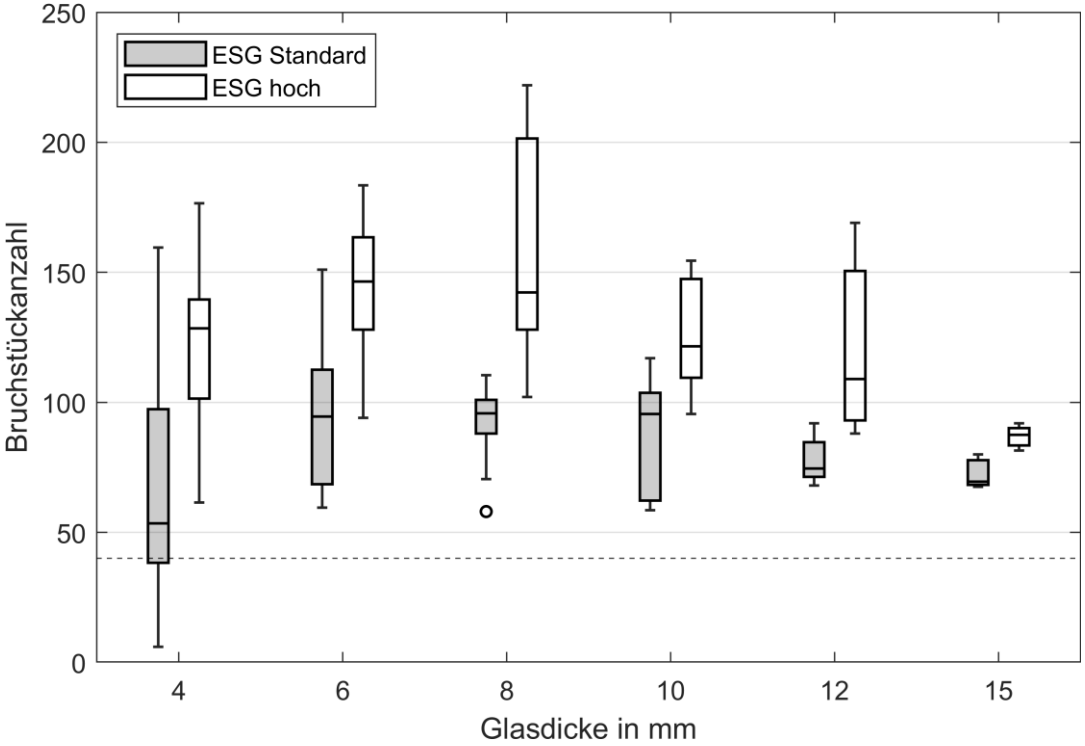


Abbildung 18: Boxplots der Bruchstückanzahl der unbeschichteten Probekörper und Kennzeichnung der für ESG geforderten 40 Bruchstücke

Ein Einfluss abhängig von Kantenbearbeitung und Glasart (clear, gefärbt, randentschichtet) auf das Bruchbild konnte nicht beobachtet werden (siehe Abbildung 19a und b). Bei genauerer Betrachtung der randentschichteten 4 mm Probekörper aus den Vorspannleveln „ESG-Standard“ und „ESG hoch“ zeigt sich, dass die in der 50 mm × 50 mm Maske geforderte Mindestanzahl von 40 Bruchstücken teilweise nicht erreicht wird. So lag der Mittelwert einer Prüfserie aus der Reihe „ESG-Standard“ lediglich bei 12,7 Bruchstücken, während der niedrigste Wert selbst in der Reihe „ESG hoch“ bei 22,8 lag. Es ist davon auszugehen, dass die Beschichtung einen Einfluss auf das Vorspannverhalten bei dünnen Gläsern hat. Wechselwirkungen zwischen Schichtaufbau, Wärmeaufnahme und thermischer Spannungsverteilung können dazu beitragen, dass das gewünschte Bruchbild bei beschichteten, dünnen Gläsern schwerer zu erzielen ist.

Die Ergebnisse zu den dünnen Gläsern stehen im Einklang mit Erkenntnissen aus Literatur und Praxis im Vorspannprozess: Es ist bekannt, dass dünne Gläser eine höhere Vorspannung benötigen, um das geforderte Fragmentierungsverhalten zu erzielen. Da die technische Machbarkeit bei sehr dünnem Glas an ihre Grenzen stößt, wird diesem Umstand auch in der Norm EN 12150-1 Rechnung getragen. Für Gläser mit einer Dicke von 2 mm oder 3 mm wird dort eine deutlich geringere Mindestanzahl von nur 15 Bruchstücken innerhalb des Prüfquadrats gefordert.

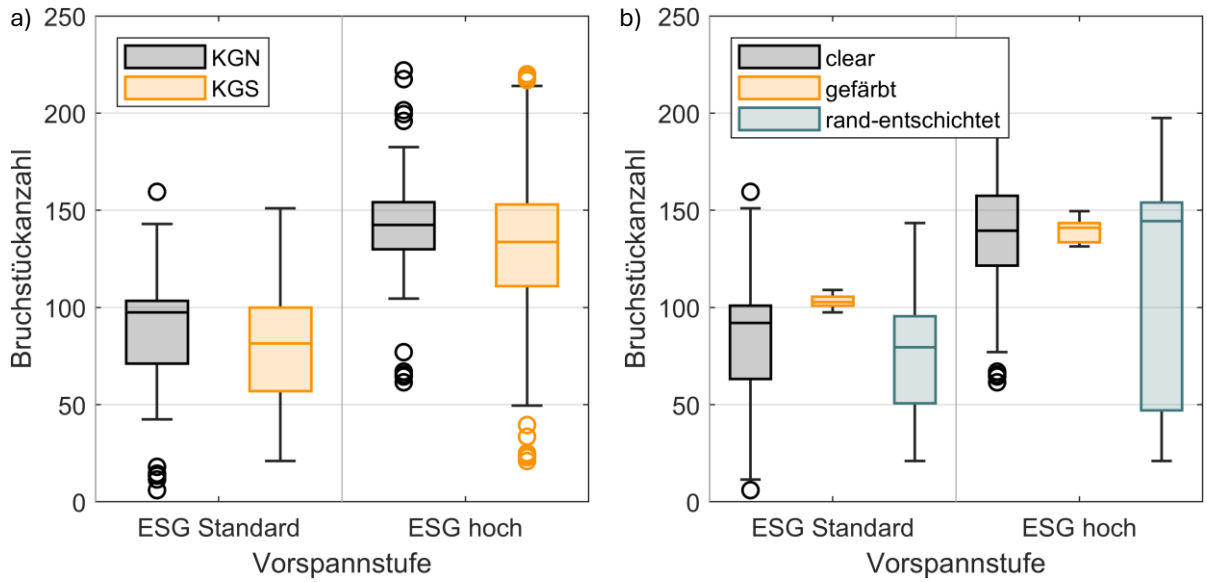


Abbildung 19: Bruchstückanzahl der 4 mm bis 8 mm PK mit Unterscheidung nach a) Kantenbearbeitung KGN und KGS; b) Glasart Clear Float, eingefärbt und rand-entschichtet

1.2.6 Vierschneiden-Verfahren zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit

Gemäß der europäischen Norm EN 1288-3 kann die Bestimmung der Biegezugfestigkeit durch den Einsatz des Vierschneiden-Verfahrens erfolgen. Während des Versuchs wird die Glasscheibe auf einer Spannweite von 1000 mm zwischen zwei unterstützenden Rollen positioniert. Zur Einleitung der Bruchlast werden zwei zusätzliche Biegerollen, die in einem Abstand von 200 mm zueinander angebracht sind, verwendet. Die Bruchlast wird im Versuch bis zum Bruch der Probe aufgebracht, wobei der entsprechende Versuchsaufbau in Abbildung 20 dargestellt ist. Zusätzlich wurde bei einigen Probekörpern eine transparente Folie im Bereich zwischen den Biegerollen geklebt, um die Bruchstücke nach Bruch zusammenzuhalten. Damit können die Bruchursprünge an den Scheiben detektiert werden, um Rückschlüsse auf den Versagensort zu erhalten.

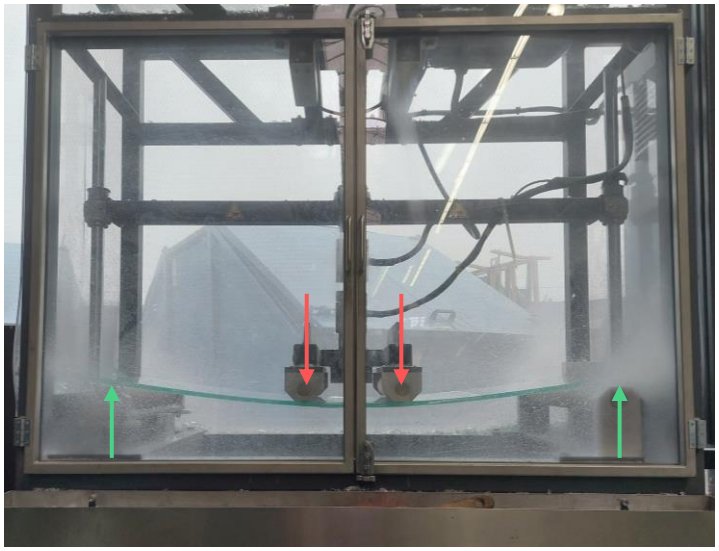


Abbildung 20: Prüfmaschine des Vierschneiden-Verfahrens mit Kennzeichnung der Auflager- (grün) und Biegerollen (rot)

Zur Berechnung der Biegespannung werden die ermittelte Bruchlast sowie die aus Messungen gewonnenen Dimensionen der Breite und Dicke der Glasprobe herangezogen, wie in EN 1288-3 (2000) beschrieben. Die zerstörenden Untersuchungen sollen die Biegefestigkeit als Qualitätsmerkmal des Glasprodukt sicherstellen. Daher bilden sie für die Korrelation mit den spannungsoptischen Messungen einen wichtigen Faktor.

Abbildung 21 zeigt die Bruchspannung für die unbeschichteten Probekörper abhängig von Glasdicke und Vorspannstufe als Boxplots dar. Zusätzlich sind die Grenzwerte der Biegezugfestigkeiten für TVG von 70 MPa als schwarze Linie und für ESG von 120 MPa als rote Linie eingezeichnet.

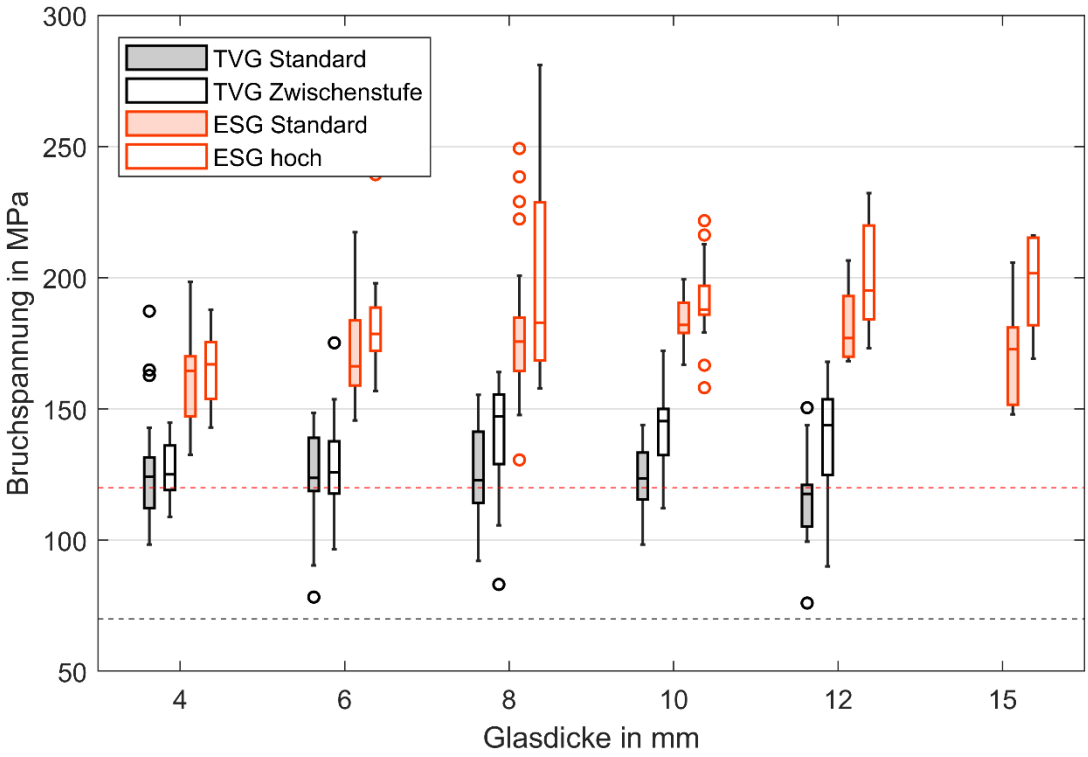


Abbildung 21: Boxplots der Bruchspannung der unbeschichteten Probekörper und Kennzeichnung der charakteristischen Biegezugfestigkeiten von ESG mit 120 MPa (rote Linie) und TVG mit 70 MPa (schwarze Linie)

In Abbildung 22a wird der Einfluss der Kantenbearbeitung dargestellt. Abbildung 22b zeigt den Vergleich von unbeschichtetem, eingefärbten und rand-entschichtetem Glas.

