

Dünnglas

Prüfverfahren für Architekturanwendungen

Timon Alexander Peters
Dissertationsschrift
Darmstadt, 2024



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ISM+D

Institute of Structural Mechanics and Design
Institut für Statik und Konstruktion



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Dünnglas – Prüfverfahren für Architekturanwendungen

**vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt**

zur Erlangung des Grades *Doktor-Ingenieur* (Dr.-Ing.)

**Dissertation
von Timon Alexander Peters**

Erstreferent: Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack

Darmstadt, 2024

Peters, Timon Alexander: Dünnglas – Prüfverfahren für Architekturanwendungen

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung auf TUpriints: 2024

Eingereicht im Januar 2024 am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Technischen Universität Darmstadt. Verteidigt ebendort am 18. März 2024.

Lizenz: CC BY-SA 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses/>

Kurzfassung

Aufgrund von großen Verformungen und den damit einhergehenden Änderungen des mechanischen Verhaltens ist dünnes Glas für Anwendungen im Bauwesen nur begrenzt mit den Prüfverfahren der Normen EN 1288-2 (Doppelringbiegeversuch mit Druckluftunterstützung), EN 1288-3 (Vierschneidenbiegeversuch für einachsige Prüfung) und EN 1288-5 (Doppelringbiegeversuch an kleinen Prüfflächen) prüfbar. Ziel dieser Arbeit ist es daher alternative Prüfverfahren zu untersuchen, die eine vergleichbare statistische Aussagekraft wie die Normversuche haben. Dazu wird zuerst das mechanische Verhalten unter großen Verformungen, der Einfluss von Imperfektionen bei den Prüfverfahren und eine mögliche Verschiebung der Anwendungsgrenzen der unveränderten Normversuche untersucht. Anschließend werden eine Reihe von Prüfverfahren, sowohl aus der Literatur als auch Eigenentwicklungen, vorgestellt und analysiert. Auf Basis der Ergebnisse kann die Arbeit Empfehlungen für Dünnglasprüfung in unterschiedlichen Anwendungsbereichen geben. Es wird gezeigt, dass eine normgerechte, mit dickerem Glas vergleichbare Bemessung für Dünnglas möglich und praktisch umsetzbar ist.

Abstract

Due to large deformations and the associated changes in mechanical behaviour, thin glass is only limitedly testable for applications in construction with the testing methods of the standards EN 1288-2 (double ring bending test with pneumatic support), EN 1288-3 (four-point bending test for uniaxial testing), and EN 1288-5 (double ring bending test on small test surfaces). Therefore, the aim of this work is to investigate alternative testing methods that have a comparable statistical validity as the standard tests. For this purpose, the mechanical behaviour under large deformations, the influence of imperfections in the testing methods, and a possible shift of the application limits of the unchanged standard tests are first examined. Subsequently, a series of testing methods, both from the literature and self-conceived developments, are presented and analysed. Based on the results, this work offers recommendations for thin glass testing across various application areas. It demonstrates that a structural analysis of thin glass, compliant with existing standards and comparable to thicker glass, is not only feasible but practically implementable.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iv
1.....Einleitung	1
1.1. Problemstellung	1
1.2. Ziel der Arbeit	1
1.3. Vorgehen	1
2.....Grundlagen	2
2.1. Dünnglas	2
2.1.1. Definition	2
2.1.2. Historie und Anwendungen	2
2.1.3. Produktionsverfahren	5
2.1.4. Produkte und mechanische Eigenschaften	6
2.1.5. Verarbeitung und Vorspannprozesse	9
2.2. Genormte Prüfverfahren im Glasbau	13
2.2.1. Einachsige Biegeprüfung zur Bestimmung der Festigkeit	13
2.2.2. Zweiachsige Biegeprüfung zur Bestimmung der Festigkeit	14
2.2.3. Sonstige Prüfverfahren für Flachglas	16
3.....Mechanisches Verhalten von Dünnglas	17
3.1. Einachsige Biegung	17
3.1.1. Steifigkeit und Spannung	18
3.1.2. Poisson-Effekt	19
3.1.3. Stabilität	26
3.1.4. Einfluss von Imperfektionen	26
3.1.5. Bruchbild	39
3.2. Zweiachsige Biegung	46
3.2.1. Steifigkeit	46
3.2.2. Membraneffekte bei der Doppelringprüfung	47
3.2.3. Stabilität	48
3.2.4. Einfluss von Imperfektionen	48
3.2.5. Bruchbild	51
3.3. Simulation von Dünnglas mit FEM	52
4.....Einachsige Prüfverfahren zur Festigkeitsermittlung von Dünnglas	56
4.1. Grenzen des Vierschneidenbiegeversuchs nach EN 1288-3	56
4.2. Stand der Technik bei einachsiger Dünnglasprüfung	58
4.3. Mehrprobenverfahren	61
4.4. Biegeprüfmaschine	63
4.4.1. Funktionsprinzip und Geometrie	63
4.4.2. Versionshistorie und Grundfragen der Konstruktion	65
4.4.3. Konstruktionsdetails und Software der aktuellen Version	70
4.4.4. Verfahrensablauf	74

4.4.5.	Ergebnisse	75
4.5.	Prüfung mit Smartphone	77
4.5.1.	Funktionsprinzip	77
4.5.2.	Aufbau der Software	78
4.5.3.	Verfahrensablauf	82
4.5.4.	Bestimmung des Nutzereinflusses mit Sensoren	83
4.5.5.	Prüfergebnisse	86
4.6.	Sonstige Prüfverfahren	91
4.6.1.	Papierbasiertes Verfahren	91
4.6.2.	Laserreflektor	91
4.6.3.	Analoge Biegeprüfmaschine	94
4.6.4.	Steckblockverfahren	94
4.6.5.	Spiralprüfverfahren	96
4.6.6.	Rolleneindrückverfahren	97
4.6.7.	Bandprüfverfahren	98
4.6.8.	Stempelzugverfahren	99
4.6.9.	Weitere Konzepte	101
4.7.	Vergleich und Empfehlungen	103
5.....	Zweiachsige Prüfverfahren zur Festigkeitsermittlung von Dünnglas	105
5.1.	Grenzen des Doppelringbiegeversuchs nach EN 1288-2 und EN 1288-5	105
5.1.1.	Doppelringbiegeversuch ohne Druckluft (EN 1288-5)	105
5.1.2.	Doppelringbiegeversuch mit Druckluft (EN 1288-2)	112
5.2.	Stand der Technik bei zweiachsiger Dünnglasprüfung	115
5.3.	Mehrprobenverfahren	116
5.4.	Druckluftunterstütztes Verfahren für kleine Doppelringe (Überdruckverfahren)	117
5.4.1.	Funktionsprinzip und Konstruktion des Versuchsaufbaus	117
5.4.2.	Druckluft im Versuchsaufbau nach EN 1288-5	118
5.4.3.	Druckluft mit größeren Durchmessern als in EN 1288-5	122
5.4.4.	Bewertung	123
5.5.	Unterdruck unter Stützring (Unterdruckverfahren)	124
5.5.1.	Prinzip und Versuchsaufbau	124
5.5.2.	Ohne Lastring	125
5.5.3.	Mit Lastring	126
5.5.4.	Bewertung	127
5.6.	Mehrringprüfung	128
5.6.1.	Funktionsprinzip und Versuchsaufbau	128
5.6.2.	Lastverteilung	129
5.6.3.	Konstruktionsvarianten	131
5.6.4.	Bewertung	133
5.7.	Sonstige Prüfverfahren	134
5.7.1.	Vibrationsprüfung	134
5.7.2.	Streifenprüfung	134
5.8.	Vergleich	136

6.....Fazit und Ausblick	138
6.1. Fazit	138
6.1.1. Zusammenfassung	138
6.1.2. Empfehlungen für die Praxis	138
6.2. Ausblick	138
6.2.1. Potenzial für zukünftige Forschung	138
6.2.2. Technologischer Fortschritt	139
6.2.3. Auswirkungen	139
7.....Anhang	1
7.1. Weibull-Auswertung	1
7.2. Thermischer Vorspannofen	6
7.3. Grasshopper-Karamba-Modell zur Biegunberechnung im einachsigen Biegeversuch und PRBM zur Überprüfung	8
7.4. Weitere Beispiele für Bruchbilder in einachsigen gebogenem Dünnglas	11
7.5. Vereinfachtes mathematisches Modell für den Vierschneidenbiegeversuch	14
7.6. Quellcode der Biegeprüfmaschine	16
7.7. Quellcode des Smartphonebiegeverfahrens	20
7.8. Quellcode für papierbasiertes Verfahren	23
7.9. Analytische Lösung des Doppelringbiegeversuchs	25
7.10. FE-Modell für den Doppelringbiegeversuch	25
7.11. Spannungskriterium bei der zweiachsigen Festigkeitsprüfung	29
Literaturverzeichnis	32
Abbildungsverzeichnis	38
Tabellenverzeichnis	46
Abkürzungsverzeichnis	47
Variablenverzeichnis	47

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Mit der fortschreitenden Entwicklung der Glasproduktion, hauptsächlich getrieben vom Bedarf der Elektronikindustrie, ist Glas in immer geringeren Dicken (bis zu 25 μm) und größeren Abmessungen (beispielsweise 2,94 x 3,37 m bei 0,5 mm Dicke) verfügbar (Kapitel 2.1.4). Die Anwendbarkeit dieser dünnen Glasprodukte im Bauwesen wird daher immer interessanter, insbesondere für leichte, flexible oder gekrümmte Bauteile. Seit einigen Jahren werden mögliche Anwendungen, zum Beispiel als flexible Überdachungen, intensiv erforscht, auf Fachmessen sind immer wieder interessante Prototypen zu sehen (Kapitel 2.1.2). Den tatsächlichen Durchbruch in der Architektur haben diese Glasprodukte jedoch noch nicht erreicht.

Ein Hauptgrund für die mangelnde Umsetzung von Bauteilen aus Dünnglas im Bauwesen ist die zurzeit fehlende Möglichkeit einer normgerechten oder bauaufsichtlich zugelassenen Festigkeitsprüfung für geringe Glasdicken (Kapitel 2.2). Im einachsigen Biegeversuch nach EN 1288-3 [1], welcher bei thermisch entspanntem und chemisch vorgespanntem Glas hauptsächlich zur Bestimmung der Kantenfestigkeit dient, ist die Glasdicke auf minimal 3 mm begrenzt. Im zweiachsigen Biegeversuch nach EN 1288-5 [2], welcher die Flächenfestigkeit prüft, ist Glas ab einer Dicke von 1 mm prüfbar, allerdings nur bis zu einer Bruchspannung von 100 MPa, höhere Festigkeiten erfordern größere Dicken. Insbesondere für vorgespanntes Glas ist diese Norm realistisch ebenfalls erst ab einer Dicke von 2 bis 3 mm anwendbar. Grund für die Begrenzung der Anwendbarkeit der Normen auf dickeres Glas ist die geringe Steifigkeit von Dünnglas, welche in den vorgegebenen Versuchsaufbauten zu großen Verformungen und bei zweiachsiger Biegung zusätzlich zu erheblichen Membranspannungen führt. Als Folge liefern die jeweiligen Biegeprüfungen mit den in den Normen aufgeführten Formeln keine oder falsche Festigkeitswerte bei geringen Glasdicken.

1.2. Ziel der Arbeit

Diese Arbeit zielt darauf ab, vorhandene Prüfverfahren für Glas auf ihre Anwendbarkeit für die Dünnglasprüfung zu untersuchen und gegebenenfalls zu modifizieren sowie neue mögliche Prüfverfahren für Dünnglas, welche statistisch verwertbare Festigkeitswerte liefern, zu entwickeln. Dabei soll die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den im Bauwesen üblichen Normversuchen, insbesondere EN 1288-3 und EN 1288-5, soweit möglich sichergestellt werden. Dies bedeutet, dass insbesondere die belastete Fläche oder Kantenlänge sowie die Spannungssteigerungsrate den Normwerten entsprechen sollte, dadurch erhalten die Versuche an Dünnglas eine zu den Prüfnormen äquivalente statistische Aussagekraft, welche für statische Nachweise an Bauwerken im Allgemeinen notwendig ist.

1.3. Vorgehen

Zu Beginn der Arbeit werden die Grundlagen zu Dünnglas erklärt, dazu gehören Historie, Anwendungen, Produkte, Herstellung und Verarbeitung (Kapitel 2.1). Zudem wird die Glasprüfung nach Normverfahren beschrieben (Kapitel 2.2). Anschließend befasst sich die Arbeit mit dem mechanischen Verhalten von Dünnglas, insbesondere im Kontext der Festigkeitsprüfung (Kapitel 3).

Die Untersuchung der Prüfverfahren, sowohl einachsig (Kapitel 4) als auch zweiachsig (Kapitel 5), bildet den Hauptteil der Arbeit. Hier werden zuerst die theoretischen Anwendungsgrenzen der bestehenden Prüfnormen untersucht. Anschließend folgt jeweils eine kurze Vorstellung von in der Literatur vorgeschlagenen Verfahren, bevor abschließend die eigenen entwickelten und untersuchten Prüfverfahren folgen. Letztere werden im Detail mit einer Kombination aus theoretischen Überlegungen, FE-Simulationen und realen Versuchsserien analysiert, zudem erfolgt eine Beschreibung von umgesetzten Versuchsaufbauten.

Basierend auf den Analysen erfolgen Vergleiche der Prüfverfahren und Empfehlungen für die Praxis sowie ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschung und Anpassung der Normen (Kapitel 6).

2. Grundlagen

2.1. Dünnglas

2.1.1. Definition

Im Allgemeinen bezeichnet der Begriff „Dünnglas“ sämtliche Glasprodukte mit geringen Glasdicken, sowohl im Kontext von Flachglas und Behälterglas als auch in sonstigen Anwendungen für technische, wissenschaftliche und künstlerische Zwecke. Hierbei kann die Grenze je nach Produkt und Einsatzzweck stark schwanken. Im Bauwesen und insbesondere im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff auf Flachglasprodukte beschränkt. Für den Begriff „Dünnglas“ existieren in diesem Kontext unterschiedliche Definitionen, die beiden gebräuchlichsten leiten sich entweder aus den Randbedingungen der Prüfnormen oder aus dem mechanischen Verhalten ab.

Die Definition über die Prüfnormen – welche in Kapitel 2.2 genauer erläutert werden – geht davon aus, dass Glas, welches in der Dicke unterhalb des für Standardprüfverfahren festgelegten Dickenbereiches liegt, allgemein als Dünnglas zu bezeichnen ist. Im Kontext der EN 1288-3 (Vierschneiden-Biegeversuch) [1] ist die Glasdicke beispielsweise auf den Bereich zwischen 3 mm und 19 mm beschränkt, die nächstgeringere allgemein verfügbare Glasdicke von 2 mm würde also bereits unter Dünnglas fallen.

Die Definition über das mechanische Verhalten – welches in Kapitel 3 dieser Arbeit genauer behandelt wird – bezieht sich hauptsächlich auf den Widerstand gegen Biegung und die Art des Lastabtrags. „Dickglas“ oder „Normalglas“ wird gewöhnlich in Anwendungen ohne signifikante Verformungen eingesetzt, das Glas bleibt also weitgehend eben und leitet Lasten je nach Belastung überwiegend über Scheiben- oder Plattentragwirkung ab. Dünnglas hingegen kann durch seine geringe Steifigkeit stärker kaltverformt und somit einerseits gekrümmten Konturen angepasst werden, andererseits ermöglicht die Verformung auch ein Abtrag der Lasten über die Aktivierung der Membrantragwirkung. Hierbei hängt die für die Definition maßgebende Glasdicke vom Einsatzzweck ab, die Grenze wird in den meisten Fällen über das Verhältnis von Glasdicke zu Spannweite bestimmt.

Da sich diese Arbeit auf Prüfverfahren für Dünnglas bezieht wird die Definition über die Grenzen der Prüfnormen und somit einer Glasdicke bis zu 2 mm verwendet.

2.1.2. Historie und Anwendungen

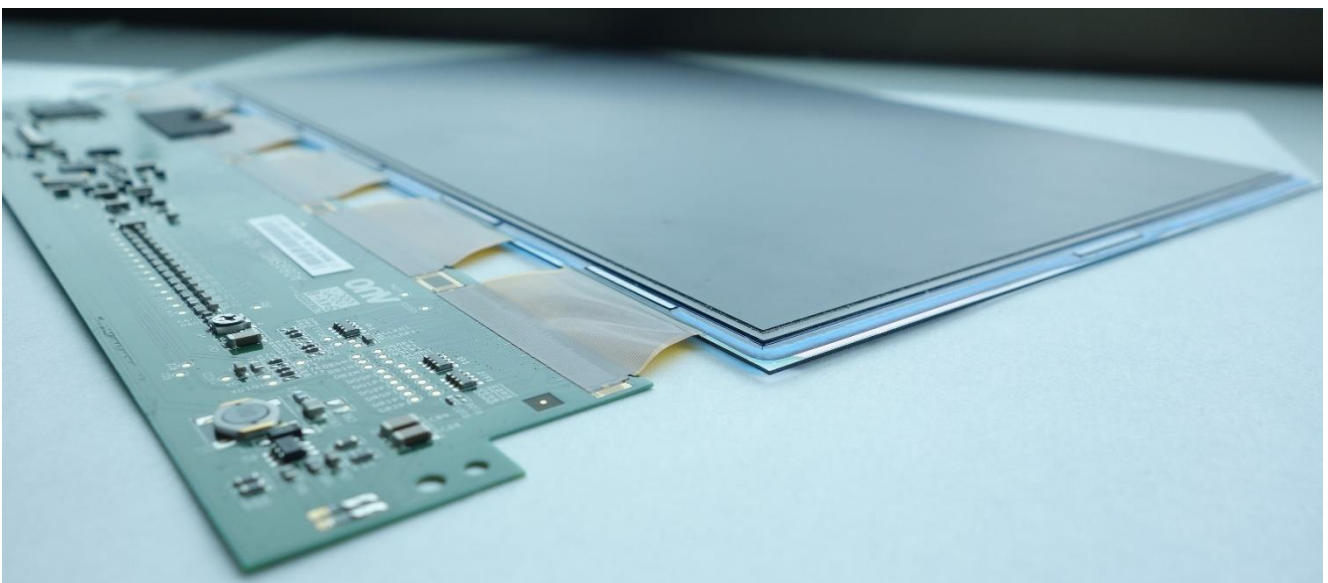


Abbildung 1: 8,9"-Display eines Asus Eee PC 901 aus dem Jahr 2008; Das Display besteht aus drei Dünnglasscheiben mit 1,14 mm Gesamtdicke, die innere Scheibe hat dabei eine Stärke von ca. 0,44 mm und die beiden Äußeren jeweils ca. 0,35 mm

Auch wenn dünne Flachglasprodukte schon seit Jahrhunderten hergestellt werden, beispielsweise für optische Instrumente, ist die Produktion von großformatigem, in der Bauindustrie einsetzbarem Dünnglas eine Folge der Entwicklung der Elektronikindustrie der 1990er und 2000er Jahre. Insbesondere die Displaytechnologie erforderte beim Schritt von Kathodenstrahlröhren zu Flachbildschirmen einen deutlichen technologischen Sprung in der Glasherstellung, ein Beispiel eines dünnen Displays ist in Abbildung 1 gezeigt. An der für LCD-Bildschirme üblichen Klassifikation über „Generationen“, welche die Größe des Glassubstrats beschreiben, lässt sich diese Entwicklung gut nachverfolgen. Zu Beginn der 1990er Jahre wurden Produktionsanlagen für die erste Generation mit einer Glasgröße von ca. 300 mm x 400 mm [3] gebaut. Im Abstand von wenigen Monaten bis Jahren wurden neue Generationen eingeführt, über einen Zeitraum von fast 20 Jahren vergrößerte sich so die mögliche Displaygröße schnell zu Kantenlängen von mehreren Metern, Generation 10 aus dem Jahr 2009 [4] wird mit 2880 mm x 3130 mm angegeben [5]. Die aktuelle Generation 10.5 ist nur wenige Millimeter größer [5]. Eine weitere Anwendung die maßgeblich zur Weiterentwicklung der Technologie für die Herstellung größerer Dünngläser, insbesondere bei sehr dünnem Dünnglas (auch Ultradünnglas genannt, teilweise mit Dicken unter 100 μm), beigetragen hat ist die Entwicklung von flexiblen Solarmodulen [6].

Die ersten Anwendungen im Bauwesen erfolgten hauptsächlich als Zwischenschichten für Lamine, beispielsweise in Sicherheitsanwendungen zum Explosionsschutz [7], bei der Sanierung von historischen Fenstern bei denen Zweischiebenisoliervergläser [8] oder Vakuumisoliervergläser [7] in ursprünglich für Monoverglasung gedachte Rahmen eingesetzt werden, was die mögliche Dicke begrenzt, und als und innere Scheiben von Drei- [9] oder Vierfachfachisolierverglasung [10]. Hierbei liegt der Fokus jedoch weniger auf der Flexibilität und Membrantragwirkung des Glases als auf der reinen Gewichts- und Dickenersparnis.

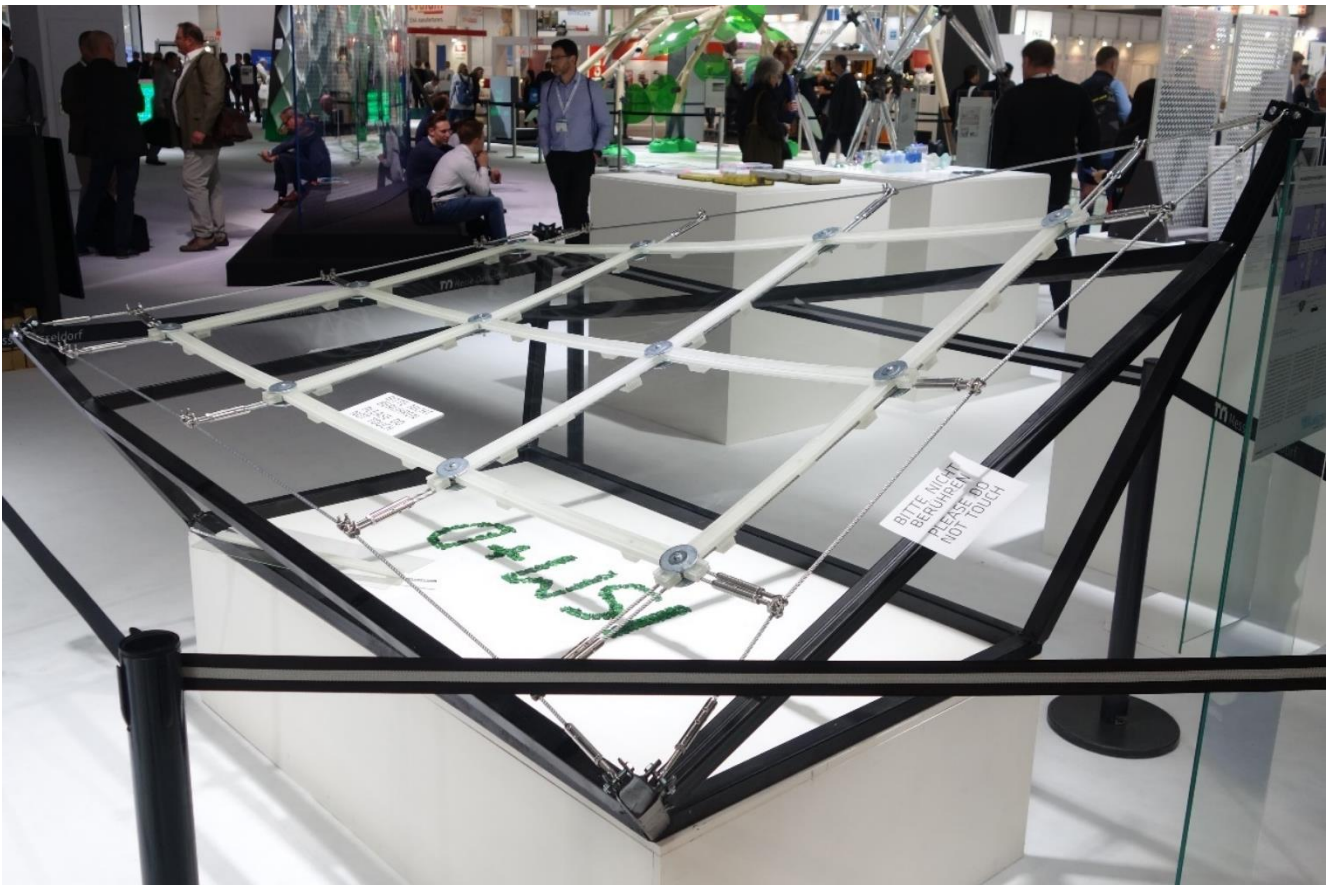


Abbildung 2: Prototyp eines mit Dünnglas eingedeckten Seilnetzdaches, vorgestellt auf der Fachmesse Glasstec 2019

Dünnglas nach der Definition über die Prüfnormen, also mit Dicken von 2 mm oder weniger, wurde als gekrümmten und flexibles Bauteil bisher weitgehend in experimentellen Prototypen – zu sehen auf vielen Fachmessen der letzten Jahre – eingesetzt. Nennenswerte Beispiele sind hier das auf der Glastec 2014 vorgestellte bewegliche Dünnglasdach von Neugebauer [11] sowie das auf der Glastec 2018 ausgestellte mit Dünnglas eingedeckte doppelt gekrümmte Seilnetztragwerk von Jaschke [12] (Abbildung 2).

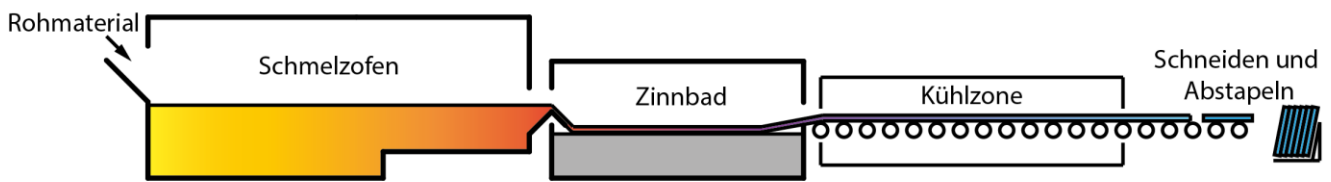
Anwendungen von Dünnglas nach der Definition über das mechanische Verhalten, also mit beliebiger absoluter, aber im Verhältnis zur Spannweite geringer Dicke, sind dagegen bereits häufiger im Bauwesen zu finden. Vorreiter auf diesem Gebiet sind die im Jahr 2007 gebaute, von der deutschen Unternehmensgruppe seele [13] geplante und ausgeführte Glasfassade des Bahnhofs in Straßburg (Abbildung 3) sowie die Arbeiten von Mick Eekhout und dem von ihm gegründeten Ingenieurbüro Octatube aus den Niederlanden, welche in ihren Projekten einige der ersten doppelt gekrümmten kaltgebogenen Glaselemente einsetzten, beispielsweise bei der Überdachung des Zuidpoort Delft aus dem Jahr 2006 [14]. Neuere bedeutende Projekte wurden unter anderem vom Ingenieurbüro Eckersley O’Callaghan aus Großbritannien in Zusammenarbeit mit der seele Gruppe entwickelt und umgesetzt, dazu gehören der mit kaltgebogenen laminierten Glaselementen eingedeckte kugelförmige Apple Store Marina Bay Sands in Singapur [15] sowie die 14 Meter langen und 3,2 Meter hohen, ebenfalls kaltgebogenen Glaselemente der gekrümmten Fassade des Apple Campus in Cupertino, Kalifornien, USA [16].



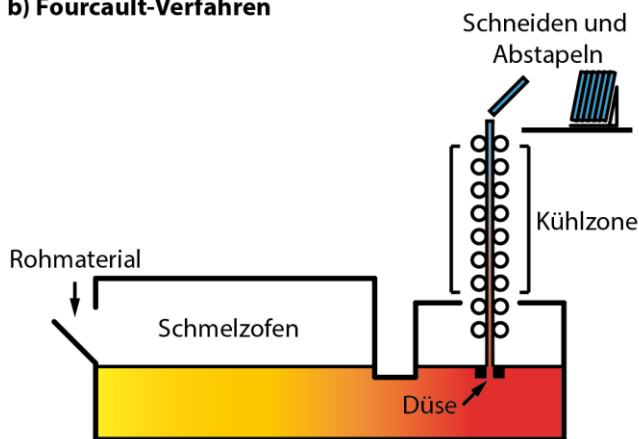
Abbildung 3: Kaltgebogene Glasfassade des Bahnhof Straßburg, kaltgebogen laminiertes Verbundglas aus 2 x 6 mm Einscheibensicherheitsglas [13]. Bild: Nils Öberg via Wikimedia Commons, Lizenz: CC-BY-SA 3.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>

2.1.3. Produktionsverfahren

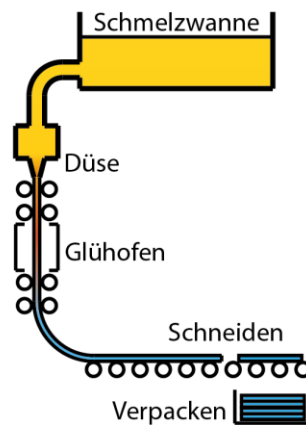
a) Floatverfahren



b) Fourcault-Verfahren



c) Down-Draw-Verfahren



d) Overflow-Verfahren

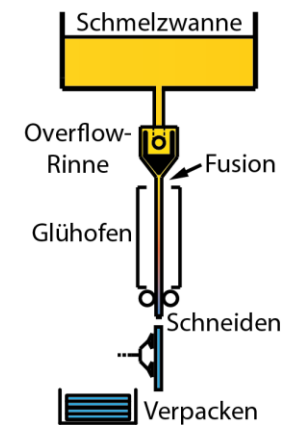


Abbildung 4: Produktionsverfahren im Vergleich

Je nach Dicke des Glases bieten sich für Dünnglas unterschiedliche Produktionsverfahren an. Das bewährteste und technisch einfachste Verfahren ist das auch in der Produktion von dickerem Glas (üblicherweise 3 mm bis 19 mm) heutzutage standardmäßig eingesetzte, im Jahr 1952 von Pilkington [17] erfundene Floatverfahren (Abbildung 4 a)). Hierbei erstarrt das kontinuierlich aus einer Schmelzwanne fließende Glas als endloses Band dessen Dicke durch die Ziehgeschwindigkeit beeinflusst wird auf einem Bad aus flüssigem Zinn und wird anschließend in industriübliche Formate („Bandmaß“) geschnitten. Hierbei entstehen für den europäischen Markt gewöhnlich Glasbänder mit einer Breite von 3,21 m die im Abstand von 6,1 m geteilt werden, diese Werte können international jedoch variieren [18]. Für spezielle Anwendungen, insbesondere für Dünnglas, kann das Floatverfahren in kleineren Abmessungen und mit höherer Präzision modifiziert werden, ein Beispiel dafür ist das von Schott eingesetzte MicroFloat-Verfahren [19]. Die Dicke des Glases ist in diesem Verfahren kaum nach unten begrenzt, so stellt AGC das Produkt „Spool™“ gemäß eigenen Angaben in einer Stärke von nur 0,05 mm her [20].

Ein weiteres Verfahren, das auch zur Produktion von Dünnglas eingesetzt werden kann, ist das ältere Fourcault- oder Up-Draw-Verfahren (Abbildung 4 b)), der Vorgänger des Floatverfahrens für die Herstellung von industriellem Standardflachglas. Hierbei wird das Glas ebenfalls als endloses Band von Walzen aus der Schmelzwanne durch eine Düse vertikal nach oben gezogen. Schott setzt dieses Verfahren beispielsweise ab einer Dicke von 0,9 mm ein. Ein Vorteil des Verfahrens ist die im Gegensatz zum Floatverfahren beidseitig feuerpolierte Oberfläche. [19]

Speziell für die Herstellung von sehr dünnen Gläsern wurden jedoch in den letzten Jahrzehnten einige vom Grundprinzip ähnliche Produktionsverfahren entwickelt. Bei diesen Verfahren wird das Glas nicht horizontal oder nach oben gezogen, sondern unter Nutzung der Schwerkraft nach unten zu einem endlosen, feuerpolierten Band geformt. Hierbei gibt es zwei grundlegende Ansätze (vergleiche auch Abbildung 4 c) und d)). Im von Schott eingesetzten Down-Draw-Verfahren fließt das Glas durch eine Düse und wird anschließend ähnlich zum Fourcault-Verfahren von Rollern auf die gewünschte Dicke gezogen. Die mögliche Glasdicke wird hier mit 0,03 mm bis 1,1 mm angegeben [19]. Im Gegensatz

dazu fließt beim von Corning und Nippon Electric Glass (NEG) eingesetzten Fusion-Draw- bzw. Overflow-Fusion-Verfahren das Glas nach oben beidseitig über eine Rinne und wird unterhalb der Rinne wieder zu einem Glasband verschmolzen [21] [22] [23]. Die Ziehgeschwindigkeit und Flussrate bestimmen hierbei ebenfalls die Dicke, Corning gibt diese von 0,1 mm [24] bis 2 mm [25], NEG von 0,03 mm bis 0,5 mm [26] an.

2.1.4. Produkte und mechanische Eigenschaften

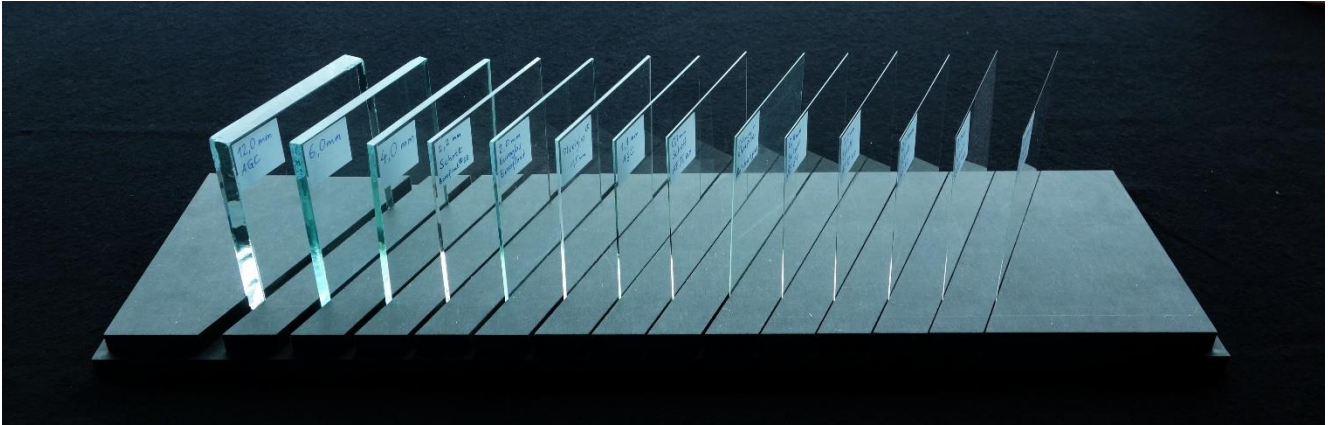


Abbildung 5: Glasprodukte unterschiedlicher Hersteller in Dicken von 0,07 mm bis 12 mm

Eine Reihe von Herstellern bietet spezielle Dünnglasprodukte an, größtenteils für die Elektronikindustrie (Beispiele siehe Abbildung 5). Zwar kann auch „gewöhnliches“ Kalk-Natronsilicatglas in Floatanlagen für Architektur- und Automotiveglas von einigen Herstellern auf Dicken von 2 mm oder geringer gebracht werden, insbesondere für Spezialanwendungen wie beispielsweise Substrate für Flachbildschirme kann jedoch in vielen Fällen nicht die nötige Qualität in Hinblick auf Ebenheit, konstante Dicke und Reinheit des Glases erreicht werden, weshalb hier Produkte mit verbesserten Eigenschaften entwickelt wurden. Sowohl die Glasmischungen als auch die Produktionsverfahren (siehe Kapitel 2.1.3) müssen häufig angepasst werden. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über ausgewählte Produkte einiger bekannter Hersteller.