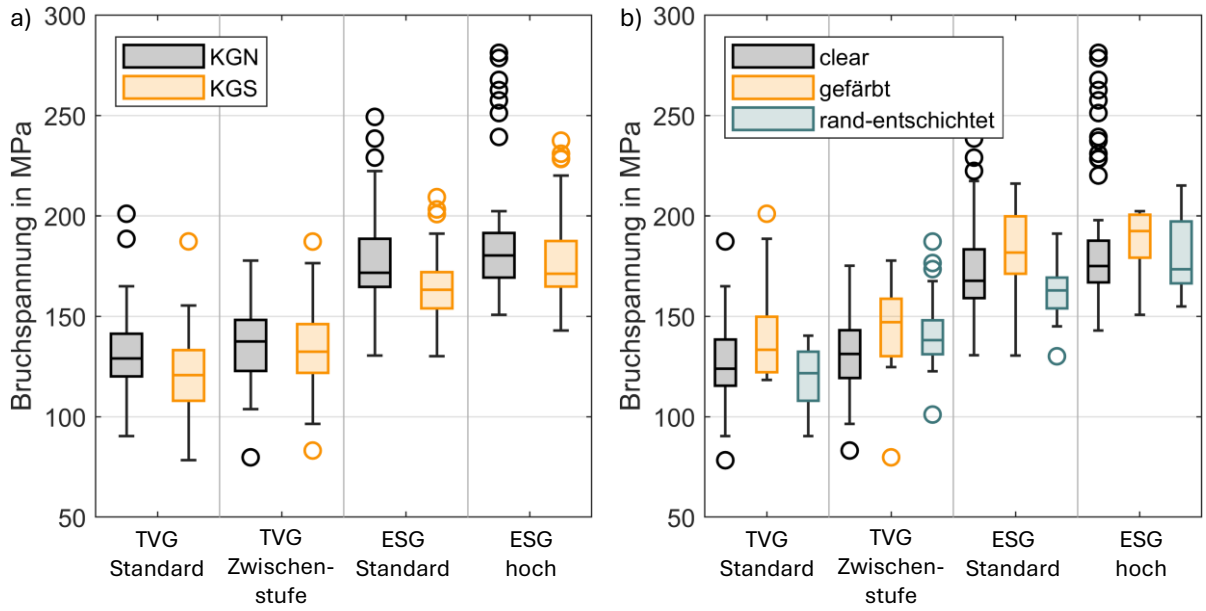


Abbildung 22: Bruchspannung der 4 mm bis 8 mm PK mit Unterscheidung nach a) Kantenbearbeitung KGN und KGS; b) Glasart Clear Float, eingefärbt und rand-entschichtet

1.3 Vergleich von simulierten Glasbruchmustern mit realen Bruchbildern

Im Rahmen des Projekts NEMA erfolgte eine umfassende Untersuchung zur Vergleichbarkeit von simulierten Glasbruchmustern mit realen Bruchbildern. Zunächst wurde hierfür das Verfahren BREAK („Bayesian Reconstruction and Prediction of Glass Breakage Patterns“) angewendet. BREAK basiert auf der statistischen Rekonstruktion von Glasbruchmustern mittels Bayesscher Methoden und Voronoi-Tessellation (Kraus et al. 2019, Kraus 2019). Dieses Verfahren ermöglicht, auf Grundlage der experimentell bestimmten räumlichen Verteilung von Fragmentzentren, realistische Bruchmuster zu generieren. Die Genauigkeit von BREAK zeigte sich insbesondere bei der Wiedergabe statistischer Mittelwerte, wie beispielsweise der durchschnittlichen Fragmentgröße, Fragmentintensität und der globalen statistischen Verteilung der Fragmentgeometrien (Abbildung 23). Trotz dieser Stärken offenbarte BREAK jedoch deutliche Schwächen hinsichtlich der realistischen Darstellung lokaler Fragmentverteilungen und spezifischer Formmerkmale, insbesondere bei hohen thermischen Vorspannungen und komplexen Bruchmustern (Pourmoghaddam et al. 2019).

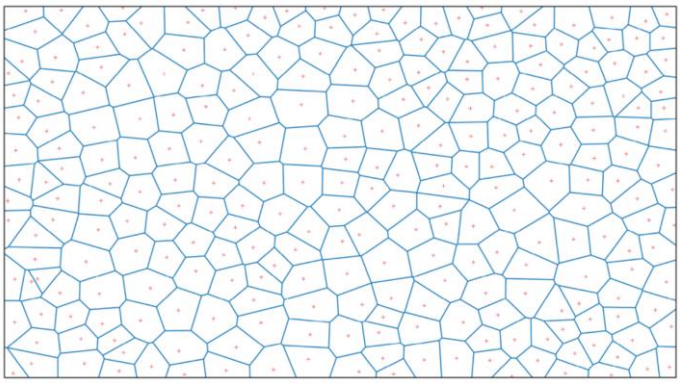


Abbildung 23: Beispiel einer Voronoi-Tessellierung von Punktverteilungen (Pourmoghaddam et al. 2019)

Um diese Schwächen zu beheben, wurde an der TU Darmstadt der erweiterte Ansatz ALFA (Advanced Layered Fracture Analysis) entwickelt (Bohmann et al. 2025). ALFA basiert auf einer intensiven räumlichen und geometrischen Auswertung experimenteller Bruchbilder, die

mit hochauflösenden Bildverarbeitungstechniken erfasst wurden. Zunächst erfolgt eine umfangreiche statistische Analyse der experimentellen Daten, um detaillierte Informationen über Fragmentgrößen, -formen und deren räumliche Verteilung zu erhalten (Abbildung 24). Dabei werden spezielle Algorithmen eingesetzt, die insbesondere schwierige Fälle vertikal verlaufender Risse und minimaler Fragmentabstände zuverlässig identifizieren (Bohmann et al. 2025).

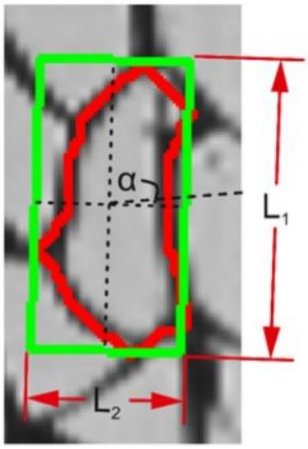


Abbildung 24: Annäherung der Fragmentmaße durch Rechtecke mit minimaler Fläche und den Seitenlängen L_1 und L_2 (Bohmann et al. 2025)

ALFA baut auf ähnlichen stochastischen Grundlagen wie BREAK auf, geht jedoch weiter, indem es die räumlichen Eigenschaften von Bruchbildern umfassender und genauer berücksichtigt. Eine wesentliche methodische Innovation von ALFA gegenüber dem bisherigen BREAK-Verfahren besteht in der Einführung eines modifizierten Matern Hard-Core-Prozesses (Baddeley et al. 2015). Während BREAK eine homogene Punktverteilung auf der gesamten Glasfläche vornimmt, implementiert ALFA eine radiale, zonierte Verteilung der Fragmentzentren. Diese berücksichtigt explizit lokale Variationen der Fragmentgrößen, -formen und -orientierungen abhängig von der Entfernung zur initialen Bruchstelle (Abbildung 25). Dadurch werden Unterschiede im Bruchbild, die sich aus den unterschiedlichen mechanischen und energetischen Bedingungen in Nähe der Bruchinitiation und den Randzonen ergeben, besser erfasst und abgebildet.

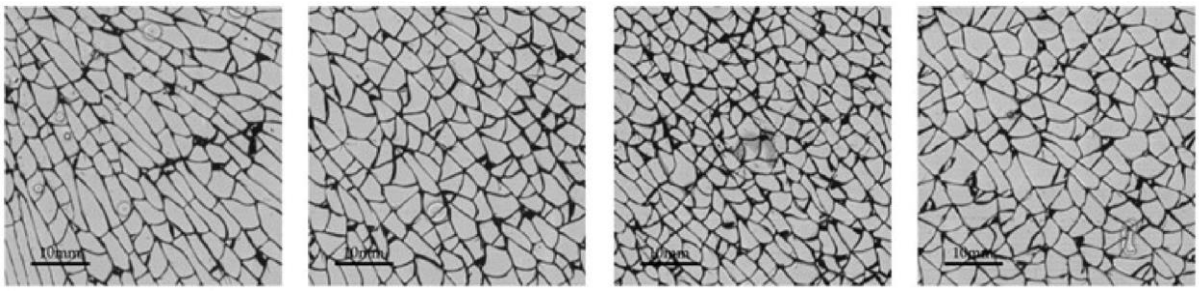


Abbildung 25: Frakturmuster mit unterschiedlichem Abstand zum Bruchursprung (Bohmann et al. 2025)

Zudem ersetzt ALFA die Voronoi-Tessellation durch eine geometrieorientierte Erstellung von Fragmentformen auf Basis prototypischer Fragmentgeometrien. Die Methodik von ALFA basiert auf einem mehrstufigen Ansatz: Zunächst erfolgt die Ermittlung der Bruchstückzentren mithilfe eines stochastischen Punktprozesses, dessen Intensität variabel und abhängig von der Distanz zum initialen Bruchursprung ist (Abbildung 26).

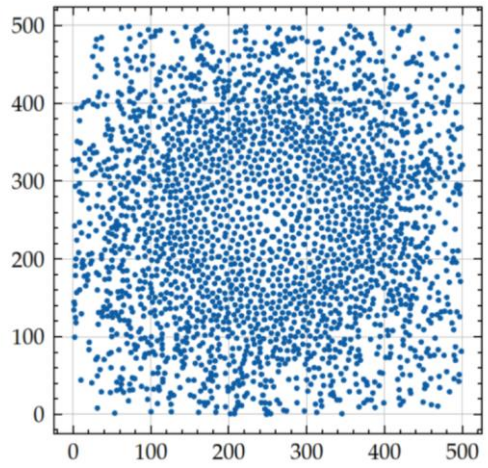


Abbildung 26: Beispielhafte Verteilung unter Verwendung des modifizierten MHCP (Matern Hard-Core Process) (Bohmann et al. 2025)

Anschließend werden mit Hilfe einer speziell entwickelten Schätzfunktion lokale Dichteverteilungen bestimmt, um die Bruchstückgröße realistisch zu modellieren. Im letzten Schritt generiert ALFA daraus Bruchstückgeometrien, die die beobachteten realen Bruchbilder präziser abbilden als das bisherige Verfahren. Diese detaillierte Modellierung erlaubt es ALFA, räumliche Variationen und komplexe geometrische Muster besser zu erfassen (Abbildung 27).

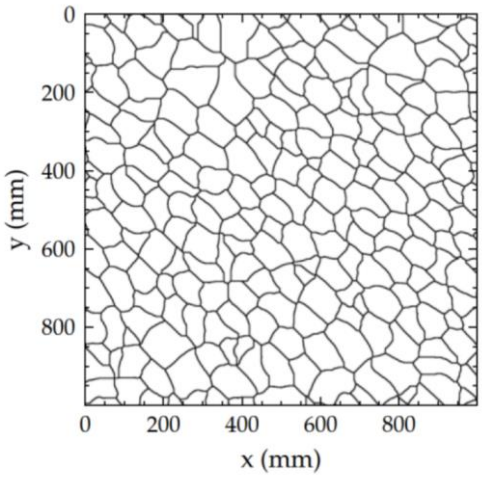
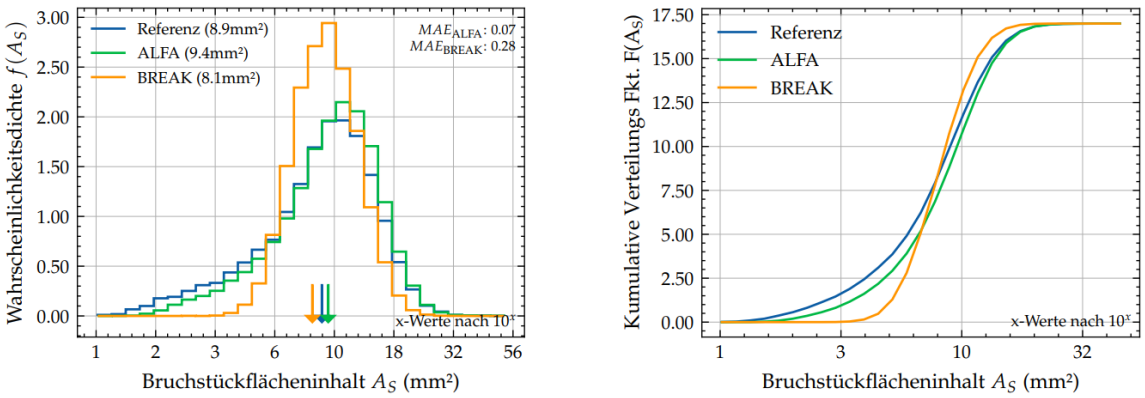


Abbildung 27: Resultierendes künstliches Bruchmuster einer räumlichen Punktverteilung nach Anwendung von Prototypgeometrien und des Watershed-Algorithmus (Bohmann et al. 2025)

Im Verlauf dieses Projekts konnte die Entwicklung von ALFA unterstützt und validiert werden. Die Validierungsergebnisse zeigten deutlich verbesserte Genauigkeiten in der Abbildung realer Bruchmuster. Besonders hervorzuheben ist die präzisere Simulation des höchstwahrscheinlichen Bruchstückflächeninhalts (Abbildung 28), bei der ALFA die Abweichungen gegenüber realen Messungen erheblich reduzieren konnte (ALFA mit 2–7% Abweichung und BREAK mit 9–22% Abweichung bei Probekörpergrößen). Zudem wurden räumliche Bruchstückeigenschaften, wie beispielsweise die Bruchintensität und Abmessungen der Bruchstücke, durch ALFA wesentlich realistischer dargestellt.



(a) Wahrscheinlichkeitsdichte **(b)** kumulative Verteilungsfunktion

Abbildung 28: Bruchstückgrößenverteilung von t = 4 mm, σ_s = 122 MPa, U = 132 Jm^{-2} (Bohmann et al. 2025)

Zusammenfassend stellt ALFA einen bedeutenden Fortschritt gegenüber dem BREAK-Verfahren dar und eröffnet neue Möglichkeiten zur realistischen Simulation und Untersuchung von Glasbruchmustern. Die verbesserten Ergebnisse bieten eine zuverlässige Grundlage für die zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätskontrolle von thermisch vorgespanntem Glas, insbesondere hinsichtlich der Bewertung von Resttragfähigkeiten und Sicherheitsanalysen in der Praxis.

1.4 Ermittlung von spannungsoptischen Grenzwerten

Um spannungsoptische Grenzwerte für die Reduzierung zerstörender Tests der Biegezugfestigkeit und des Bruchbilds für ESG zu ermitteln, wurden Quantile Regressionsmodelle untersucht.

1.4.1 Vorgehensweise

Als Datenbasis der Regressionsmodelle wurden die Mittelwerte der Messpunkte der Kantenmembranspannung und Oberflächendruckspannung σ_1 je Probekörper der Glasdicken von 6 mm bis 12 mm verwendet. Dabei bilden die Ergebnisse der spannungsoptischen Prüfverfahren die Prädiktoren zur Prognose der abhängigen Zielgröße aus den zerstörenden Prüfungen.

Die Quantile Regression hat gegenüber der klassischen linearen Regression, bei der die Regressionskoeffizienten in der Regel mit der Methode der Minimierung der Summe der quadratischen Abweichungen geschätzt werden, den Vorteil, dass der Schwerpunkt auf der Modellierung der Verteilung der abhängigen Variable. Die folgenden Auswertungen erfolgten für das 5. Quantil (τ = 0,05), da nach Eurocode 0 charakteristische Materialkennwerte mit dem 5. Quantil bestimmt werden. Damit wird den Einfluss der spannungsoptisch ermittelten Kenngrößen der Oberflächenspannung und Kantenspannung im unteren Bereich der Verteilung der zerstörenden Prüfwerte (Bruchstückanzahl, Biegespannung) untersucht. Dieser Ansatz orientiert sich an sicherheitsrelevanten Anforderungen aufgrund des Bruchverhaltens von Glas, bei denen insbesondere die Extrembereiche der Verteilung eine entscheidende Rolle spielen. Die Regressionsgerade der Quantilen Regression wird hier folgendermaßen beschrieben:

$$Y_{destr} = \beta_0 + \beta_1 * X_{photo}$$

Wobei

Y_{destr}	Vorhersage der abhängigen Variable des zerstörenden Tests (Anzahl der Bruchstücke oder Biegespannung)
β_0	Koeffizient des Interzepts

β_1 Koeffizient der Unabhängige Variable

X_{photo} Unabhängige Variable der spannungsoptischen Messung

Zur Validierung der Regressionsmodelle wurde ein Bootstrapping-Verfahren mit 2000 Wiederholungen durchgeführt, um daraus 95%-Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten zu bestimmen. Ein Koeffizient gilt als signifikant, wenn sein Konfidenzintervall den Wert Null nicht einschließt. Zusätzlich wurden getrennte Modelle für unterschiedliche Glasdicken erstellt und die Konfidenzintervalle der unabhängigen Variablen β_1 verglichen. Nicht überlappende Intervalle deuten auf signifikante Unterschiede hin, während überlappende Intervalle auf vergleichbare Effekte und die Eignung eines gemeinsamen Modells schließen lassen. Dieses Vorgehen hatte das Ziel zu untersuchen, ob verschiedene Grenzwerte für unterschiedlichen Glasdicken notwendig sind.

Danach erfolgt eine statistische Ableitung von Grenzwerten für die spannungsoptischen Messgrößen, die als Grundlage für die Qualitätssicherung von Einscheiben-Sicherheitsglas dienen können. Im Diagramm in Abbildung 29 sind dazu die Regressionslinie aus dem Quantilsregressionsmodell sowie der gemäß Norm einzuhaltende Grenzwert der zerstörenden Prüfung (Biegespannung bzw. Bruchstückanzahl) eingetragen. Der zugehörige Grenzwert der spannungsoptischen Kenngröße ergibt sich aus dem Schnittpunkt mit der Regressionslinie und wird folgendermaßen berechnet:

$$Limit = \frac{L_{destr} - \beta_0}{\beta_1}$$

Mit

L_{destr} Grenzwert der zerstörenden Prüfung: Bruchstückanzahl = 40 oder Biegezugfestigkeit = 120 MPa

β_0 Koeffizient des Interzepts

β_1 Koeffizient der unabhängigen Variable: Oberflächendruckspannung oder Kantenmembranspannung

Zum Vergleich wird in Abbildung 29 auch die lineare Regressionsgerade auf Basis der Kleinste-Quadrate-Methode (OLS) dargestellt. Der Schnittpunkt der Mittelwertsregressionslinie mit der Grenzlinie der zerstörenden Prüfung liegt unterhalb des spannungsoptischen Messgrenzwerts und eignet sich nicht zur Bestimmung eines Grenzwerts. Die detaillierte Vorgehensweise zur Ermittlung der Grenzwerte für die spannungsoptischen Messungen der Kantenmembranspannung und Oberflächenspannung und die Ergebnisse wurden in Efferz et al. (2025a) veröffentlicht.

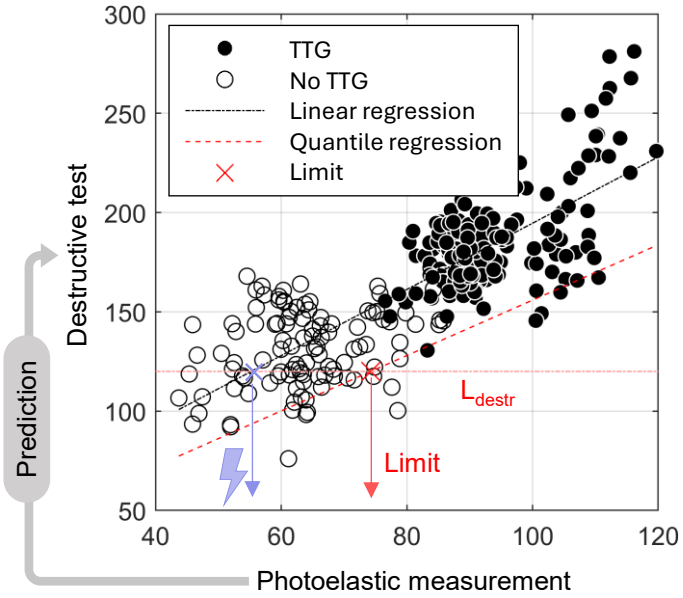


Abbildung 29: Visuelle Bestimmung des Grenzwertes auf Basis der Quantilen Regression mit Vergleich zur linearen Regression aus Efferz et al. (2025a)

1.4.2 Korrelation mit Oberflächendruckspannung

Die Untersuchung der 95%-Konfidenzintervalle des Modells „Oberflächenspannung vs. Bruchstückanzahl“ ergab, dass sich das Regressionsmodell der 6 mm Probekörper signifikant von den Regressionsmodellen der restlichen Glasdicken hinsichtlich der Regressionskoeffizienten unterscheidet. Abbildung 30 zeigt, dass sich die Konfidenzintervalle der Glasdicke von 6 mm mit den restlichen Glasdicken beim Modell „Oberflächenspannung vs. Bruchstückanzahl“ nicht überlappen. Die Glasdicken von 8 bis 12 mm wurden daher in einem Regressionsmodell zusammengefasst und ein getrenntes Modell für die Glasdicke von 6 mm gerechnet. Somit ergaben sich zwei Grenzwerte: Als Schnittpunkte mit der Linie der geforderten 40 Bruchstücke ergaben sich 104 MPa für die Glasdicke von 6 mm und 96 MPa für die Glasdicken von 8 mm bis 12 mm.

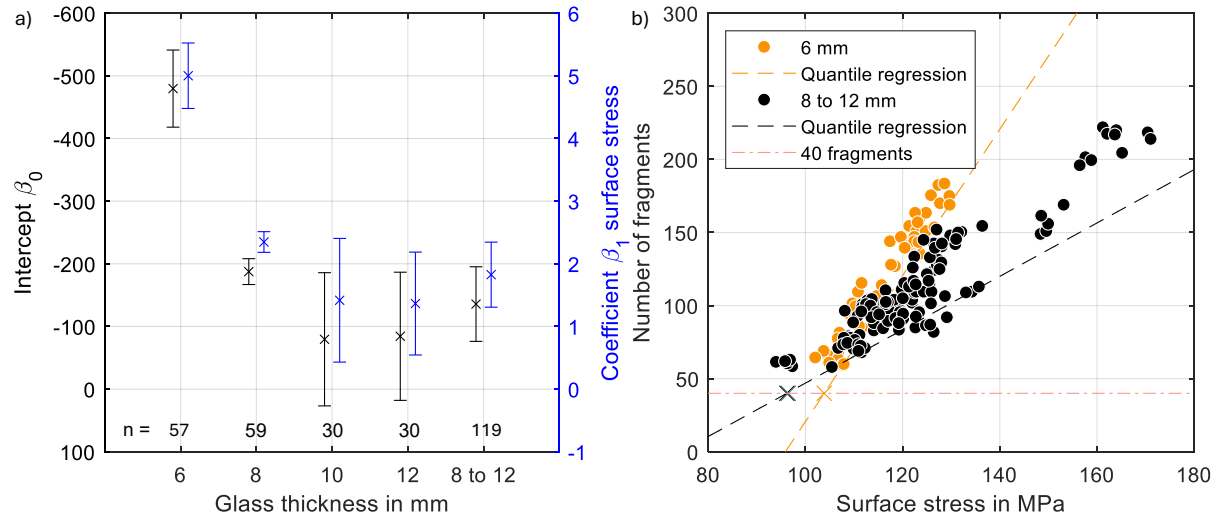


Abbildung 30: Quantile Regression von Oberflächenspannung vs. Bruchstückanzahl mit a) Konfidenzintervallen für den Interzept β_0 und den Koeffizienten β_1 der unabhängigen Variable Oberflächenspannung in Abhängigkeit von der Glasdicke und b) Streudiagramm mit Regressionslinien aus Efferz et al. (2025a)

Die Untersuchung der Konfidenzintervalle von „Oberflächenspannung vs. Biegespannung“ ergab keinen Unterschied in den Glasdicken. Als Grenzwert wurde 70 MPa berechnet.