Tabelle 1: Ausgewählte Dünnglasprodukte einiger Hersteller

Produkt	Anwendung	Material	Verfahren	E [GPa]	μ [-]	ρ [g/cm ³]	α [10 ⁻⁶ /K]	Dicke [mm]	Abmessung	Quellen
Corning Inc.										
Eagle XG®	Substrat für Aktivmatrix-displays	Erdalkali-Boro-Alumino-silikat	Fusion Draw	73,6	0,23	2,38	3,17	0,25 - 0,5	0,25 mm: 1300 mm x 1500 mm (Gen 5.5) 0,5 mm: 2940 mm x 3370 mm (Gen 10.5)	[27] [28] [21]
Astra®	Substrat für High-Performance-Displays			81	0,23	2,52	3,3	0,25 - 0,5	0,5 mm: 2940 mm x 3370 mm (Gen 10.5)	[29] [30]
Lotus™ NXT	Substrat für High-Performance-Displays			83	0,23	2,59	3,5	0,3 - 0,7	2880 mm x 3130 mm (Gen 10)	[31]
Gorilla® Victus® 2	Touchscreens, Coverglas	Alumino-silikat		79	0,22	2,41	5,88	0,4 - 1,2		[32]
Gorilla® Victus®			77	0,22	2,4	7,25	0,4 - 1,2		[33]	
Gorilla® Glass 6			77	0,21	2,4	7,52	0,4 - 0,9		[34]	
Gorilla® Glass 5			77	0,21	2,43	7,88	0,4 - 1,2		[35]	
Gorilla® Glass 3			70	0,22	2,39	7,58	0,4 - 2,0		[25]	
Willow® Glass	flexible Displays, roll-to-roll-Produktion	Erdalkali-Boro-Alumino-silikat		78,7	0,23	2,56	3,46	0,1 0,2 0,25	0,1+0,2 mm: 1300 mm x 300 m (Rolle) 0,25 mm: 1500 mm x 1900 mm	[24]
Schott										
D363® M	Mikroskopie	Borosilikat	Down-Draw	72,9	0,21	2,51	7,2	0,03 - 1,1	420 mm x 710 mm	[36] [37] [38]
D263® T eco	Kamerasysteme							0,03 - 1,1	430 mm x 510 mm	[39] [40]
D263® bio	Biotechnologie							0,145 - 1,3		[36] [37]
D263® LA eco	Strahlung (Low-Alpha)							0,3 - 0,7		[41] [37]
Xensation® α	Coverglas (z.B. für Mobilgeräte)	Lithium-Alumino-Borosilikat	Microfloat	80	0,26	2,39	5,3	0,6 - 0,8	950 mm x 1150 mm	[42] [43]
Xensation® Up.		Lithium-Alumino-silikat		82	0,22	2,48	8,3	0,55 - 0,8	950 mm x 1150 mm	
Xensation® Flex	Faltbare Displays (SCHOTT UTG®)		Down-Draw					ab 0,025		[44] [45]

Produkt	Anwendung	Material	Verfahren	E [GPa]	μ [-]	ρ [g/cm ³]	α [10 ⁻⁶ /K]	Dicke [mm]	Abmessung	Quellen
AS 87 Eco	Displayschutz, Touchsensoren	Alumino-silikat		73,3	0,216	2,46	8,7	0,07 - 0,4	400 mm x 500 mm	[46] [47]
AF 32® eco	Alkalifreies Glas für Halbleiter	Alumino-Borosilikat	Down-Draw	74,8	0,24	2,43	3,2	0,03 - 0,5	300 mm x 300 mm	[48] [49]
MEMpax®	Sensoren, Substrate	Borosilikat		62,7	0,196	2,22	3,26	0,07 - 0,55	12" x 12" (304,8 mm x 304,8 mm)	[50] [51]
Borofloat	Optik, Labor, Haushalt, Halbleiter, ...		Microfloat	64	0,2	2,23	3,25	0,7 - 25,4	850 mm x 1150 mm	[52] [53] [54]
B 270® Thin	Optik, Biotechnologie, integrierte Schaltungen	Kalk-Natron-Silikatglas (Kronglas)	Down-Draw	69,8	0,25	2,56	9,4	0,3 - 1,1		[55]
B 270®			Fourcault (Up-Draw)	71,1	0,22	2,56	9,4	0,9 - 10	900 mm x 1680 mm	[56]
AGC										
Falcon	Elektronik, Automotive, Gebäude...	Alumino-silikat	Float	70	0,21	2,48	9	0,5 - 4	3210 mm x (0,5 mm: 1245 mm 0,7 - 1,1 mm: 1350 mm 2,1 - 4 mm: 1600 mm)	[57]
Standardglas		Kalk-Natron-Glas		70	0,2	2,45	8,7	0,5 - 1,6	3210 mm x (0,5 mm: 1245 mm 0,7 - 0,9 mm: 1350 mm 1,1 - 1,3 mm: 1480 mm 1,6 mm: 1600 mm)	[58]
Dragon-trail™	Coverglas			74	0,23	2,48	9,8			[59]
Spool™	flexible Displays, roll-to-roll-Produktion							0,05	1150 mm x 100 m (Rollenware)	[20]
Nippon Electric Glass										
G-Leaf™	flexible Displays, roll-to-roll-Produktion		Overflow-Draw	73	0,2	2,46	3,8	0,03-0,2	Rollenware	[26] [22]
OA-10G	Substrat für OLED-Displays	Alkali-frei		73	0,2	2,46	3,8	0,3-0,5	2200 mm x 2500 mm	[60]
OA-11				78	0,2	2,52	3,7			
NSG / NSG Pilkington										
UFF™ (Ultra Fine Flat Glass)			Float					0,3-1,3		[61]
glanova™	Displays			75,4	0,24	2,48	9,18	0,28-2		[62]
Micro-white™	Spiegel, Display, Automotive	Low-Iron		70	0,2	2,5	9	1,0-1,3	1600 mm x 2000 mm	[63]

Die häufigsten Anwendungen für Dünnglasprodukte sind Displays, sowohl als Substrat für die Displaymatrix als auch als Coverglas für z.B. Touchscreens. Weiterhin spielt das Glas bei Labor- und Kameraanwendungen eine große Rolle. Nur wenige Hersteller geben eine gleichzeitige Verwendung für Elektronik und in der Architektur explizit an, beispielsweise AGC mit ihrem Produkt Falcon [57]. Eine Verwendung im Bauwesen erscheint jedoch bei den meisten Produkten zumindest aufgrund der maximal möglichen Abmessungen plausibel, Bildschirmsubstrate der Generation 10.5 (2940 mm x 3370 mm) ähneln zum Beispiel in ihren Abmessungen dem halben Bandmaß einer Standardfloatanlage.

In Bezug auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften sind die meisten Gläser zwar sehr nah an den für (Architektur-)Kalk-Natronsilicatglas in der DIN EN 572-1 [64] festgelegten Materialeigenschaften, jedoch ist eine gewisse Streuung zu bemerken. Bei den in Tabelle 1 angegebenen Produktdetails sind Minimal- und Maximalwerte zu finden die jeweils unter- und oberhalb der Normwerte liegen. Tabelle 2 zeigt einen Vergleich dieser Materialparameter mit der Norm DIN EN 572-1.

Tabelle 2: Vergleich der Materialeigenschaften unterschiedlicher Dünngläser

Wert	Minimum	Maximum	DIN EN 572-1
Elastizitätsmodul E [GPa]	62,7 (Schott MEMpax®)	83 (Corning® Lotus™ NXT)	70
Querdehnzahl μ [-]	0,196 (Schott MEMpax®)	0,26 (Schott Xensation® α)	0,2
Dichte ρ [g/cm ³]	2,22 (Schott MEMpax®)	2,59 (Corning® Lotus™ NXT)	2,5
Ausdehnkoeffizient α [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	3,17 (Corning® Eagle XG®)	9,8 (AGC Dragontrail™)	9

Diese Wertebereiche stellen jedoch nicht das Maximum der möglichen Eigenschaften von Glas dar, ein Blick auf die Übersicht der optischen Gläser von Schott zeigt beispielsweise Werte des Elastizitätsmoduls zwischen 54 GPa und 132 GPa und Querdehnzahlen zwischen 0,19 und 0,303. Auch sind dort Dichten von bis zu 6,194 g/cm³ und Ausdehnkoeffizienten bis zu 13,67x10⁻⁶ K⁻¹ zu finden [65].

2.1.5. Verarbeitung und Vorspannprozesse

Die Verarbeitung von Dünnglas mit Standardverfahren der Industrie ist insbesondere für sehr dünnes Glas stark eingeschränkt. Dies beginnt bereits bei der Produktion und dem Transport, beinhaltet aber auch Schneid-, Kantenbearbeitungs-, Laminations- und Vorspannverfahren.

Im Kapitel „Produktionsverfahren“ wurden bereits die industriellen Methoden zur Herstellung des Basisglases vorgestellt. Hier haben die geringe Dicke und Steifigkeit einen großen Einfluss, weshalb von Standardfloatverfahren abgewichen wird. Einerseits ist es schwer mit den großindustriellen Verfahren die nötige Präzision und Oberflächenqualität zu erzielen, andererseits ergeben sich auch bereits beim Zuschnitt des Glases auf Transportmaße und dem weiteren Handling im Herstellungsbetrieb sowie der Auslieferung Herausforderungen. Während auf einer üblichen Floatlinie für Architektur- und Automotiveglas das Glas nach dem Abkühlen während des Rollentransports vollautomatisch geschnitten und anschließend von mit Saughebern ausgestatteten Hebesystemen transportfähig auf Glasgestelle abgestapelt wird, ist dies für dünnes Glas häufig eine Herausforderung. Bei der Besichtigung einiger Produktionsstätten für Dünnglas konnte beispielsweise beobachtet werden, dass das Glas zwar gewöhnlich vollautomatisch geschnitten, jedoch anschließend teilweise oder vollständig manuell verpackt wurde. Auch die Transportverpackungen weichen deutlich von denen für dickeres Flachglas ab, die üblicherweise verwendeten Stahlgestelle für den vertikalen und nicht weiter verpackten Transport des Glases sind kaum anzutreffen, insbesondere für Displayglas das bei der Weiterverarbeitung so sauber und fehlerfrei wie möglich bleiben muss. Es wurde beobachtet, dass in den meisten Fällen mit Polymerschäumen gepolsterte Holzkisten mit zwischen den Glasscheiben eingebrachten Papierschichten der Standard sind. Auch erfolgt der Transport des Glases aufgrund seiner geringen Steifigkeit gewöhnlich liegend, da sehr dünnes Glas bereits unter Eigengewicht knicken kann und die Kanten in dieser Position weniger Belastung erfahren. Eine weitere

Art der Produktbereitstellung ist der für die Roll-To-Roll-Produktion notwendige Transport als Rollenware.

Bei den Zuschnittsverfahren auf die Endmaße des Glases sind ebenfalls einige Unterschiede zu Standardglas zu beobachten, welches nahezu ausschließlich mit Schneidrädern an der gewünschten Position geritzt und anschließend dort durch Anheben der Scheibe gebrochen wird. Wird Dünnglas mit Schneidrädern zugeschnitten, muss der Schneiddruck so gering sein dass das Glas nicht unter der lokalen, punktförmigen Belastung bricht. Zwar gilt für Glas die allgemeine Regel, dass der Schneidenwinkel der Schneidräder mit abnehmender Glasdicke steiler werden sollte, bei sehr geringen Dicken kann dies jedoch nicht mehr ausreichend sein. Daher werden spezielle Schneidräder mit Mikroverzahnung eingesetzt, die im Gegensatz zu gewöhnlichen Schneidrädern nicht mit dem vollen Umfang, sondern nur punktuell und damit auch schon bei geringeren Schneiddrücken in das Glas eindringen, um ausreichende lokale Schädigungen zum anschließenden kontrollierten Brechen des Glases zu erzeugen [66].

Neben dem Zuschnitt mit Schneidrädern kommen bei Dünnglas zudem andere Schneidverfahren zum Einsatz. Insbesondere bei komplizierteren Geometrien (welche in dickerem Glas teilweise gefräst oder im Wasser- oder Heißluftstrahlschneidverfahren gefertigt werden [67]), aber auch bei geraden Schnitten werden immer häufiger Laserschneidtechniken angewendet. Dabei gibt es prinzipiell zwei unterschiedliche Verfahren: beim ersten Verfahren wird der Schnitt erzeugt, indem das Glas lokal erhitzt und somit ein fortlaufender durch Wärmeausdehnung bzw. die darauffolgende Kontraktion bei Abkühlung bedingter Spannungsbruch eingebracht wird [67] [68]. Beim zweiten Verfahren wird das Glas durch Laserablation abgetragen, hier kommen im Picosekunden- [69] oder Femtosekundenbereich [70] gepulste Laser zur Anwendung die im Gegensatz zu kontinuierlichen Laserstrahlen zu geringeren lokalen Aufheizungen des Glases führen. In beiden Fällen wird das Glas entweder anschließend an der durch die Laserbestrahlung eingebrachten Schädigung gebrochen oder durch den Laser direkt komplett durchtrennt [67].

Da in vielen Anwendungen eine erhöhte Glasfestigkeit notwendig ist oder mögliche Bruchstücke aus Sicherheitsgründen in ihrer Größe begrenzt werden müssen (zum Beispiel bei ESG = Einscheibensicherheitsglas nach DIN EN 12150 [71]) kommen bei Glas Vorspannverfahren zum Einsatz. Diese basieren auf dem Prinzip, dass das Glas, welches üblicherweise aufgrund von durch Zugspannungen an mikroskopischen Oberflächendefekten versagen würde, mit einer zusätzlichen Druckspannung in der Oberfläche versehen wird. Mögliche Risse werden dadurch – zumindest bei geringen Zugspannungen – überdrückt. Auch verringert die Oberflächendruckspannung durch Behinderung des Tiefenrisswachstums die Festigkeitsverluste durch Kratzer [72], was insbesondere für viel beanspruchte Gläser wie Displayschutzgläser wichtig ist.

Für dickeres Glas, üblicherweise ab einer Dicke von 3 mm, ist hierbei das thermische Vorspannen das Standardverfahren. Dabei wird das Glas auf Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g , üblicherweise auf ungefähr 650 °C, gebracht und durch sehr schnelles Abkühlen mithilfe von Luftdüsen, bei dem sich die Oberfläche zuerst und der Kern des Glases aufgrund der verzögerten Wärmeleitung anschließend zusammenzieht, ein dauerhafter Spannungszustand im Glas erzeugt. Dabei steht Zugspannung im Kern des Glases mit Oberflächendruckspannung im Gleichgewicht, es entsteht üblicherweise ein parabelförmiger Spannungsverlauf (siehe Abbildung 6 a)).

a) thermischer Vorspannprozess



b) chemischer Vorspannprozess

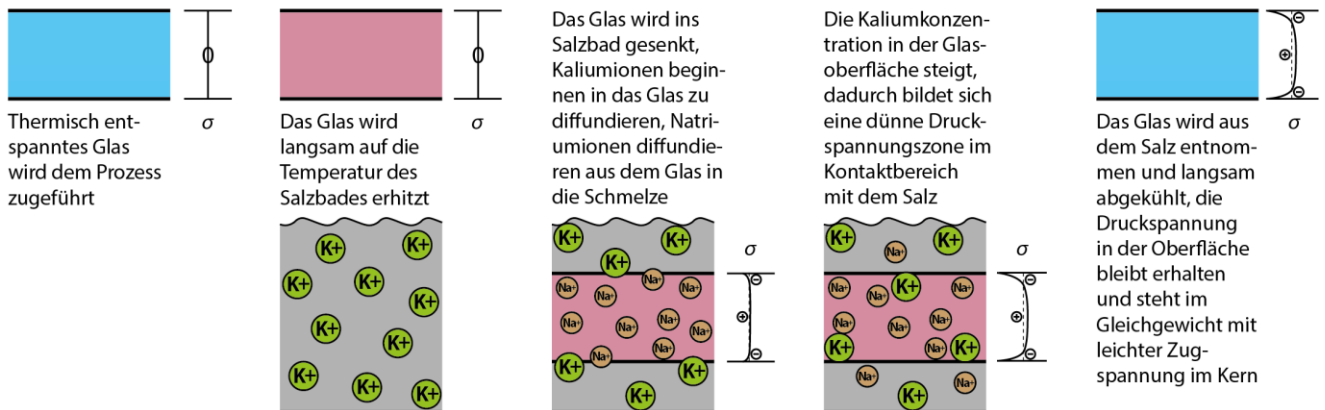


Abbildung 6: Vorspannprozesse im Vergleich

Bei dünnerem Glas stößt das thermische Vorspannen allerdings an seine Grenzen. Der notwendige Temperaturunterschied zwischen Glasoberfläche und Kern kann aufgrund der geringen Dicke nur mit sehr schneller Abkühlung erzeugt werden [73], was technisch sehr aufwändig werden kann. Zudem wurde in eigenen Versuchen beobachtet dass sich dünneres Glas während des thermischen Vorspannens stärker verformt und zudem dazu neigt während des Kühlvorgangs aufgrund des geringen Eigengewichts „abzuheben“. In Abbildung 7 sind Ergebnisse eines Versuchs gezeigt bei dem in einem thermischen Vorspannofen (selbstgebaut, siehe Anhang 7.2) Proben (30 mm x 30 mm) unterschiedlicher Dicke an den Ecken aufgelagert, aufgeheizt (mit jeweils identischer Heizkurve, Heizzeit ca. 45 s je 2 mm) und in dem Moment abgeschreckt (mit jeweils identischem „Kühldruck“, also Luftmenge und Anblasgeschwindigkeit) wurden in dem sie sich unter Eigengewicht sichtbar verformten. Zu sehen ist, dass die erreichbaren Spannungen (gemessen mit „GlasStress SCALP-05“-Polariskop) mit abnehmender Dicke deutlich abfallen und unterhalb von ca. 1,5 mm nicht mehr zuverlässig die für ESG notwendige charakteristische Biegefestigkeit von >120 MPa gemäß DIN EN 12150 (dies beinhaltet die Summe aus charakteristischer Glasfestigkeit des Basisglases (gewöhnlich >45 MPa) und Vorspannung (gewöhnlich >75 MPa)) erreicht werden können. Die meisten kommerziellen Vorspannöfen haben zudem nicht die Möglichkeit den „Kühldruck“ deutlich mehr als in diesem Versuch zu erhöhen.

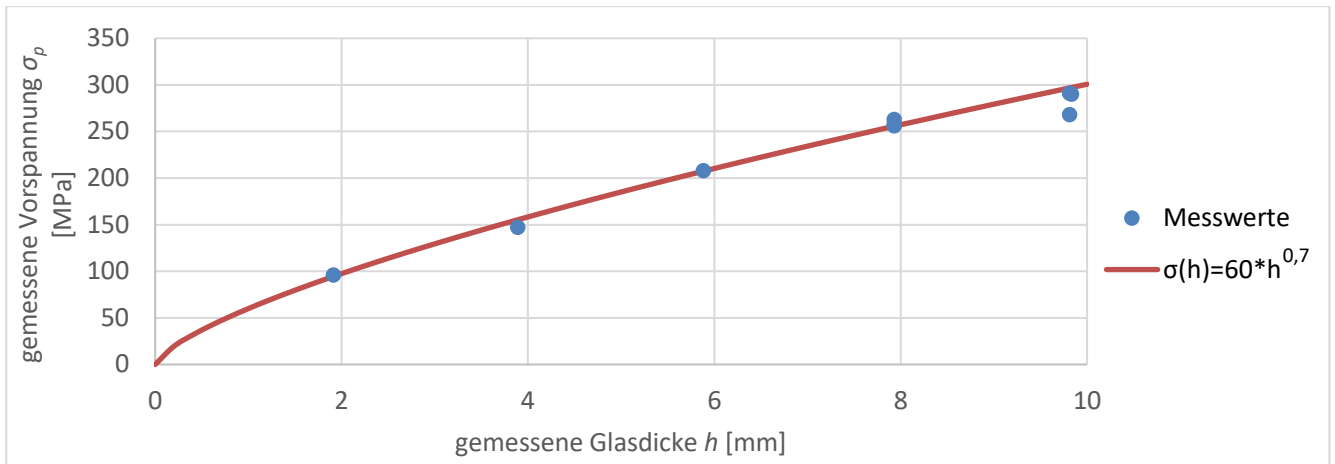


Abbildung 7: Versuchsergebnisse zur Vorspannung von 30 mm x 30 mm großen Glasproben aus Kalk-Natronsilicatglas unterschiedlicher Dicke

Aus diesem Grund wird bei dünneren Gläsern häufig ein chemisches Vorspannverfahren eingesetzt. Dieses Verfahren basiert auf dem Austausch von Ionen unterschiedlicher Größe in der Glasoberfläche. Das Glas wird dazu über einen Zeitraum von mehreren Stunden in einem Salzbad, üblicherweise aus geschmolzenem Kaliumnitrat (Schmelzpunkt: 334 °C, Zersetzungstemperatur: ≥ 400 °C [74]), gelagert. Die Kaliumionen diffundieren dabei in die Glasoberfläche und ersetzen kleinere Natriumionen (siehe Abbildung 6 b)). Die Vorspannzone ist in diesem Verfahren aufgrund der geringen Eindringtiefe der Ionen dünner als bei thermischer Vorspannung (üblicherweise deutlich unter 100 μm [75] [76] [77]), was die Gefahr von Festigkeitsherabsetzungen durch tief eindringende Oberflächendefekte erhöht, allerdings lassen sich üblicherweise auch höhere Vorspanngrade erzielen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde chemisch vorgespanntes Glas unterschiedlicher Hersteller getestet, die Ergebnisse von Festigkeitsprüfungen finden sich in den entsprechenden Kapiteln. Festigkeiten über 400 MPa, deutlich mehr als bei thermisch vorgespanntem Glas üblich, wurden dabei bei einzelnen Proben gemessen.

Alternativ zum thermischen Vorspannen kann die Tragfähigkeit sowie die Sicherheit beim Bruch auch durch Lamination mehrerer Glasschichten mithilfe von polymeren Zwischenschichten erhöht werden. In diesem Zusammenhang kann Dünnglas sowohl Vorteile als auch Nachteile gegenüber dickerem Glas aufweisen.

Neben der Möglichkeit flaches Verbundglas mit einer geringeren Gesamtdicke zu erzeugen, ermöglicht die Verwendung von Glas mit einer im Vergleich zur Spannweite sehr geringen Dicke auch eine eingeprägte dauerhafte Formgebung der Gesamtscheibe durch Laminationsbiegen [78]. Hierfür werden mehrere Schichten des flexiblen Glases mit polymeren Zwischenschichten in einer Form laminiert, das Laminat behält nach dem Abkühlen einen großen Teil der Verformung. Die Rückverformung lässt sich näherungsweise über das Verhältnis der Einzelscheibensteifigkeit I_i zur Gesamtsteifigkeit des Laminats $I_{Laminat}$ bestimmen [79]:

$$\text{relative Rückverformung} \cong \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{I_{Laminat}} \quad (1)$$

Gemäß Gleichung 1 würde sich somit für ein Laminat aus zwei 1 mm starken Glasscheiben mit einer 0,38 mm starken PVB-Zwischenschicht (Steifigkeit wird der Zwischenschicht hier vernachlässigt) eine Rückverformung um $(2 \cdot 1^3) / (2,38^3) \cong 15\%$ nach dem Laminationsprozess ergeben, was in der Wahl der Laminationsform berücksichtigt werden muss. Für weitere Details zum Laminationsbiegen sei auf [79] verwiesen.

Als nachteilig erweist sich bei der Lamination sehr dünner Gläser die geringe Steifigkeit sowie die geringere absolute Belastbarkeit. Bei Laminationsversuchen mit dünnen Gläsern (nicht vorgespanntes

Glas ≤ 1 mm) wurde festgestellt, dass in einigen Fällen das Glas insbesondere entlang der Kanten nicht dem Laminationsdruck von Standardlaminationsverfahren standhalten kann und während der Lamination bricht oder sich sichtbar (und durch die Verklebung mit der Zwischenschicht dauerhaft) lokal verformt. Daher muss das Laminationsverfahren für dünne Gläser teilweise angepasst werden, um lokale Biegeverformungen zu begrenzen.

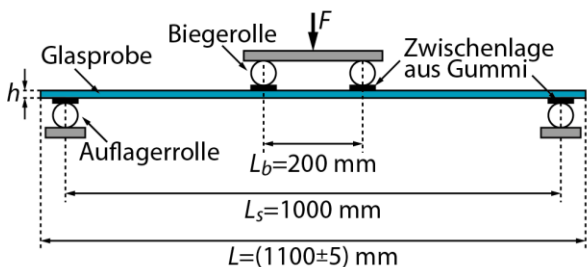
2.2. Genormte Prüfverfahren im Glasbau

Für Glas im Bauwesen sind verschiedene Prüfverfahren genormt. Diese erstrecken sich von einachsiger Biegung zur Bestimmung der Kantenfestigkeit über zweiachsige Biegung zur Bestimmung der Flächenfestigkeit bis hin zu Prüfverfahren für Stoßbelastungen und zum Nachbruch- und Resttragverhalten. In diesem Abschnitt werden die in Europa genormten (Euronorm EN), auf Festigkeit bezogenen, Verfahren betrachtet und als Referenz für die Dünnglasprüfung im weiteren Verlauf der Arbeit herangezogen. Andere Normungen (beispielsweise die amerikanischen ASTM-Normen) enthalten ähnliche Ansätze.

2.2.1. Einachsige Biegeprüfung zur Bestimmung der Festigkeit

Das wahrscheinlich wichtigste und im Glasbau am häufigsten eingesetzte Prüfverfahren ist die einachsige Biegeprüfung im Vierschneidenbiegeverfahren. Hierbei entstehen auf einer Länge von 200 mm gleichmäßige Spannungen entlang der Kanten von Glassteifen, somit wird damit hauptsächlich die Kantenfestigkeit des Glases bestimmt (auch wenn das Glas in diesem Fall auch in der Fläche brechen kann, was die Norm berücksichtigt). Das dazu genormte Prüfverfahren ist in der EN 1288-3 festgehalten [1].

a) Versuchsaufbau nach EN 1288-3



Probenbreite:	$B=(360\pm 5)$ mm
Rollen:	Radius=50 mm
Gummi:	Dicke=3 mm Härte=(40±10) IRHD
Temperatur:	$T_{Umgebung}=(23\pm 5)$ °C $\Delta T_{Probe}\leq 1$ °C
Feuchte:	40%≤relative Luftfeuchte≤70%
Belastung:	Spannungsanstieg=(2±0,4) N/(mm ² s)

b) Schnittkraftverlauf (unverformt, ohne Eigengewicht)

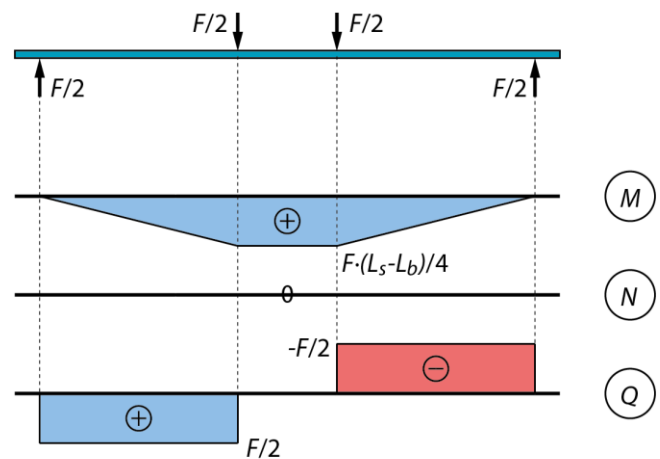


Abbildung 8: Versuchsaufbau nach EN 1288-3 mit Schnittkraftverlauf

Der Versuchsaufbau (Abbildung 8 und Abbildung 9) nach EN 1288-3 sieht die Prüfung von 360 mm x 1100 mm großen Glasscheiben mit einer Dicke von 3 mm bis 19 mm vor. Die Scheiben werden auf Auflagerrollen mit einem Abstand von $L_s=1000$ mm aufgelegt und über Biegerollen mit einem Abstand von $L_b=200$ mm vertikal belastet. Durch die gleichmäßige Spannungsverteilung zwischen den Biegerollen kann eine flächen- oder kantenlängenbezogene Bruchspannung aus den Versuchsergebnissen berechnet werden, die Menge der Probekörper richtet sich nach der gewünschten Signifikanz [80].

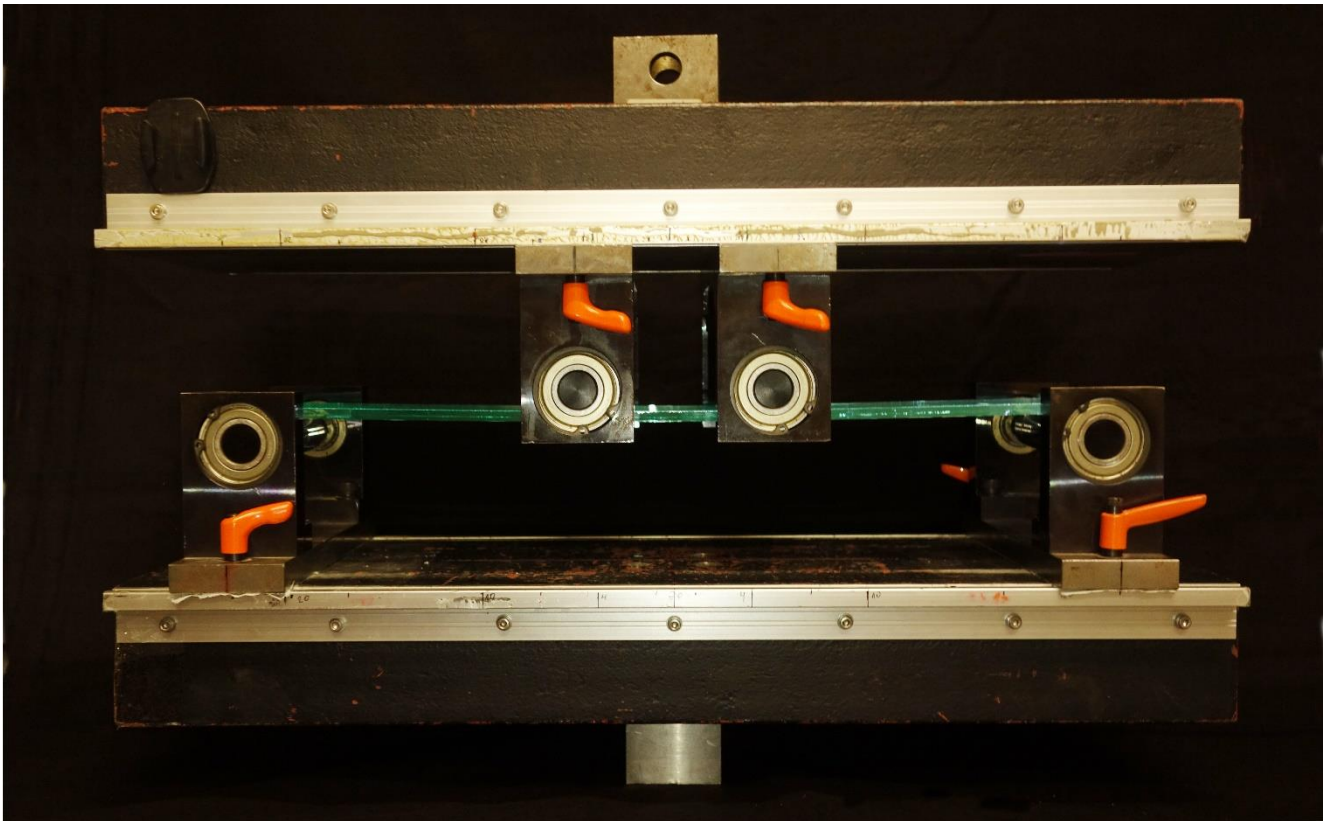


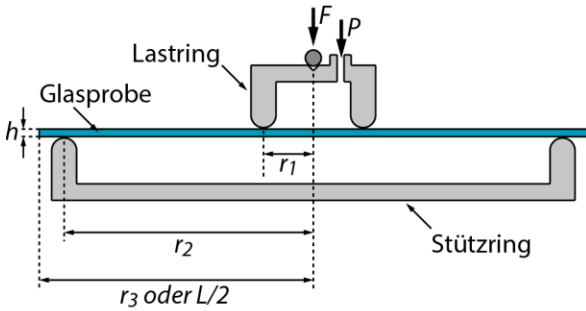
Abbildung 9: modifizierter (halbe Größe) Versuchsaufbau nach EN 1288-3

2.2.2. Zweiachsige Biegeprüfung zur Bestimmung der Festigkeit

Im Gegensatz zur einachsigen Biegeprüfung, die überwiegend zur Bestimmung der Kantenfestigkeit eingesetzt wird, zielt die zweiachsige Biegeprüfung auf die Bestimmung der Flächenfestigkeit von Flachglasprodukten ab. Die in der EN 1288-2 [81] und EN 1288-5 [2] genormten Prüfverfahren beinhalten die Bestimmung der Biegezugfestigkeit der Glasoberfläche im Doppelringbiegeverfahren.

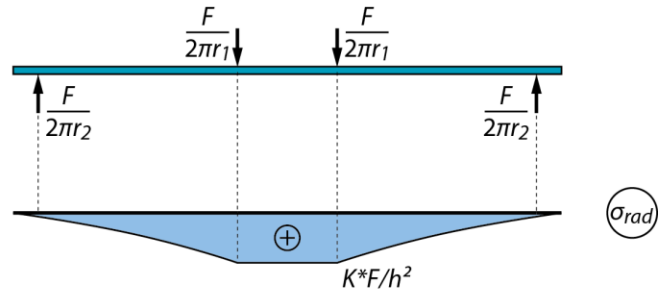
Das Grundprinzip dieses Verfahrens ähnelt einem rotationssymmetrischen Vierschneidenbiegeverfahren: Eine auf einem Stützring gelagerte Glasplatte wird über einen kleineren Lastring belastet, was im Idealfall zu einer konstanten Spannungsverteilung innerhalb des Lastringes führt (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11). In EN 1288-5 wird zusätzlich noch eine Belastung durch Druckluft im Lastring aufgebracht die dem Spannungsabfall vom Bereich unter dem Lastring zur Probenmitte aufgrund von Membranspannungen entgegenwirken soll.

a) Versuchsaufbau nach EN 1288-2 und EN 1288-5



Temperatur: $T_{Umgebung}=(23\pm 5)^\circ\text{C}$ $\Delta T_{Probe}\leq 1^\circ\text{C}$
 Feuchte: $40\%\leq\text{Luftfeuchte}\leq 70\%$
 Belastung: Spannungsanstieg= $(2\pm 0,4)\text{ N}/(\text{mm}^2\text{s})$

b) Spannungsverlauf in EN 1288-5 (unverformt, ohne Eigengewicht, $P=0$)



K = dimensionsloser Geometriefaktor $\approx 1,088$ (für $\mu=0,23$)

Abbildung 10: Versuchsaufbau nach EN 1288-2 und EN 1288-5 mit Radialspannungsverlauf an der Plattenunterseite

Die maßgebende Spannung errechnet sich in EN 1288-5 als Produkt eines Geometriefaktors K des Versuchsaufbaus mit der Belastung F geteilt durch das Quadrat der Glasdicke h . In EN 1288-2 ist die Berechnung komplexer, hierfür sind in der Norm tabellarische Werte gegeben.