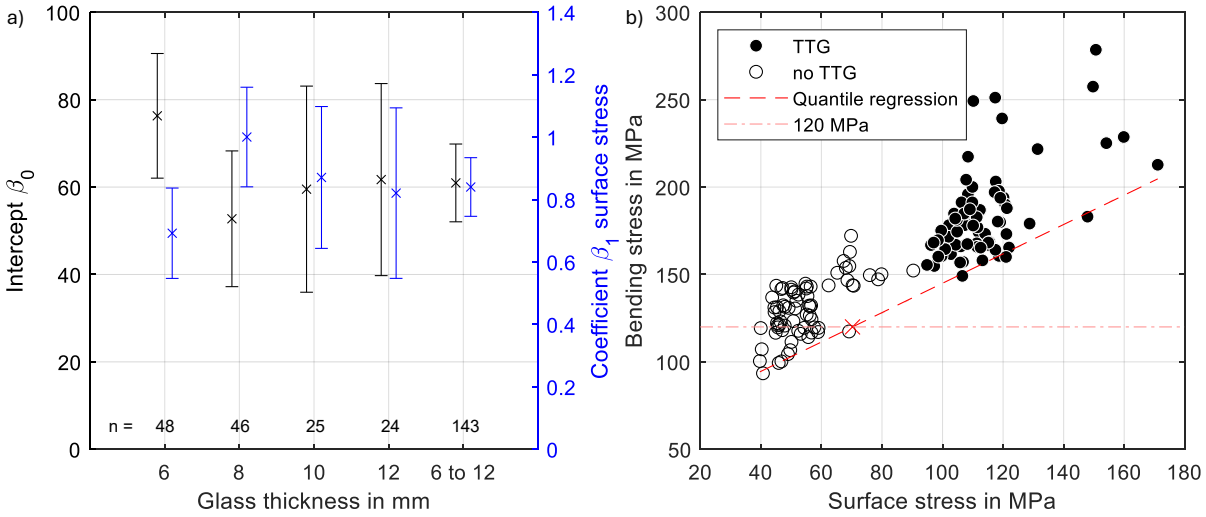


Abbildung 31: Quantile Regression von Oberflächenspannung vs. Biegespannung mit a) Konfidenzintervallen für den Interzept β_0 und den Koeffizienten β_1 der unabhängigen Variable Oberflächenspannung in Abhängigkeit von der Glasdicke und b) Streudiagramm mit Regressionslinien aus Efferz et al. (2025a)

Aus der Literatur ist beschrieben, dass die Bruchstückanzahl von thermisch vorgespanntem Glas von der im Glas gespeicherten elastischen Energie U bzw. der Energiedichte $UD=U/t$ beeinflusst wird, siehe z.B. (Pourmoghaddam et al. 2019). Die elastische Energie berechnet sich wie folgt:

$$U = \frac{1}{5} \cdot \frac{1-\upsilon}{E} \cdot t \cdot \sigma_s^2$$

Wobei υ die Querkontraktionszahl (0,23), E der Elastizitätsmodul (70.000 MPa), t die Glasdicke und σ_s die Oberflächendruckspannung ist.

Abbildung 32a zeigt die Beziehung zwischen Bruchstückanzahl und elastischer Energie. Der Einfluss der Glasdicke ist aufgrund der Berechnungsformel für die Energie dabei deutlich erkennbar: Dünne Gläser weisen trotz ähnlicher oder höherer Oberflächenspannungen deutlich geringere Energiewerte wie dickere Gläser auf. Dies bedeutet, dass in dünnen Gläsern trotz vergleichbarer Oberflächendruckspannungen weniger elastische Energie gespeichert ist. Gleiche elastische Energie, wenn nach obenstehender Gleichung errechnet, bedeutet somit nicht gleiche Bruchstückanzahl. Bei dünnen Gläsern ist zur Erreichung der erforderlichen Bruchstückanzahl eine höhere Oberflächendruckspannung notwendig, was sich mit der Auswertung der quantilen Regressionsmodelle und der Ermittlung der dickenabhängigen Grenzwerte deckt. Dieses Verhalten lässt sich auch in Abbildung 32b beobachten, bei der die Beziehung zwischen Bruchstückanzahl und der Energiedichte beschrieben ist. Die 6 mm zeigen auch hier eine steilere Regressionsgerade.

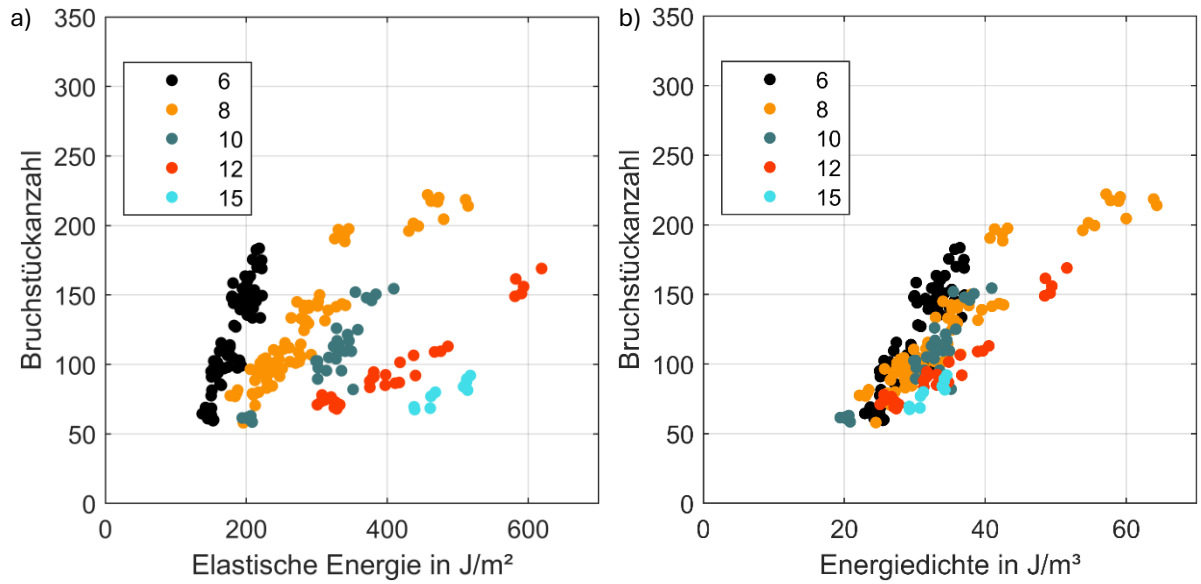


Abbildung 32: Beziehung zwischen Bruchstückanzahl und a) Elastischer Energie und b) Energiedichte

1.4.3 Korrelation mit Kantenmembranspannung

Abbildung 33 zeigt, dass die Untersuchung der Konfidenzintervalle von „Kantenmembranspannung vs. Biegespannung“ keinen Unterschied in den Glasdicken ergab. Das Gesamtmodell mit allen Glasdicken ergab also ein Grenzwert von 70 MPa.

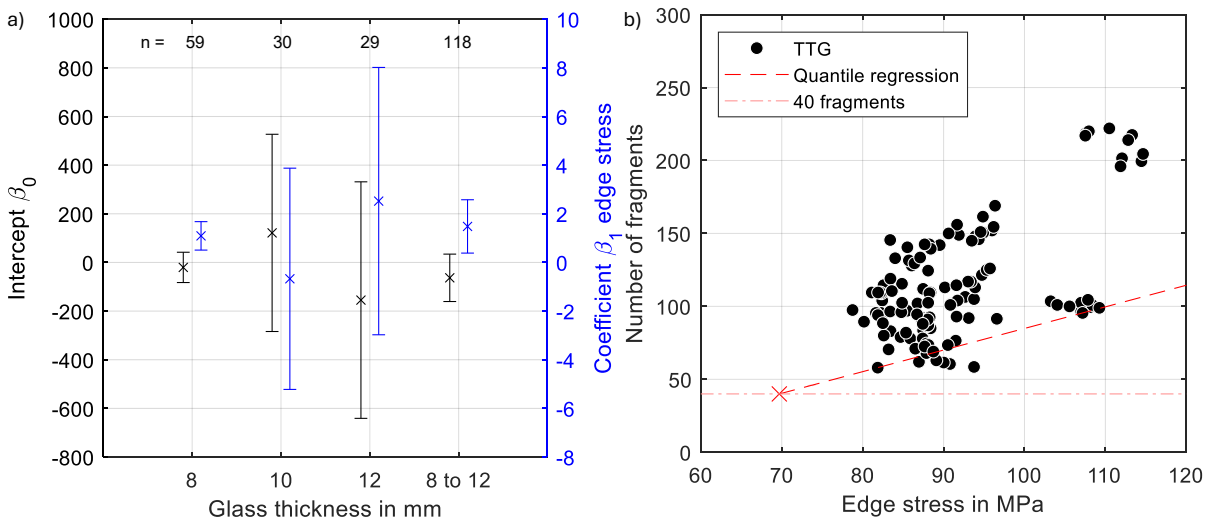


Abbildung 33: Quantile Regression von Kantenmembranspannung vs. Bruchstückanzahl mit a) Konfidenzintervallen für den Interzept β_0 und den Koeffizienten β_1 der unabhängigen Variable Kantenmembranspannung in Abhängigkeit von der Glasdicke und b) Streudiagramm mit Regressionslinien aus Efferz et al. (2025a)

Auch die Konfidenzintervalle von „Kantenmembranspannung vs. Biegespannung“ wiesen keine Überlappung hinsichtlich der Glasdicken auf, wie Abbildung 34 zeigt. Der Schnitt mit der 120 MPa Linie für die Biegezugfestigkeit ergab einen Grenzwert von 75 MPa.

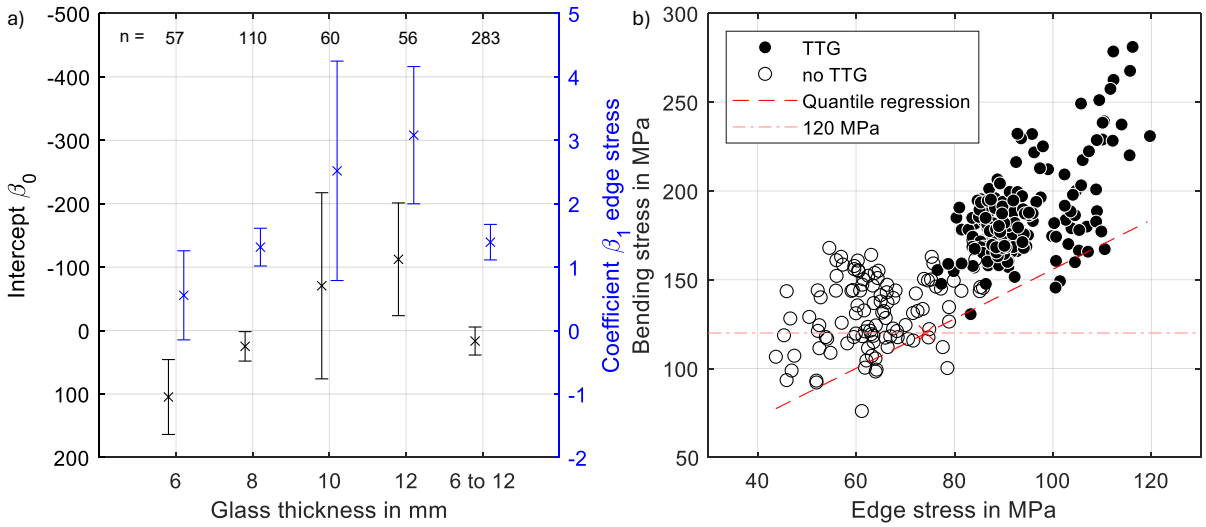


Abbildung 34: Quantile Regression von Kantenmembranspannung vs. Biegespannung mit a) Konfidenzintervallen für den Interzept β_0 und den Koeffizienten β_1 der unabhängigen Variable Kantenmembranspannung in Abhängigkeit von der Glasdicke und b) Streudiagramm mit Regressionslinien aus Efferz et al. (2025a)

1.4.4 Spannungsoptische Grenzwerte

In Abbildung 35 sind die Grenzwerte aus den vier Regressionsmodellen gegenübergestellt. Um die Grenzwerte für die zerstörungsfreie Qualitätskontrolle festzulegen, wurden jeweils die höheren Werte je spannungsoptische Messgröße genommen, welche in der Abbildung grün markiert sind. So kann die Kantenmembranspannung mit einem Grenzwert von 75 MPa (t = 6 mm bis 12 mm) oder die Oberflächendruckspannung mit den dickenabhängigen Grenzwerten von 104 MPa (t = 6 mm) und 96 MPa (t = 8 mm bis 12 mm) verwendet werden, um die beiden zerstörende Tests der Festigkeit und des Bruchbilds in der Qualitätskontrolle von unbeschichtetem Einscheibensicherheitsglas zu reduzieren.

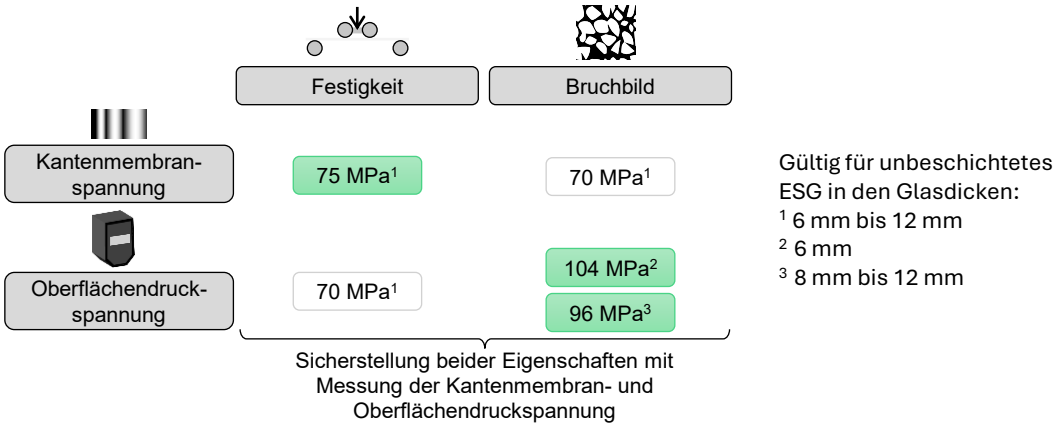


Abbildung 35: Spannungsoptische Grenzwerte für Kantenmembranspannung und Oberflächendruckspannung, welche die Anforderungen an die Festigkeit und an das Bruchbild einhalten, gültig für unbeschichtetes ESG aus Efferz et al. (2025a)

1.5 Experimentelle Untersuchungen an Großbauteil-Probekörpern

Um die Messmethoden und Grenzwerte, welche anhand Kleinbauteil-Probekörpern entwickelt wurden, an praxisrelevanteren Formaten zu validieren, wurden die spannungsoptischen Messungen an Großbauteil-Probekörpern durchgeführt.

1.5.1 Probekörper

Eine Gesamtzahl von 240 Probekörpern wurde zur Produktion auf die drei Glasveredler aufgeteilt. Da sich aus den Auswertungen aus AP 04 gezeigt hat, dass sich die Kantenmembranspannung für dünne Scheiben nicht verlässlich bestimmen lässt, wurde sich bei den Bauteilprobekörpern für die Untersuchung der Glasdicke ab 6 mm entschieden. Bei der Glasart Clear Float werden vier Glasdicken von 6 mm, 8 mm, 10 mm und 12 mm untersucht, die häufig im Alltagsgeschäft produziert werden. Diese Probekörper werden wie bei den Kleinbauteilen auch in vier Vorspannstufen beginnend von TVG Standard über TVG hoch als Zwischenstufe bis ESG Standard und ESG hoch vorgespannt, um den Einfluss auf das Bruchbild zu untersuchen. Die rand-entschichteten Probekörper werden in TVG und ESG in den Dicken 6 mm und 10 mm produziert.

	Bauteilformat 1				**Bauteilformat 2**					
	Clear Float				**Clear Float**				**Rand-entschichtet**	
Glasdicke [mm]	**6**	**8**	**10**	**12**	**6**	**8**	**10**	**12**	**6**	**10**
Glasveredler	2	3	2	2	2	3	2	2	2	2
Vorspanngrad	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2
Anzahl Bruchbild [Stk.]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Gesamt [Stk.]	**36**	**36**	**36**	**36**	**24**	**36**	**24**	**24**	**12**	**12**

Format 1:
1100 x 800 mm²
KGN

Stückzahl: 108x

Format 2:
3000 x 1000 mm²
KGN

Stückzahl: 132x

Abbildung 36: Prüfkörpermatrix Bauteilgröße

1.5.2 Versuchsablauf

Die Untersuchung der Probekörper wurde auf die zwei verschiedene Forschungseinrichtungen aufgeteilt. Die TU Darmstadt konzentrierte sich auf die Analyse der 108 Probekörper des Formats 1 mit den Maßen 1100 x 800 mm². Im Vergleich dazu nahm die Hochschule München die Untersuchung der 132 Probekörper des Formats 2 mit den Abmessungen von 3000 x 1000 mm² vor. Der Ablauf der experimentellen Untersuchungen an den Großbauteilscheiben lief gemäß folgendem Schema ab, wie in Abbildung 37 dargestellt.

Zuerst wurde die Kantenmembranspannung bestimmt. Dazu kam für die fortlaufende Datenerfassung und -analyse während des Herstellungsprozesses der Großbauteil-Probekörper der Softsolution Linescanner bei den Glasveredlern zum Einsatz, der die Probekörper im Anschluss des thermischen Vorspannprozesses scannt. Die dabei generierten Daten wurden an die Hochschule München für die weitere Auswertung der Kantenmembranspannung weitergeleitet. Ein Teil der Probekörper wurde zusätzlich bei den Forschungseinrichtungen mithilfe des Softsolution Culletscanner und Linescanners gescannt. Bei Format 1 gibt es drei Auswertebereiche für die Kantenmembranspannung, die sich an den gleichen Positionen wie bei den

Kleinbauteilen befinden. Bei Format 2 wurde aufgrund der langen Kante die Anzahl der Auswertebereiche auf neun erhöht, siehe Abbildung 37.

Dann erfolgte die Messung der Oberflächendruckspannung mit dem SCALP-05 von GlasStress an drei Messpunkten, die sich in den Viertelspunkten der langen und kurzen Kante diagonal über die Scheibenflächen verteilen.

Schließlich wurde die Scheibe bei Format 1 in einem Abstand von 13 mm mittig an der langen Kante und bei Format 2 mittig mit einem Körner angeschlagen und das Bruchbild ausgewertet.

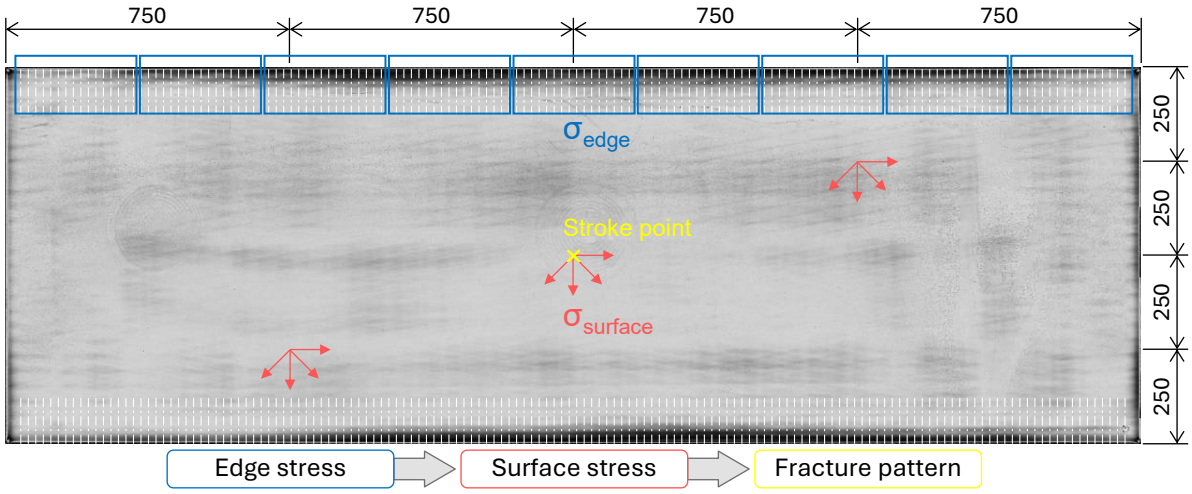


Abbildung 37: Position der Messpunkte der Kantenmembranspannung, der Oberflächendruckspannung und der Bruchprüfung dargestellt auf einer Isochromatenaufnahme der Großbauteil-Probekörper 1000 mm x 3000 mm aus Efferz et al. (2025b)

1.5.3 Ergebnisse der Großbauteilversuche

Im Vergleich zu den Kleinbauteilprobekörpern werden geringere spannungsoptische Werte bei den Großbauteilscheiben gemessen.

Die Auswirkung der Glasdimension zeigt sich vor allem bei den dünneren Scheiben:

Die Probekörper zweier Prüfreihen von 6 mm Glasdicke in den Abmessungen 1000 mm x 3000 mm und 800 mm x 1100 mm wurden mit angepassten Heizdauern, aber mit den gleichen Kühlparametern wie die Probekörper des Standardformats (360 mm x 1100 mm) für ESG Standard thermisch vorgespannt. Alle sechs Probekörper der Bauteilgrößen lagen unter der Grenze von 40 Bruchstücken im Auswertebereich von 50 mm x 50 mm im Bereich des gröbsten Bruchbilds und wiesen somit nicht das nach EN 12150-1 geforderte feine Bruchbild für ESG auf. Im Vergleich dazu, erreichten alle Probekörper des Standardformats die erforderlichen Bruchstückanzahl. Abbildung 38 zeigt exemplarisch die Zählung der Bruchstücke der nicht ESG konformen Probekörper mit den Abmessungen von 1000 mm x 3000 mm (a) und 800 mm x 1100 mm (b).

a)

b)

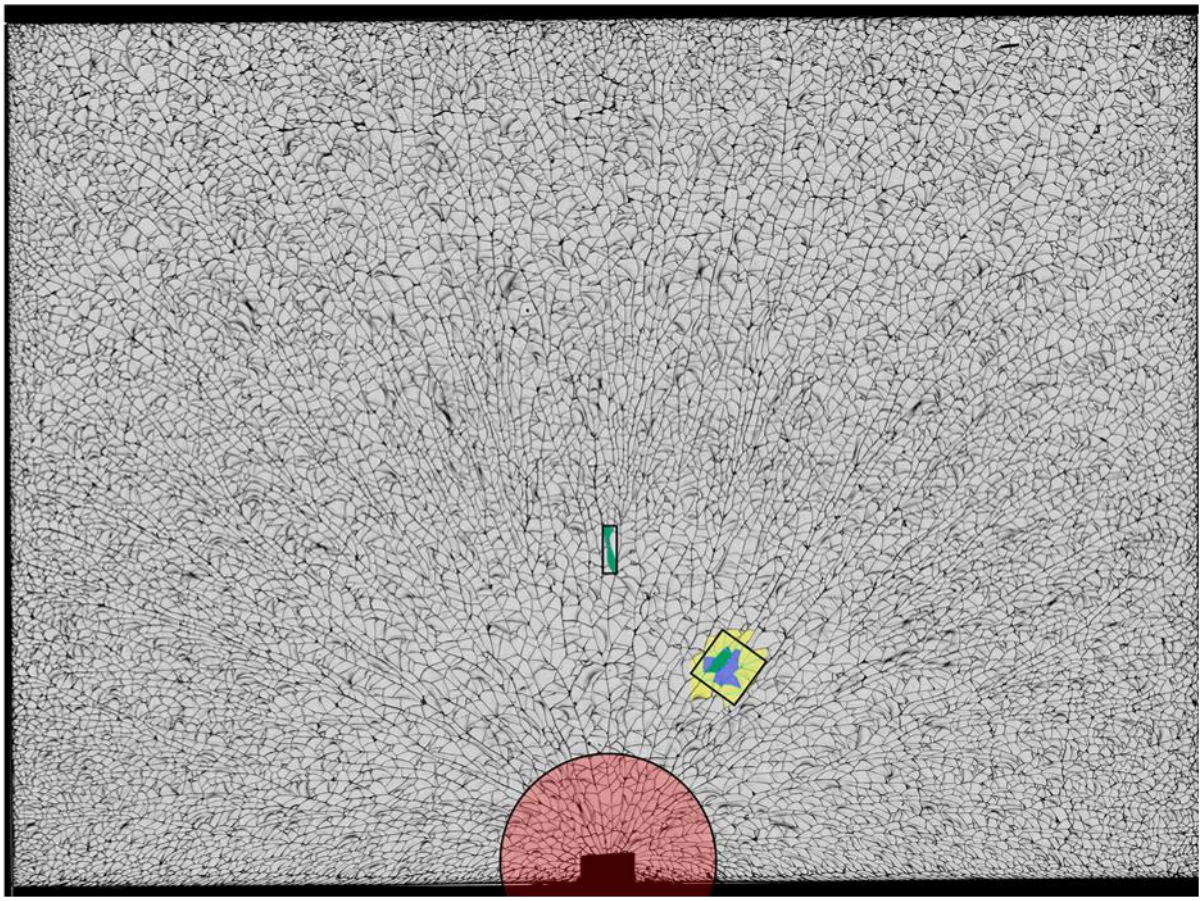


Abbildung 38: Bruchbilder der a) 1000 mm x 3000 mm und b) 800 mm x 1100 mm Probekörper mit der Glasdicke von 6 mm, welche die Grenze von 40 Bruchstücken unterschreiten.