Die Abmessungen der Versuchsaufbauten und der Glasproben sind für beide Prüfnormen in Tabelle 3 gegeben:

Tabelle 3: Probenabmessungen in EN 1288-2 und EN 1288-5

Norm		r_1 [mm]	r_2 [mm]	r_3 oder $L/2$ [mm]
EN 1288-2		300	400	500
EN 1288-5	R45	9	45	50
	R30	6	30	33

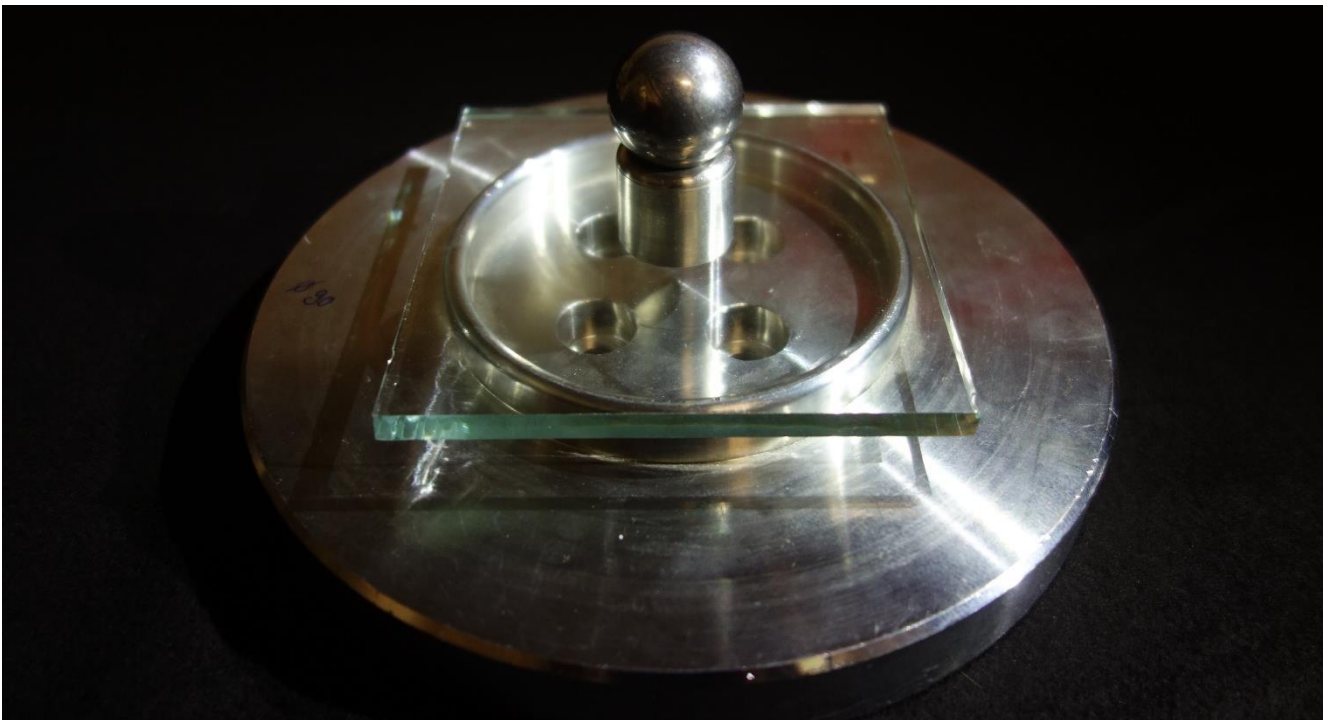


Abbildung 11: Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5

2.2.3. Sonstige Prüfverfahren für Flachglas

Zusätzlich zu den beiden in den vorherigen Kapiteln genannten Prüfverfahren gibt es im Glasbau noch weitere Prüfverfahren für Flachglas, die entweder die mechanischen Eigenschaften des Glases oder die (Rest-)Tragfähigkeit der in späteren Prozessschritten zusammengefügt Komponenten (zum Beispiel Verbundglas) prüfen. Eine Auswahl der wichtigsten Prüfverfahren ist in Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4: Ausgewählte weitere Prüfverfahren

Verfahren	Norm	Ziel	Durchführung
Bruchbildanalyse für ESG und TVG	DIN EN 12150 (ESG) [71] DIN EN 1863-1 (TVG) [82]	Überprüfung des ausreichenden Vorspanngrades und der Sicherheitseigenschaften	Das Glas wird nahe der Kante durch Anschlagen gebrochen. Die Analyse des Bruchbildes und der Bruchstückgröße bestimmt die Konformität mit der Norm.
Kugelfallversuch	DIN 52338 [83] EN 356 [84]	Überprüfung der Widerstandsfähigkeit von Verbundglas bei stoßartigem Aufprall eines harten Körpers	Eine ca. 1 kg (DIN 52338) oder 4,11 kg (EN 356) schwere gehärtete Stahlkugel fällt aus definierter Höhe auf eine zwischen zwei Rahmen gelagerte Verbundglasscheibe, der Grad der Zerstörung und Durchdringung wird ausgewertet.
Pendelschlagversuch	DIN EN 12600 [85]	Überprüfung der Widerstandsfähigkeit von Glaskomponenten bei stoßartigem Aufprall eines weichen Körpers	Ein Pendel aus mit Stahlgewichten versehenen Gummireifen schwingt aus definierter Höhe gegen ein Glaselement, die herabfallenden Bruchstücke und die Durchdringbarkeit der Glaskomponente werden ausgewertet.
Resttragfähigkeit	DIN 18008-1 [86] DIN 18008-5 [87]	Überprüfung des Resttragverhaltens von Verbundglas mit gebrochenen Einzelscheiben	Bei geschädigten Verbundglasscheiben wird beispielsweise die halbe Nutzlast über Gewichte aufgebracht, die Tragfähigkeit über 30 Minuten wird ausgewertet.

Es existiert eine große Zahl weiterer Prüfverfahren für spezifische Anwendungen, z.B. Beschusshemmung nach EN 1063 [88], Sprengwirkungshemmung nach EN 13541 [89], Einbruchhemmung nach EN 356 [84], Feuerwiderstand nach EN 13501-2 [90], Lichttransmissionsgrad und Lichtreflexionsgrad nach EN 410 [91]. Diese werden hier nicht weiter behandelt, auch wenn Dünnglas in den meisten Fällen theoretische Vor- oder Nachteile gegenüber dickerem Glas hat.

Für die Bruchbildanalyse von thermisch vorgespanntem Glas (siehe Tabelle 4) sind die Bruchbilder von ESG und TVG für Dünnglas schwer zu erreichen. Unabhängig davon sind die Verfahren für Dünnglas nur begrenzt einsetzbar da wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben die zum Zeitpunkt des Bruches vorherrschende Verformung des Glases einen sehr viel größeren Einfluss auf das Bruchbild hat als die Eigenspannungen aus Vorspannung. Zudem fällt chemisch vorgespanntes Glas nicht unter die beiden Normen, die relevanten Normen EN 12337-1 [92] und EN 12337-2 [93] regeln kein Bruchbild bei chemischer Vorspannung.

Die Kugelfall-, Pendelschlag- und Resttragfähigkeitsversuche sollten auf Dünnglaslamine unverändert anwendbar sein, auch wenn die Versagensmechanismen aufgrund der größeren möglichen Verformung dünnerer Scheiben und des unterschiedlichen Bruchbildes abweichen können. Diese Versuche sind allerdings nicht Bestandteil dieser Arbeit.

3. Mechanisches Verhalten von Dünnglas

Die Besonderheiten des mechanischen Verhaltens von Dünnglas im Vergleich zu dickerem Glas können grob in zwei Kategorien eingeteilt werden: einachsige und zweiachsige Biegung. Bei einachsiger Biegung spielt die geringe Biegesteifigkeit eine große Rolle, bei zweiachsiger Biegung kommen Membraneffekte hinzu. Auf diese beiden Besonderheiten wird in diesem Kapitel eingegangen.

Weitere für statische Bemessungen wichtige Besonderheiten von Dünnglas, zum Beispiel das vergleichsweise geringe Gewicht der Einzelscheiben oder die Auswirkungen von teilweise von den Normwerten für Kalk-Natron-Glas abweichenden Materialeigenschaften von Dünnglasprodukten (siehe Kapitel 2.1.4) sind für sachkundige Personen im Ingenieurwesen selbsterklärend, werden daher nicht gesondert behandelt.

3.1. Einachsige Biegung

Einachsige Biegung, definiert als ein Zustand in dem an jedem Ort des Bauteils jeweils ein Biegemoment (mit daraus folgender Krümmung) in eine in der lokalen Tangentialebene liegende Richtung aufgebracht wird, während das Biegemoment in derselben Ebene orthogonal dazu null ist, ist der Zustand der beispielsweise mit dem einachsigen Biegeversuch nach EN 1288-3 erzeugt werden soll. Es ist auch der an häufigsten anzutreffende Einsatzfall für Dünnglas in Architekturanwendungen (siehe beispielsweise den Bahnhof Straßburg in Abbildung 32.1.2 und das in Abbildung 12 dargestellte bewegliche Dünnglasfenster). Der Umstand, dass sich dieser Zustand nicht immer wie gewünscht einstellt und daraus zu beachtende Anwendungsgrenzen oder Einschränkungen entstehen, wird in diesem Unterkapitel behandelt.



Abbildung 12: Dünnglasfenster mit durch im Rahmen verbaute Motoren einachsiger biegsamer Scheibe; Eigenbau, ausgestellt auf der Glasstec 2018

3.1.1. Steifigkeit und Spannung

Da die statische Höhe h eines massiven Balkens oder einer massiven Platte mit der dritten Potenz in die Biegesteifigkeit I und die Plattensteifigkeit K eingeht ist folglich die Biege- und Plattensteifigkeit von Dünnglas, zumindest bezogen auf Einzelscheiben, deutlich geringer als von dickerem Glas. I und K ergeben sich zu:

$$I = \frac{b h^3}{12} \quad (b = \text{Breite}) \quad (2)$$

$$K = \frac{h^3}{12 (1-\mu^2)} \quad (\mu = \text{Querdehnzahl}) \quad (3)$$

Somit ergibt sich ein deutlich geringerer Widerstand gegen Verformung. Dies kann positive (z.B. einfachere Anpassung an gekrümmte Geometrien) und negative (z.B. geringere Knicksteifigkeit) Effekte haben.

Die sich aus der einachsigen Biegung ergebenden Spannungen sinken bei gleicher Verformung nicht mit der dritten Potenz, sondern nur linear relativ zur Dicke h . Die Biegespannung ergibt sich aus der Differentialgleichung der Biegelinie ($E I w'' = M = W \sigma$) zu:

$$\sigma = \frac{E h}{2 r} \quad (r = \text{Biegeradius, } E = \text{Elastizitätsmodul}) \quad (4)$$

Trotzdem stellen sich für dünneres Glas bei identischen Spannungen kleinere Biegeradien ein (siehe Tabelle 5), welches das Hauptproblem für die Anwendung von einachsiger Biegeprüfung auf Dünnglas ist (siehe Kapitel 2.2.1 und 4.1).

Tabelle 5: Biegespannung σ [MPa] abhängig von Glasdicke h [mm] und Biegeradius r [m] für Glas mit Elastizitätsmodul $E = 70000$ MPa, die Spannungen sind von grün (üblicherweise deutlich unterhalb der charakteristischen Glasfestigkeit, selbst bei Glas ohne Vorspannung) bis rot (auch mit den Festigkeiten der meisten vorgespannten Glasprodukte nicht zu erreichen) farblich unterlegt, um die Anwendungsgrenzen aufzuzeigen

Glasdicke [mm]	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	3	4	6	10	19
Biegeradius [m]													
10	0	0	0	0	1	2	4	7	11	14	21	35	67
8	0	0	0	0	1	2	4	9	13	18	26	44	83
6	0	0	0	1	1	3	6	12	18	23	35	58	111
4	0	0	0	1	2	4	9	18	26	35	53	88	166
2	0	0	1	2	4	9	18	35	53	70	105	175	333
1	0	1	2	4	7	18	35	70	105	140	210	350	665
0,8	0	1	2	4	9	22	44	88	131	175	263	438	831
0,6	1	1	3	6	12	29	58	117	175	233	350	583	1108
0,4	1	2	4	9	18	44	88	175	263	350	525	875	1663
0,2	2	4	9	18	35	88	175	350	525	700	1050	1750	3325
0,1	4	7	18	35	70	175	350	700	1050	1400	2100	3500	6650
0,08	4	9	22	44	88	219	438	875	1313	1750	2625	4375	8313
0,06	6	12	29	58	117	292	583	1167	1750	2333	3500	5833	11083
0,04	9	18	44	88	175	438	875	1750	2625	3500	5250	8750	16625
0,02	18	35	88	175	350	875	1750	3500	5250	7000	10500	17500	33250
0,01	35	70	175	350	700	1750	3500	7000	10500	14000	21000	35000	66500

3.1.2. Poisson-Effekt

Wie jedes Material mit einer Querdehnzahl $\mu \neq 0$ erfährt auch Glas bei Aufbringen einer Spannung Querdehnung, insbesondere bei einachsiger Biegung hat diese einen signifikanten Einfluss auf die Biegeform. Da sich die Querdehnung entlang der Glaskanten freier einstellen kann, kommt es dort bei einachsiger Biegung zu einer zusätzlichen Verformung des Materials, dem sogenannten Poisson-Effekt (Abbildung 13 und Abbildung 14) [94] [95].

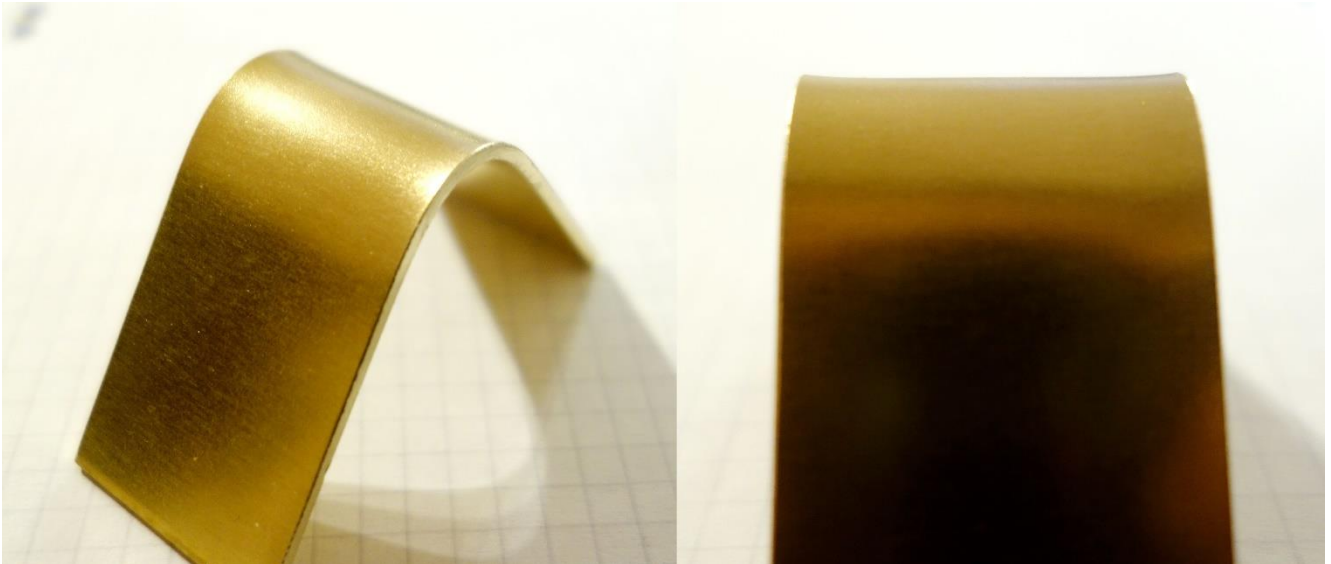
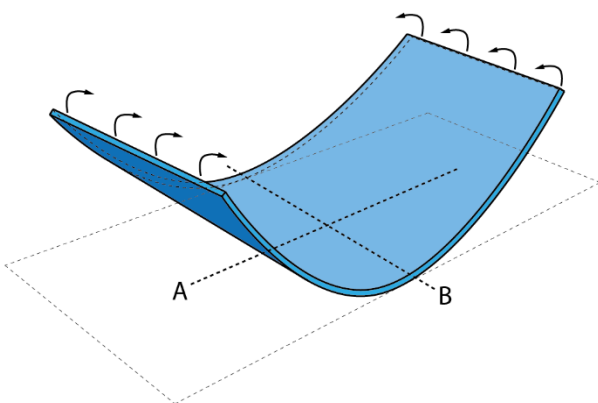


Abbildung 13: Der Poissoneffekt ist in einem stark einachsiger gebogenen Messingstreifen (30 x 2 mm) gut zu erkennen: die Ränder wölben sich im gebogenen Bereich nach außen; es wurde Messing gewählt da dieses eine höhere Querdehnzahl (ca. 0,37) als beispielsweise Stahl (ca. 0,3) oder Glas (ca. 0,22) hat, wodurch der Poissoneffekt sich stärker ausprägt; in Glas ist er im Allgemeinen, auch aufgrund der deutlich geringeren Möglichkeit der Verformung, nicht mit dem bloßen Auge zu erkennen, siehe auch Abbildung 17

a) Einachsiger gebogene Scheibe



b) Spannung und Verformung im Schnitt

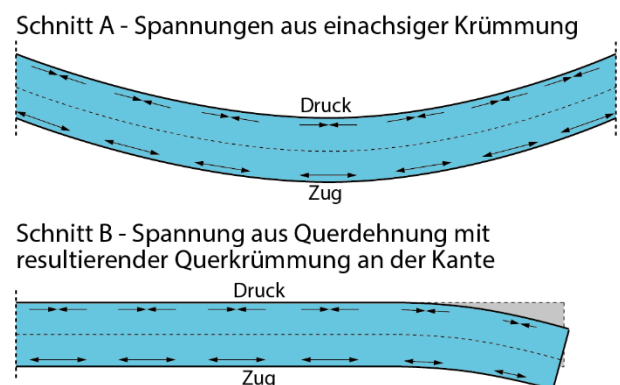


Abbildung 14: Prinzipdarstellung des Poissoneffekts

Dieser sorgt dafür, dass sich das Glas entlang der Kante – sofern es nicht durch äußere Randbedingungen daran gehindert wird – bezogen auf den Biegeradius nach außen wölbt, es entsteht somit eine zusätzliche Spannungserhöhung in diesem Bereich (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15). Abseits der Kante, im Flächenbereich, ist diese Querdehnung durch das umgebende Glas behindert. Dies zeigt sich auch im Unterschied zwischen der Balken- (Gleichung 2) und Plattensteifigkeit (Gleichung 3), letztere ist um den Faktor $1/(1-\mu)^2$ erhöht.

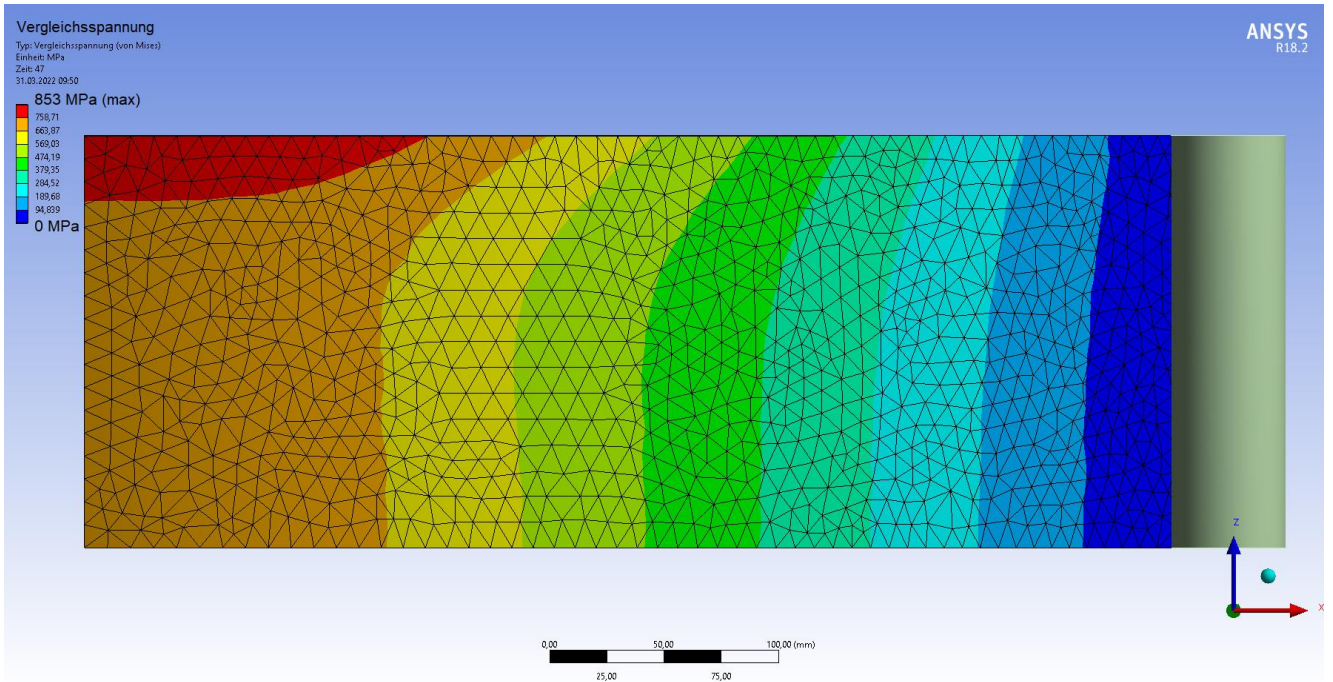


Abbildung 15: Untersicht eines symmetrischen Viertelmodells (Symmetrieachsen links und unten) einer 10 mm dicken Scheibe im Vierschneidenbiegeversuch mit farblich dargestellter Vergleichsspannung (von Mises, siehe Anhang 7.11), von blau (niedrig) bis rot (hoch), die Spannungserhöhung aufgrund des Poissoneffekts ist deutlich zu sehen

In Abbildung 16 ist für eine in Abbildung 17 gezeigte heißgebogene Dünnglasscheibe beispielhaft das gemessene dauerhaft eingebrachte Verformungsprofil aufgrund des Poissoneffekts im Schnitt dargestellt. Das Prinzip des Poissoneffekts durch an den Kanten weniger behinderte Querdehnung ist bei Heißbiegung dasselbe wie bei Kaltbiegung, die Höhe kann aber aufgrund der zeitverzögerten Relaxation des hochviskosen heißen Glases abweichen.

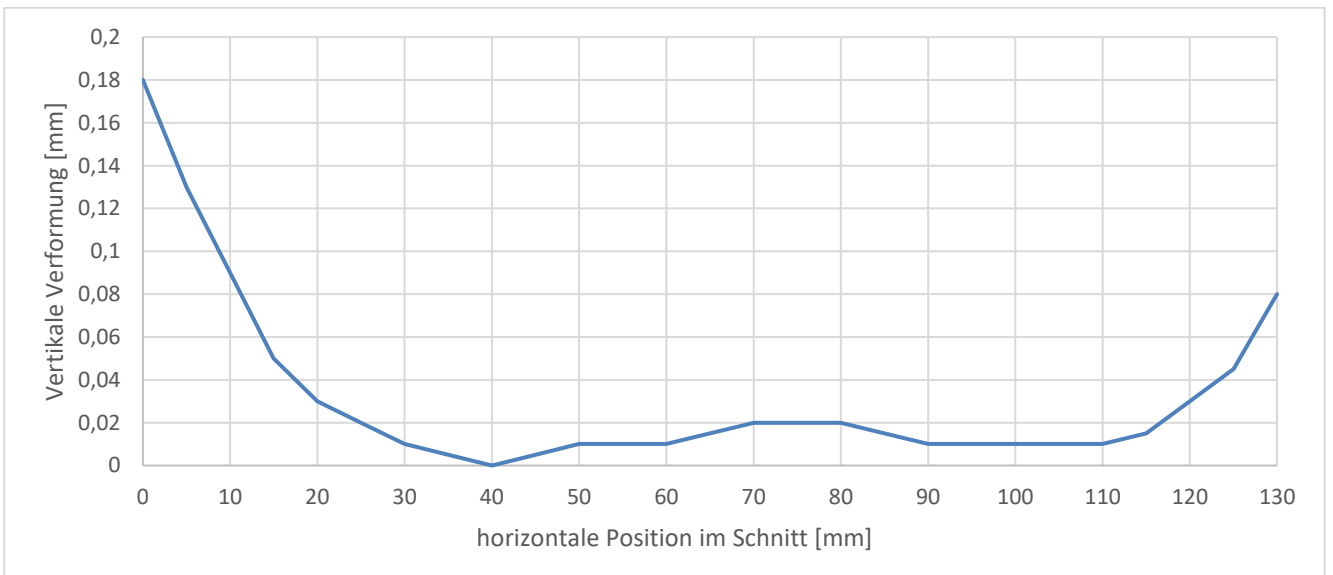


Abbildung 16: auf der Außenseite gemessene dauerhaft eingebrachte Verformung durch den Poissoneffekt im in Längsrichtung in der Mitte der Platte gelegenen Schnitt einer 130 mm breiten, 1,1 mm dicken mit einer Krümmung von ca. 1,3/m heißgebogenen Dünnglasscheibe (entspricht einer Spannung von ca. 50 MPa bei Kaltbiegung); die Messung erfolgte durch Abtasten der Oberfläche mit einer Messuhr in einer Fräseinrichtung linear von einer Kante (horizontale Position 0 mm) zur gegenüberliegenden Kante (130 mm)

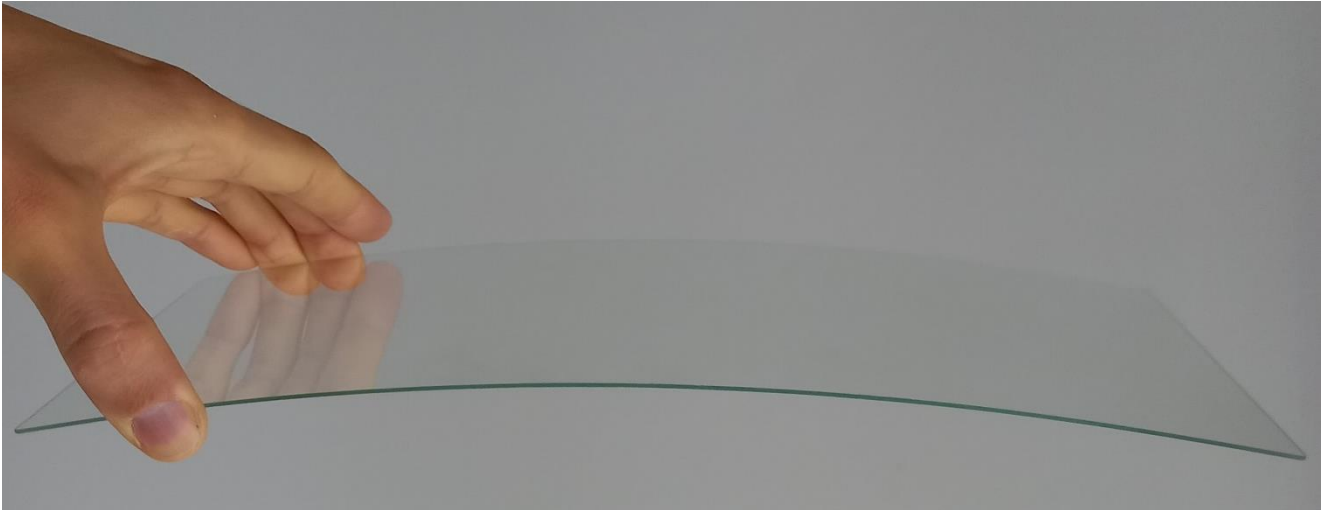


Abbildung 17: Aufnahme der für die vorherige Abbildung vermessenen Scheibe, der Poissoneffekt ist selbst bei starker Krümmung in Dünnglas gewöhnlich nicht mit dem bloßen Auge wahrnehmbar, die Scheibe erscheint glatt

Die Höhe der Verformungen durch den Poisson-Effekt bei Kaltbiegung von Dünnglas sind dicken-, breiten-, krümmungs- und randbedingungsabhängig sowie proportional zur Querdehnzahl. Mit abnehmender Glasdicke im Verhältnis zu Breite und Spannweite nimmt der Poisson-Effekt relativ zu. Bei steigender Krümmung nimmt der Poisson-Effekt ebenfalls zu bis er einen Maximalwert erreicht, danach sinkt er ab und verbleibt relativ zur rechnerischen Glasspannung σ_{calc} auf einem Plateau (Abbildung 18).

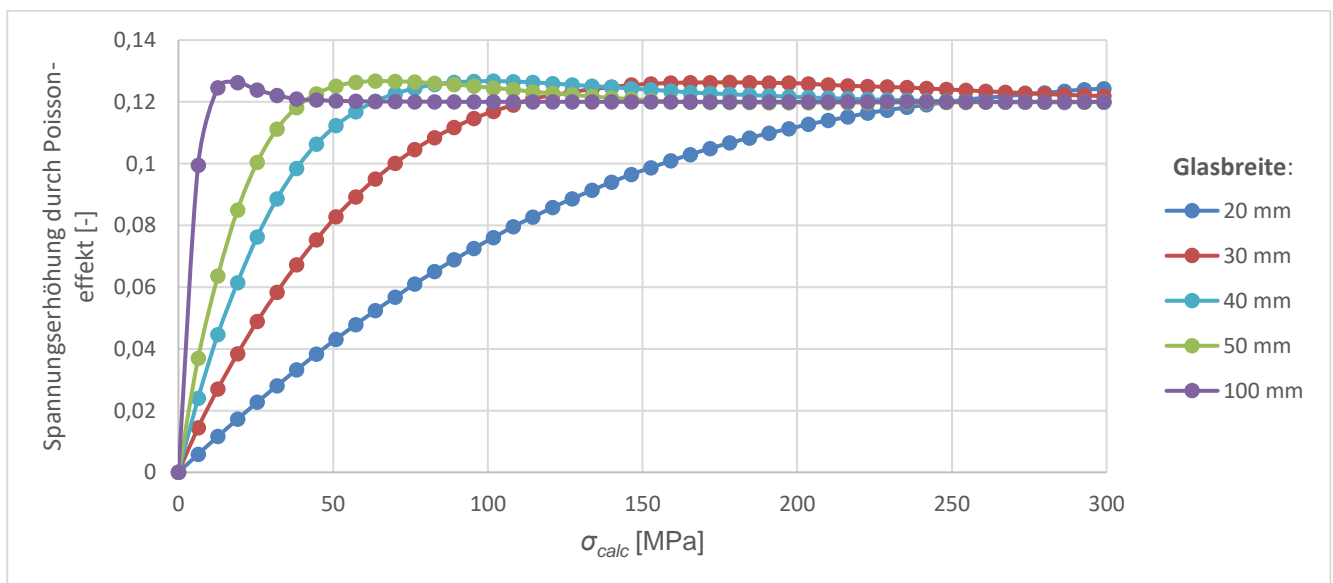


Abbildung 18: Spannungserhöhung an der Kante, in Längsrichtung gesehen in Plattenmitte, durch den Poisson-Effekt in einer 200 mm langen, 0,7 mm dicken Glasplatte unter einachsiger Biegung aus konstantem Biegemoment bei unterschiedlichen Breiten, aus Finite-Element-Simulation (FE-Simulation) in ANSYS 18.2 mit einem Modell aus tetraedrischen Volumenelementen um unter großen Verformungen das Element-Locking (siehe Kapitel 3.3) zu begrenzen

Der Anstieg der Spannungserhöhung ist (näherungsweise) quadratisch von der Breite der Probe abhängig (Abbildung 19).

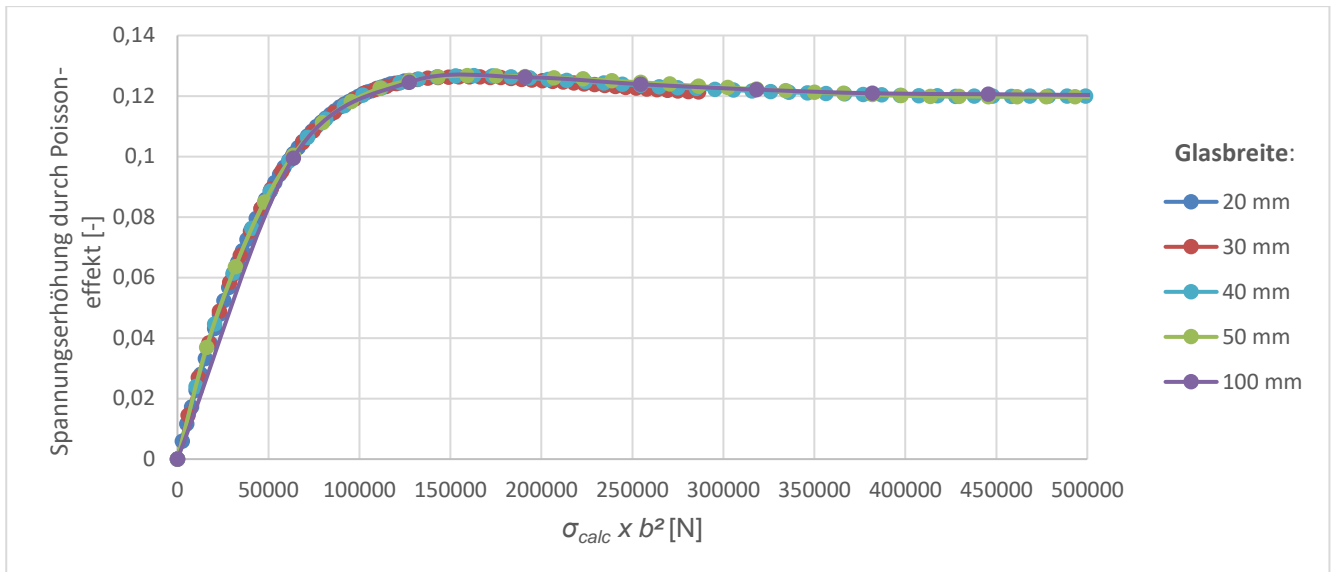


Abbildung 19: Daten aus der vorherigen Abbildung, diesmal in Abhängigkeit der Spannung multipliziert mit dem Quadrat der Breite

Mit einer Erhöhung der Dicke ist ein langsamerer Anstieg des Poissoneffekts bezogen auf die Spannung zu beobachten (Abbildung 20).

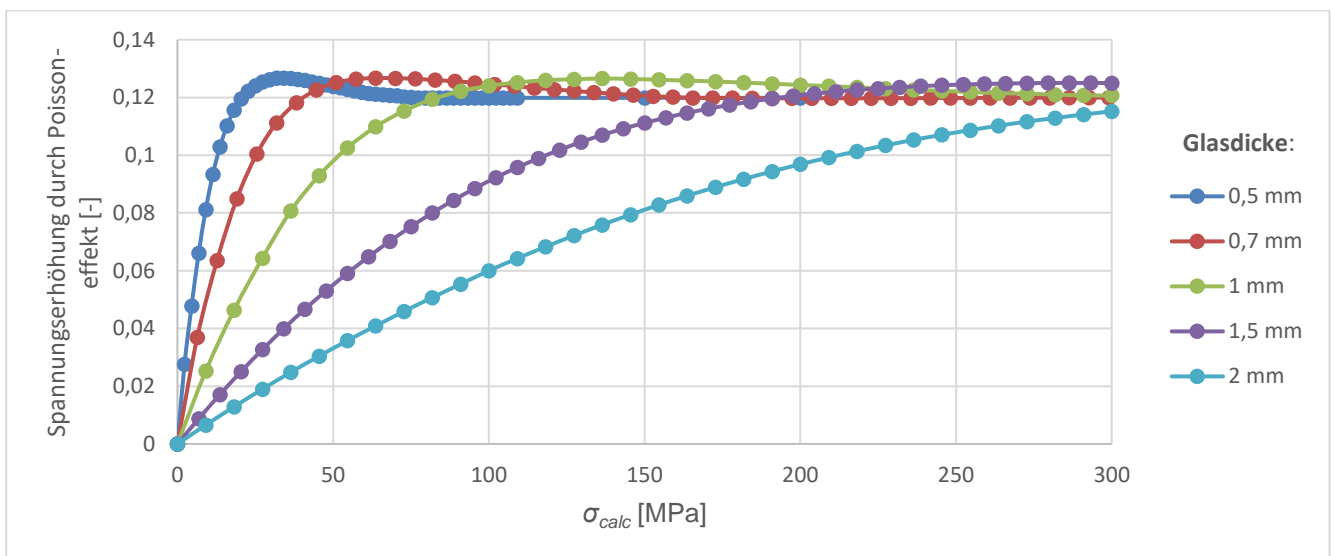


Abbildung 20: Spannungserhöhung aufgrund des Poisson-Effekts in einer 200 mm langen, 50 mm breiten Glasplatte mit variierender Dicke unter einachsiger Biegung aus konstantem Biegemoment, aus FE-Simulation

Allerdings lässt sich diese Spannungserhöhung wieder durch Teilen durch das Quadrat der Dicke herauskürzen (Abbildung 21).

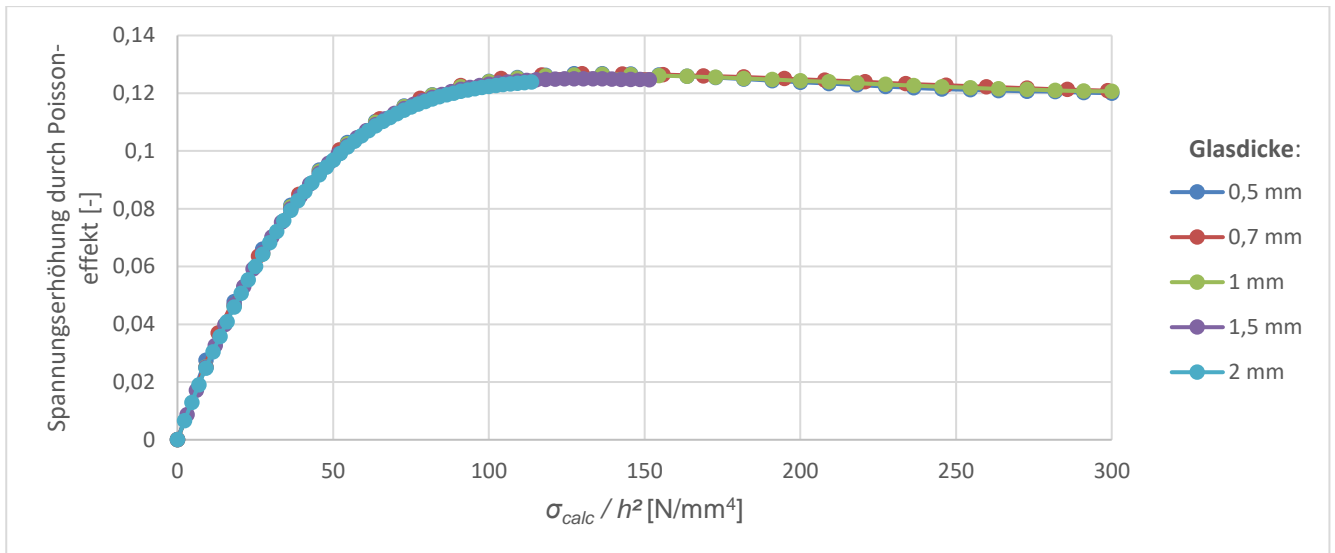


Abbildung 21: Daten aus der vorherigen Abbildung, diesmal in Abhängigkeit der Spannung geteilt durch das Quadrat der Glasdicke

Zudem ist die Höhe der Spannungserhöhung von der Querdehnzahl abhängig, eine Erhöhung der Querdehnzahl führt zu einer Erhöhung der Auswirkungen des Poissoneffekts (Abbildung 22).