Wie in Abbildung 39 dargestellt, schließen auch die spannungsoptischen Grenzwerte der Kantenmembranspannung und der Oberflächendruckspannung diese nicht-konformen Probekörper zuverlässig aus. Allerdings entsteht auch ein Ausschuss: Anhand der Grenzwerte von 104 MPa der Oberflächendruckspannung für t = 6 mm und von 96 MPa der Oberflächendruckspannung für t = 8 mm bis 12 mm würden elf Probekörper fälschlicherweise aussortiert werden, die ein konformes Bruchbild von ESG bestätigen.

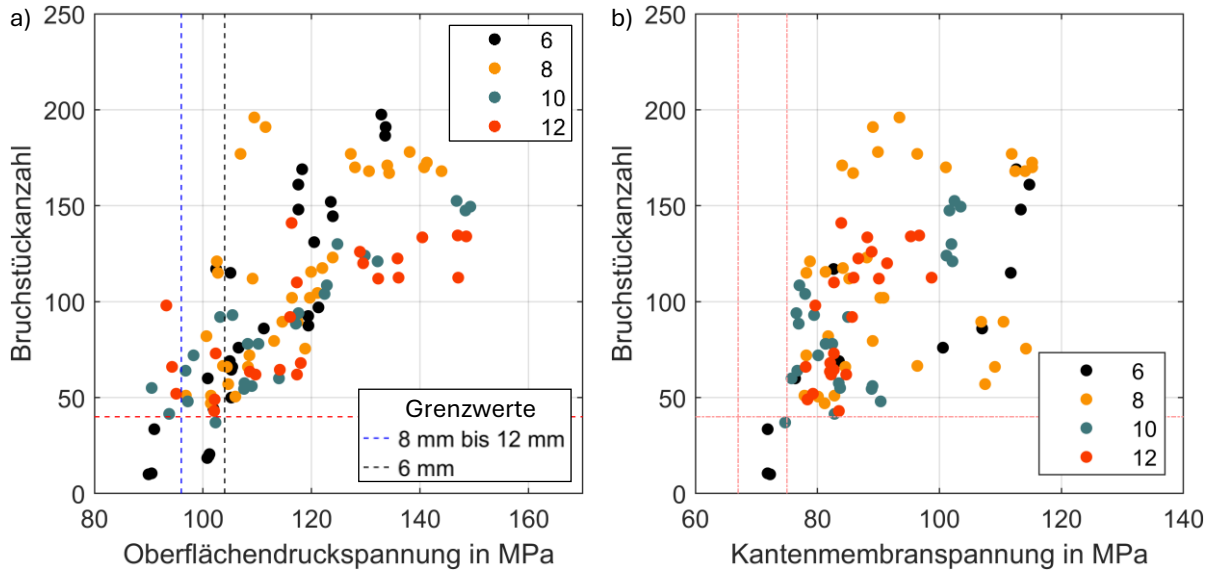


Abbildung 39: Korrelation von Bruchstückanzahl mit a) Oberflächendruckspannung und b) Kantenmembranspannung mit Kennzeichnung

Der Zusammenhang zwischen der Kantenmembranspannung und der Oberflächendruckspannung ist in Abbildung 40 zu sehen. Die Datenpunkte wurden dabei gemäß ihrer Vorspannart gekennzeichnet, welche auf Grundlage der jeweiligen Bruchbilder klassifiziert wurde.

Zur besseren Einordnung ist in der Abbildung eine Ursprungsgerade mit einer Steigung von 1 dargestellt. Diese dient als Referenz für eine ideale 1:1-Beziehung zwischen Kantenmembran- und Oberflächendruckspannung. Die Auswertung zeigt eine systematische Abweichung dieser beiden Spannungsgrößen in Abhängigkeit von der Vorspannart: ESG-Probekörper zeigen tendenziell höhere Oberflächendruckspannungen als Kantenmembranspannungen. Ihre Messpunkte liegen überwiegend oberhalb der Ursprungsgeraden. TVG-Probekörper hingegen weisen in den meisten Fällen eine höhere Kantenmembranspannung als Oberflächendruckspannung auf. Ihre Punkte befinden sich damit typischerweise unterhalb der Ursprungsgeraden.

Diese Beobachtungen bestätigen die Erkenntnisse aus den Kleinbauteiluntersuchungen: Die Kantenmembranspannung weist über die Vorspannarten einen geringen Umfang auf, während die Oberflächendruckspannung empfindlicher auf die Vorspannparameter reagiert, was sich in einem größeren Umfang der Messwerte zeigt. Weitere Auswertungen finden sich in Efferz et al. (2025b, 2026).

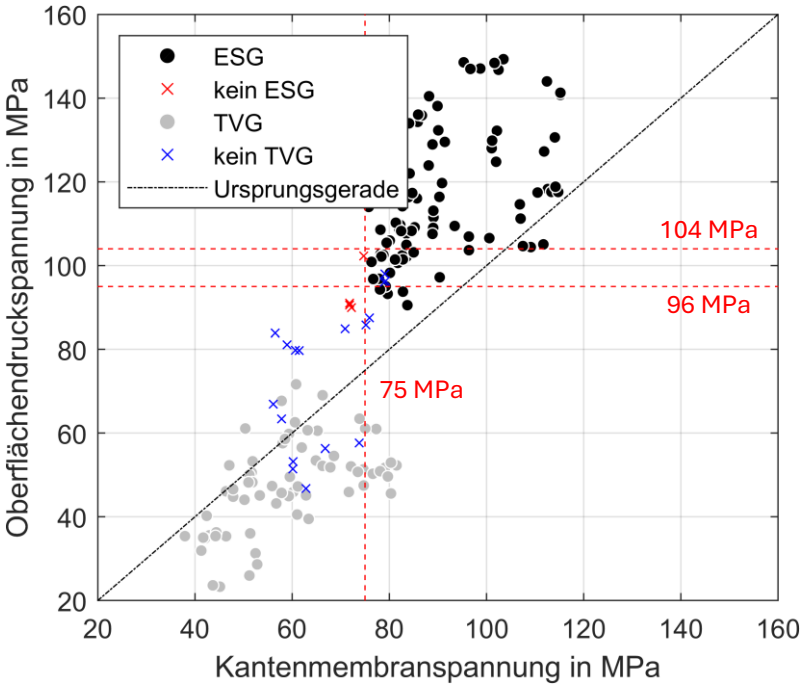


Abbildung 40: Korrelation zwischen Oberflächendruckspannung und Kantenmembranspannung der Großbauteil-probekörper

1.6 Prüfverfahren und Normentwurf

Die Ergebnisse bestehend aus den experimentellen Untersuchungen, den Prüfverfahren sowie den spannungsoptischen Grenzwerten wurden im Ausschuss der NA 005-09-29, der für die Produktnorm für ESG zuständig ist, vorgestellt. Zudem wurden die Ergebnisse in einem Dokument zusammengefasst, das als möglicher Anhang für die EN 12150-1 dienen kann.

Folgende Abbildungen und Textteile sind Ausschnitte des vorgeschlagenen Anhangs:

Der mögliche Anhang für die EN 12150-1 stellt zerstörungsfreie Testmethoden auf Grundlage der Spannungsoptik vor, die auf thermisch vorgespanntes (heißgelagertes) Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas aus unbeschichtetem Floatglas nach EN 12150-1 ohne Bohrungen und Ausschnitte anwendbar ist. Durch die zerstörungsfreien, spannungsoptischen Messungen können die zerstörenden Überprüfungen der Bruchstruktur (EN 12150-1, Kap. 8) und der mechanischen Festigkeit (EN 12150-1 Kap. 9.4 und EN 12150-2 Anhang B) innerhalb der werkseigenen Produktionskontrolle (EN 12150-2 Anhang A) reduziert werden.

Um die Anforderungen von Einscheibensicherheitsglas an die Biegezugfestigkeit und Bruchstruktur nach EN 12150-1 einzuhalten, kann entweder die Kantenmembranspannung oder die Oberflächendruckspannung gemessen werden. Die Messungen können für alle rechteckigen Scheibenformate aus unbeschichtetem, monolithischem Floatglas mit Glasdicke größer gleich 6 mm genutzt werden. Es sollen folgende Mindestwerte gelten:

- Kantenmembranspannung (ab 6 mm): **75 N/mm²**
- Oberflächendruckspannung (6 mm): **104 N/mm²**
- Oberflächendruckspannung (ab 8 mm): **96 N/mm²**

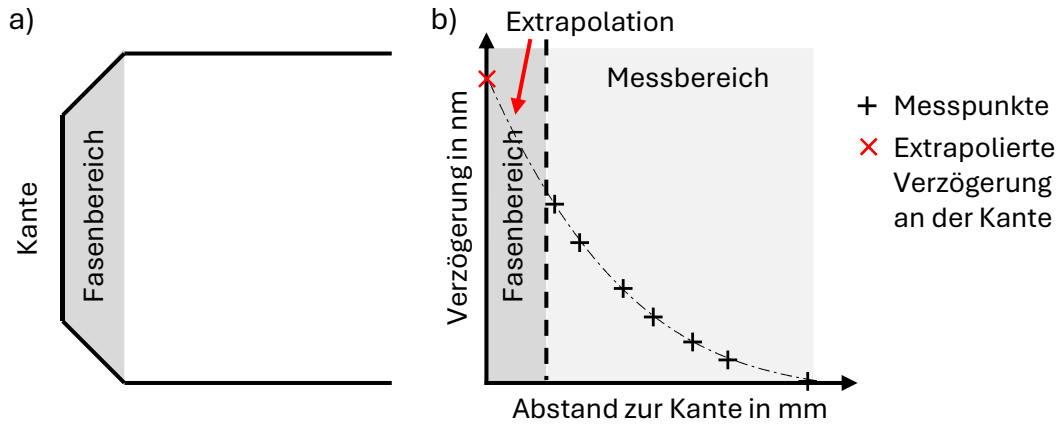


Abbildung 41: Normentwurf a) Schnitt durch Glaskante, b) Diagramm zur Veranschaulichung des Messbereichs mit Messpunkten der Verzögerung und extrapoliertem Wert an der Kante

Die Messung der Verzögerung an der Kante zur Ermittlung der Kantenmembranspannung soll an mindestens drei Messstellen je Längskante durchgeführt werden, die sich mittig und in den Vierteln der Kante befinden, siehe Abbildung 42. Dabei ist zu beachten, dass ein Mindestabstand von 100 mm zur Ecke eingehalten wird.

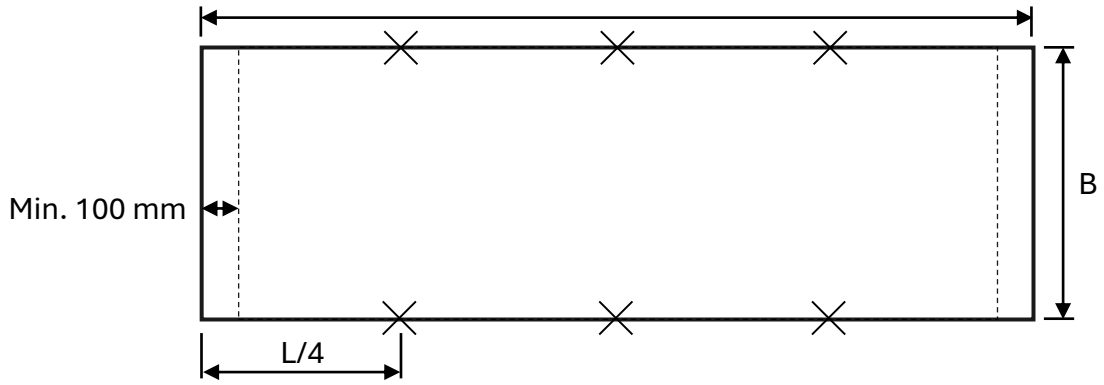


Abbildung 42: Normentwurf Messpunkte Kantenmembranspannung

Die Messungen der Oberflächenspannung sollen an den fünf Stellen vorgenommen werden, die in Abbildung 43a angegeben sind. Dabei ist ein Abstand von minimal 100 mm zur Kante einzuhalten. Die Anzahl an Messpunkten kann auf 3 reduziert werden, wenn Anisotropie-Scans vorliegen und diese eine Qualität A nach DIN SPEC 18198 (2022) aufweisen. Die drei Messpunkte befinden sich entlang der Diagonalen entsprechend Abbildung 43b.

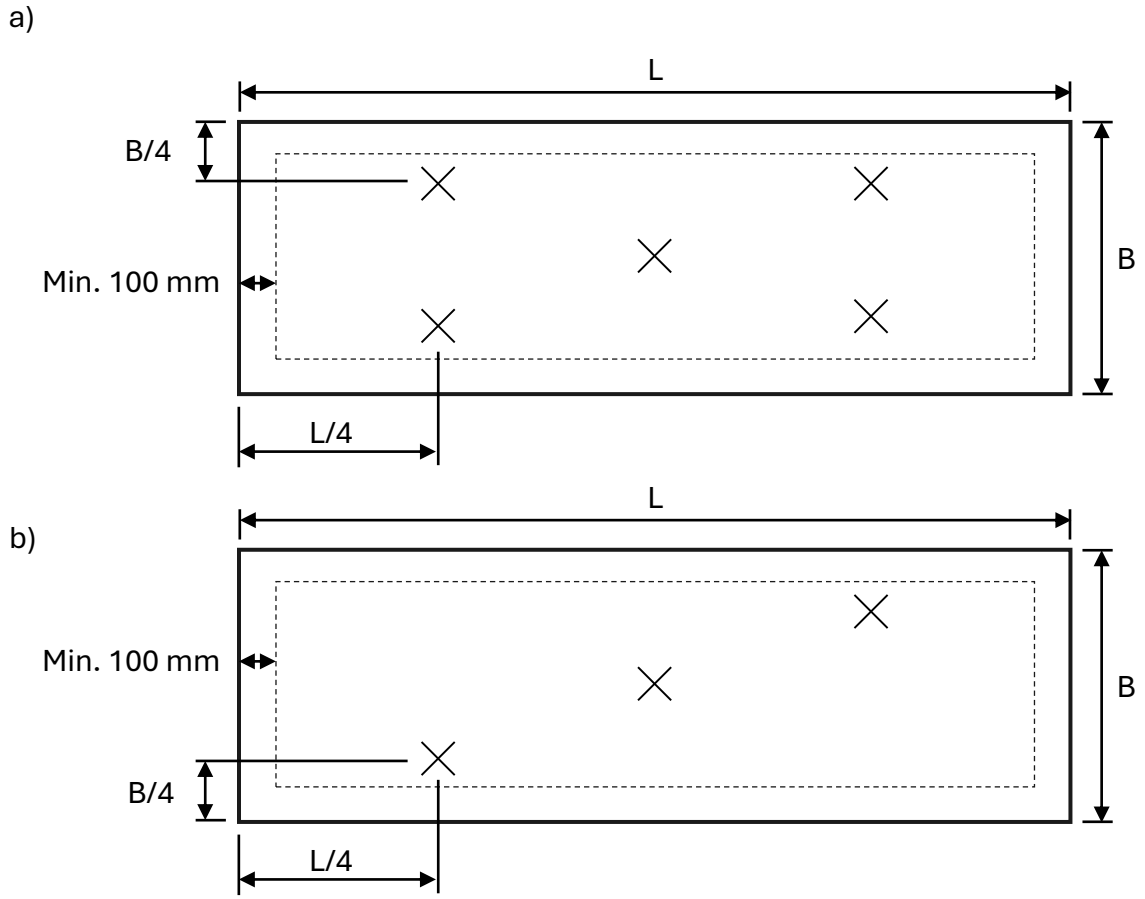


Abbildung 43: Normentwurf Messpunkte Oberflächendruckspannung

Zusätzlich wird in der Norm darauf hingewiesen, dass Oberflächendefekte wie Mikrorisse, die möglicherweise trotz thermischer Vorspannung verfrüht zum Bruch führen, nicht spannungsoptisch erkannt werden können. Daher ist es erforderlich, die Oberflächenqualität der Scheiben zu gewährleisten.

Aufgrund der Neueinführung der Bauproduktenverordnung im Jahr 2026 kann die Integration des Anhangs erst in ein paar Jahren eingeleitet werden.

1.7 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Anschluss folgt die Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele mit den erzielten Ergebnissen.

AP 1	**Ausgangssituation und Anforderungsprofil**
Beteiligte	Hochschule München, TU Darmstadt, AGC Interpane, Glas Trösch, SGT
Ziel	Alle Projektpartner haben den gleichen Informationsstand von existierenden Messsystemen, Prüfverfahren, Normungen und Veröffentlichungen, die mit der mit der Kantenmembranspannung verbunden sind. Die Versuchsmatrix und Vorlagen zur Dokumentation der Probekörperherstellung für die Versuche der kleinformatigen Probekörper ist erstellt. Das Anforderungsprofil an die Norm ist erstellt.
Ergebnis	Das Arbeitspaket wurde wie geplant bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen. Das Ziel wurde gemeinsam erreicht.

AP 2	**Entwicklung des Prüfverfahrens und Normentwurf I**
Beteiligte	Hochschule München, TU Darmstadt
Ziel	Die Forschungseinrichtungen legen den Aufbau des Normentwurfes fest. Aus dem Anforderungsprofil und dem Anwendungsbereich aus AP 1 wird ein erstes Inhaltsverzeichnis der Norm entworfen. Prüfverfahren für die Probekörper im Projekt sind festgelegt.
Ergebnis	Die Forschungseinrichtungen bearbeiteten das Arbeitspaket wie geplant und schlossen es erfolgreich ab.
AP 3	**Probenherstellung Normprüfkörper und Onlinemessung**
Beteiligte	AGC Interpane, Glas Trösch, SGT
Ziel	Die Probekörper in Kleinformat sind hergestellt. Die Probekörperherstellung ist wie in AP 1 festgelegt dokumentiert. Die Daten der Onlinemessungen der Kantenmembranspannung und Gangunterschiedsmessungen der Fläche bei der Herstellung der Probekörper liegen vor.
Ergebnis:	Die Industriepartner bearbeiteten das Arbeitspaket wie geplant und schlossen es erfolgreich ab. Die Forschungseinrichtungen besuchten die Industriepartner, um die Probenherstellung zu kontrollieren.
AP 4	**Labormessungen und Validierung der Ergebnisse**
Beteiligte	Hochschule München, TU Darmstadt
Ziel	Die Forschungseinrichtungen führen zerstörungsfreie Messungen der Kantenmembranspannung und der Oberflächenvorspannung punktuell in einem festgelegten Raster durch, anschließend werden zerstörende Prüfungen zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit und des Bruchbilds durchgeführt. Die Ergebnisse der Laborversuche sind zusammengefasst, ausgewertet und Korrelationen zwischen den spannungsoptischen Messungen und zerstörenden Tests eruiert.
Ergebnis:	Die Forschungseinrichtungen bearbeiteten das Arbeitspaket wie geplant und schlossen es erfolgreich ab.
AP 5	**Optimierung Prozess und Onlinemessungen**
Beteiligte	AGC Interpane, Glas Trösch, SGT
Ziel	Die Prozesse der Glasveredler sind optimiert. Die Versuchsmatrix für Versuche in Bauteilgröße ist erstellt. Die Dokumentationsbögen sind verbessert.
Ergebnis	Die Industriepartner bearbeiteten das Arbeitspaket wie geplant und schlossen es erfolgreich ab.
AP 6	**Entwicklung des Prüfverfahrens und Normentwurf II**
Beteiligte	Hochschule München, TU Darmstadt

Ziel	Ein erster Normentwurf ist erstellt. Die Struktur der Norm aus AP 2 wird mit den neuen Erkenntnissen aus den durchgeführten Messungen aus AP 4 überarbeitet und gefüllt. Der Normentwurf ist bei den entsprechenden Stellen vorgestellt.
Ergebnis	Die Forschungseinrichtungen entwickelten den Normentwurf und das Prüfverfahren weiter. Der Normentwurf wurde gegen Ende des Projekts vorgestellt.
AP 7	**Probenherstellung Bauteilgröße und Onlinemessung**
Beteiligte	AGC Interpane, Glas Trösch, SGT
Ziel	Die Probekörper in Bauteilgröße sind gemäß der in AP 5 festgelegten Versuchsmatrix, hergestellt. Die Daten der Onlinemessung liegen vor.
Ergebnis	Die Industriepartner bearbeiteten das Arbeitspaket wie geplant und schlossen es erfolgreich ab.
AP 8	**Labormessung und Validierung der Ergebnisse**
Beteiligte	Hochschule München, TU Darmstadt
Ziel	Die Daten der Labormessungen bestehend aus zerstörungsfreien Messungen der Kantenmembranspannung und der Oberflächenvorspannung und zerstörenden Bruchbildversuchen liegen den Hochschulen vor. Die Onlinemessungen und Labormessungen sind validiert. Die Ergebnisse der Versuche in Bauteilgröße sind mit den Versuchen in Kleinformat korreliert.
Ergebnis	Die Forschungseinrichtungen bearbeiteten das Arbeitspaket wie geplant und schlossen es erfolgreich ab.
AP 9	**Entwicklung des Prüfverfahrens und Normentwurf III**
Beteiligte	Hochschule München, TU Darmstadt, AGC Interpane, Glas Trösch, SGT
Ziel	Alle Arbeiten sind zusammengefügt und fließen in den Normentwurf ein. Der stetig bearbeitete Normentwurf wird in einem abschließenden Prozess finalisiert. Einheitliche Prüfverfahren sind festgelegt.
Ergebnis	Das Arbeitspaket wurde wie geplant bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen. Das Ziel wurde gemeinsam erreicht.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Hochschule München

Die Hochschule München finanzierte über die beantragten Mittel aus Position 0812 (Angestellte/Lohnempfänger) zwei wissenschaftliche Mitarbeitende über insgesamt 31 Monate, die für die Planung und Durchführung der experimentellen Untersuchungen und Auswertungen zuständig waren.

Aus Mitteln der Position 0850 (Gegenstände und andere Investitionen) wurde der Softsolution Linescanner der Hochschule München um Glasdicken- und Beschichtungssensoren ergänzt,

die für die Aufnahme der Isochromatenaufnahmen und somit die Ermittlung der Kantenmembranspannung benötigt wurden.

TU Darmstadt

Die TU Darmstadt finanzierte aus Position 0812 wissenschaftliche Mitarbeitende (26,75 Personenmonate) und studentische Hilfskräfte, die für die Planung und Durchführung der experimentellen Untersuchungen und Auswertungen zuständig waren.

Aus Mitteln der Position 0831 (Gegenstände bis 800 €) und der Position 0843 (Sonst. Allg. Verw.-Ausg.) wurden u.a. Kalibrierungen von Messgeräten, sowie eine digitale Bügelmessschraube, Saugheber, Ersatzkörnerspitzen, eine VSG Grundplatte für den Scanner und weitere Hilfsmittel wie Ratschenzurrgurt, Antistatikrolle etc. finanziert.

Aus Mitteln der Position 0850 (Gegenstände über 800€) wurde eine High-End Workstation finanziert.

AGC Interpane

AGC Interpane finanzierte aus Position 0837 Maschinen.- und Anlagenführer, Helfer sowie die Projektleitung, für die Planung und der Herstellung der Prüf.- und Probekörper.

Aus Mitteln der Position 0813 (Material) wurden die verwenden Kosten für Material und Werkzeuge finanziert (Glas, Werkzeug). Über die Position 0850 (sonst. unmittelbare Vorhabenkosten) wurde weitere Kosten zur Unterstützung der Herstellung, Versand sowie erarbeiten der Maschinenparameter abgerechnet.

Weiterhin entstanden Kosten für Reisetätigkeiten, welche unter der Position 0838 abgerechnet wurden.

Glas Trösch

Glas Trösch finanzierte aus Mitteln der Position 0837 (Personalkosten) zeitweise drei Mitarbeitende. Diese waren für die Produktion, Durchführung und Bewertung der Prüfkörper verantwortlich.

Aus der Position 0847 (vorhabenspezifische Abschreibungen) wurde ein Softsolution Linescanner installiert. Diese Erweiterung war essenziell die Bestimmung der Kantenmembranspannung.

Sicherheitsglastechnik Oelsnitz

Sicherheitsglastechnik Oelsnitz finanzierte aus Position 0837 Produktionsmitarbeiter sowie die Projektverantwortlichen, für die Planung und Herstellung der Prüf- und Probekörper.

Aus Mitteln der Position 0813 (Material) und der Position 0850 (sonst. unmittelbare Vorhabenkosten) wurde das Material zur Herstellung der Prüf- und Probekörper sowie der Versand dieser an die Hochschule München und TU Darmstadt finanziert.

Es entstanden zusätzlich Kosten für Reisen zu Meetings und Vorträgen, welche durch die Mittel aus Position 0838 finanziert wurden.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Untersuchung der Kantenmembranspannung ist von zentraler Bedeutung für die Qualitätssicherung von thermisch vorgespanntem Glas. Da bestehende Prüfmethoden zur Messung der Kantenmembranspannung bislang für die Bauindustrie eingesetzt werden und die aktuellen Normen keine expliziten Vorgaben sowohl für die Kantenmembranspannung als auch die

Oberflächendruckspannung enthalten, besteht ein dringender Bedarf an validierten Messverfahren. Die durchgeführte Arbeit trägt dazu bei, diese Lücke zu schließen, indem verschiedene Messmethoden systematisch untersucht und verglichen werden.