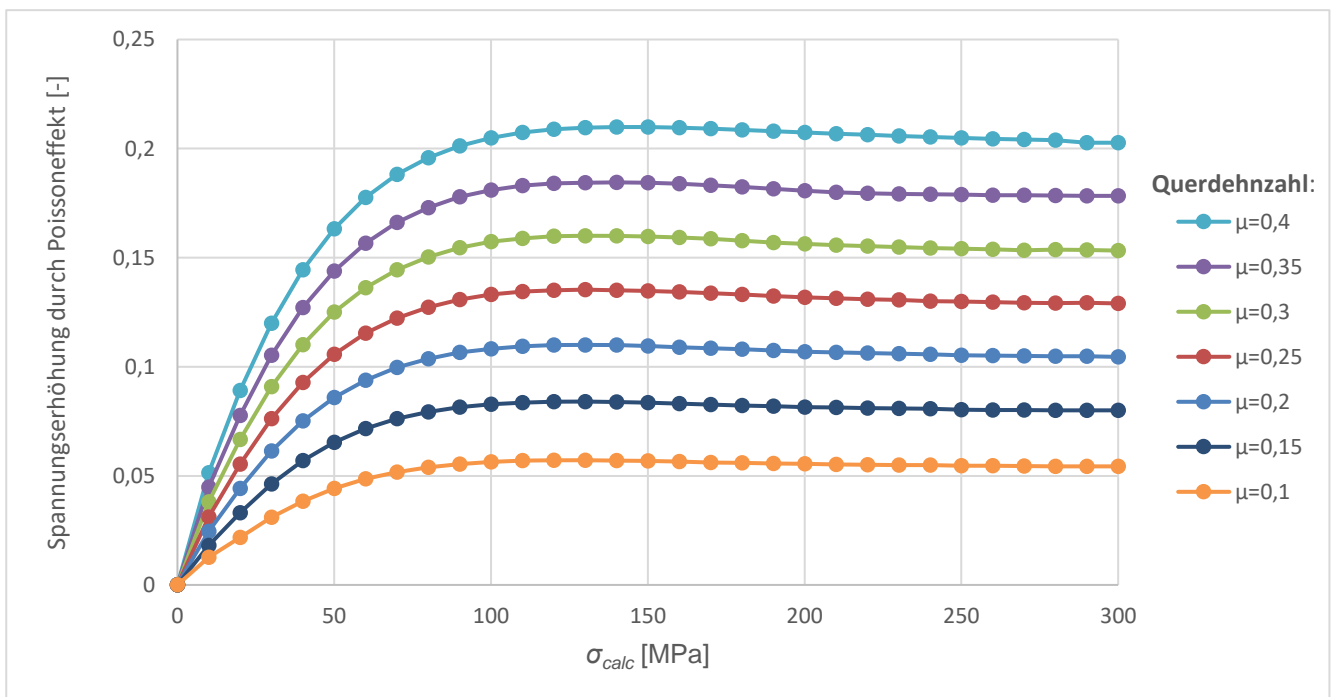


Abbildung 22: Spannungserhöhung aus Poissoneffekt in Abhängigkeit der Querdehnzahl μ für eine 200 mm lange, 1 mm dicke und 50 mm breite Glasscheibe unter einachsiger Krümmung aus konstantem Biegemoment, aus FE-Simulation

Auch hier lässt sich die Querdehnzahl herauskürzen, da der Poissoneffekt linear mit ihr zusammenhängt. Bei höherer Querdehnzahl werden die Fehler aus dem FE-Modell (aufgrund der Auswertung der Spannung an einzelnen Elementen des FE-Modells) relativ zu den absoluten Spannungswerten geringer und das Plateau der Spannungserhöhung konvergiert in FE-Parameterstudien gegen $0,5 \mu$ (Abbildung 23). Das Maximum der Spannungserhöhung gegenüber dem

Plateau konvergiert in einer FE-Netzstudie im für die meisten Gläser relevanten Bereich von $0,2 < \mu < 0,25$ gegen $5,5 \pm 0,1\%$. Für höhere μ wird es leicht geringer, für geringere μ leicht höher.

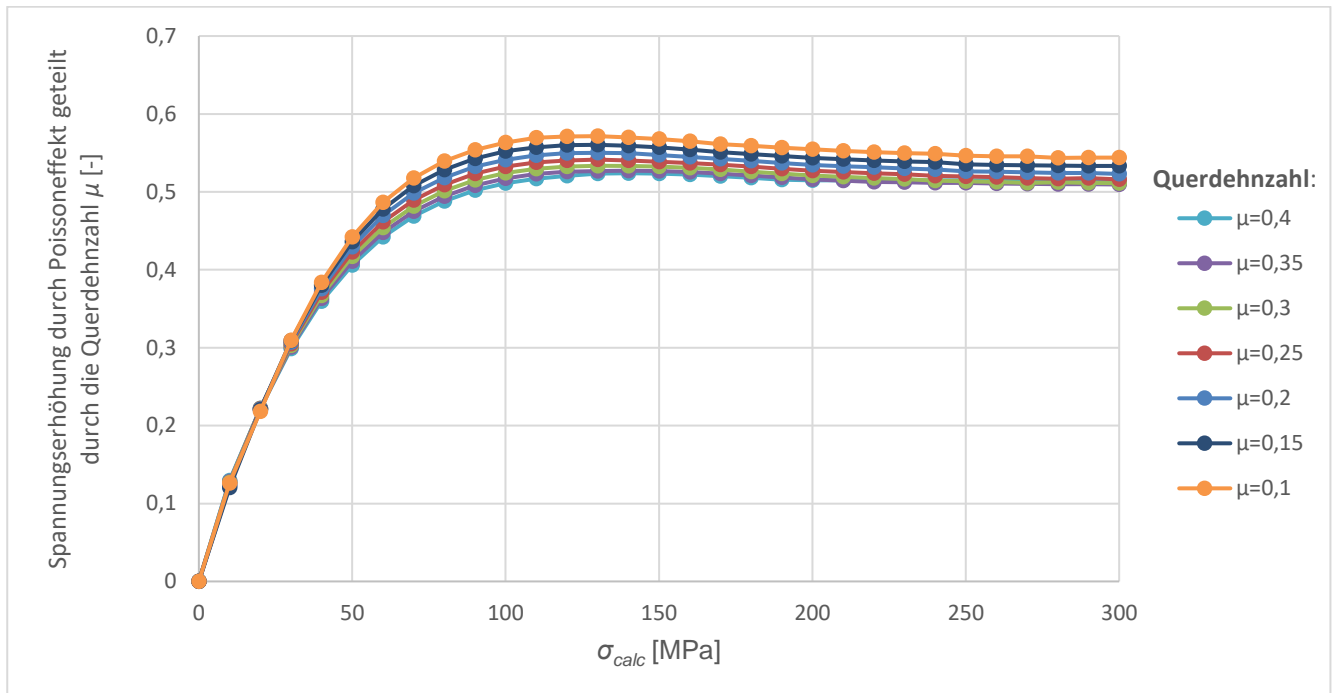


Abbildung 23: Daten aus vorheriger Abbildung, diesmal geteilt durch die Querdehnzahl μ

Die Länge der Probe hat einen Einfluss falls die Probe am Ende so eingespannt ist dass der Poissoneffekt lokal begrenzt ist. Ab einem geringen Abstand von der Einspannung verliert dieser Effekt jedoch an Relevanz.

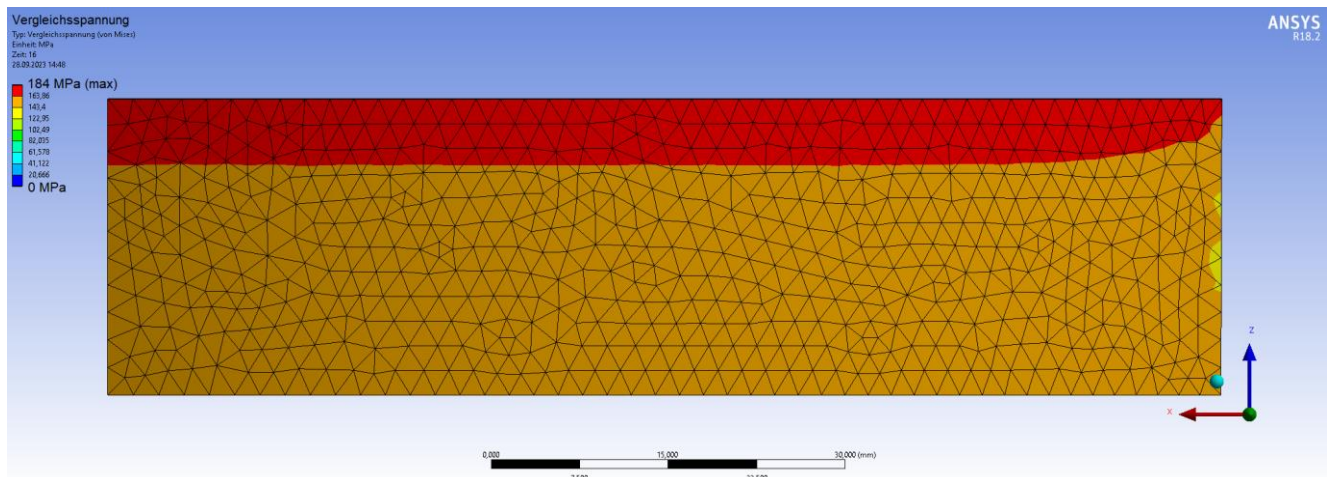


Abbildung 24: Spannung in einer am rechten Rand eingespannten, unter konstantem Biegemoment einachsig gekrümmten doppelt symmetrischen (Symmetrieachsen links und unten) Scheibe mit einer Länge von 200 mm, Dicke von 1 mm, Breite von 50 mm und Maximalspannung von 184 MPa aus FE-Simulation, in rot ist der Bereich maximaler Spannung dargestellt

Die Kurve der Spannungserhöhung $\Delta\sigma$ aus dem Poissoneffekt gegenüber der rechnerischen Biegespannung σ_{calc} lässt sich zusammenfassend mit nachfolgend beschriebenen Formeln approximieren.

Da sich das Plateau der Spannungserhöhung für schlankes Glas (hohes b/h) sehr schnell einstellt, kann für die meisten Anwendungen von Dünnglas von einem konstanten Wert der Spannungserhöhung durch den Poissoneffekt ausgegangen werden:

$$\Delta\sigma = \frac{\mu}{2} \sigma_{calc} \quad (5)$$

Geht man nicht von einem konstanten Wert aus, kann stark vereinfacht angenommen werden dass die relative Spannungszunahme bis zu einem Wert von $\sigma_{calc} = 120 \text{ GPa} \cdot h^2 / b^2$ linear ansteigt und dann konstant bleibt.

$$\Delta\sigma = \begin{cases} \frac{b^2}{120 \text{ GPa} \cdot h^2} \frac{\mu}{2} \sigma_{calc}^2, & \sigma_{calc} < \frac{120 \text{ GPa} \cdot h^2}{b^2} \\ \frac{\mu}{2} \sigma_{calc}, & \sigma_{calc} \geq \frac{120 \text{ GPa} \cdot h^2}{b^2} \end{cases} \quad (6)$$

Eine stetige Annäherung unter Vernachlässigung des Maximalwerts liefert alternativ eine Sigmoidfunktion, beispielsweise der Tangens hyperbolicus:

$$\Delta\sigma = \frac{\mu}{2} \sigma_{calc} \tanh \frac{\sigma_{calc} b^2}{120 \text{ GPa} h^2} \quad (7)$$

Tatsächlich stellt sich ungefähr bei $\sigma_{calc} \cdot h^2 / b^2 = 1/3 \text{ TPa}$ das Maximum ein (Abbildung 25), danach fällt die Spannungserhöhung leicht auf das Plateau ab. Dies wird mit der folgenden genaueren Näherung über die Differenz von zwei Sigmoidfunktionen, ebenfalls über den Tangens Hyperbolicus, approximiert, welche für Glas im Bereich von $0,2 < \mu < 0,25$ anwendbar ist:

$$\Delta\sigma = \frac{\mu}{2} \sigma_{calc} \left(1,15 \tanh \frac{\sigma_{calc} b^2}{128 \text{ GPa} h^2} - 0,15 \tanh \frac{\sigma_{calc} b^2}{540 \text{ GPa} h^2} \right) \quad (8)$$

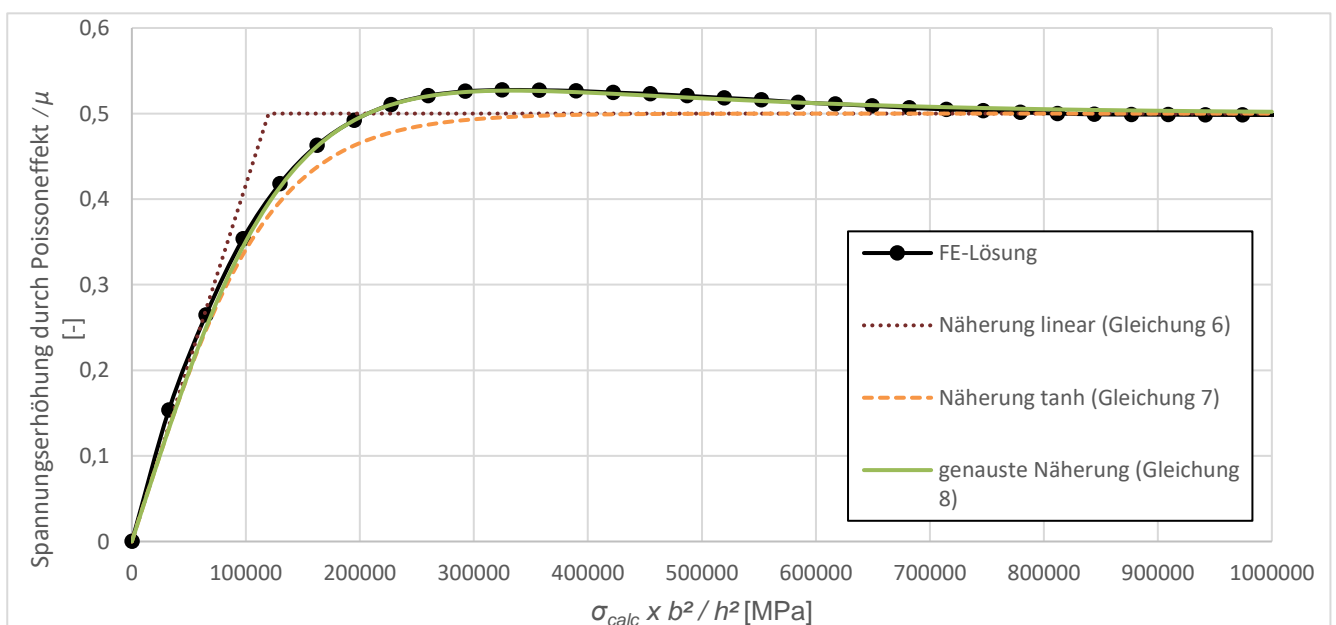


Abbildung 25: Vergleich der Näherungen mit dem Ergebnis aus FE aus dem die Modellgenauigkeiten durch Konvergenzuntersuchungen (näherungsweise) herausgerechnet wurden

Praktisch bedeutet dies, dass es für (Dünn-)Glas vereinfacht zwei Bereiche gibt: einen in dem der Poissoneffekt mit der Krümmungszunahme zunimmt (Bereich I, definiert als $\sigma_{calc} < 120 \text{ GPa} \cdot h^2 / b^2$) und einen in dem er als nahezu konstant zu betrachten ist (Bereich II). Tabelle 6 zeigt für unterschiedliche Glasdicken und unterschiedliche Biegespannungen den Grenzwert der Breite eines einachsigen gebogenen Glasstreifens bis zu welcher das Glas in Bereich I beziehungsweise oberhalb welcher es in Bereich II fällt.

Tabelle 6: Grenzwert der Breite oberhalb derer die einachsige gebogene Probe in Bereich II fällt, also ein näherungsweise konstanter Poissoneffekt angenommen werden kann

	$h=0,2 \text{ mm}$	$h=0,5 \text{ mm}$	$h=1 \text{ mm}$	$h=1,5 \text{ mm}$	$h=2 \text{ mm}$
$\sigma_{calc} = 50 \text{ MPa}$	$b = 10 \text{ mm}$	$b = 24 \text{ mm}$	$b = 49 \text{ mm}$	$b = 73 \text{ mm}$	$b = 98 \text{ mm}$
$\sigma_{calc} = 100 \text{ MPa}$	$b = 7 \text{ mm}$	$b = 17 \text{ mm}$	$b = 35 \text{ mm}$	$b = 52 \text{ mm}$	$b = 69 \text{ mm}$
$\sigma_{calc} = 200 \text{ MPa}$	$b = 5 \text{ mm}$	$b = 12 \text{ mm}$	$b = 24 \text{ mm}$	$b = 37 \text{ mm}$	$b = 49 \text{ mm}$
$\sigma_{calc} = 500 \text{ MPa}$	$b = 3 \text{ mm}$	$b = 8 \text{ mm}$	$b = 15 \text{ mm}$	$b = 23 \text{ mm}$	$b = 31 \text{ mm}$
$\sigma_{calc} = 1000 \text{ MPa}$	$b = 2 \text{ mm}$	$b = 5 \text{ mm}$	$b = 11 \text{ mm}$	$b = 16 \text{ mm}$	$b = 22 \text{ mm}$

Es ist zu erkennen dass der Poissoneffekt insbesondere für die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Glasprüfungen weitgehend in Bereich II liegt, was zur Folge hat dass eine Vernachlässigung des Poissoneffekts in diesen Fällen gewöhnlich kein Problem darstellt wenn die rechnerische Spannung eines späteren unter Biegung stehenden Bauteils ohne Berücksichtigung des dort ebenfalls auftretenden Poissoneffekts mit der rechnerischen Spannung σ_{calc} der Probekörper verglichen wird. Lediglich wenn die Probekörper in Bereich I fallen kann dies bedeuten, dass der Poissoneffekt im späteren Bauteil höher ausfallen kann als in der Probe und somit berücksichtigt werden muss. Daher sollte im Allgemeinen auf eine ausreichende Probenbreite geachtet werden, um die Vergleichbarkeit der Glasprüfung mit dem realen Bauteil zu gewährleisten.

3.1.3. Stabilität

Ein unter einachsiger Biegung stehendes Bauteil aus Dünn Glas hat im Vergleich zu einem flachen Bauteil nur eine Richtung in die nennenswerte Anfälligkeit für Normalkräfte besteht. Die einachsige Erhöhung der Biegesteifigkeit durch die Krümmung des Glases hat einen stark stabilisierenden Effekt, insbesondere abseits freier Ränder. In die andere Richtung, entlang der Krümmung, sinkt aufgrund der Krümmung jedoch der Widerstand gegen Normalkräfte. In der Masterthesis [79] wurde intensiv auf das umfangreiche Thema der Stabilität von Dünn Glas eingegangen. Für die Dünn Glasprüfung mit den in folgenden Kapiteln vorgeschlagenen einachsigen Prüfverfahren spielt Stabilität keine nennenswerte Rolle, daher sei bei Interesse auf die genannte Arbeit verwiesen.

3.1.4. Einfluss von Imperfektionen

Ein anderer Faktor, der im Gegensatz zu Stabilität eine sehr große Rolle bei der einachsigen Biegeprüfung von Dünn Glas spielt, sind Imperfektionen, insbesondere eine unpräzise Führung des Glases während des Prüfungsvorgangs wie sie beispielsweise bei der freihändigen Prüfung mittels dem „Smartphoneverfahren“ (Kapitel 4.5) gewöhnlich vorkommt.

Hierbei gibt es theoretisch an jedem Ende der beidseitig gehaltenen Probe sechs Freiheitsgrade, in die eine Imperfektion auftreten kann, drei Translationsfreiheitsgrade und drei Rotationsfreiheitsgrade. Allerdings wirken nicht alle dieser Imperfektionen auf die schwachen Achsen der Probe, Verschiebungen und Verdrehungen in der Ebene der Probe sind nur bei großem Kraftaufwand möglich. Abbildung 26 zeigt die sechs unterschiedlichen Freiheitsgrade für Imperfektionen.

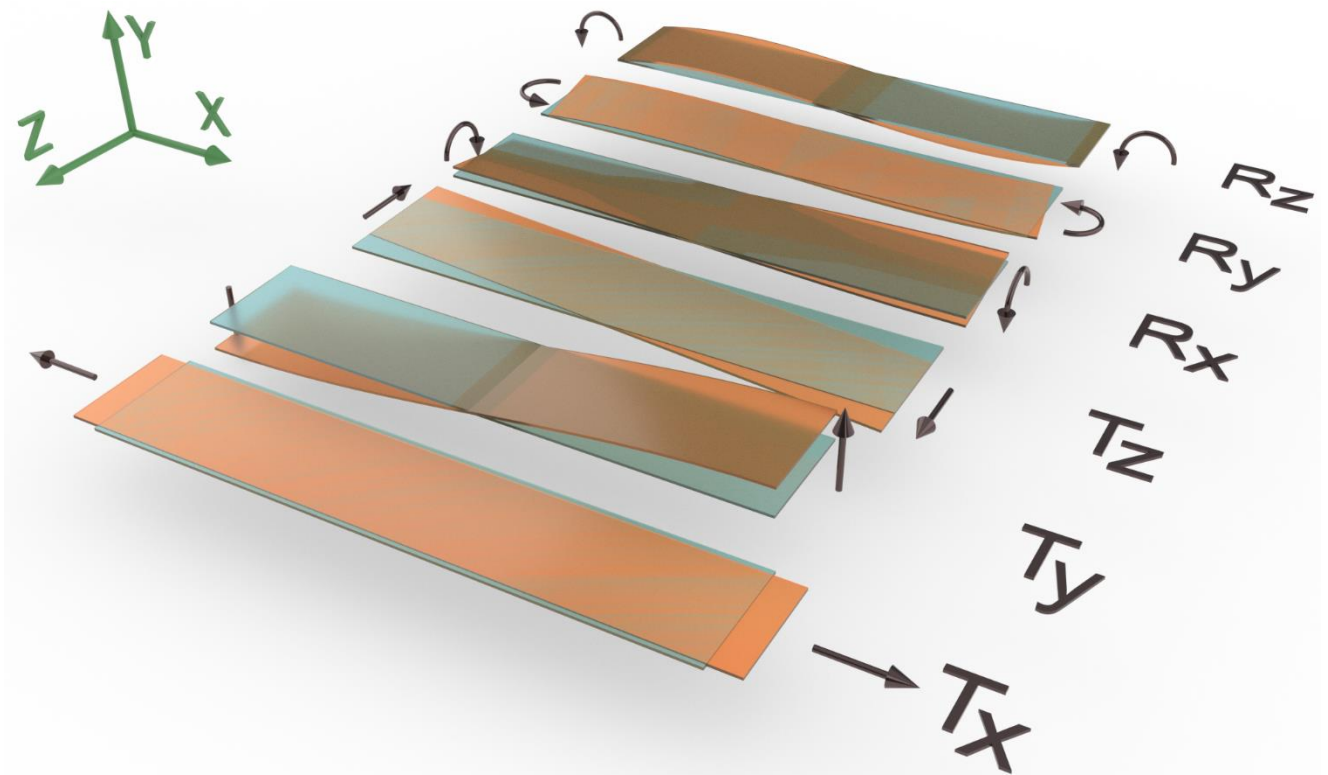


Abbildung 26: Die sechs Freiheitsgrade für Imperfektionen, die Veränderung ist in orange gegenüber der blauen Ausgangsgeometrie dargestellt. T=Translation, R=Rotation, Index=Achse

Hierbei ist zu beachten, dass sich die Verformungen sowohl an einem als auch an beiden Enden in jeweils dieselbe (symmetrisch) oder die entgegengesetzte (antimetrisch) Richtung einstellen können. Je nach Belastung können sich symmetrische oder antimetrische Imperfektionen entweder aufsummieren oder bezogen auf die Spannungen im Glas gegenseitig aufheben. Einseitige Imperfektionen führen bei Translationsimperfektionen sowie der Rotationsimperfektion R_x zur halben Spannungserhöhung verglichen mit der symmetrischen Verformung. Bei den Rotationsimperfektionen R_y und R_z führen sie zu einer neuen, unsymmetrischen Biegefigur.

Für das nicht gebogene Glas lassen sich die Spannungserhöhungen aufgrund der Imperfektionen sehr einfach errechnen, z.B. über die Differentialgleichung der Biegelinie (Voraussetzung: kleine Imperfektionen) oder aus Formelsammlungen [96] beziehungsweise Lehrbüchern [97], diese sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Maximale Spannungserhöhung im Querschnitt aufgrund von (kleinen) Imperfektionen im nicht gebogenen Glas

Imperfektion	symmetrische (gleichgerichtete) Belastung	antimetrische (gegengerichtete) Belastung	einseitige Belastung
T_x	$\Delta\sigma=0$	$\Delta\sigma=2 E L/\Delta x$ (konstant über Trägerlänge und Querschnitt)	$\Delta\sigma=E L/\Delta x$ (konstant über Trägerlänge und Querschnitt)
T_y	$\Delta\sigma=0$	$\Delta\sigma=6 E h \Delta y/L^2$ (an Ober- und Unterseite an Einspannung)	$\Delta\sigma=3 E h \Delta y/L^2$ (an Ober- und Unterseite an Einspannung)
T_z	$\Delta\sigma=0$	$\Delta\sigma=6 E b \Delta z/L^2$ (an Kante an Einspannung)	$\Delta\sigma=3 E b \Delta z/L^2$ (an Kante an Einspannung)
R_x	$\Delta\sigma=0$	$\Delta\tau=E h \Delta\phi_x/(1+\mu)/L$ ($b \gg h$, in Querschnittsmitte,	$\Delta\tau=E h \Delta\phi_x/(1+\mu)/L/2$ ($b \gg h$, in Querschnittsmitte,

		konstant über Trägerlänge, St. Venant)	konstant über Trägerlänge, St. Venant)
R_y	$\Delta\sigma = \Delta\varphi_y b E / L$ (an Kante konstant über Trägerlänge)	$\Delta\sigma = 3 \Delta\varphi_y b E / L$ (an Kante an Einspannung)	$\Delta\sigma = 3 \Delta\varphi_y b E / L / 2$ (an Kante an Einspannung)
R_z	$\Delta\sigma = \Delta\varphi_z h E / L$ (an Ober- und Unterseite konstant über Querschnittslänge)	$\Delta\sigma = 3 \Delta\varphi_z h E / L$ (an Ober- und Unterseite an Einspannung)	$\Delta\sigma = 3 \Delta\varphi_z h E / L / 2$ (an Ober- und Unterseite an Einspannung)

Bei der Torsion des Querschnitts (Imperfektion R_x) ist zu beachten, dass dünne Platten bei zunehmender Torsionsverformung sehr schnell von einem gleichmäßigen verdrehten Torsionszustand in eine – da energetisch günstiger – aus mehreren überwiegend einachsig gekrümmten Segmenten zusammengesetzte Form übergehen (man könnte es auch als eine Art des „Knickens“ bezeichnen), welche von der geraden Trägerachse seitlich ausweicht (siehe Abbildung 27). Hierbei kommt es dann statt wie bei der gleichmäßigen Torsion nicht zu einer maßgeblichen Spannungserhöhung durch Schubspannungen in Querschnittsmittte, sondern zu zusätzlicher hoher Biegebeanspruchung am Querschnittsrand, welche schnell zum Versagen des Probekörpers führen kann. Die Grenze der Instabilität wurde in der Literatur bereits untersucht [98] [99], hier wird sie jedoch nicht weiterbehandelt da sie in keinem der in dieser Arbeit behandelten Prüfverfahren relevant wurde.

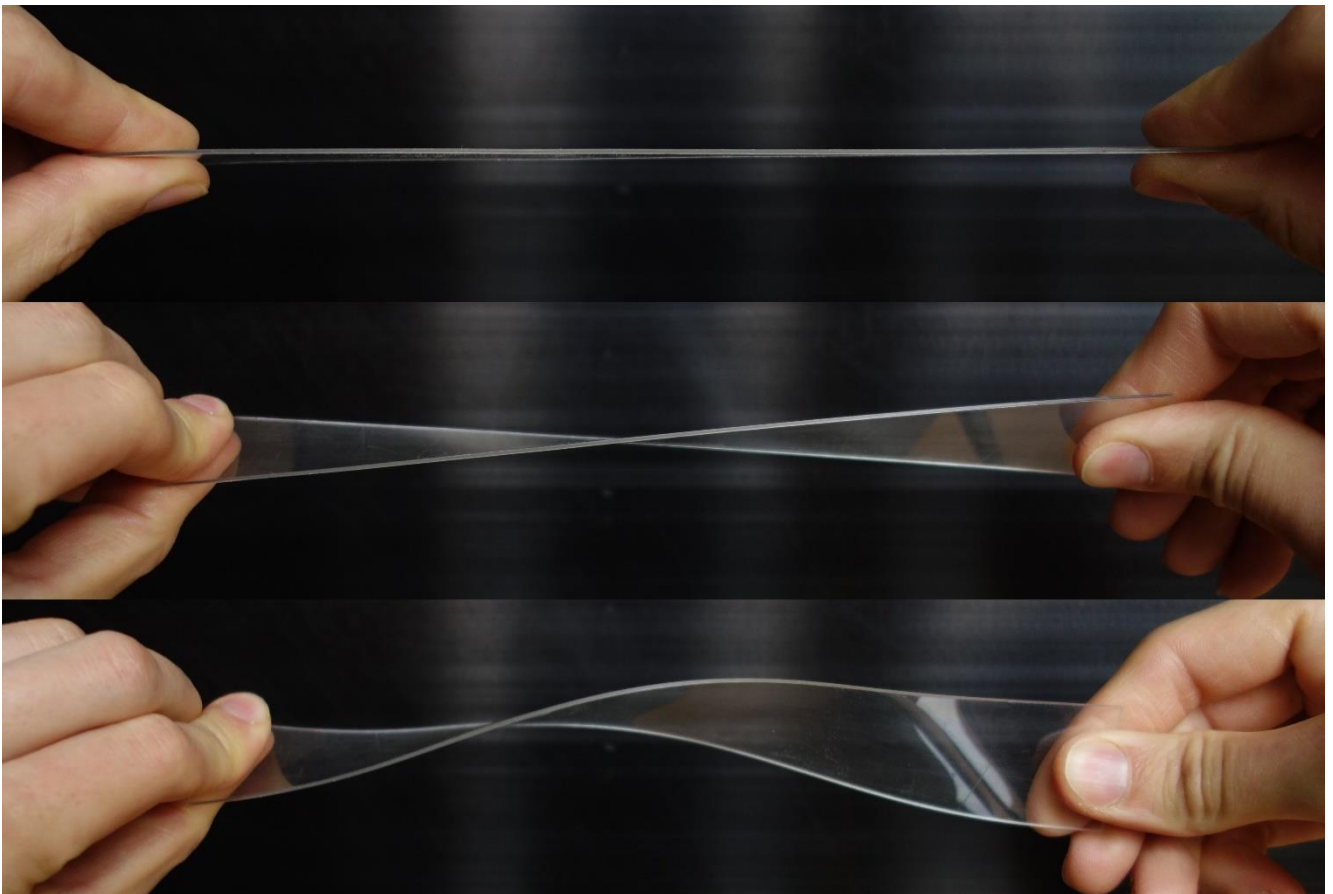
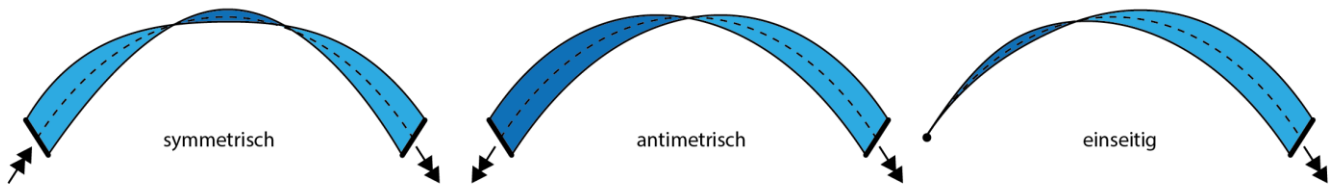


Abbildung 27: Verdrehter Probekörper beim Übergang von der gleichmäßigen zweiachsig gekrümmten Torsionsform zur stärker einachsig gekrümmten "Knickform" bei stärkerer Verdrehung. Zur Veranschaulichung wurde statt Glas ein weniger steifes Polycarbonat gewählt welches den Zustandswechsel erst bei größerer Verdrehung und ohne das oft übliche Versagen des Probekörpers zeigt.

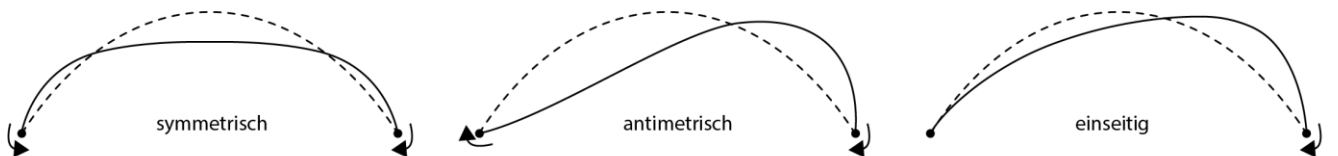
Da die Verformungen T_Z und R_Y einem sehr hohen Widerstand („starke Achse“) entgegenwirken kann im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass diese Verformungen während der einachsigen Biegeprüfung nicht signifikant auftreten. Auch ist aufgrund der hohen Dehnsteifigkeit anzunehmen die Verformung T_X nur im gebogenen Glas relevant wird.

Die Imperfektionen T_Y und R_Z lassen sich direkt ineinander überführen. Auch lassen sich durch Kombination der sechs Imperfektionen mehrere identische Zustände erreichen. Daher kann zusammenfassend die Anzahl der relevanten Imperfektionen des Probekörpers auf drei relevante Zustände reduziert werden: Verdrillung um die X-Achse, Verdrehung um die Z-Achse und gleichmäßige Erhöhung oder Verringerung des Biegeradius (Abbildung 28).

a) Verdrillung um lokal X



b) Verdrehung um lokal Z



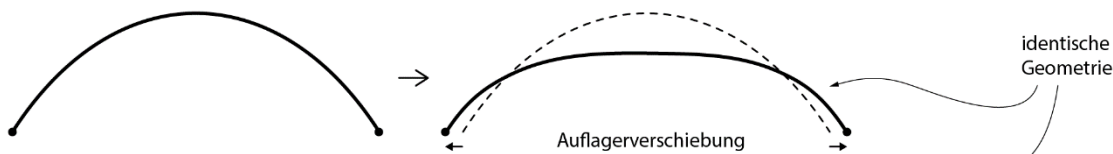
c) Konstante Krümmungsänderung



Abbildung 28: Reduktion der Imperfektionen auf Verdrillung um lokal X (Längsrichtung der Platte) (a), Verdrehung um Lokal Z (Querrichtung der Platte) (b) und konstante Krümmungsänderung (c)

Die Spannungszunahme durch gleichmäßige Änderung des Biegeradius kann nach Kapitel 3.1.1 berechnet werden. Für das gebogene Glas während des einachsigen Biegeversuchs sind somit die Spannungserhöhungen durch jeweils symmetrische, antimetrische und einseitige Verdrehung um lokal Z und Verdrillung um lokal X zu berechnen. Andere Verformungen lassen sich aus diesen Imperfektionen zusammensetzen, so ist eine horizontale Auflagerverschiebung zum Beispiel durch eine Kombination aus Verdrehung um lokal Z und konstante Krümmungsänderung darstellbar (Abbildung 29).

a) Auflagerverschiebung



b) Konstante Krümmungsänderung und Verdrehung um lokal Z



Abbildung 29: Darstellung einer Auflagerverschiebung (a) durch eine Kombination aus konstanter Krümmungsänderung und Auflagerverdrehung um lokal Z (b)

Rechnerisch ergibt sich bei diesem Beispiel die (einseitige) Auflagerverschiebung ΔX als die Kombination der Auflagerverdrehungen $\varphi_{Z,I} = -\varphi_{Z,K}$ (I= linkes Auflager, K=rechtes Auflager) und der Krümmungsradiusänderung Δr nach folgendem Zusammenhang:

$$\Delta X = \frac{r + \Delta r}{r} \frac{\sin\left(\frac{l}{2r} + \varphi_{Z,I}\right)}{\sin\left(\frac{l}{2r}\right)} \quad (9)$$

Die Ergebnisse der Parameterstudien für $l = 200$ mm lange und $b = 40$ mm breite Probekörper (wie sie im weiteren Verlauf der Arbeit hauptsächlich verwendet werden) aus Finite-Elemente-Simulationen oder alternativen querschnittsunabhängigen Modellen sind im Folgenden dargestellt.

Auflagerverdrehung (R_Z)

Bei der Auflagerverdrehung können bei kleinen Krümmungsradien des Glases sowie bei kleinen Auflagerverdrehungen die Werte aus Tabelle 7 angewandt werden, für Dünnglas führen kleine Verformungen im nahezu ebenen Zustand jedoch selten zu signifikanten Spannungen. Es sind daher die Auswirkungen bei größeren Verformungen zu betrachten, da diese im Glas signifikante Normalkräfte erzeugen.

Symmetrische Auflagerverdrehungen ohne behinderte Horizontalverschiebung in X-Richtung führen wie zuvor gezeigt zu einer konstanten Krümmungs- und somit Spannungsänderung, der Zusammenhang zwischen Verdrehung und Spannungsänderung kann mit einer einfachen Formel dargestellt werden:

$$\Delta\sigma = \frac{E h}{l} \Delta\varphi_Z \quad (10)$$

Ist die horizontale Verschiebung jedoch behindert oder kommt es zu einer unsymmetrischen, also beispielsweise einseitigen oder antimetrischen, Lagerverdrehung, entstehen jedoch komplexere Biegeformen. Prinzipiell kann die Biegeform welche sich bei einer Auflagerverdrehung einstellt als die energetisch günstigste Verbindung von zwei Punkten in definiertem Abstand mit einer Kurve der Länge l mit zwei Endverdrehungen ausgedrückt werden. Vernachlässigt man Steifigkeitsänderungen durch den Poissoneffekt und geht man davon aus dass die Dehnsteifigkeit sehr viel größer als die Biegesteifigkeit ist, also keine Dehnung durch Normalkräfte entsteht, kann man die Form unabhängig von Materialparametern und Biegesteifigkeit beschreiben. Eine Implementierung der Formfindung in

der Modellersoftware Grasshopper mit dem Berechnungswerkzeug Karamba (siehe Anhang 7.3, dieser enthält auch die Überprüfung des Modells mit einem PRBM (Poly-Rigid-Body-Model)) erlaubt die Generierung der Biegeformen (Abbildung 30) aus welchen mithilfe einer Krümmungsanalyse die Spannungen ermittelt werden können.

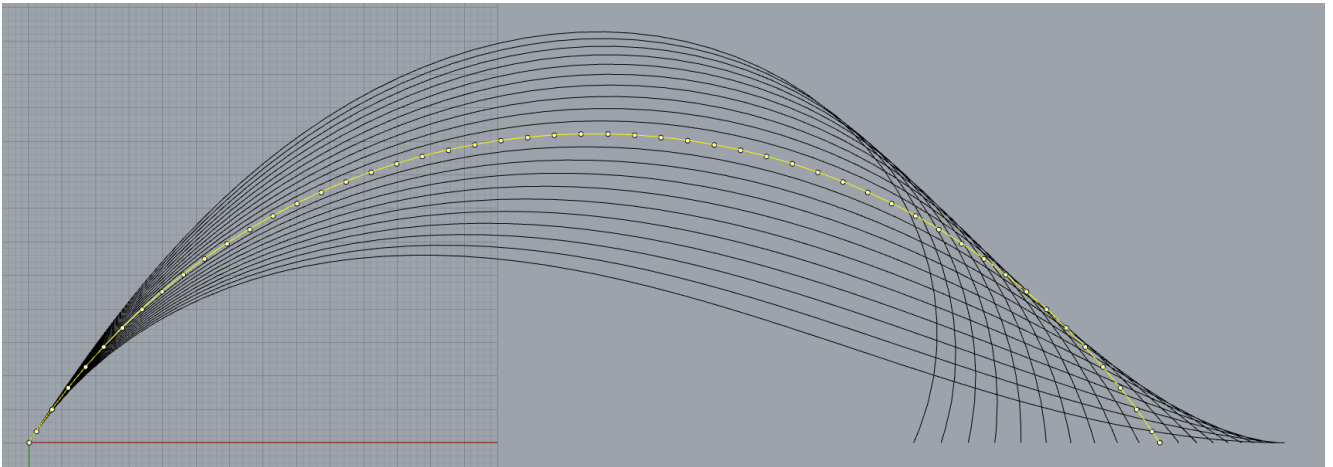


Abbildung 30: beispielhafte Biegeformen für einseitige Verdrehungsimperfektionen von -1 rad bis 1 rad bei frei einstellbarer Horizontalverschiebung der Lager, ausgehend von einer symmetrischen Lagerverdrehung von 1 rad. In gelb ist die imperfektionsfreie Kreisbogenform gegeben.

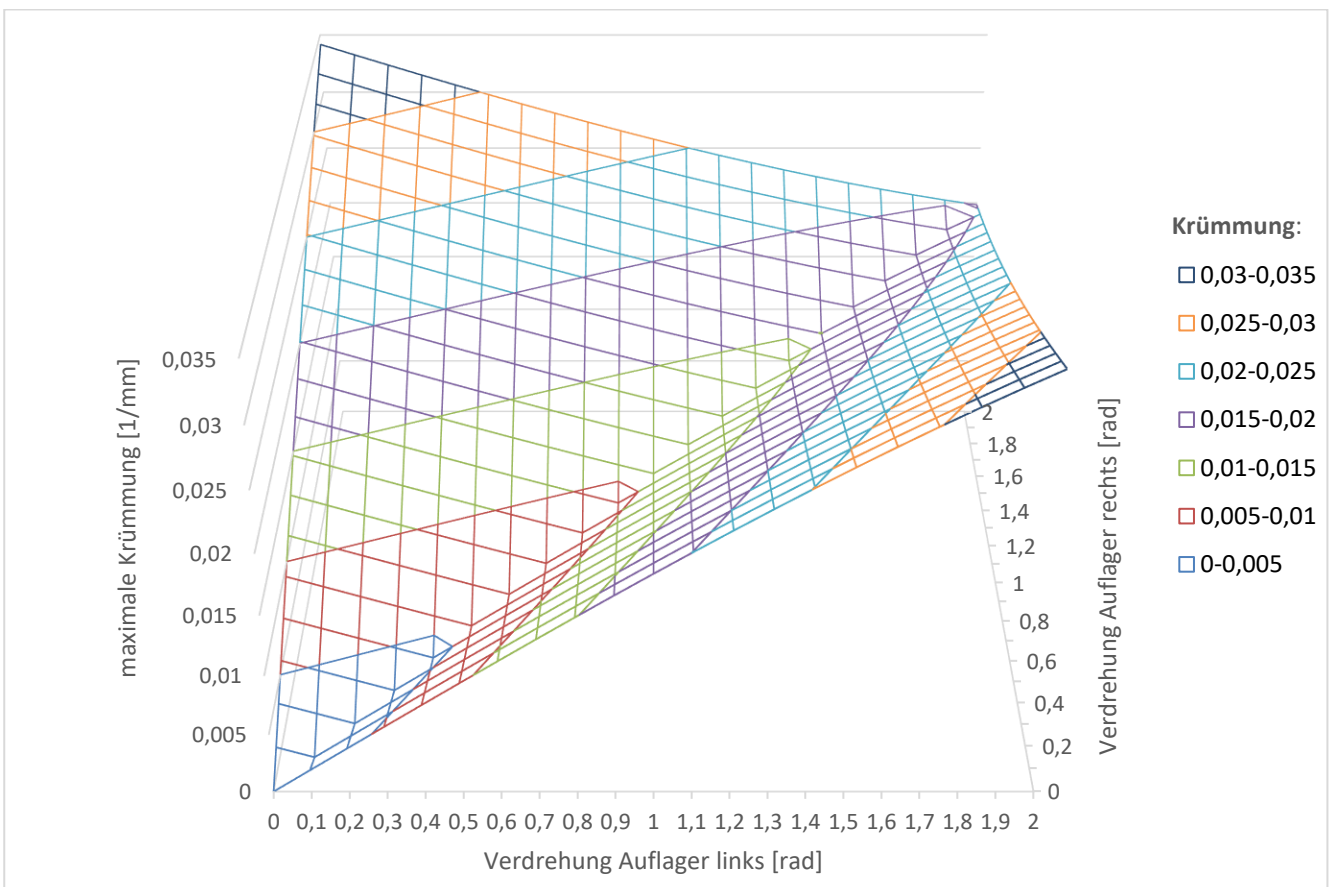


Abbildung 31: Zusammenhang zwischen Verdrehung an beiden Auflagern und maximaler Krümmung für einen 200 mm langen Probekörper mit frei einstellbarer Horizontalverschiebung der Auflager, der diagonal verlaufende „Knick“ zeigt die Krümmung bei symmetrischer Biegung, beidseitig davon steigt die Spannung bei einseitiger Krümmungsänderung

Wie in Abbildung 31 zu erkennen, führen sowohl positive, also die Lagerverdrehung relativ zum flachen Zustand erhöhende, als auch negative Verdrehungsimperfectionen zu einer Zunahme der Krümmung und somit der Biegespannungen. Die negative Verdrehung hat dabei einen geringeren Spannungsanstieg je Verdrehung zur Folge, da die durchschnittliche Verdrehung reduziert wird, bei größerer Ausgangskrümmung nimmt der Spannungsanstieg ab (Abbildung 32).

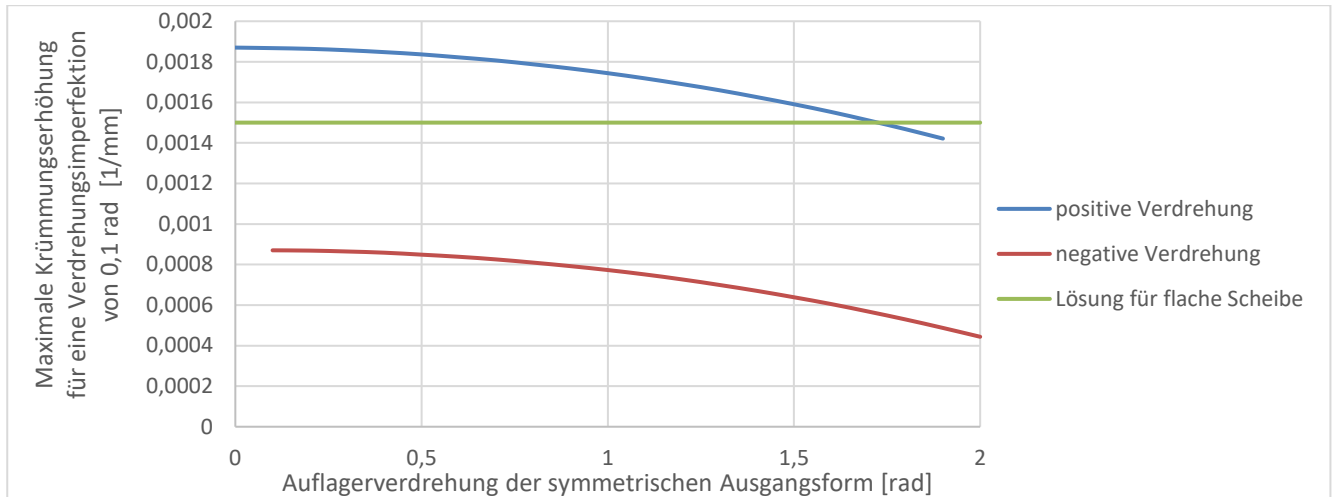


Abbildung 32: maximale Krümmungserhöhung für eine Auflagerverdrehung von 0,1 rad in einer 200 mm langen Scheibe mit symmetrisch gebogener Ausgangsform und frei einstellbarer Auflagerverchiebung

Es kann aus dem Modell ein mathematischer Zusammenhang für die zusätzliche Krümmung Δk angenähert werden:

$$\Delta k(\Delta\varphi) = \begin{cases} (0,00187 \text{ mm}^{-1}\text{rad}^{-1} - 0,000125 \text{ mm}^{-1}\text{rad}^{-3} \varphi_{\text{symm}}^2)\Delta\varphi & \text{bei positiver Imperfektion} \\ (0,00087 \text{ mm}^{-1}\text{rad}^{-1} - 0,0001 \text{ mm}^{-1}\text{rad}^{-3} \varphi_{\text{symm}}^2)\Delta\varphi & \text{bei negativer Imperfektion} \end{cases} \quad (11)$$

Als Näherung kann für leicht gekrümmte Scheiben daher angenommen werden, dass die maximale Krümmungserhöhung bei positiver Lagerverdrehung $0,0187 \text{ mm}^{-1}$ je rad und bei negativer Lagerverdrehung $0,0087 \text{ mm}^{-1}$ je rad beträgt. Generell ist immer zu beachten, dass es durch Steifigkeitsänderungen aus dem Poissoneffekt und andere Imperfectionen zu Abweichungen kommt, die hier aber nicht näher behandelt werden.

Für die antimetrische Lagerverdrehung ist die Krümmungsänderung identisch zur doppelten positiven einseitigen Lagerverdrehung ausgehend von einer um den Betrag der antimetrischen Krümmungsänderung reduzierten Krümmung der Ausgangsform.

Bei behinderter Horizontalverschiebung zeigt sich für asymmetrische und symmetrische Imperfektion durch zusätzliche Horizontalkräfte zwischen den Lagern jedoch ein deutlich unterschiedliches Bild. Bei positiver Imperfektion steht der Probekörper unter Zug, bei negativer unter Druck.

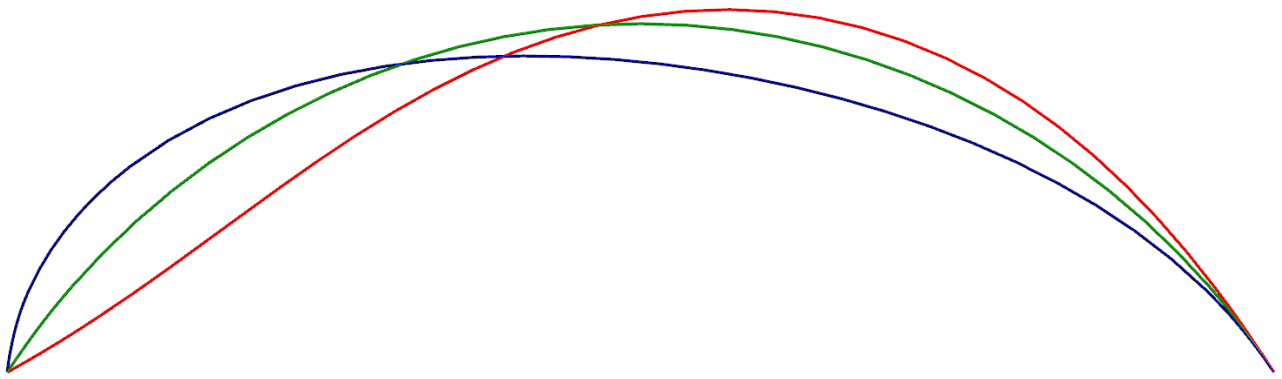


Abbildung 33: beispielhafte Biegeformen für einseitige Verdrehungsimperfektion von +0,5 rad (blau) und -0,5 rad (rot) bei fester Horizontalverschiebung der Lager, ausgehend von symmetrischen Biegeformen mit einer Verdrehung von 1 rad (grün)

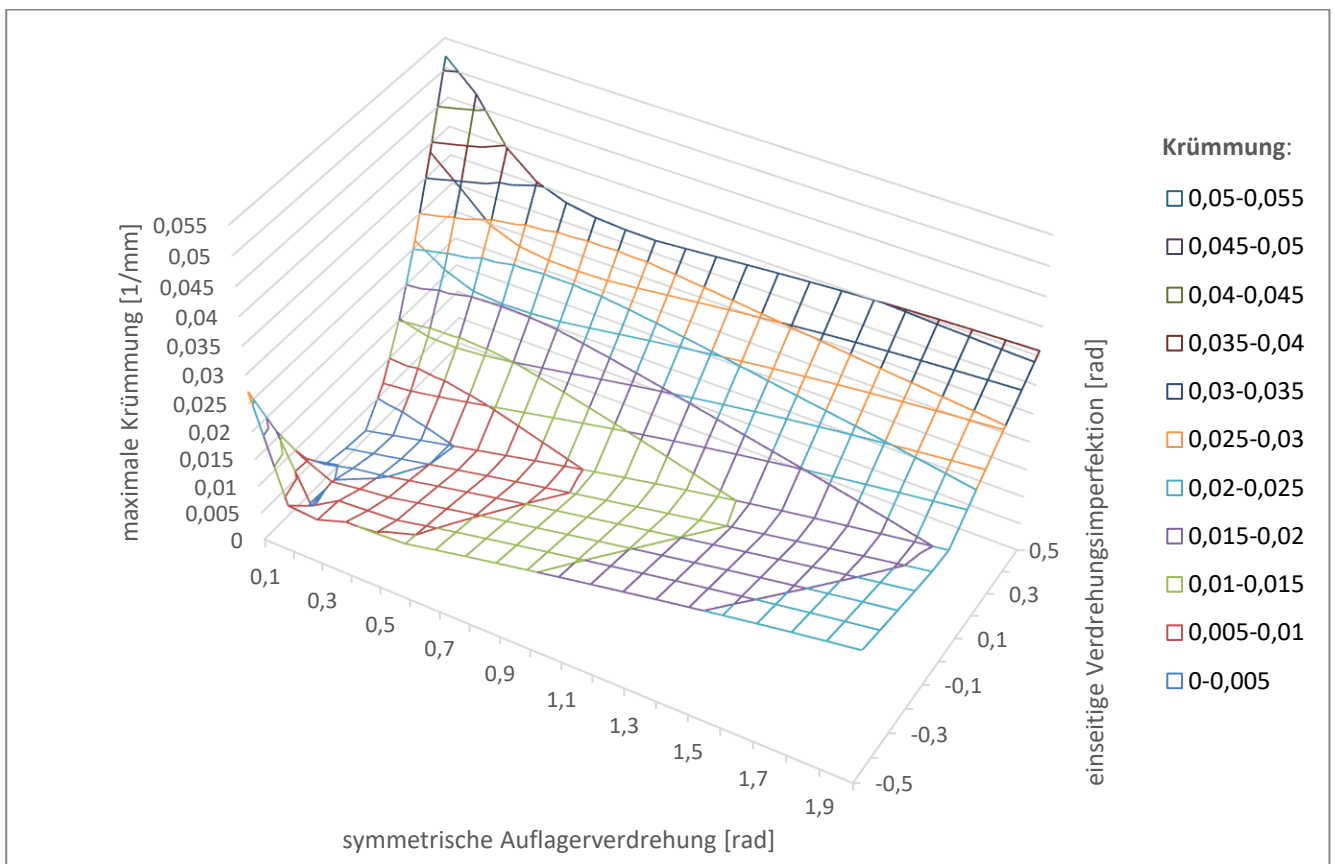


Abbildung 34: maximale Krümmung bei einseitiger Verdrehungsimperfektion in einer 200 mm langen Probe mit in symmetrischer Ausgangsform gehaltener horizontaler Verformung der Lager, der Knick zeigt den imperfektionsfreien symmetrischen Zustand

Für die Verdrehungsimperfektion bei behinderter Horizontalverschiebung der Lager (Abbildung 33) ist die Spannungszunahme ähnlich wie bei der nicht behinderten Verformung bei positiver Imperfektion größer als bei negativer Imperfektion (Abbildung 34 und Abbildung 35). Anders als die Lösung für eine flache Scheibe nach Theorie 1. Ordnung (siehe Tabelle 7 auf Seite 27) entstehen in der Realität sehr hohe Normalkräfte und somit insbesondere bei positiver Imperfektion sehr hohe Krümmung am Auflager der Imperfektion.

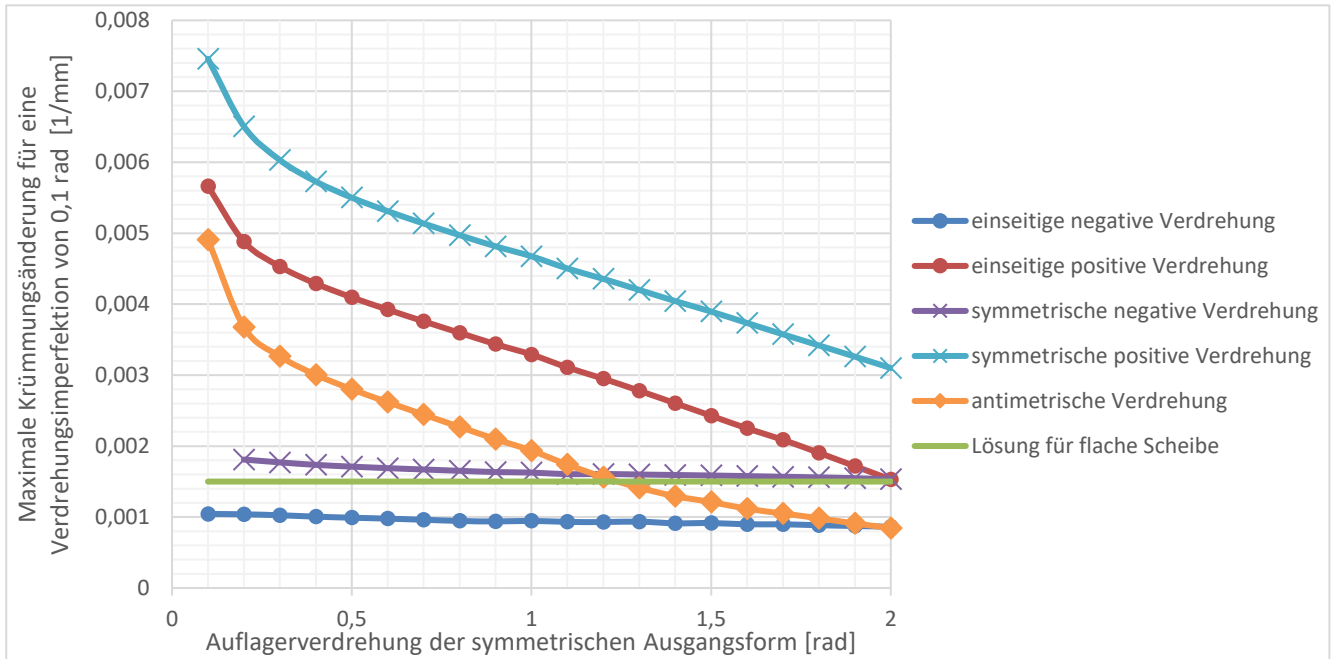


Abbildung 35: maximale Krümmungserhöhung für eine Auflagerverdrehung von 0,1 rad in einer 200 mm langen Scheibe mit symmetrisch gebogener Ausgangsform und behinderter Auflagerverschiebung

Da die Normalkräfte aus Rotationsimperfection bei kleiner Krümmung der Ausgangsform sehr hoch werden und daher entsprechende Verformungen in nahezu flachem Glas weitgehend verhindern ist die nachfolgenden Näherungsformel nur für Ausgangsverdrehungen von $0,5 \text{ rad} < \Delta\varphi < 1 \text{ rad}$ bei einer Länge der Prüffläche von $l = 200 \text{ mm}$ angegeben:

$$\Delta k(\Delta\varphi) = \begin{cases} (0,010 \text{ mm}^{-1} \text{ rad}^{-1} - 0,001 \text{ mm}^{-1} \text{ rad}^{-2} \varphi_{\text{symm}})\Delta\varphi, & \text{einseitig negative Verdrehung} \\ (0,049 \text{ mm}^{-1} \text{ rad}^{-1} - 0,016 \text{ mm}^{-1} \text{ rad}^{-2} \varphi_{\text{symm}})\Delta\varphi, & \text{einseitig positive Verdrehung} \\ (0,018 \text{ mm}^{-1} \text{ rad}^{-1} - 0,002 \text{ mm}^{-1} \text{ rad}^{-2} \varphi_{\text{symm}})\Delta\varphi, & \text{symmetrische negative Verdreh.} \\ (0,063 \text{ mm}^{-1} \text{ rad}^{-1} - 0,017 \text{ mm}^{-1} \text{ rad}^{-2} \varphi_{\text{symm}})\Delta\varphi, & \text{symmetrische positive Verdreh.} \\ (0,037 \text{ mm}^{-1} \text{ rad}^{-1} - 0,017 \text{ mm}^{-1} \text{ rad}^{-2} \varphi_{\text{symm}})\Delta\varphi, & \text{antimetrische Verdrehung} \end{cases} \quad (12)$$

Symmetrische Verdrillung (R_x)

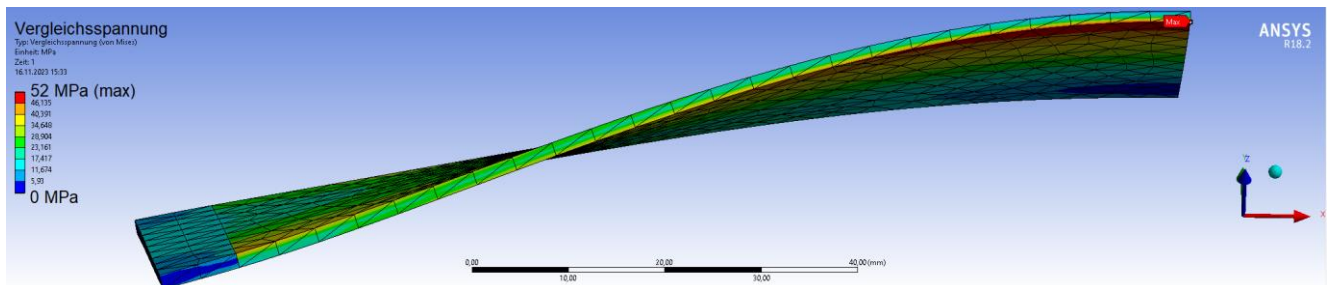


Abbildung 36: Verdrillung um die lokale X-Achse während einachsiger Biegung; Die Symmetrieachse ist rechts, das Spannungsmaximum an der Kante in Elementmitte

Symmetrische Verdrillung um die lokale X-Achse führt wie in Tabelle 7 bereits angedeutet in flachen Probekörpern nur zu einer spannungsfreien Verkippung. In unter einachsiger Biegung stehenden Probekörpern wird jedoch eine signifikante Spannung erzeugt (Abbildung 36 und Abbildung 37).

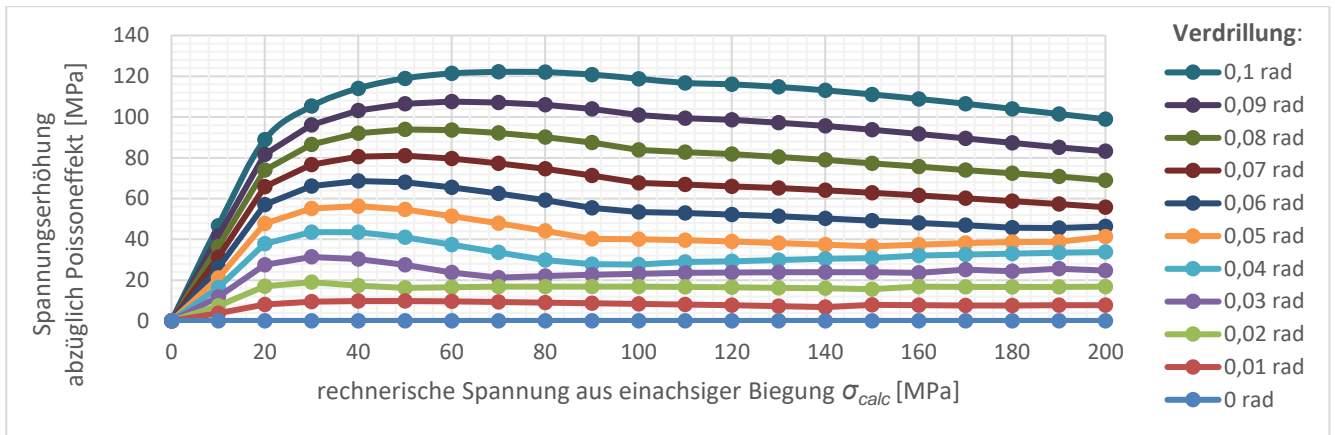


Abbildung 37: Spannungserhöhung durch zusätzliche Verdrillung bei einachsiger Biegung in einer 200 mm langen, 40 mm breiten und 1 mm dicken Glasplatte aus FE-Simulation.

Wie in Abbildung 37 zu sehen führt die Verdrillung insbesondere bei kleiner einachsiger Biegung zusätzlich zum Poissoneffekt zu einem hohen Spannungszuwachs, dieser fällt anschließend bei stärkerer Krümmung wieder auf ein lokales Minimum ab (da die entstehenden Normalkräfte leichter abgebaut werden können) und bleibt dann nahezu auf einem Plateau mit nur leichtem Anstieg. Es ist zudem zu erkennen, dass für ein nicht gekrümmtes Glaselement die Spannung gegen null geht, da es zu einer reinen Verkippung kommt. Minimal- und Maximalwerte der Spannungserhöhung sind beispielhaft in Abbildung 38 gezeigt, der Verlauf der beiden Kurven lässt sich (aufgrund der Interaktion mit dem Poissoneffekt) mathematisch nicht sinnvoll in eine Formel umwandeln, kann jedoch als nahezu linear mit einer Störung für kleine Verdrillungen beschrieben werden. Zwischen Minimum und Maximum kann zudem für nicht zu kleine Verdrillungen ($>0,4$ rad) ein Faktor von ungefähr 1,5 festgestellt werden.

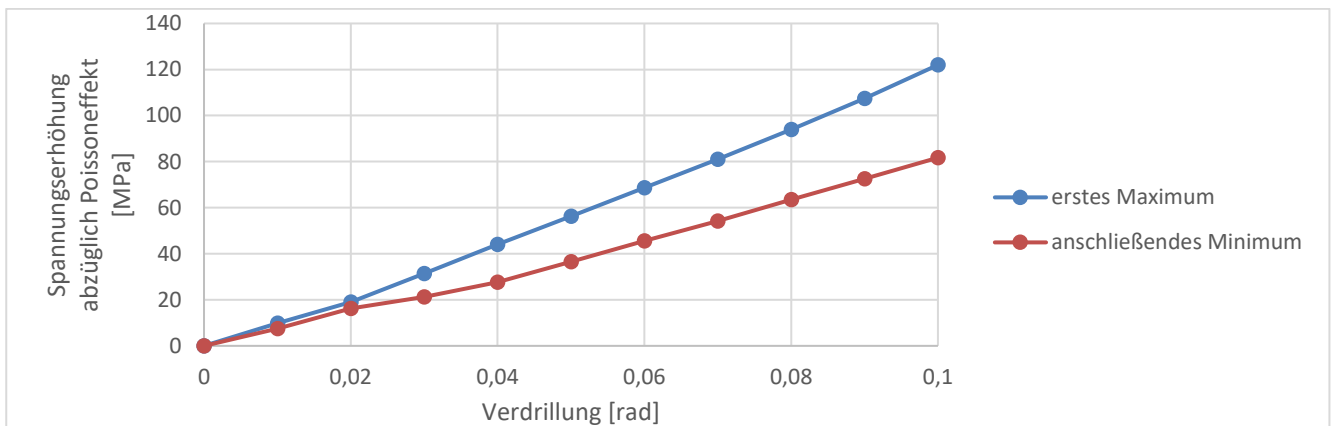


Abbildung 38: Minimal- und Maximalwerte für die Daten der vorherigen Abbildung

Betrachtet man unterschiedliche Glasdicken bei gleicher Verdrillung, so kann man erkennen dass der Spannungsverlauf nahezu proportional zur Glasdicke ist (Abbildung 39).

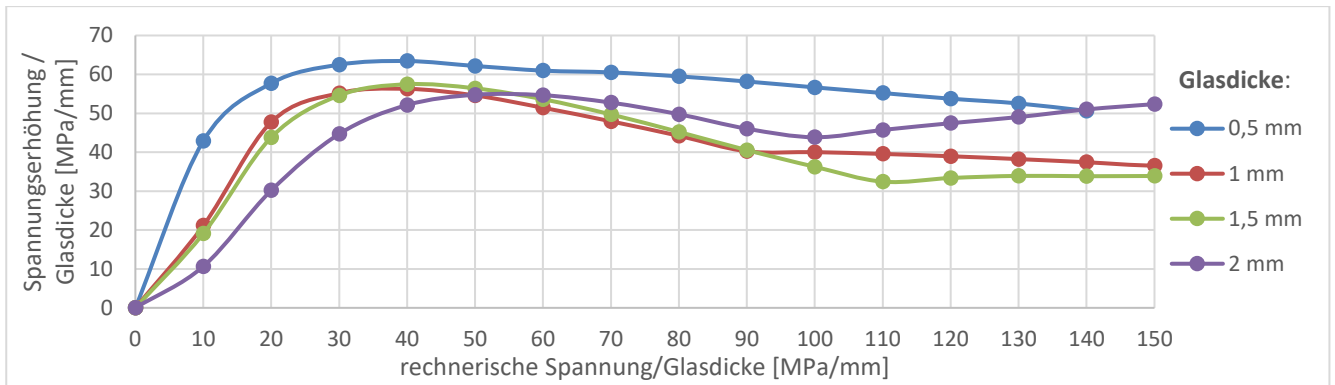


Abbildung 39: auf die Glasdicke normierte Spannungserhöhung (abzüglich Poissoneffekt) durch Verdrillung in einer 40 mm breiten und 200 mm langen Platte unterschiedlicher Dicke unter einer Verdrillung von 0,05 rad

Bei unterschiedlicher Breite ist ein anderer Effekt zu beobachten, das Ergebnis steigt zwar für breiteres Glas auf ein höheres Maximum, ist im Plateau aber nahezu unabhängig von der Breite (Abbildung 40).

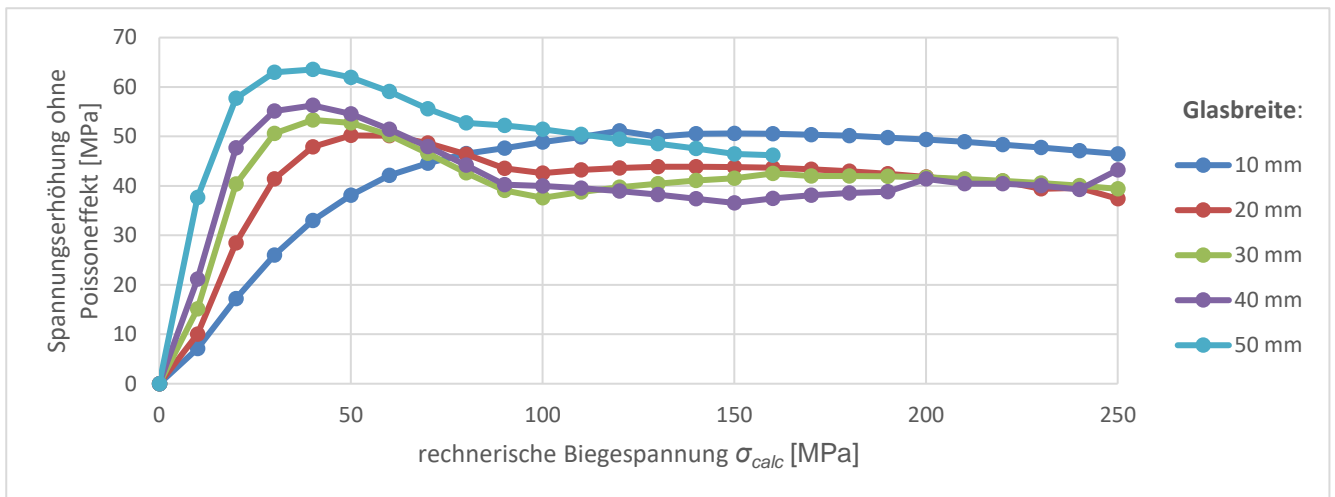


Abbildung 40: Spannungserhöhung (abzüglich Poissoneffekt) für eine 200 mm lange, 1 mm dicke Glasplatte unterschiedlicher Breite

Zusammenfassend lässt sich eine sehr grobe, aber dennoch brauchbare praktikable Näherungsgleichung für die untersuchte Probenlänge von 200 mm angeben:

$$\Delta\sigma = \frac{800 \text{ MPa}}{h} \varphi_x \quad (13)$$

Symmetrische Verdrillung um die globale X-Achse führt ebenfalls bei nicht gebogenen Probekörpern nicht zu einer Spannungserhöhung, sondern lediglich zu einer Verkippung des Querschnitts. Wird jedoch während einer einachsigen Biegung um die Globale Z-Achse das gebogene Glaselement um die globale X-Achse (X-Achse der ebenen Scheibe) verdrillt, entstehen Spannungen im Glas die jedoch deutlich geringer sind als bei Verdrillung um die lokale X-Achse am Scheibenende (Abbildung 41). Es ist zu erkennen, dass für ein nicht gekrümmtes Glaselement die Spannung ebenfalls gegen null geht, da es zu einer reinen Verkippung kommt.