Die Anzahl der untersuchten Probekörper wurde bewusst hoch gewählt, da eine Vielzahl an Parametern untersucht wurde und eine ausreichende Datenbasis für eine belastbare statistische Auswertung erforderlich ist. Nur durch eine umfangreiche Stichprobe können verlässliche Aussagen zur Messgenauigkeit, Reproduzierbarkeit und Variabilität der verschiedenen Verfahren getroffen werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt liegt insbesondere auf der praxisnahen Ausrichtung: Die Produktion der Probekörper sowie die Messungen wurden unter realistischen Bedingungen durchgeführt und berücksichtigen sowohl industrielle als auch labortechnische Anforderungen.

Zusammenfassend war die geleistete Arbeit im Forschungsvorhaben sowohl notwendig als auch angemessen, da sie eine methodische Grundlage für die standardisierte Erfassung der Kantenmembranspannung schafft, spannungsoptische Grenzwerte für die Kantenmembranspannung und Oberflächendruckspannung und damit einen wichtigen Beitrag zur Qualitätssicherung in der Glasindustrie leistet.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die erzielten Ergebnisse bieten sowohl für Hochschulen als auch für Industriepartner einen hohen wissenschaftlichen und praktischen Mehrwert.

Forschungseinrichtungen

Für Forschungseinrichtungen an den Hochschulen liefern die Ergebnisse wertvolle Erkenntnisse zur spannungsoptischen Messung der Kantenmembran- und Oberflächendruckspannung. Die gewonnenen Daten und Entwicklung der Mess- und Prüfmethoden ermöglichen eine weiterführende wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Thematik der zerstörungsfreien Qualitätskontrolle und bieten eine fundierte Basis für zukünftige Forschungsprojekte. Zudem können die Erkenntnisse in die Lehre integriert werden, um Studierende mit aktuellen Entwicklungen in der Glasmesstechnik und Qualitätssicherung vertraut zu machen. Darüber hinaus tragen die Ergebnisse zur Weiterentwicklung normativer Prüfmethoden bei, wodurch sich neue Kooperationsmöglichkeiten zwischen Wissenschaft und Industrie ergeben.

Industriepartner

Für die Glasindustrie sind die Ergebnisse insbesondere im Bereich der Qualitätssicherung und Prozessoptimierung von hoher Relevanz. Die Untersuchung verschiedener Messmethoden – einschließlich Inline-Systemen und manuellen Verfahren – ermöglicht eine gezielte Auswahl geeigneter Prüfverfahren für die industrielle Anwendung. Insbesondere die Validierung der Inline-Messtechnik unterstützt die Automatisierung, reduziert manuelle Eingriffe und steigert die Effizienz sowie Reproduzierbarkeit der Fertigung. Darüber hinaus liefern die Ergebnisse eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die Weiterentwicklung und Standardisierung von Prüfmethoden zur Kantenmembran- und Oberflächendruckspannung. Dies kann langfristig dazu beitragen, einheitliche Qualitätsstandards zu etablieren und damit die Verlässlichkeit sowie Vergleichbarkeit von Messergebnissen zu verbessern.

Zusammenfassend leisten die Ergebnisse einen bedeutenden Beitrag zur Weiterentwicklung der spannungsoptischen Messtechnik und schaffen Synergien zwischen akademischer For-

schung und industrieller Anwendung. Sie unterstützen sowohl die wissenschaftliche Weiterentwicklung als auch die praxisorientierte Optimierung von Mess- und Prüfverfahren in der Glasverarbeitung.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Bei den Informationsrecherchen wurde keine Veröffentlichung hinsichtlich normativer spannungsoptischer Qualitätskontrolle gefunden.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Basierend auf den Projektergebnissen sind folgende Beiträge innerhalb des Projektzeitraums veröffentlicht worden:

(1) L. Efferz, C. Schuler, and G. Siebert (2024) *Photoelastic Measurements and Evaluation Methods for Edge Stress in Architectural Tempered Glass*. Glass Structures & Engineering, doi: 10.1007/s40940-024-00270-3.
(2) L. Efferz, K. Thiele, M. Schuster, C. Schuler, G. Siebert, and J. Schneider (2024) *Relation between edge stress, bending strength, surface stress and fracture pattern of thermally toughened glass*. Glass Structures & Engineering, doi: 10.1007/s40940-024-00269-w.
(3) L. Efferz (2024) *Relation between edge stress, bending strength, surface stress and fracture pattern of thermally toughened glass*. Vortrag auf der Konferenz *Challenging Glass Conference* (CGC 9) in Delft, Niederlande.
(4) L. Efferz (2024) *Ermittlung und Bewertung von Randspannungen in thermisch vorgespanntem Glas.* Vortrag im *glass melting pot* im Rahmen der Messe glasstec Düsseldorf, 2024.
(5) Hochschule München (2025) *Innovative Testmethode für Sicherheitsglas entwickelt | HM Forschung wirkt!* Forschungsfilm https://youtu.be/PhK0xpnyX1Q?si=7X0q1tcX5oQPtTOt

Zudem sind mehrere Veröffentlichungen und Vorstellungen auf Fachtagungen geplant. Diese sind im Folgenden aufgelistet:

(1) L. Efferz, M. Schuster, M. A. Kraus, C. Schuler, and G. Siebert (2025) *Key parameters for the non-destructive quality control of thermally toughened safety* glass. Veröffentlichung im Journal of Building Engineering.
(2) L. Efferz (2025) *Zerstörungsfreie Qualitätskontrolle von ESG mit spannungsoptischen Methoden.* Vortrag auf der Tagung *Glas im konstruktiven Ingenieurbau 19* (GikI 2025) in München.
(3) L. Efferz (2025) *Zerstörungsfreie Qualitätskontrolle von ESG? Vorstellung von Grenzwerten für spannungsoptische Messungen.* Vortrag im Bundesverband Flachglas im AK "Sicherheitsglas und Glasbemessung", online.
(4) L. Efferz (2025) *Non-destructive, photoelastic quality control for large-format, thermally toughened glass*. Vortrag auf der Konferenz *Glass Performance Days* (GPD 2025) Tampere, Finnland.
(5) L. Efferz, C. Schuler, and G. Siebert (2025) *Non-destructive, photoelastic quality control for large-format, thermally toughened glass*. Glass Structures & Engineering.

(6) Hochschule München (2025) Veröffentlichung Artikel in Glaswelt
(7) L. Efferz: Dissertationsschrift [geplant 2026]

7 Literaturverzeichnis

Aben, H., Guillemet, C.: Photoelasticity of Glass. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (1993)

Aben, H., Anton, J., Errapart, A., Hödemann, S., Kikas, J., Klaassen, H., Lamp, M.: On non-destructive residual stress measurement in glass panels Estonian J. Eng. **16**(2), 150–156 (2010). doi: 10.3176/eng.2010.2.04

ASTM C 1048: Standard Specification for Heat-Strengthened and Fully Tempered Flat Glass. ASTM International, West Conshohocken, PA(ASTM C 1048 - 18) (2018)

ASTM C 1279: Standard Test Method for Non-Destructive Photoelastic Measurement of Edge and Surface Stresses in Annealed, Heat-Strengthened, and Fully Tempered Flat Glass. ASTM International, West Conshohocken, PA(ASTM C 1279-23) (2023)

Baddeley, A., Rubak, E., Turner, R.: Spatial Point Patterns. Chapman and Hall/CRC (2015)

Bohmann, L., Schuster, M., Seel, M., Kraus, M.: Experimental statistical fracture pattern analysis of glass panes with varying pre-stress levels Glass Performance Days 2025 Conference Proceedings (2025)

DIN SPEC 18198: Messung und Bewertung von optischen Anisotropie-Effekten bei thermisch vorgespanntem Glas. Beuth, Berlin(DIN SPEC 18198) (2022)

Dix, S., Schuler, C.: Untersuchungen an thermisch vorgespannten Gläsern mittels spannungsoptischen Methoden. Glas im konstruktiven Ingenieurbau 16, München (2018)

Efferz, L.: On the non-destructive quality control of thermally toughened glass: in Erstellung. Dissertation, Universität der Bundeswehr München; Hochschule München (2026)

Efferz, L., Schuler, C., Siebert, G.: Photoelastic Measurements and Evaluation Methods for Edge Stress in Architectural Tempered Glass Glass Structures & Engineering (2024a). doi: 10.1007/s40940-024-00270-3

Efferz, L., Thiele, K., Schuster, M., Schuler, C., Siebert, G., Schneider, J.: Relation between edge stress, bending strength, surface stress and fracture pattern of thermally toughened glass Glass Structures & Engineering (2024b). doi: 10.1007/s40940-024-00269-w.

Efferz, L., Schuster, M., Kraus, M.A., Schuler, C., Siebert, G.: Key parameters for the non-destructive quality control of thermally toughened safety glass Journal of Building Engineering (2025a). doi: 10.1016/j.jobe.2025.112613

Efferz, L., Schuler, C., Siebert, G.: Non-destructive, photoelastic quality control for large-format, thermally toughened glass: (under Review) Glass Structures & Engineering (2025b)

EN 12150-1: Glass in building – Thermally toughened soda lime silicate safety glass – Part 1: Definition and description.(12150) (2020)

EN 1288-3: Glas im Bauwesen - Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Teil 3: Prüfung von Proben bei zweiseitiger Auflagerung (Vierschneiden-Verfahren). Beuth, Berlin(1288) (2000)

EN 1863-1: Glass in buildings - Heat strengthened soda lime silicate glass –Part 1: Definition and description(1863) (2012)

GlasStress Ltd.: SCALP Instruction Manual, 5th edn., Tallinn, Estonia (2013)

Griffith, A., A.: VI. The phenomena of rupture and flow in solids Phil. Trans. R. Soc. Lond. A **221**(582-593), 163–198 (1921). doi: 10.1098/rsta.1921.0006

Kraus, M., Pourmoghaddam, N., Schneider, J., Siebert, G.: BREAK – Calibrating Stochastic Tessellations for the Prediction of Fracture Patterns of Thermally Pre-stressed Glass (2019)

Kraus, A.M.: Machine Learning Techniques for the Material Identification of Laminated Glass in the Intact and Post-Fracture State. Dissertation, Universität der Bundeswehr München (2019)

Lee, H., Cho, S., Yoon, K., Lee, J.: Glass Thickness and Fragmentation Behavior in Stressed Glasses NJGC **02**(04), 116–121 (2012). doi: 10.4236/njgc.2012.24020

Mognato, E., Barbieri, A., Schiavonato, M., Pace, M.: Thermally toughened safety glass: correlation between flexural strength, fragmentation and surface compressive stress. In: GPD Glass Performance Days 2011, pp. 115–118 (2011)

Mognato, E., Brocca, S., Barbieri, A.: Thermally Processed Glass: Correlation Between Surface Compression, Mechanical and Fragmentation Test. In: GPD Glass Performance Days, pp. 14–20 (2017)

Mognato, E., Brocca, S., Comiati, F.: Which is the Right Reference Surface Compression Value for Heat Treated Glass? Challenging glass 6, 703–712 (2018)

Mognato, E., Bazzaco, P., Brocca, S., Barbieri, A.: Surface Compression Comparative Measurements on Tempered Glass with Different Instruments. https://www.glassonweb.com/article/surface-compression-comparative-measurements-tempered-glass-with-different-instruments (2020)

Pourmoghaddam, N., Schneider, J.: Experimental investigation into the fragment size of tempered glass Glass Struct Eng **3**(2), 167–181 (2018a). doi: 10.1007/s40940-018-0062-0

Pourmoghaddam, N., Schneider, J.: Finite-element analysis of the residual stresses in tempered glass plates with holes or cut-outs Glass Struct Eng **3**(1), 17–37 (2018b). doi: 10.1007/s40940-018-0055-z

Pourmoghaddam, N., Kraus, M.A., Schneider, J., Siebert, G.: Relationship between strain energy and fracture pattern morphology of thermally tempered glass for the prediction of the 2D macro-scale fragmentation of glass Glass Struct Eng **4**(2), 257–275 (2019). doi: 10.1007/s40940-018-00091-1

Pour-Moghaddam, N.: On the Fracture Behaviour and the Fracture Pattern Morphology of Tempered Soda-Lime Glass, vol. 54. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden (2020)

Schaaf, B., Di Biase, P., Feldmann, M., Schuler, C., Dix, S.: Full-surface and Non-destructive Quality Control and Evaluation by Using Photoelastic Methods. In: Tamglass Ltd Oy (ed) Glass Processing Days, Tampere (2017)

Thiele, K., Müller-Braun, S., Schneider, J.: Evaluation methods for surface compression stress measurements with unknown principle stress directions Glass Struct Eng **7**(2), 121–137 (2022). doi: 10.1007/s40940-022-00184-y