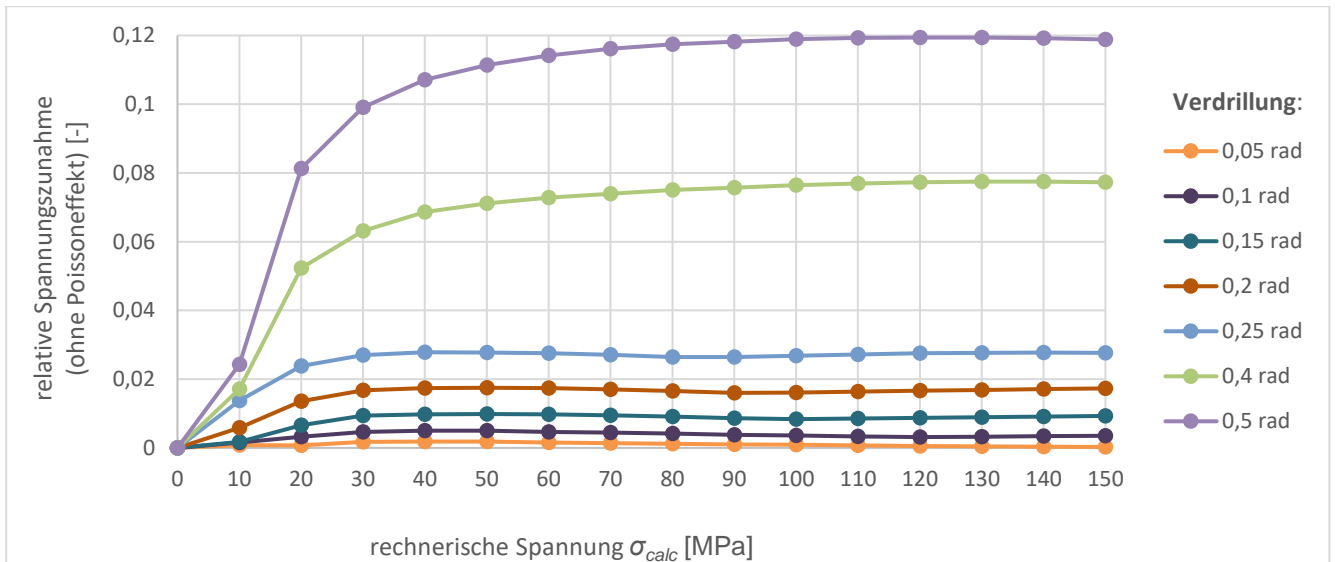


Abbildung 41: Relative Spannungserhöhung (ohne Poissoneffekt) für eine 1 mm dicke, 40 mm breite und 200 mm lange Dünnglasplatte mit symmetrischer Verdrillung um die globale X-Achse

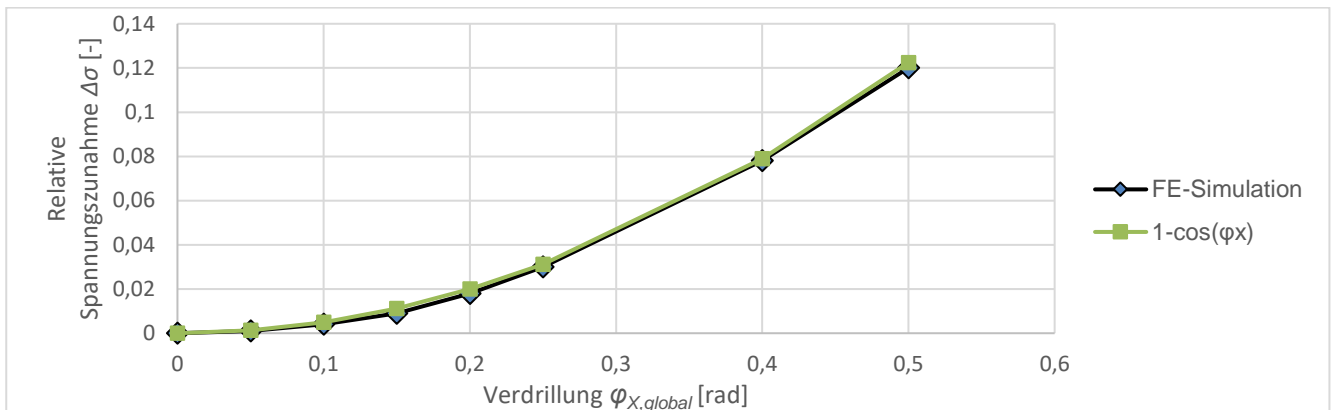


Abbildung 42: Relative Spannungszunahme für die Daten aus der vorherigen Abbildung im Plateaubereich

Für die symmetrische Verdrillung um die globale X-Achse kann vereinfacht im Bereich II des Poissoneffekts (siehe 3.1.2; für den untersuchten Probekörper ist Bereich II bei $\sigma_{calc} > 75\text{MPa}$) eine konstante, verdrillungsabhängige Spannungszunahme angesetzt werden (Abbildung 41, Abbildung 42). Die relative Spannungszunahme im Plateaubereich ist hierbei, da es sich um eine relative Verformung handelt, unabhängig von der Glasdicke, es ergibt sich aus der FE-Simulation folgender Zusammenhang abhängig von der Verdrillung φ_x :

$$\Delta\sigma = \sigma_{calc} (1 - \cos(\varphi_{X,global})) \quad (14)$$

Das Spannungsmaximum findet sich in diesem Fall nahe der Einspannung, an dem Punkt an dem sich der Poissoneffekt aufgebaut hat (Abbildung 43, vergleiche zudem Abbildung 24).

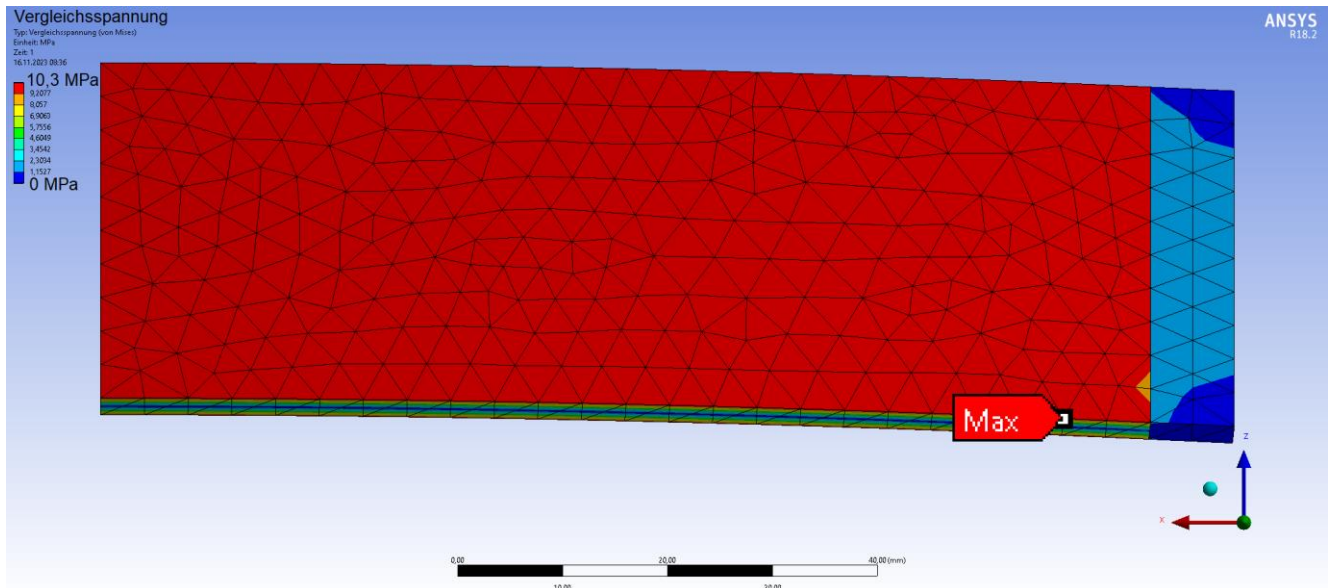


Abbildung 43: Punkt des Spannungsmaximums bei symmetrischer Verdrillung; Das Modell hat eine Symmetrieachse an der linken Kante, die Verdrillung dreht in der gezeigten Draufsicht die untere rechte Ecke „hoch“ und die obere rechte Ecke „runter“

Antimetrische Verdrillung (R_x)

Bei der antimetrischen Verdrillung dreht sich das Glas um die unveränderte Mittelfaser des Probekörpers. Aus diesem Grund kann näherungsweise das Ergebnis der flachen Scheibe (siehe Tabelle 7) verwendet werden.

Anschaulich kann dies auch anders erklärt werden: nimmt man an, dass es durch die Verdrillung des Querschnitts in der Draufsicht bei Drehung der Ansicht zu einer Scherung des Querschnitts kommt (Analogie von T_z und R_x), so lässt sich die Spannungszunahme über den Scherungswinkel errechnen (Abbildung 44).

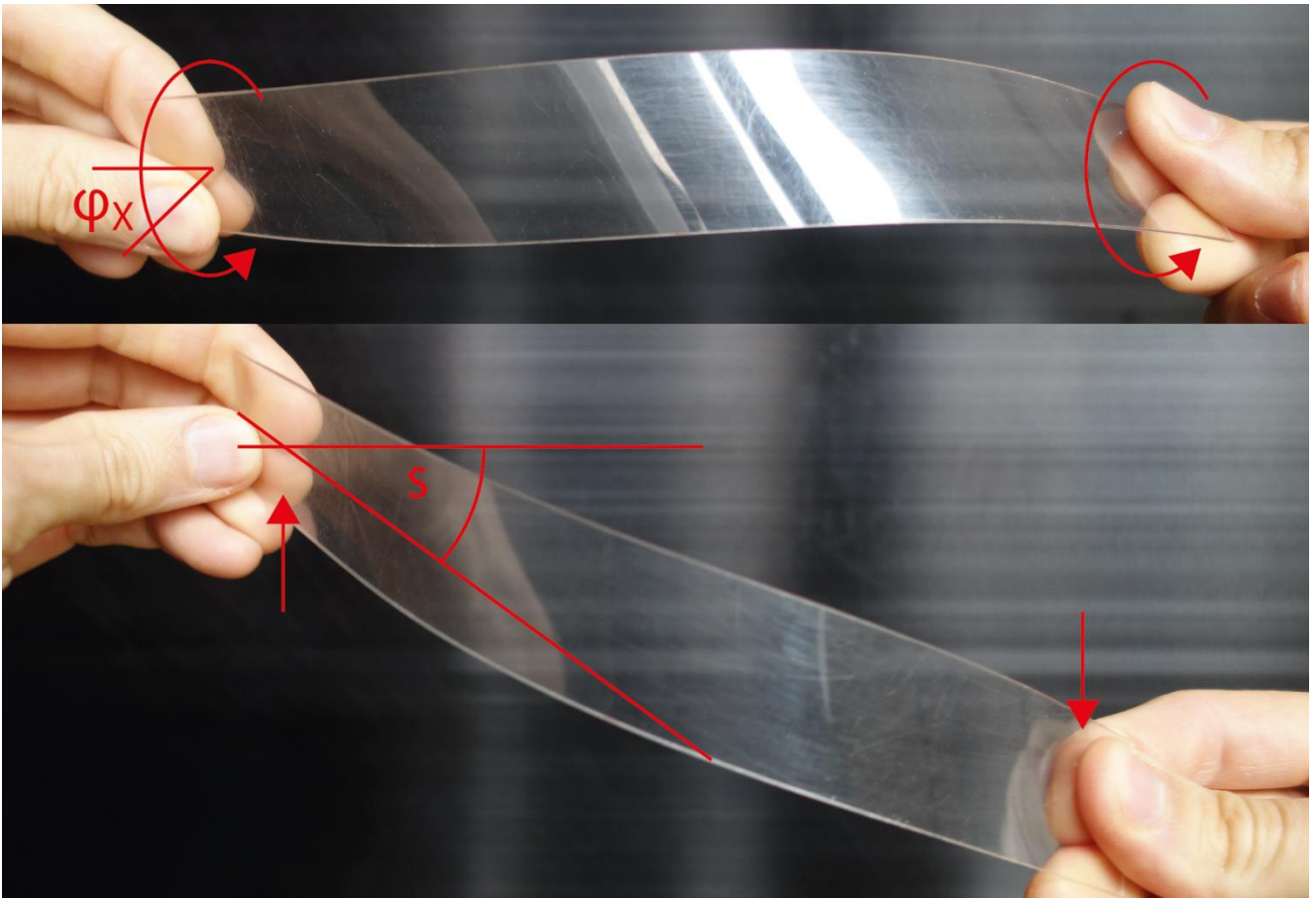


Abbildung 44: eine antimetrische Verdrillung mit Drillwinkel φ_x (oben) kann für eine gekrümmte Platte auch als Scherung mit Scherwinkel S (unten, hier perspektivisch in der lokalen Glasebene am Auflager gezeigt) unter Beibehaltung der Sehnenlänge durch Korrektur der Auflagerverschiebung in X-Richtung dargestellt werden

Einseitige Verdrillung (R_x)

Bei der einseitigen Verdrillung kommt es im Gegensatz zur antimetrischen Verdrillung und ähnlich wie bei der symmetrischen Verdrillung zu signifikanten Normalkräften im Glas. Es kann analog zum flachen Glas (Tabelle 7) zwar nicht exakt, aber mit meist ausreichender Genauigkeit näherungsweise die halbe Spannungserhöhung der symmetrischen Verdrillung angesetzt werden. Dies ist möglich da eine einseitige Verdrillung auch als Verkippung mit anschließender symmetrischer Verdrillung in jeweils halber Höhe der einseitigen Verdrillung angenähert werden kann.

3.1.5. Bruchbild

Das Hauptcharakteristikum des Bruchbilds von Dünnglas ist, dass es sehr stark von der Belastung vor und während des Bruches abhängig ist. Selbst bei hoher, zum Beispiel chemischer, Vorspannung ist kein weitgehend gleichmäßiges Bruchbild, wie zum Beispiel bei ESG, zu beobachten, sondern ein stark krümmungs- und belastungsabhängiges Bruchbild, ähnlich dem von dickerem Floatglas. Dieses Bruchbild hat die folgenden Charakteristika:

Trichterförmiger Bruch

Bricht Dünnglas unter Krümmung, so bildet sich vom Bruchursprung (1 in Abbildung 45) aus ein trichterförmiger Bruch der je nachdem ob der Bruchursprung in der Fläche (Abbildung 51) oder an der Kante (Abbildung 45, Abbildung 46, Abbildung 52) liegt in eine oder zwei Richtungen senkrecht zur

Hauptkrümmung aufgeht. Der Innenwinkel des Trichters und die Anzahl der den Trichter ausfüllenden Bruchlinien nimmt im Allgemeinen mit höherer Bruchspannung zu (Abbildung 48).

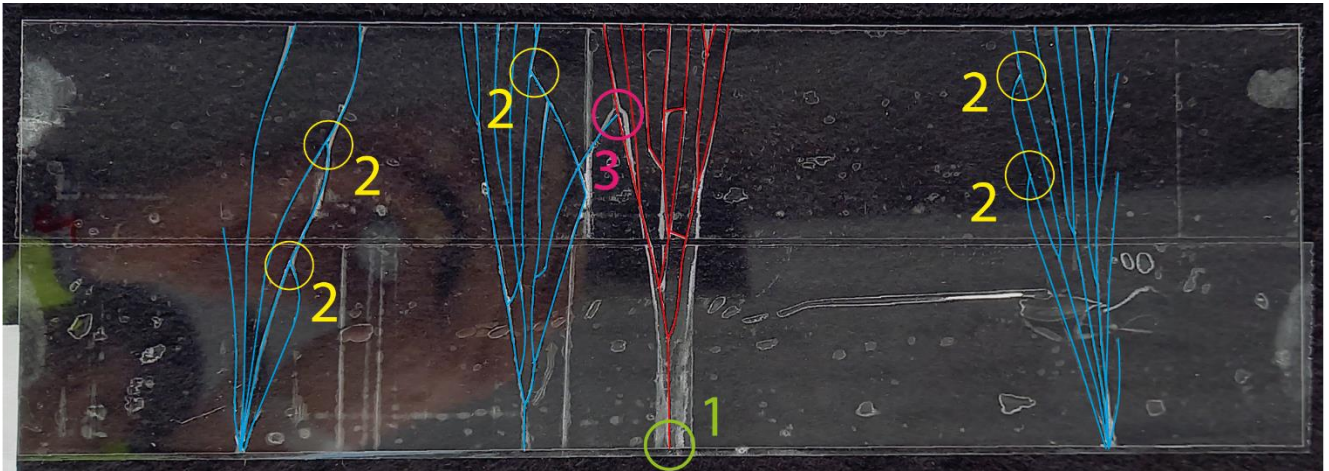


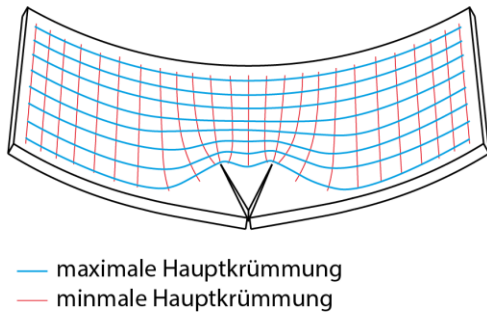
Abbildung 45: beispielhafter Bruch im einachsigen Biegeversuch von nicht vorgespanntem 0,7 mm dicken Glas unter einer Bruchspannung von ca. 37 MPa; 1 = Bruchursprung mit davon ausgehendem roten Primärbruch, 2 = Krümmungsänderung der Bruchlinien weg vom Primärbruch in blauen Sekundärbrüchen, 3 = Sekundärbruch trifft auf Primärbruch und endet dort



Abbildung 46: Trichterförmiger Bruch einer unter einer Spannung von ca. 264 MPa gebrochenen chemisch vorgespannten 1,1 mm dicken Dünnglasscheibe mit großem Winkel des Bruchtrichters

Die trichterförmige Form lässt sich dadurch erklären, dass das Glas nach dem lokalen Öffnen des Risses dort sehr schnell, wie eine losgelassene Torsionsfeder, in Richtung seiner ebenen Form beschleunigt. Dadurch ändert sich während des Bruchs lokal die Richtung der Hauptbiegespannung (Abbildung 47). Je stärker die „Feder“ vorgespannt, also das Glas gekrümmt, ist, desto schneller beschleunigt sie, was einen breiteren Bruchtrichter zur Folge hat (Abbildung 48).

a) schematische Darstellung



b) FE-Simulation

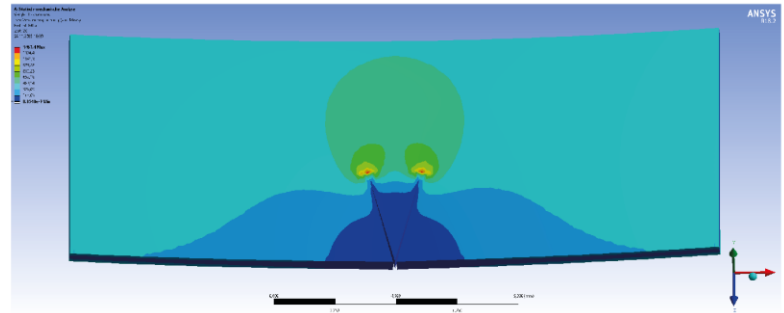


Abbildung 47: Darstellung der Spannung und Krümmung während der Rissöffnung; a) schematische Darstellung, b) FE-Simulation mit farbiger Darstellung der Vergleichsspannung (von Mises) von niedrig (blau) nach hoch (rot)

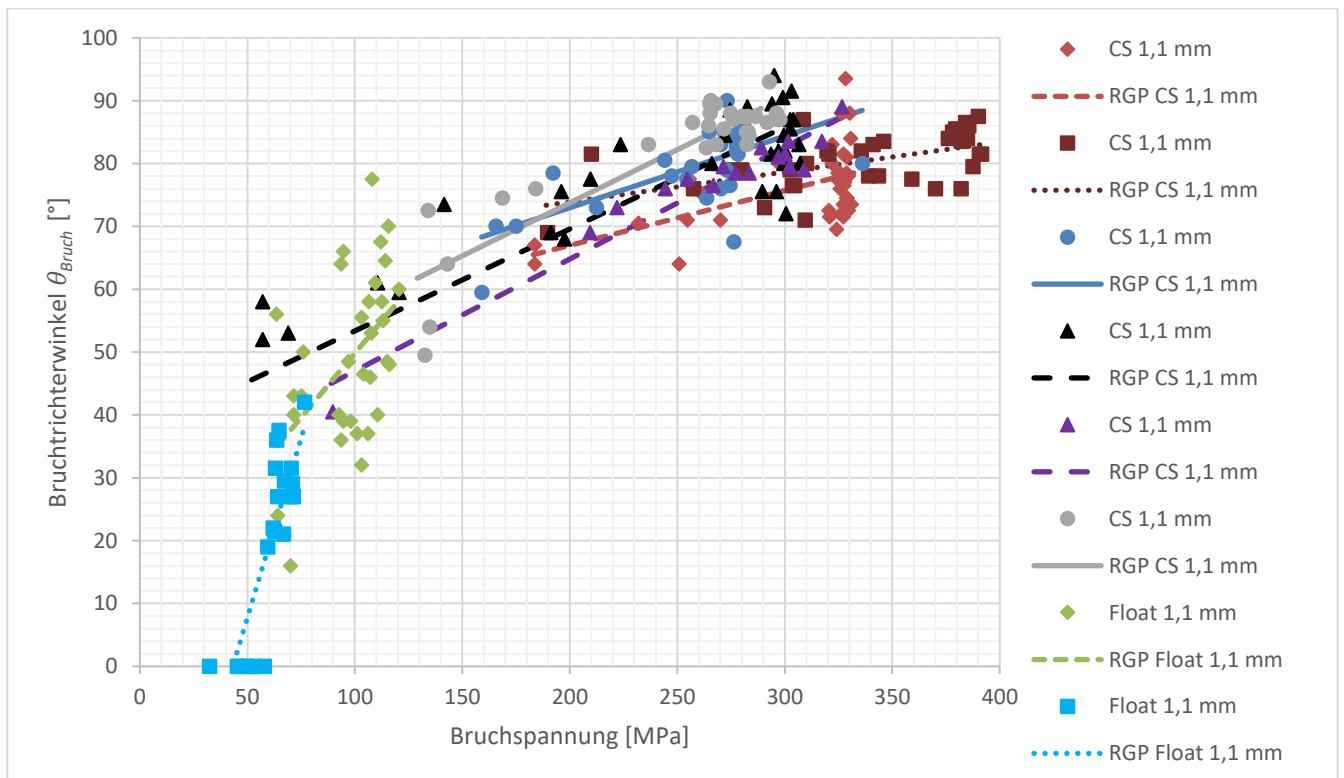


Abbildung 48: Bruchrichterwinkel im Verhältnis zur Bruchspannung für 230 Proben aus 8 Versuchsreihen in 1,1 mm dickem Glas; CS = chemisch vorgespannt; RGP = lineare Regression über den jeweiligen Datensatz

Bei geringen Krümmungen (meist in nicht vorgespanntem Glas oder bei lokalen die Festigkeit stark herabsetzenden Defekten) reicht die Energie oft nicht aus um einen Bruchrichter zu öffnen, in diesem Fall läuft die Bruchlinie meist senkrecht zur Kante durch das Glas (Abbildung 50). Gemäß vorliegender Daten kann der Bruchrichterwinkel θ_{Bruch} nach folgendem Zusammenhang abhängig der Glasdicke h und der Bruchspannung σ_{Bruch} angegeben werden (allerdings mit hoher Unsicherheit aufgrund der geringen Datenlage und hohen Streuung, siehe auch Abbildung 49):

$$\theta_{Bruch}(\sigma_{Bruch}) = \arctan\left(0,03(\sigma_{Bruch} - 53 \text{ MPa} \cdot \sqrt{h})\right) \quad \text{für } \sigma_{Bruch} > 53 \text{ MPa} \cdot \sqrt{h} \quad (15)$$

Teilweise öffnen sich allerdings auch in Glas welches bei einer Spannung unter $53 \text{ MPa} \cdot \sqrt{h}$ gebrochen ist während des Brechens durch Lastumlagerungen und damit verbundenen Spannungszunahmen

noch Bruchtrichter, in diesem Fall läuft zuerst eine gerade Linie durch das Glas, die sich dann aufspaltet (Abbildung 45 und Abbildung 53 rechts). Generell ist die Messung des Bruchwinkels sehr ungenau da dieser sich während des Bruchs immer wieder leicht ändert, die Linien laufen nicht gerade, sondern leicht „sanduhrförmig“ (Abbildung 51), die vorliegenden Daten wurden ungefähr 1 cm vom Bruchursprung entfernt gemessen.

Plastische Vorkrümmungen (zum Beispiel aus Heißverformung) scheinen die untere Grenze um den Spannungswert zu erhöhen der sich theoretisch aus einer der Krümmung der Heißbiegung entsprechenden Kaltbiegung ergeben würde, hier liegen allerdings auch nur wenige Daten vor.

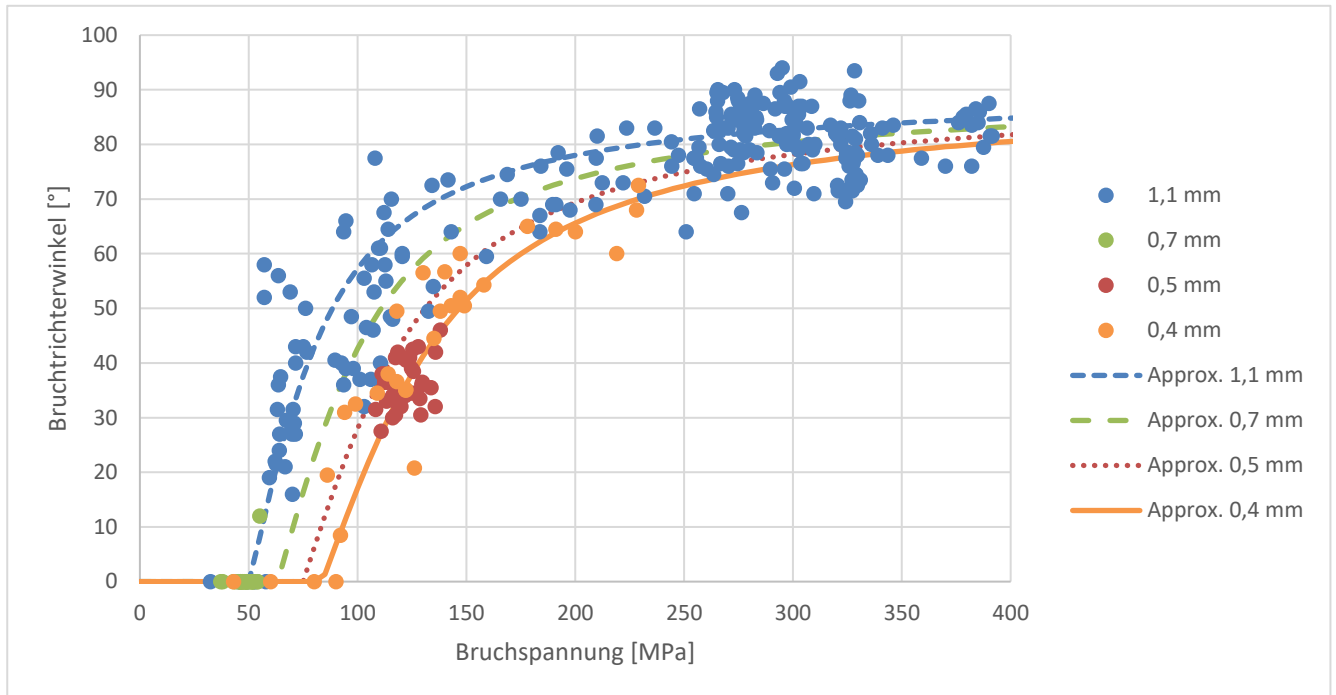


Abbildung 49: Bruchtrichterwinkel in Abhängigkeit der Bruchspannung für 1,1 mm, 0,7 mm, 0,5 mm und 0,4 mm Flachglas mit Approximation des Zusammenhangs zwischen Spannung und Winkel



Abbildung 50: chemisch vorgespanntes heiß vorgekrümmtes 1,1 mm dickes unter einer außergewöhnlich geringen Spannung von ca. 90 MPa bei einachsiger Biegung gebrochenes Glas ohne Bruchtrichter (Bruchkrümmung = 1,03 / m)

Abbau der Verformungsenergie aus Biegung in Bruchfläche

Innerhalb des Bruchtrichters wird die dort „gespeicherte“ Biegungsenergie (und gegebenenfalls Energie aus Stoß, Vorspannung etc.) im Allgemeinen in Bruchfläche abgebaut, wie es zum Beispiel auch bei ESG zu beobachten ist [100]. Außerhalb wird diese durch das Glas (und gegebenenfalls in den Versuchsaufbau) weitergeleitet und dort auch zum Teil in Bruchfläche umgewandelt, sofern die Energie für die Überwindung der Glasfestigkeit ausreichend ist (Abbildung 50 und Abbildung 51).

Hierbei ist anzumerken, dass bereits das Aufbringen einer dünnen Polymerschicht (Klebeband) aufgrund seiner dämpfenden und energieabsorbierenden Eigenschaften zu einer deutlichen Reduktion der Bruchstückzahl führt. Auch der Versuchsaufbau beziehungsweise Einbauzustand oder Lamination sind in der Lage diese Zahl stark zu beeinflussen. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll einen Zusammenhang von Bruchspannung oder Bruchkrümmung mit der Bruchstückzahl mathematisch darzustellen. Trotzdem gilt bei identischen Rahmenbedingungen, dass die Bruchstückzahl bei steigender Bruchspannung zunimmt.

Weiterhin ist anzumerken, dass insbesondere bei hohen Bruchspannungen von mehreren hundert Megapascal die Bruchstücke, sofern sie nicht zum Beispiel durch Klebeband gehalten sind, sehr stark beschleunigt werden können, so dass bereits eine gebrochene Scheibe ausreicht, um in einem Raum eine sehr große Zahl teils sandkorngroßer Glassplitter in sämtliche Bereiche zu verteilen, so dass diese teilweise Jahre später noch an schwer zugänglichen Stellen gefunden werden.

Dies unterscheidet sich stark vom Verhalten einer zum Beispiel durch lokale punktförmige Einwirkung gebrochenen Scheibe (z.B. Smartphonedisplay bei Fall auf die Kante), auch wenn die Bruchspannung in ähnlichem Bereich ist. Der Einfluss der freigesetzten Biegungsenergie auf das Bruchbild ist auch bei stark vorgespanntem Dünnglas größer als der Einfluss der freigesetzten Energie aus Vorspannung.

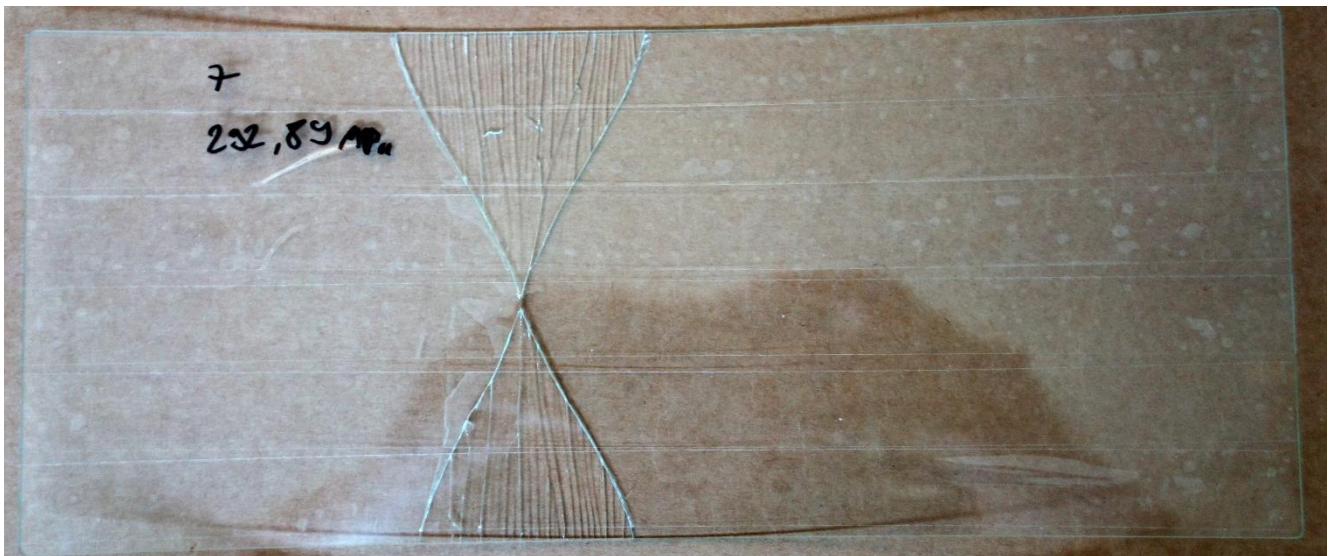


Abbildung 51: Bruchbild in 1,1 mm dickem chemisch vorgespanntem Glas mit Flächenbruch und nur innerhalb der Bruchtrichter erzeugter zusätzlicher Bruchfläche; Bruchspannung ca. 131 MPa

Sekundäre Brüche

Während sich der Bruch vom primären Bruchursprung öffnet, erfolgt bereits eine signifikante Lastumlagerung im gekrümmten Bauteil, welche sofort zu einer Spannungsänderung in anderen Bereichen führt. Dort kann es nun zu starken Spannungsspitzen kommen die sekundäre Brüche erzeugen (Abbildung 45, Abbildung 46, Abbildung 52). Diese sekundären Brüche sind im Allgemeinen durch zwei Charakteristika zu erkennen:

Sie laufen nicht wie die primären Brüche gerade und symmetrisch durchs Glas, sondern weisen teils lokale Richtungsänderungen auf bei denen sich beispielsweise die Risse auf der Seite des Bruchtrichters, die in Richtung des primären Bruchs liegt, von diesem weg (2 in Abbildung 45) oder der gesamte Bruchtrichter zu ihm hin krümmen (Abbildung 53 links), diese Richtungsänderungen sind von Lastumlagerungen abhängig.

Zudem laufen sie nicht unbegrenzt durch das gesamte Glas, sondern enden an den Bruchflächen bereits vorhandener, vorher entstandener Brüche (3 in Abbildung 45, Abbildung 53 links). Welcher Bruch auf welchen anderen Bruch trifft und welcher Bruch sich von welchem anderen wegkrümmt sind folglich häufig Zeichen welcher Bruch zuerst entstanden ist.

Sekundäre Brüche beginnen mit höherer Wahrscheinlichkeit an derselben Kante wie primäre Brüche da sich die Last dort gewöhnlich zuerst umlagert (Abbildung 45), können aber auch beispielsweise vom Primärbruch (Abbildung 46, Abbildung 52, Abbildung 53 Mitte) oder in seltenen Fällen von der gegenüberliegenden Kante ausgehen. Auch kann es bei hohen Spannungen zu längs durch das Glas laufenden Bruchlinien kommen, welche weitere Bruchfläche erzeugen (Abbildung 53 Mitte).

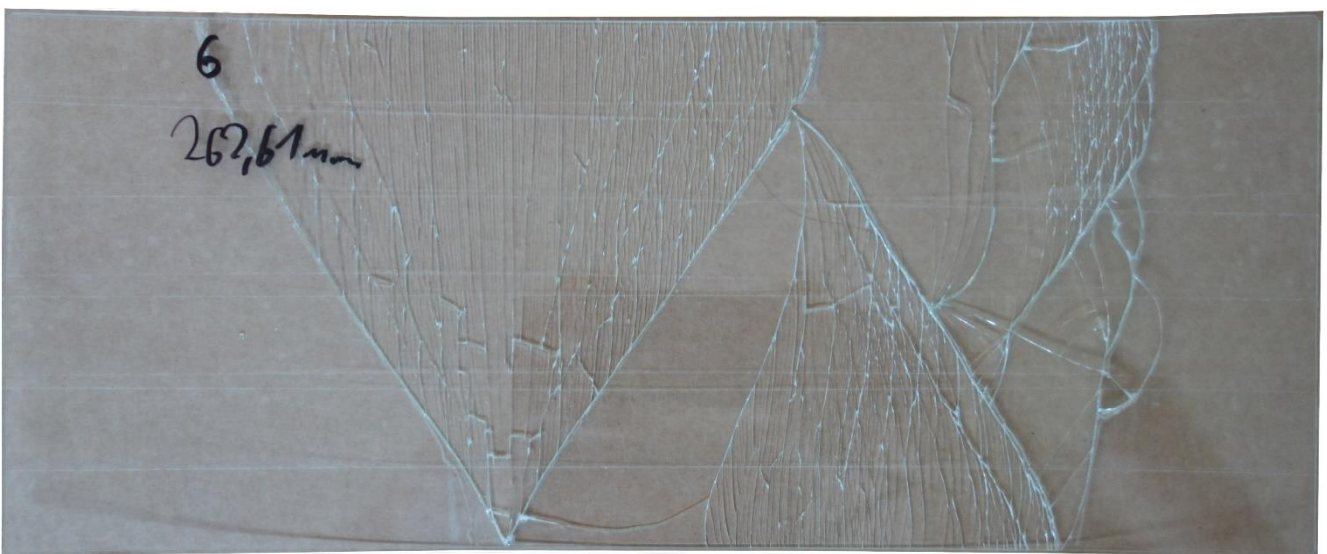


Abbildung 52: Vom Primärbruch ausgehender Sekundärbruch in einer unter einer Spannung von ca. 147 MPa gebrochenen 1,1 mm dicken chemisch vorgespannten Scheibe

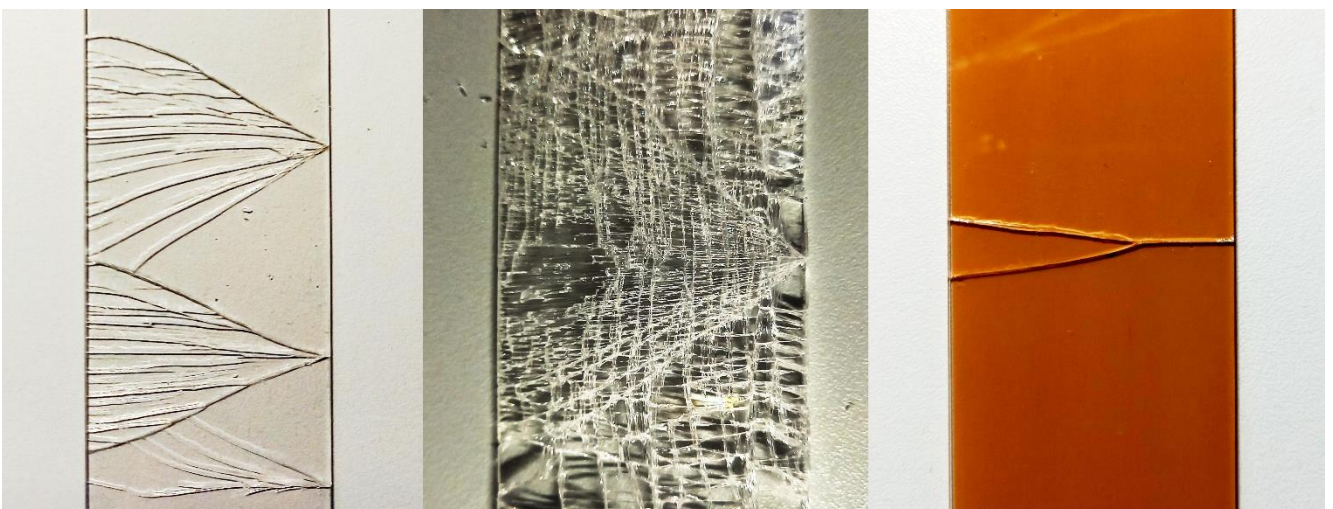


Abbildung 53: links: symmetrischer Primärbruch mit asymmetrischen Sekundär Brüchen, davon einer an der Einspannung, in 0,5 mm Floatglas; Mitte: Trichterförmiger Primärbruch mit horizontal und vertikal verlaufenden Sekundärbrüchen in 1,1 mm chemisch vorgespanntem Glas; rechts: Primärbruch an der unteren Grenze für das Entstehen von Bruchtrichtern in 1,1 mm Floatglas mit einer Bruchspannung von ca. 57 MPa, es läuft zuerst eine gerade Linie durch das Glas bevor sich der Bruchtrichter (wahrscheinlich aufgrund von Krümmungsänderung durch Lastumlagerung) öffnet

Bruchspiegel

Da sich der Bruchspiegel in Glas nicht nach absoluter Größe, sondern nach relativer lokaler Dehnung des Glases einstellt, ist er in Dünnglas üblicherweise mit dem Erscheinungsbild bei dickerem Glas vergleichbar (Abbildung 54). Teilweise läuft er bei starken Krümmungen senkrecht zur Oberfläche durch das Glas und weitet sich dabei auf, dies ist bei dem anliegenden gerichteten Spannungszustand des „aufklappenden“ Risses allerdings zu erwarten, das seitliche Risswachstum erfährt eine höhere Beschleunigung als das vertikale. Das Thema wird, auch weil es für die Entwicklung der Prüfverfahren mäßig relevant ist, hier nicht weiter vertieft, es ist möglicherweise Gegenstand weiterer Forschung.

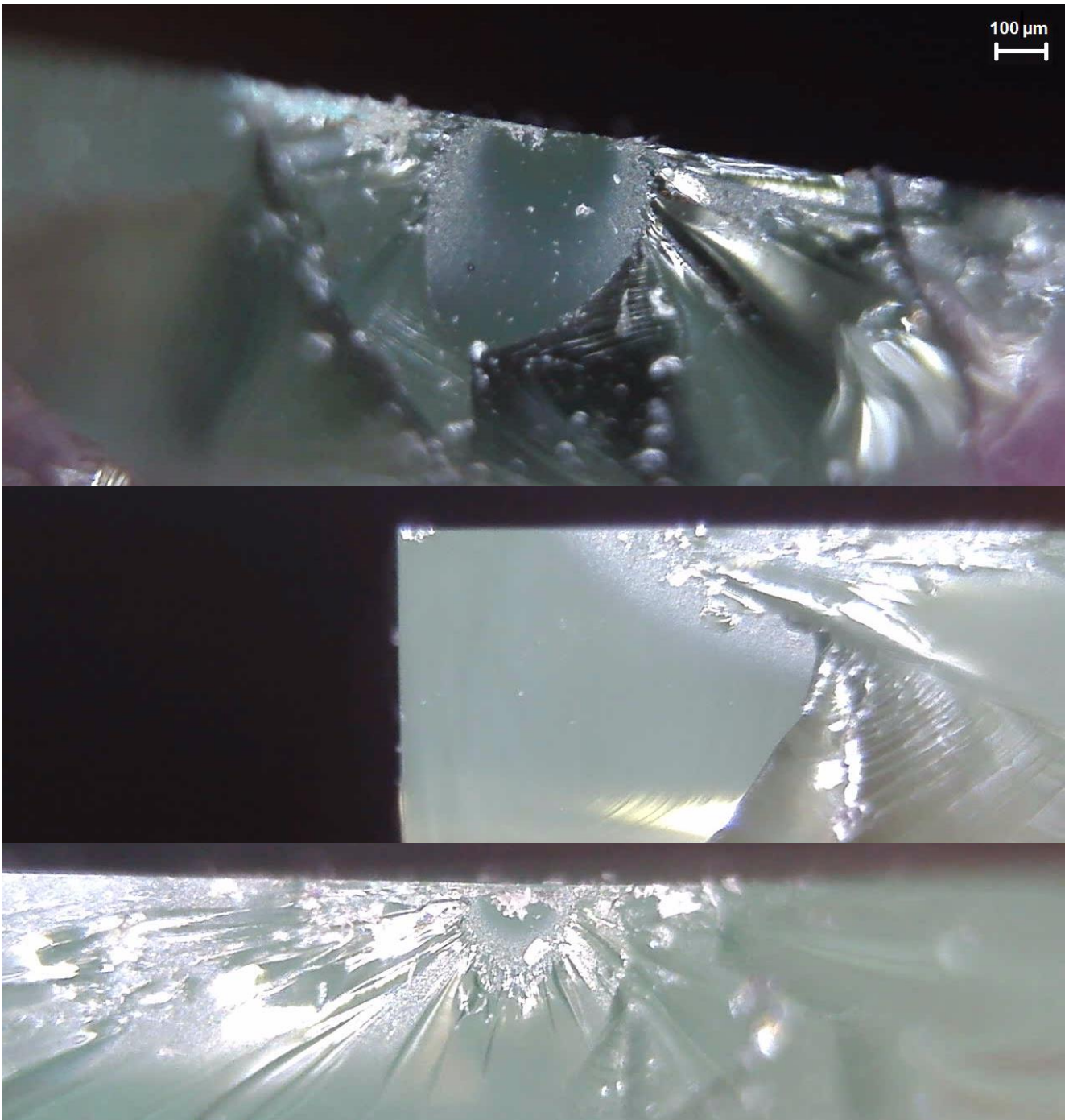


Abbildung 54: drei Bruchspiegel unterschiedlicher Größe in 1,1 mm dickem Glas

In Anhang 7.4 sind eine Reihe weiterer Bruchbilder von Dünnglas gezeigt.

3.2. Zweiachsige Biegung

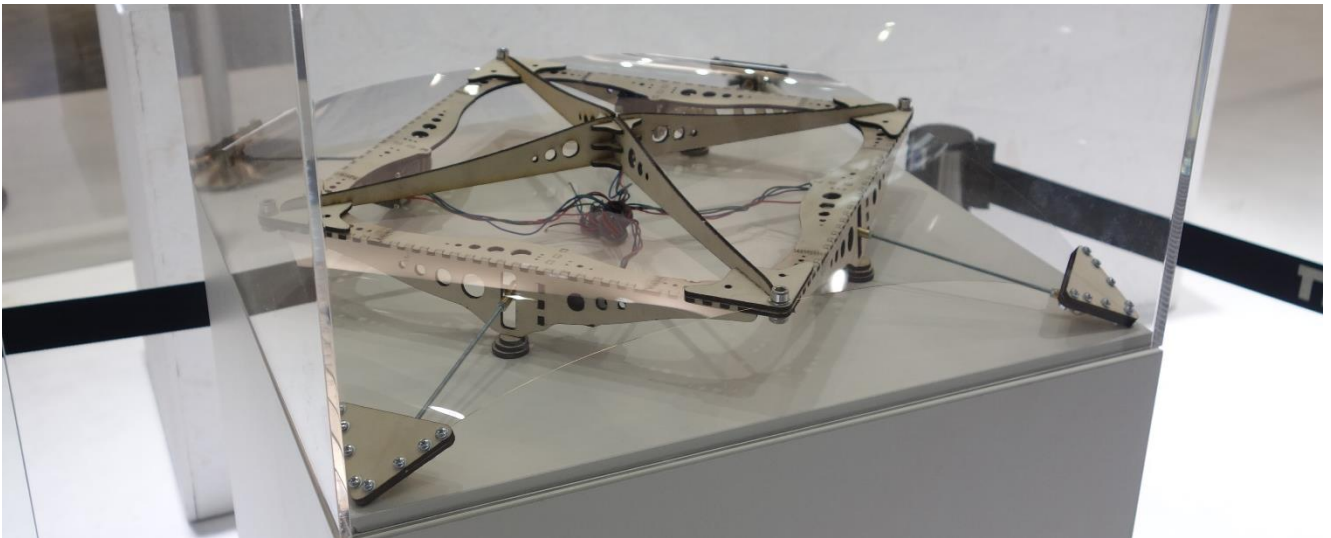


Abbildung 55: Dünnglasroboter mit einachsiger gebogenen "Beinen" und zweiachsiger gebogenem "Körper", Eigenbau, ausgestellt auf der Messe Glasstec 2018

3.2.1. Steifigkeit

Im Gegensatz zu einachsiger Biegung, bei der (abgesehen vom lokal wirkenden Poissoneffekt) gewöhnlich ein in der Mittelfaser des Querschnitts normalspannungsfreier Zustand vorliegt, ist die zweiachsige Biegung von Dünnglas durch Normalspannungen maßgeblich beeinflusst. Aufgrund bereits geringer Verformungen entstehende Normalkräfte im Glas sorgen für einen deutlichen Anstieg des Verformungswiderstands der belasteten Bauteile, ähnlich einem horizontal gespannten Seil mit vertikaler Last nimmt dieser mit steigender Verformung signifikant zu. Bei dickerem Glas mit kleinen Abmessungen, welches gewöhnlich nur sehr geringe Verformungen erfährt, wird dieser meist vernachlässigt, je nach Bauteilgeometrie und Glasdicke kann er aber bemessungsbestimmend werden.

Die Steifigkeitsanstiege durch Normalkräfte, insbesondere in den Flächen eines Bauteils, sorgen dafür dass Verformungen in Randbereiche und insbesondere in Ecken „geschoben“ werden, was dort zu (im Vergleich zu dickerem Glas) massiven Spannungsanstiegen führt (Abbildung 56).

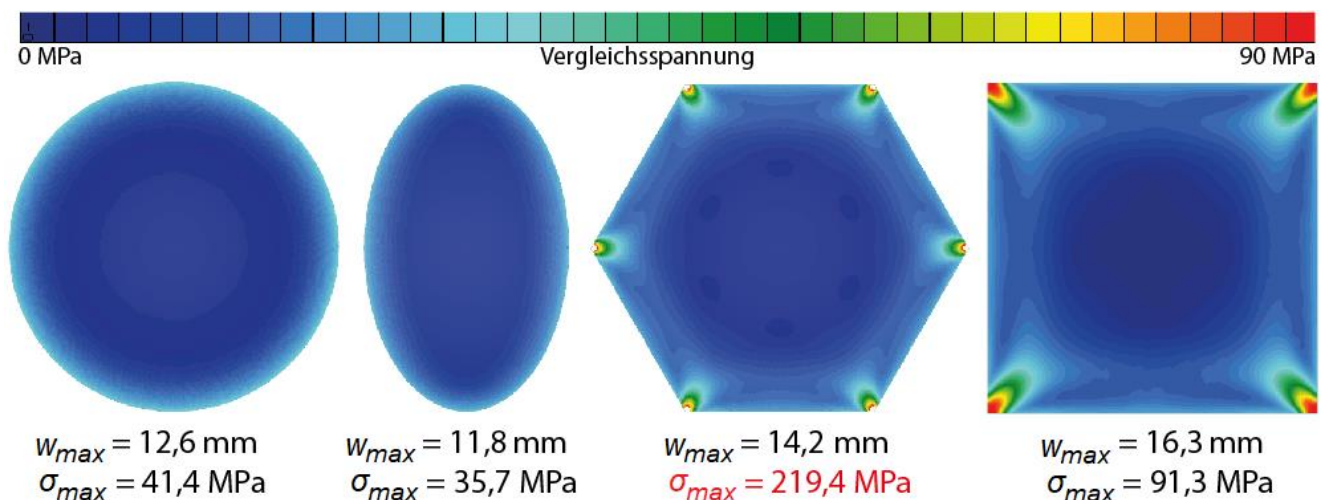


Abbildung 56: Spannungen und maximale Verformung in unter einem Druck von 5 mBar stehendem 1 mm dickem Glas mit einer Fläche von jeweils 1 m² und umlaufender Navierlagerung

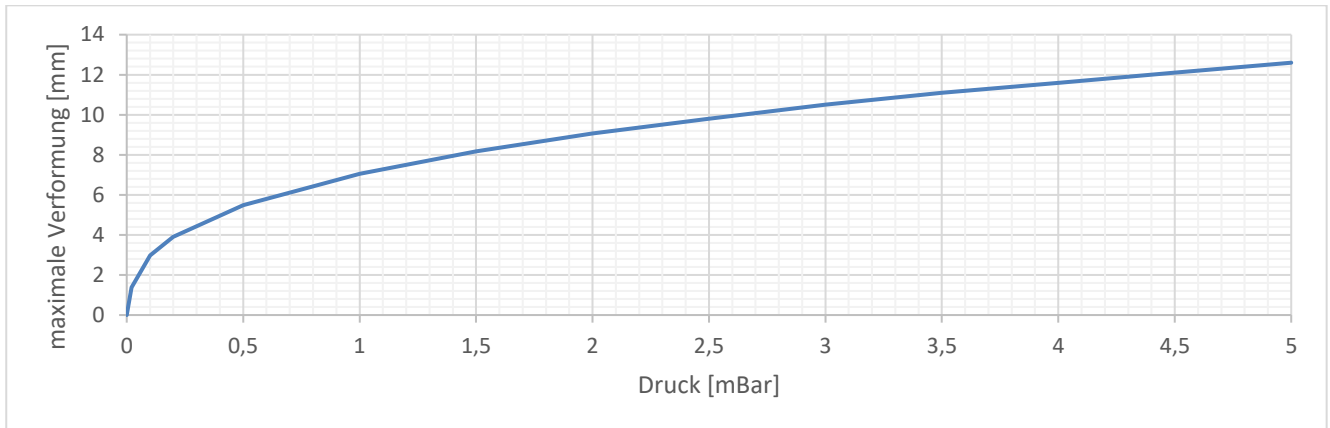


Abbildung 57: Versteifung der Geometrie durch Membrankräfte gezeigt durch die druckabhängige Verformung für die in der vorherigen Grafik gezeigte kreisrunde Geometrie

Entwirft man folglich Bauteile mit unter zweiachsiger Belastung stehenden Flächen, so sind diese darauf zu optimieren die entstehenden Verformungen an den Rändern möglichst gleichmäßig und ohne Spannungsspitzen – diese entstehen gewöhnlich wenn es an den Rändern zu starken Randparallelen einachsigen Biegungen kommt – zu verteilen, Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen ein Beispiel für eine auf maximale Verformung optimierte Geometrie eines Folienkissens aus Dünnglas, die Ränder setzen sich aus konkaven und konvexen Segmenten zusammen, die für einen besseren Ausgleich der normalkraftbedingten Längenänderungen am Rand sorgen.

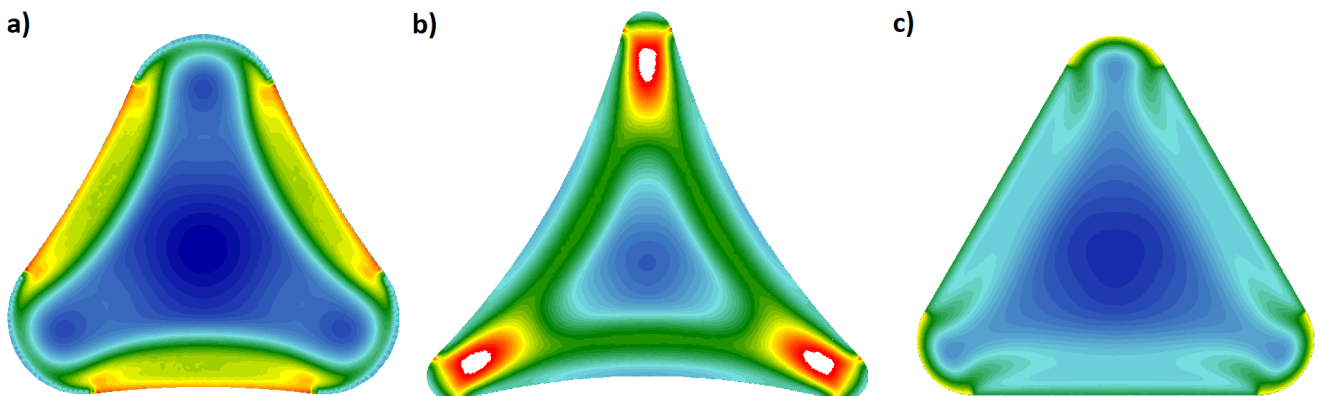


Abbildung 58: Vergleichsspannung (von Mises), dargestellt von blau (niedrig) zu rot (hoch), in Folienkissen aus Dünnglas einer Dicke von 1 mm und einer Fläche von 1 m²; a) auf maximales Verhältnis von Verformung zu Spannung optimiertes dreieckiges Folienkissen; b) Folienkissen mit zu geringem Eckradius bei zu spitzem Eckwinkel, es bilden sich Spannungsspitzen durch einachsige Krümmung; c) zu steife Geometrie, die Spannungen werden entlang der Kanten in die Ecken gedrückt

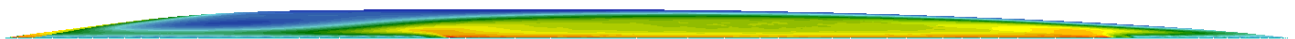


Abbildung 59: Seitenansicht für a) aus vorheriger Abbildung. Die maximale Spannung beträgt 50 MPa.

3.2.2. Membraneffekte bei der Doppelringprüfung

Bei der Doppelringbiegeprüfung kommt es ebenfalls zu den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Spannungsumlagerungen aufgrund normalkraftbedingter Steifigkeitsänderungen. Wie bereits im linken Bild von Abbildung 56 zu sehen „drücken“ (über den entstehenden Druckring) beziehungsweise „ziehen“ (über die radialen Zugkräfte) die Normalkräfte die Verformungen und folglich auch die

Spannungen von der Mitte des zu prüfenden Glases „weg“, was zu einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung führt. Abbildung 60 zeigt die im Doppelringbiegeversuch bei geringer Glasdicke in signifikanter Höhe entstehenden Normalspannungen. In Kapitel 5.1 wird dies bei der Untersuchung der Anwendungsgrenzen des Doppelringbiegeversuchs detaillierter betrachtet.

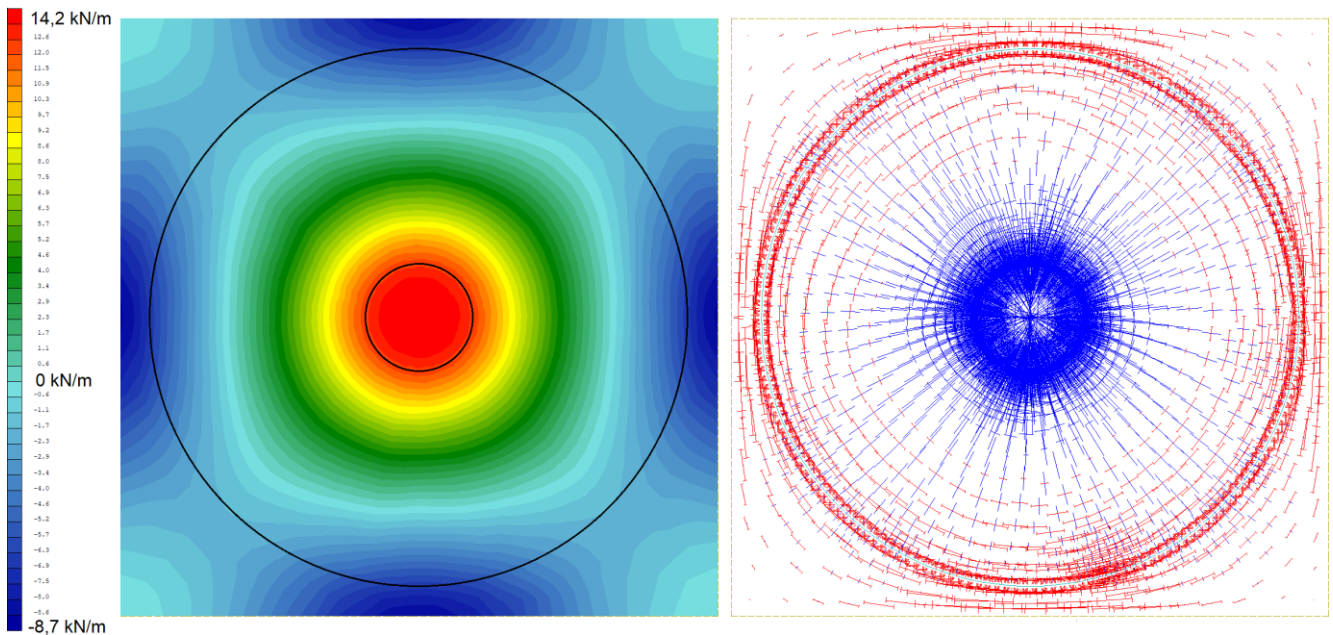


Abbildung 60: Membranspannungen im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 unter einer Last von 0,1 kN (maximale Spannung unter Lastring ca. 88,9 MPa, Spannungsabfall zur Mitte ca. 2%) mit einer Glasdicke von 1 mm aus nichtlinearer FE-Berechnung; links: Mittelwert der Membrankräfte, von Druck (Blau) bis Zug (Rot), mit eingezeichnetem Stütz- und Lastring; rechts: Hauptvektoren der Membrankräfte, farbig in Zug (blau) und Druck (rot) unterschieden und in absoluter Höhe über die Länge dargestellt

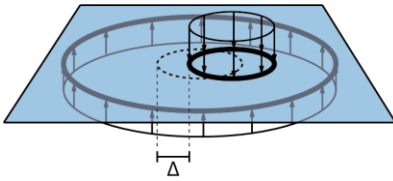
3.2.3. Stabilität

Durch die Schalentragwirkung von unter verformungsbedingten Zugnormalkräften stehendem Dünnglas wird in der Fläche die Knickgefahr meist herabgesetzt, an den Rändern steigt diese durch entstehende randparallele Druckspannungen allerdings an. Dies wird ebenfalls in Kapitel 5.1 bei der Untersuchung der Anwendungsgrenzen des Doppelringbiegeversuchs detaillierter betrachtet.

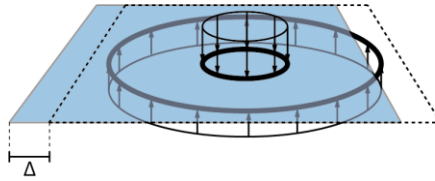
3.2.4. Einfluss von Imperfektionen

Im Gegensatz zur einachsigen Biegeprüfung können in den behandelten zweiachsigen Prüfversuchen (dies bezieht sich auf die Doppelringprüfung) nur drei signifikante Imperfektionen auftreten: Verschiebung der Scheibe zwischen Stütz- und Lastring, Verschiebung des Lastrings relativ zum Stützring und ungleichmäßige Belastung des Lastrings (Abbildung 61 und Abbildung 62). Nachfolgend sind die entstehenden Imperfektionen für eine „dicke“ Scheibe im Prüfversuch nach EN 1288-5 (Doppelringbiegeversuch ohne Druckluft) gegeben, diese lassen sich weitgehend auf Dünnglas im Rahmen der Anwendbarkeit des Doppelringbiegeversuchs (siehe Kapitel 5.1) übertragen.

a) Verschiebung des Lastrings



b) Verschiebung der Scheibe



c) asymmetrische Last

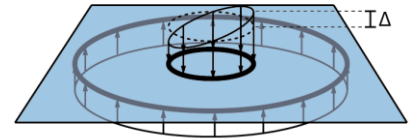


Abbildung 61: Darstellung der drei maßgebenden Imperfektionen im Doppelringbiegeversuch

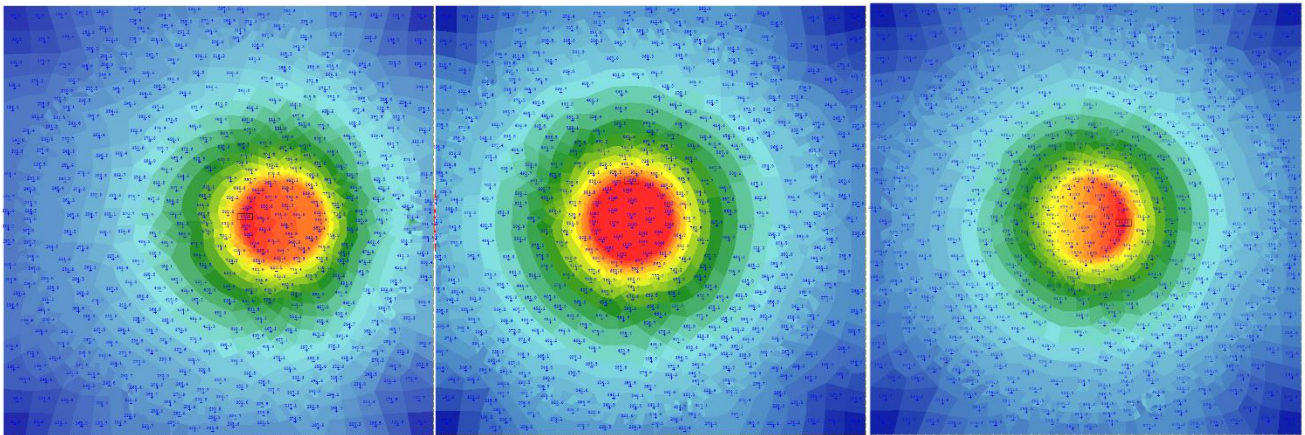


Abbildung 62: Vergleichsspannung (von Mises, siehe Anhang 7.11) an Plattenunterseite von Blau (niedrig) zu Rot (hoch), aus FE-Simulationen der Imperfektionen aus der vorherigen Abbildung im Versuchsaufbau R45 mit 1 mm dickem Glas und 1 cm² Querschnittsfläche des Lastrings (Stahl) nach Theorie 1. Ordnung (ohne Membraneffekt); links: Verschiebung des Lastrings um 15 mm (resultiert in Spannungsabfall); Mitte: Verschiebung der Scheibe um 4,2 mm (0,3 mm vor dem Abrutschen vom Lastring, Spannung bleibt nahezu konstant); rechts: Asymmetrie der Belastung, die Kraft am linken Rand des Lastrings ist um 50% geringer und am rechten Rand um 50% höher als in der Mitte (resultiert in deutlicher Spannungszunahme)

Verschiebung des Lastrings

Eine Verschiebung des Lastrings hat bei weiterhin konstanter Belastung eine Spannungserhöhung an der am weitesten vom Stützring entfernten Stelle des verschobenen Lastrings (äußerster Punkt entgegen der Verschiebungsrichtung) zur Folge, da hier das Biegemoment in der Scheibe am größten wird. In der Berechnung muss gegebenenfalls die Steifigkeit des Lastrings berücksichtigt werden, welche bei symmetrischer Anordnung der Last keine Rolle spielt (Abbildung 63).

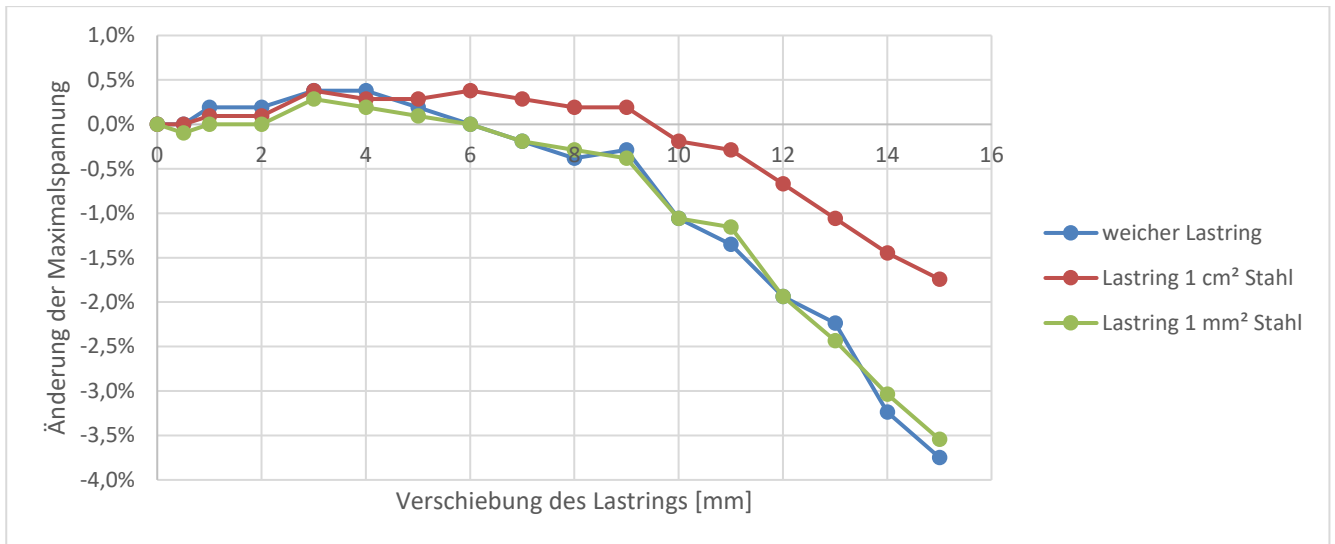


Abbildung 63: Spannungserhöhung im Doppelringbiegeversuch R45 nach EN 1288-5 infolge Verschiebung des Lastring in Richtung der Kantenmitte aus FE mit drei unterschiedlich steifen Lastringen (oberhalb von 1 cm² Stahl scheint es keine signifikanten Änderungen für steifer Lastringe zu geben) nach Theorie 1. Ordnung (ohne Membraneffekt) und mit 1 mm Glasdicke, die angegebenen Querschnittsfläche beschreibt die Schnittfläche des auf das Glas gedrückten Rings

Die in Abbildung 63 errechneten Werte lassen sich näherungsweise im Faktor 1,5 (bezogen auf die Verschiebung) auf den Versuchsaufbau R30 nach EN 1288-5 (siehe Kapitel 2.2.2) übertragen.

Verschiebung der Scheibe

Wird die Scheibe nur leicht verschoben, kommt es zu einer Spannungserhöhung am Lastring in Richtung der weniger weit aufliegenden Seite der Scheibe. Bis der Rand der Scheibe den Lastring erreicht ist die dadurch entstehende Spannungssteigerung in FE-Simulationen sehr klein (in der Größenordnung der Modellgenauigkeiten, <0,2%). Wird die Scheibe darüber hinaus weit genug verschoben dass sie nicht mehr vollflächig auf dem Lastring aufliegt, kommt es an der Stelle der Kante die innerhalb des Stützrings rutscht zu starken lokalen Biegemomenten die sehr schnell zum Versagen der Scheibe führen. Da dies aber gewöhnlich vom Bediener des Versuchsaufbaus wahrgenommen wird, kann hier von einer detaillierten Untersuchung abgesehen werden. Im Allgemeinen kann der Spannungsanstieg durch eine Verschiebung der Scheibe relativ zu anderen Imperfektionen vernachlässigt werden.

Asymmetrische Belastung des Lastring

Asymmetrische Belastungen des Lastring, wie sie beispielsweise durch einen exzentrischen oder nicht vertikalen Angriff der Prüfmaschine auf den Lastring auftreten können, erzeugen auf der dadurch stärker belasteten Seite des Lastring eine nahezu proportional zur dort erhöhten Last ausgeprägte Spannungserhöhung, das Verhältnis des Spannungsanstiegs zur Asymmetrie der Last kann näherungsweise mit $\frac{1}{4}$ angegeben werden (Abbildung 64).

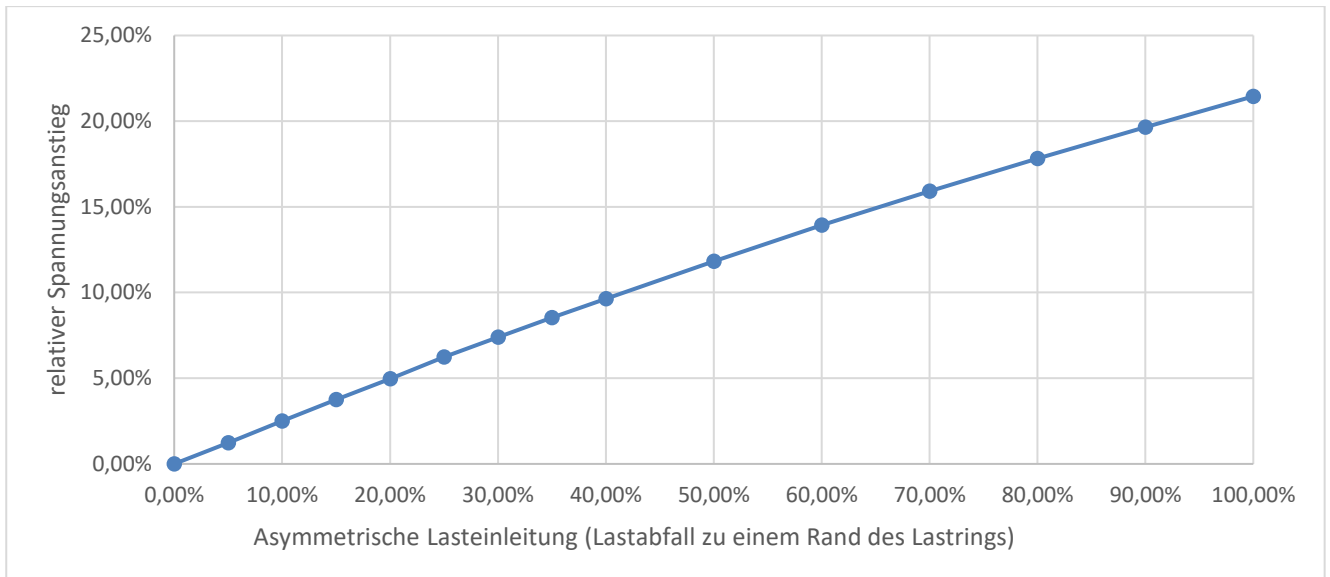


Abbildung 64: Verhältnis von Asymmetrie der Lasteinleitung (Lastabfall an einem Rand des Lastrings im Verhältnis zur durchschnittlichen Last) zum Spannungsanstieg an der maximal belasteten Stelle im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 in 1 mm dickem Glas mit einem Lastringquerschnitt von 1 cm² nach Theorie 1. Ordnung (ohne Membraneffekt) aus FE-Simulation

Die Daten aus Abbildung 64 können, da es sich um relative Werte handelt, auch auf den Versuchsaufbau R30 nach EN 1288-5 angewendet werden.

Weitere Imperfektionen

Weitere mögliche Imperfektionen wie beispielsweise ovale Last- oder Stützringe sowie Dickenvariationen des Glases können auch signifikante Auswirkungen haben, aufgrund der Vielzahl der möglichen denkbaren Variationen wird hier jedoch von einer weiteren Untersuchung dieser Zustände abgesehen.

3.2.5. Bruchbild

Das Bruchbild von zweiachsig gekrümmtem Dünnglas zeigt, wie bei einachsiger Krümmung auch, ein stärker krümmungsabhängiges Erscheinungsbild als dickeres Glas, im Allgemeinen kann der Bruchsprung und die Krümmungsverhältnisse während des Bruchs anhand des Verlaufs der Bruchlinien gut rekonstruiert werden. In Abbildung 125 in Kapitel 5.1 (Untersuchung der Anwendungsgrenzen des Doppelringbiegeversuchs) sind Beispiele für den Doppelringbiegeversuch gezeigt, in welchen das Bruchbild die Spannungen vor und während des Bruchs sehr gut darstellt. Auch die nachfolgenden Kapitel zu den zweiachsigen Prüfverfahren zeigen jeweils unterschiedliche Bruchbilder die spezifisch für einzelne Versuchsaufbauten sind.

3.3. Simulation von Dünnglas mit FEM

Die Simulation von Dünnglas mit Methoden der Finiten Elemente gestaltet sich gewöhnlich schwieriger als die Simulation von kompakteren, dickeren Bauteilen mit geringeren relativen Verformungen. Finite-Element-Simulation ist zwar nicht der Schwerpunkt dieser Arbeit, wurde zudem bereits zum Teil in der Masterthesis des Autors [79] sowie einer daraus entstandenen Publikation [78] behandelt, trotzdem wird in diesem Unterkapitel auf einige relevante Effekte und Herausforderungen, die sich bei der Simulation ergeben, eingegangen.

Große Verformung

Das Grundproblem bei der Simulation von Dünnglas ist die große Verformung im Vergleich zur Elementdicke. Berechnungen nach Theorie I. Ordnung führen aufgrund der Nichtlinearitäten bei der Verformung von Dünnglas nahezu nie zu korrekten oder zumindest brauchbaren Ergebnissen. Auch geometrisch nichtlineare Berechnungen nach Theorie II. Ordnung sind selten zielführend da beispielsweise Membraneffekte (siehe Kapitel 3.2.2) dort nicht korrekt abgebildet werden können. Es sind grundsätzlich vollständig nichtlineare Berechnungen, zum Beispiel nach Theorie III. Ordnung, notwendig.

Weiterhin sind bei FE-Berechnungen von Dünnglas mit großen Verformungen in vielen Fällen mehrere Lastschritte erforderlich um beispielsweise Durchdringungen oder zu große Verzerrungen, die das Konvergieren der nichtlinearen Lösung beeinträchtigen, zu verhindern.

Zusammen mit der nötigen Netzfeinheit und weiteren nachfolgend beschriebenen Hindernissen führen diese Anforderungen zu sehr langen Rechenzeiten für viele Modelle, zumindest im Vergleich mit den meisten Modellen welche bei dickerem Glas angewendet werden können. Das in Abbildung 15 gezeigte FE-Modell hat beispielsweise nach mehreren Optimierungen immer noch eine Rechenzeit von ungefähr einer Stunde für einen Durchgang des Vierschneidenbiegeversuchs.

Stabilität

Dass Dünnglas anfällig für Stabilitätsversagen ist, wurde bereits in Kapitel 3.1.3 und Kapitel 3.2.3 behandelt. Dieses Problem betrifft natürlich auch die Simulation von Dünnglas. Eine besondere Schwierigkeit ist es die Realität möglichst gut in FE nachzubilden, insbesondere sinnvolle Imperfektionen anzunehmen, falls diese potentiell bemessungsrelevant werden. Die Gewöhnlicher Weise für dickere Bauteile gültigen Näherungsformeln und Normvorgaben wie zum Beispiel „Imperfektion = $L/200$ “ sind häufig zu klein. Hier muss jeder Fall einzeln untersucht und gegebenenfalls experimentell überprüft werden.

Kontaktprobleme

Eine weitere Schwierigkeit bei der Berechnung von Dünnglas in FE tritt auf, wenn Kontaktbedingungen, beispielsweise Gleiten, zwischen zwei Elementen definiert werden. Die geringe Dicke der Elemente führt in Kombination mit großen Verformungen sehr schnell zu einem Durchdringen der Oberflächen und somit zu einer nicht konvergierenden Lösung. Im Rahmen der Arbeit war es beispielsweise nicht möglich (zumindest mit vertretbarem Rechenaufwand) das Gleiten von Dünnglas auf einer elastischen Rolle zu simulieren da die von beiden Bauteilen hervorgerufenen Modellinstabilitäten nur sehr kleine Verformungen je Rechenschritt ermöglichen. Lediglich ein Gleiten von Dünnglas auf starren Körpern lässt sich, wenn auch nicht sonderlich schnell, mit vertretbarem Aufwand simulieren. Die Verformungen je Lastschritt sollten dabei im Allgemeinen kleiner als die Glasdicke sein.

Element-Locking

Der Effekt des „Element-Locking“ bei dem FE-Elemente steifer reagieren als eigentlich aus Belastung und Materialeigenschaften zu erwarten wäre tritt insbesondere bei der Berechnung von Dünnglas und dünnen Elementen unter hoher Verformung häufiger auf. Es wurde beobachtet, dass dies insbesondere der Fall ist, wenn die Kanten von rechteckigen Elementen jeweils parallel und senkrecht zur Hauptbiegerichtung stehen. Werden die Elemente gedreht oder andere Polygone (zum Beispiel Dreiecke) für die Elemente verwendet, tritt der Fehler gewöhnlich nicht oder weniger stark auf. Die Ursache wird in der Literatur (zum Beispiel [101], [102]) zu FE-Methoden ausgiebig behandelt, daher wird hier auf detaillierte Erklärungen verzichtet.

Vereinfacht lässt sich der Effekt über Fehler aus der Ansatzfunktion der Elementformulierung, die meist nur eine Näherung des exakten mechanischen Verhaltens enthalten, erklären. Sind Elemente z.B. sehr dünn, werden aber stark verformt, kann die numerische Näherung das exakte Verhalten der Elemente nicht mehr genau genug abbilden, da der Unterschied der Größenordnungen von Eingangswerten der Ansatzfunktionen zu groß wird. Kleinere Eingangswerte, die die Lösung aber genauso stark wie größere Eingangswerte beeinflussen, werden relativ zu den großen Eingangswerten vernachlässigt.

„Vibrationen“

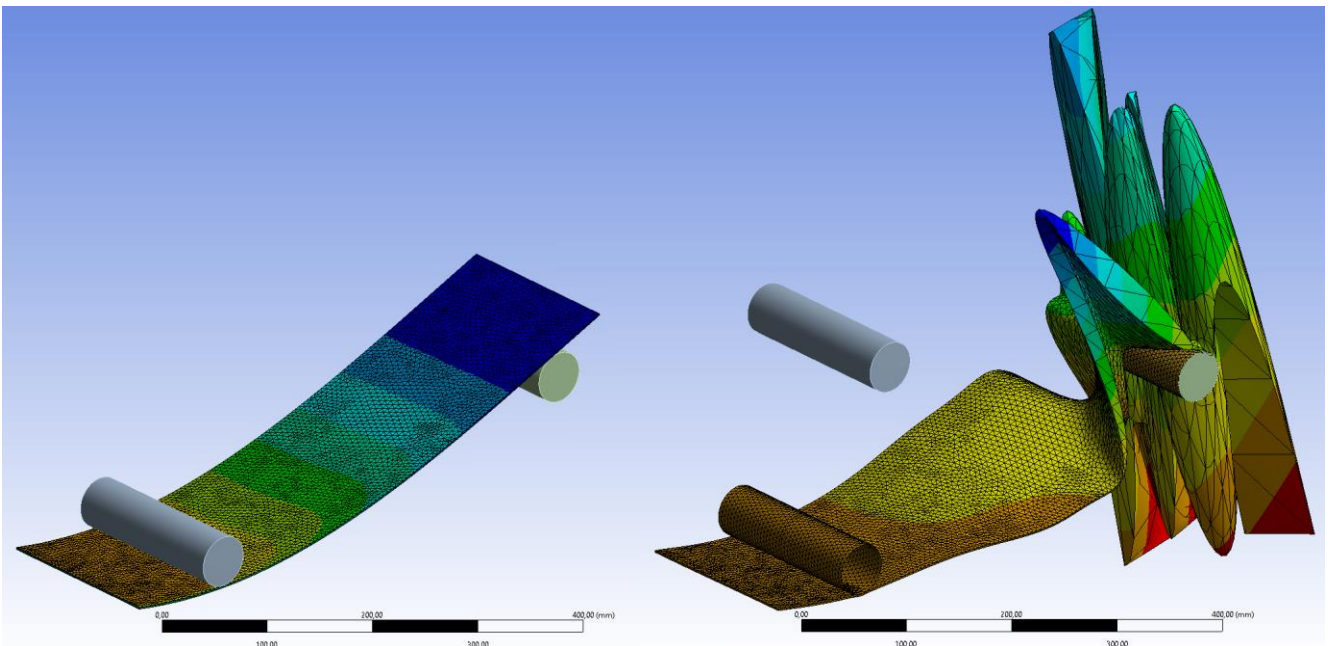


Abbildung 65: FE-Modell in der FE-Software ANSYS mit "Vibrationen"; links: kurz vor eintreten der Vibrationen; rechts: mit Vibrationen. Die Farben zeigen die Verformung von der Ausgangsgeometrie.

Insbesondere an freien Kragarmen und weit überstehenden Teilen von Dünnglasplatten kommt es in der FE-Simulation gelegentlich zu Erscheinungen die als eine Art „Vibrations-/Resonanzeffekt“ beschrieben werden können (siehe Abbildung 65). Dabei bilden sich an den freien Kanten zweidimensional sinusförmige Strukturen, die teilweise sogar zu stabilen Lösungen führen. Die exakte Ursache konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden, trotzdem können Vermutungen angestellt werden. Eine Vermutung ist, dass diese Formen aus einem „Trägheitsverhalten“ der freien Glaskante gepaart mit einem „Peitscheneffekt“ aus der Verformung der restlichen Bereiche herrühren. Der „Peitscheneffekt“ bei dem eine kleine Verformung in einem steiferen, schwereren oder mit mehr Randbedingungen gehaltenen Bereich eines Bauteils zu einer größeren Verformung in dünneren, leichteren und weniger stark gehaltenen Bereichen führt ist generell bei Simulationen von Dünnglas öfters zu beobachten und erschwert oft das Finden einer stabilen Lösung.

„Explosion“

In den meisten Fällen führt der Peitscheneffekt jedoch nicht zu den genannten „Vibrationseffekten“, sondern zu einer „gewöhnlichen“ nicht konvergenten Lösung bei der das FE-Modell „explodiert“ (Abbildung 66), also zum Beispiel große Verformungen erreicht und nicht mehr zu einer stabilen Lösung zurückfindet.

Schwache Federn können teilweise, aber nicht immer, helfen (Abbildung 67). Ein langsames Hochfahren der Steifigkeitsupdates und Verformungen bei nichtlinearer Iteration hat sich teilweise als hilfreich erwiesen. In einigen anderen Fällen, beispielsweise bei möglichem Kontaktverlust von Kontaktproblemen, ist hingegen ein schnelles Hochfahren der Last und Steifigkeitsupdates teilweise erfolgreicher. Daher können keine pauschalen Empfehlungen für die Simulation von Dünnglas gegeben werden, es muss fallabhängig optimiert werden.

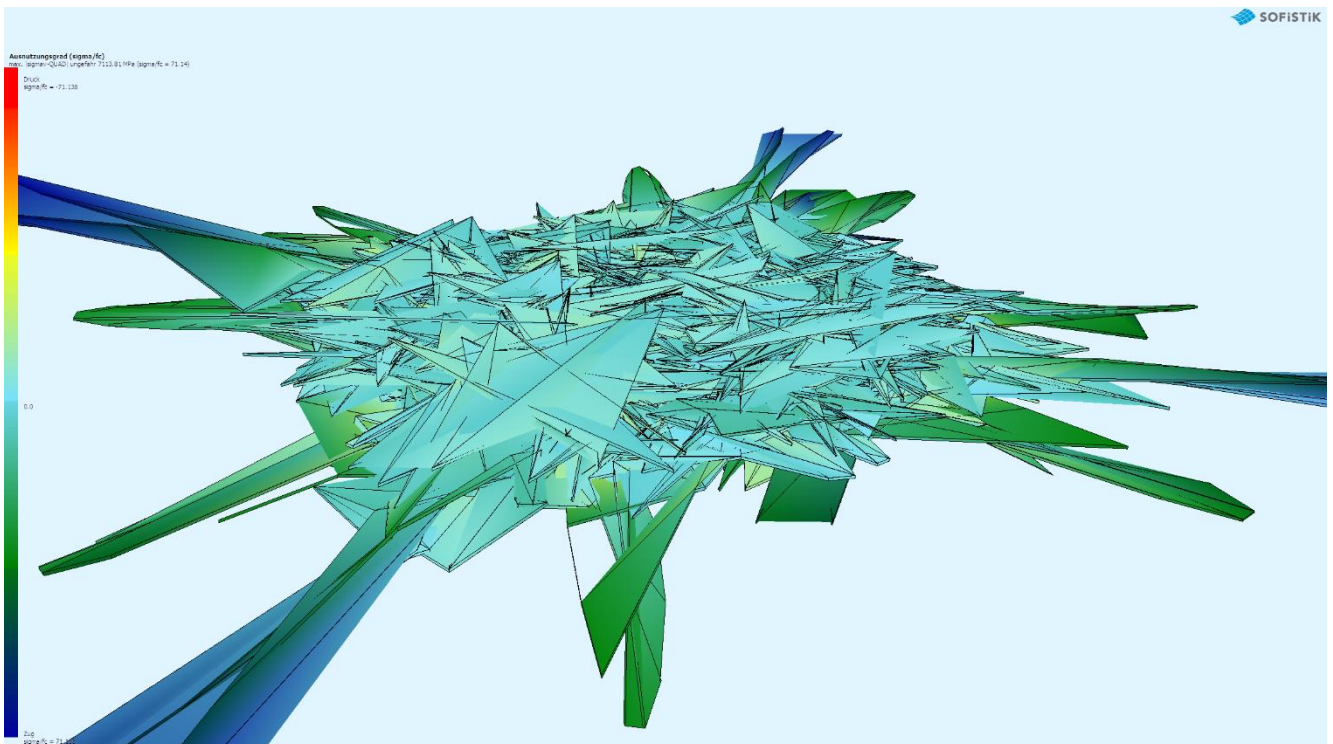


Abbildung 66: "explodiertes" Modell eines Doppelringbiegeversuchs R45 mit 0,5 mm dickem Glas und Belastung durch Vakuum unter dem Stützring statt einem Lastring nach EN 1288-5 mit weiter als üblich über den Stützring überstehendem Glas in der FE-Software SOFiSTiK, eine stabile Lösung ist für Modelle mit überstehenden freien Kanten schwer zu finden

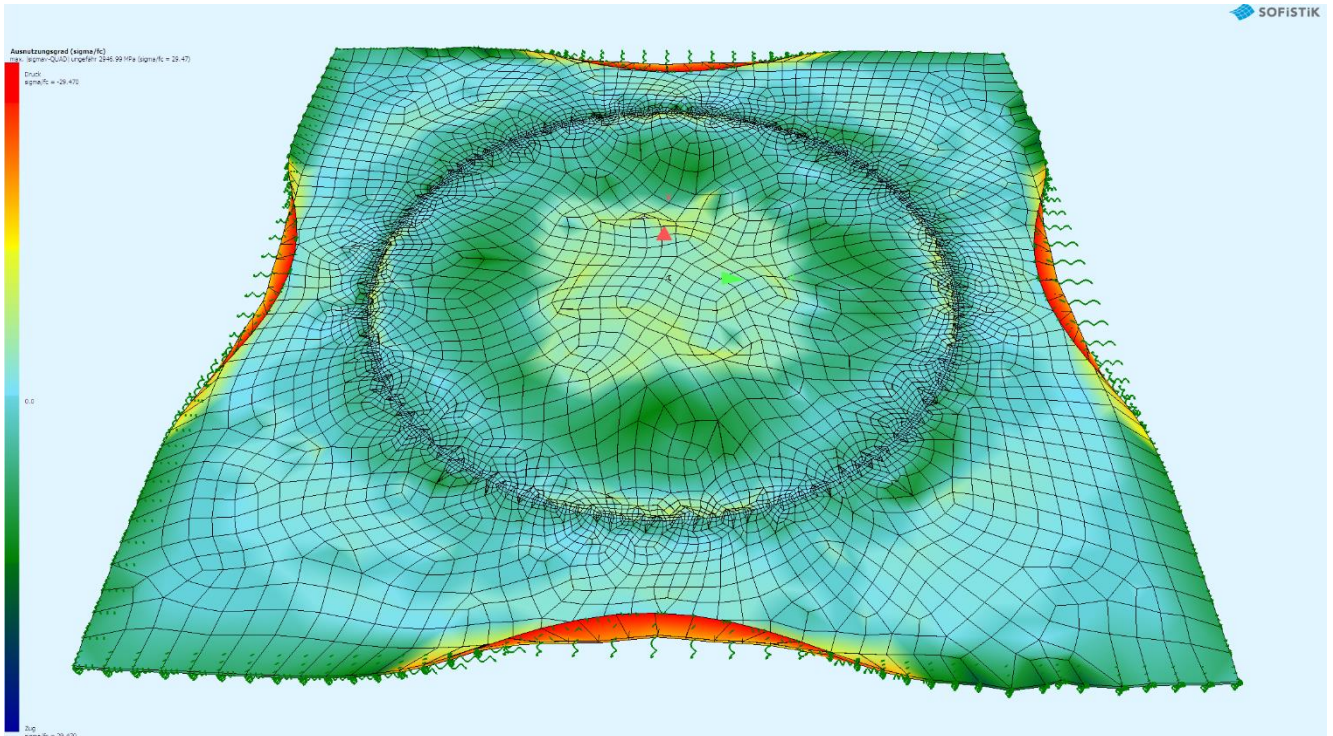


Abbildung 67: Modell aus vorheriger Abbildung wird vor dem "Explodieren" durch leichte dreiachsige Federbettung am Rand bewahrt, das Modell liefert trotzdem keine stabile Lösung da sich der Rand „aufrollt“

4. Einachsige Prüfverfahren zur Festigkeitsermittlung von Dünnglas

In Kapitel 2.2.1 wurde der Vierschneidenbiegeversuch nach EN 1288-3 [1] sowie in Kapitel 3.1 das mechanische Verhalten von Dünnglas unter einachsiger Biegung vorgestellt. Ziel dieses Kapitels ist es nun unter diesen Randbedingungen einerseits mögliche Erweiterungen der Anwendungsgrenzen des Normversuchs für dünneres Glas, andererseits weitere mögliche vergleichbare Prüfverfahren für die Anwendung bei der einachsigen Dünnglasprüfung – sowohl aus der Literatur als auch eigene Entwicklungen – zu untersuchen.

4.1. Grenzen des Vierschneidenbiegeversuchs nach EN 1288-3

Die Anwendungsgrenzen des Versuchsaufbaus werden durch die Spannungen und Verformung bestimmt bei der die Probekörper bei optimal symmetrischer Lagerung gleichzeitig beidseitig von den Auflagerrollen rutschen. Die Grenzwerte wurden im Rahmen einer Publikation [103] zu korrigierten Spannungsbeiwerten beim einachsigen Biegeversuch nach EN 1288-3 mit einem 3D-Finite-Element-Modell, welches in der Publikation beschrieben wird, berechnet. Die Ergebnisse, welche in Tabelle 8 wiedergegeben werden, zeigen dass eine 3 mm starke Glasprobe nach einer vertikalen Verschiebung von nur 229 mm und einer Spannung von 245 MPa unter geringem Kraftaufwand ($F=76,8$ N) aus dem Versuchsaufbau rutschen würde, was eine zuverlässige Prüfung von vorgespanntem Glas dieser oder geringerer Dicke nahezu unmöglich macht. Auch kann dieser Versuchsaufbau bereits für dickeres, stark (chemisch) vorgespanntes Glas nicht ausreichend sein, geht man von Glasfestigkeiten bis 500 MPa aus liegt die Grenze der Anwendbarkeit oberhalb einer Glasdicke von 6 mm.

Tabelle 8: Anwendungsgrenzen des Vierschneidenbiegeversuches nach EN 1288-3

Glasdicke h [mm]	Spannung unterhalb der Biegerolle σ_{bB} [MPa]	Vertikale Prüfkraft F [kN]	Verschiebung der Biegerollen y_{rolle} [mm]	Bogenlänge zwischen Kontaktpunkten der Biegerollen l_{Bogen} [mm]
19	1570	28,1	240	217
15	1240	13,8	238	216
12	984	7,02	236	215
10	822	4,04	234	215
8	656	2,05	233	215
6	492	0,842	231	214
5	409	0,473	231	214
4	330	0,228	230	213
3	245	0,0768	229	213

Extrapoliert man diese Werte für geringere Dicken, erkennt man dass der Versuchsaufbau nicht genügend Spannung für Versuche mit Dünnglas aufbringen kann. Für 2 mm würde sich eine Maximalspannung von 161 MPa und für 1 mm lediglich 78 MPa ergeben, zudem haben Simulationen mit demselben Modell gezeigt, dass das Glas bei einer Dicke von 2 mm unter Eigengewicht bereits eine Spannung von über 100 MPa erreichen und bei 1 mm direkt unter Eigengewicht von den Lagern rutschen würde.

Die Grenzen des Vierschneidenbiegeversuches lassen sich – unter Beibehaltung des Abstands der Biegerollen L_b und somit der statistischen Aussagekraft der Prüfung – durch Reduktion der Stützlänge L_s und/oder Erhöhung der Probenlänge L sowie ein Drehen des gesamten Versuchsaufbaus, einschließlich Belastungsrichtung, um 90° um die Längsachse (zur Reduktion des Einflusses aus Eigengewicht) verschieben. Die sich aus einer Veränderung der Stützlänge L_s ergebenden Veränderungen der Grenzwerte für einen Versuchsaufbau ohne Eigengewichtseinfluss wurden beispielhaft unter Verwendung eines vereinfachten mathematischen Modells (siehe Anhang 7.4)

berechnet, die Ergebnisse sind in Abbildung 68 angegeben. Die gezeigten Graphen enden, wenn die Probe zwischen den Auflagern durchgedrückt werden würde.

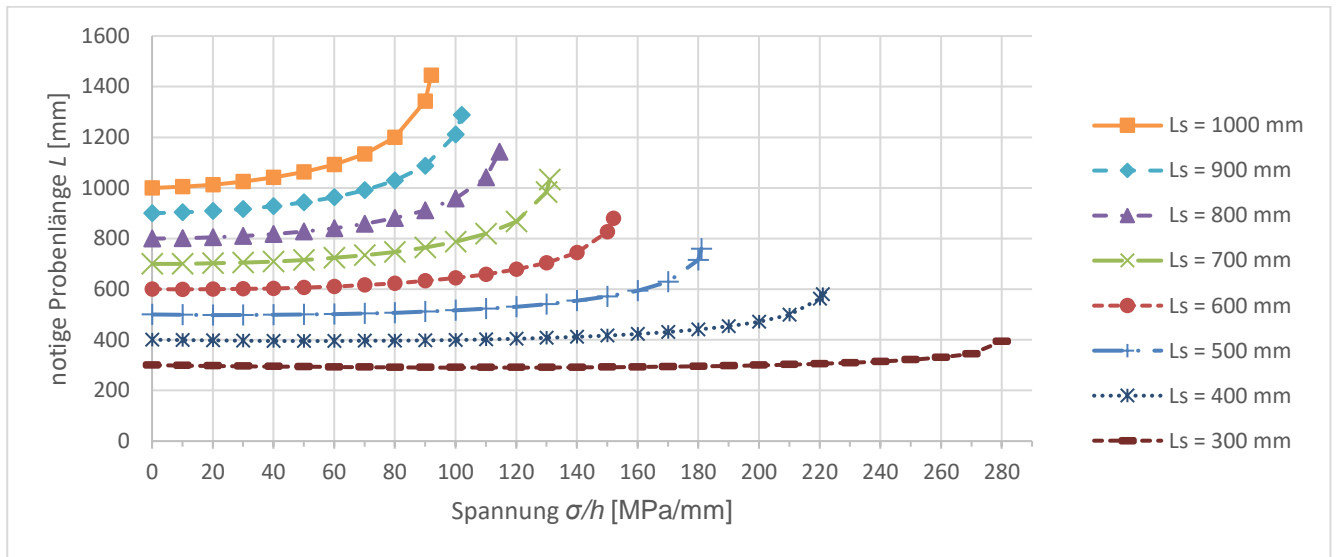


Abbildung 68: nötige Probenlänge L zur Erreichung der angegebenen dickenabhängigen Spannung σ/h bei unterschiedlichen Stützlängen L_s

Zu erkennen ist, dass selbst bei Anpassung der Geometrie die Nutzbarkeit des Vierschneidenbiegeverfahrens für Dünnglas, zumindest bei Beibehaltung des Abstands der Biegerollen und somit der statistischen Aussagekraft, sehr begrenzt ist. Daraus ergibt sich die Entwicklung alternativer gleichwertiger Prüfverfahren als ein Ziel dieser Arbeit.

4.2. Stand der Technik bei einachsiger Dünnglasprüfung

Im Bereich der einachsigen Dünnglasprüfung wurden in den letzten zwei Jahrzehnten mehrere Prüfverfahren vorgeschlagen und entwickelt. Einige der vorgeschlagenen Prüfverfahren werden nachfolgend vorgestellt.

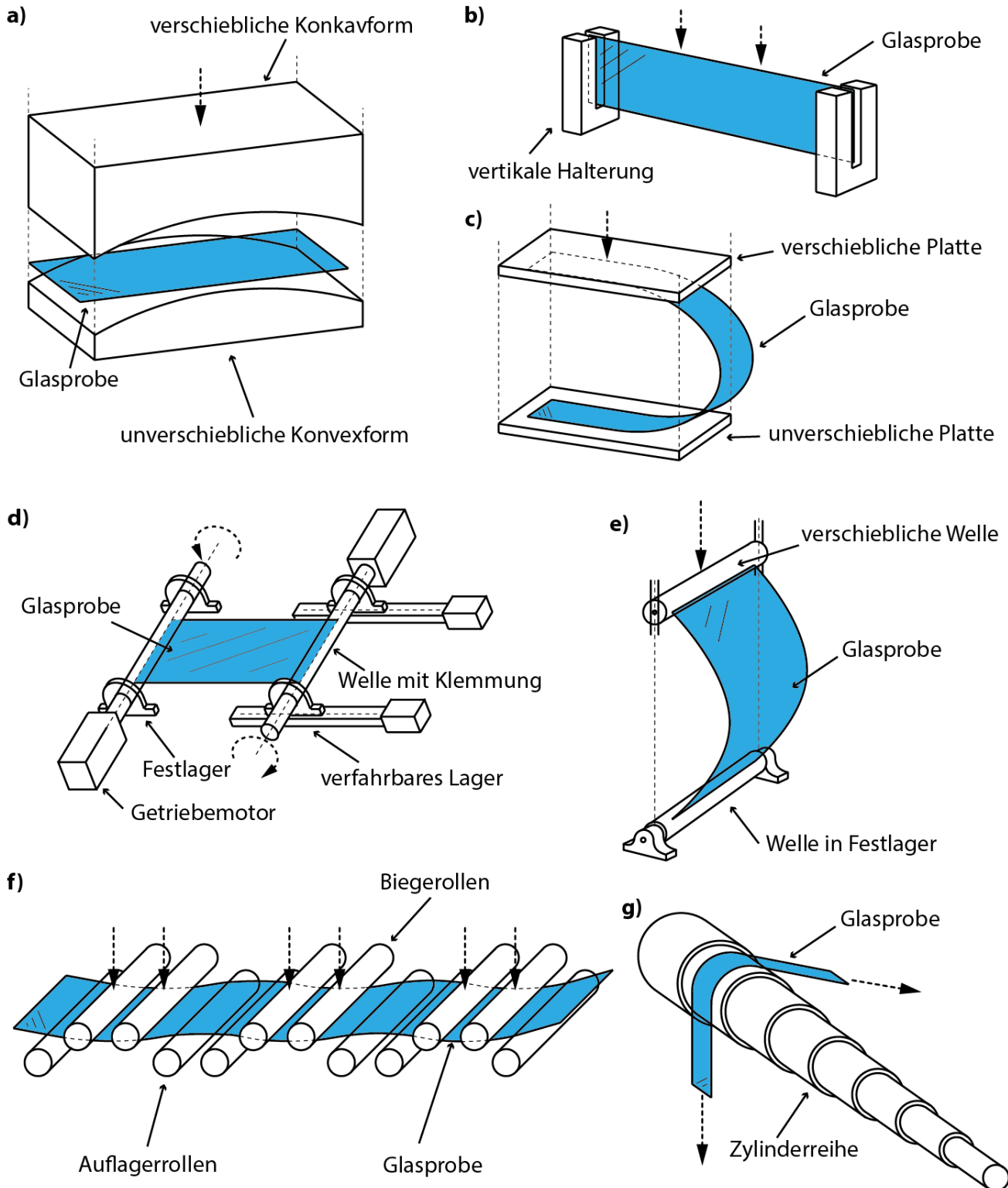


Abbildung 69: Schematische Darstellung einiger Versuchsaufbauten für die einachsige Prüfung von Dünnglas aus der Literatur; a) Helfinstine 2006 b) Gulati 2011 c) Gulati 2012 d) Leutgeb + Schallauer 2012 e) Spitzhüttl 2013 f) Siebert 2013/Neugebauer 2016 g) Jotz 2018

Zylinderpresstest

Die ersten Prüfverfahren für Dünnglas, die in der Literatur gefunden wurden, stammen von oder aus dem Umfeld von Suresh T. Gulati, einem langjährigen Angestellten von Corning Inc. der sich mindestens seit den frühen 1990er Jahren mit der Festigkeit von Displayglas beschäftigte [104], sowie seinem Kollegen John D. Helfinstine. Im Jahr 2006 stellten sie in einer Publikation [105] ein erstes uniaxiales Prüfverfahren für Dünnglas vor, den Zylinderpresstest (Abbildung 69 a)). Da die Autoren dieser Arbeit ebenfalls feststellten, dass ein Versuchsaufbau nach dem Prinzip des Vierschneidenbiegeversuchs, auch in abgewandelter Form, aufgrund der großen Verformungen nicht sinnvoll ist, wählten sie das Prinzip der Erzeugung einer konstanten Krümmung im Glas in einer aus zwei Hälften bestehenden Form. Mit jeder Form konnte zwar nur eine Krümmung untersucht werden, da diese Methode allerdings hauptsächlich zur Qualitätskontrolle eingesetzt werden sollte schien dies jedoch ausreichend. Als Nachteil merkten die Autoren an, dass die unter Zug stehende Oberfläche in Kontakt mit anderen Oberflächen kommt, was möglicherweise die Festigkeit beeinträchtigt.

Vierpunktbiegeversuch mit Kantenbelastung

Im Jahr 2011 stellten Gulati und Helfinstine ihren nächsten Biegeprüfstand für die Bestimmung der Kantenfestigkeit von Dünnglas vor, ein abgeänderter Vierschneidenbiegeversuch bei dem das Glas auf der Kante stehend geprüft wird [106] (Abbildung 69 b)). Als limitierender Faktor wurde hier anstatt der großen Verformung bei üblicher Prüfung seitliches Knicken der Probe festgestellt.

Zweipunktbiegeversuch

Der Zweipunktbiegeversuch wird bereits mindestens seit 1980 für Glasfasern [107], und bereits deutlich länger für andere Werkstoffe angewendet. Gulati hatte selbst 1986 an einer maßgebenden Publikation zu dieser Prüfung mitgearbeitet [108], im Jahr 2011 übertrug er dieses Prüfverfahren auf Dünnglas [109] (Abbildung 69 c)). Das Prinzip des Zweipunktbiegeversuchs besteht darin eine Faser oder einen Streifen eines Materials gebogen zwischen zwei Platten zu platzieren und diese langsam aufeinander zuzubewegen, wobei sich die Krümmung der Probe kontinuierlich ändert. Allerdings merkten die Autoren an, dass sich, wie bereits 1986 beschrieben [108], keine konstante Krümmung einstellt, vielmehr entsteht ein näherungsweise parabelförmiger Spannungsverlauf zwischen den beiden Kontaktpunkten.

Rotationsbiegeprüfstand

Im Rahmen der gemeinsamen Diplomarbeit von Leutgeb und Schallauer von der HTL Waidhofen an der Ybbs aus dem Jahr 2012 [110] wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Lisee eine der ersten Prüfeinrichtungen für dünneres Glas entwickelt und gebaut, die eine kontinuierliche Krümmung ohne Kontakt der Zugseite des Glases mit anderen Oberflächen auch bei sehr großer Verformung ermöglichte (Abbildung 69 d)). Ziel der Entwicklung dieser Prüfeinrichtung war das Prüfen von vorgespanntem Glas mit Abmessungen von maximal 2,3 m x 1,6 m und einer Dicke von 0,7 mm bis 4 mm durch Verdrehung zweier gegenüberliegender Kanten mit Hilfe von motorisierten Klemmen, wodurch das Glas auch bei großer Verformung ein konstantes Biegemoment erhält. In dem entwickelten Versuchsaufbau steht das Glas während der Biegung senkrecht, eine der mit Getriebemotoren angetriebenen Klemmen ist zum Längenausgleich während der Prüfung mit einem Linearantrieb horizontal verschiebbar. In einer sechs Jahre später erschienenen Publikation [111] wird der Biegeprüfstand, welcher im Rahmen der Diplomarbeit nicht zur Ausführung kam, erneut gezeigt.

Hier haben sich die möglichen Glasabmessungen reduziert, die maximale Breite der Glasproben beträgt nun ungefähr 400 mm.

Zweipunktbiegeversuch ohne Oberflächenkontakt / Knickprüfung

Das Problem des Oberflächenkontaktes im Zweipunktbiegeversuch löste Spitzhüttl in seiner Masterthesis an der Universität der Bundeswehr München aus dem Jahr 2013 [112] [113] [114] (Abbildung 69 e)), indem er das Glas an beiden Enden in gefräste Schlitz in drehbare Wellen steckte und dann vertikal belastete. Diese Variation des Zweipunktbiegeversuchs eignet sich hauptsächlich für dickeres Glas, da das Glas bei größerer Verdrehung der Auflager – anders als beim Versuchsaufbau zum Zweipunktbiegeversuch von Gulati [109] – aus den Schlitzten rutschen würde. Wie auch beim Zweipunktbiegeversuch von Gulati entsteht hier zudem keine gleichmäßige Krümmung im Glas.

Mehrpunktbiegeverfahren

Ein weiteres, 2013 von Siebert (Universität der Bundeswehr München) vorgeschlagenes, Prüfverfahren [114] [115] ist das Mehrpunktbiegeverfahren bei dem Proben der Normmaße des Vierschneidenbiegeversuchs nach EN 1288-3 (1100 mm x 360 mm) in einem modifizierten Mehrschneidenbiegeversuch (Abbildung 69 f)) mit einer größeren Zahl von Auflager- und Biegerollen wechselseitig an der Ober- und Unterseite geprüft werden. Da es sich hierbei um eine durchlaufende Scheibe handelt sind die Biegespannungen, wie bei einem Mehrfeldträger üblich, nicht unter jedem Lastrollenpaar gleich. Dieser Versuchsaufbau wurde scheinbar nie umgesetzt.

Zylinderpasstest

Ähnlich dem Zylinderpresstest von Helfinstine [105] dient der Zylinderpasstest von Jotz [116] der Produktionskontrolle von (Ultra-)Dünnglas, diesmal bei der Firma Schott. Dafür wird ein Glasstreifen, gewöhnlich beklebt mit einem überstehenden Klebestreifen zur Verhinderung des direkten Kontaktes mit dem Glas, händisch über eine Serie von Zylindern mit zunehmend kleinerem Radius gebogen (Abbildung 69 g)). Anders als die anderen vorgestellten Verfahren ist hier keine maschinell kontrollierte Lasteinleitung und -steigerung möglich, jedoch ist das Verfahren sehr schnell anwendbar und mobil.

Weitere Prüfverfahren

Santos (Universität Lissabon) schlug in seiner Masterthesis aus dem Jahr 2016 [117] einen uniaxialen Zugversuch für Dünnglas vor, welcher gewöhnlich nicht durch die geringe Steifigkeit von Dünnglas nachteilig beeinflusst wäre, dieser wurde jedoch nie umgesetzt.

Glauppi (Universität Parma) entwickelte für eine im Jahr 2022 veröffentlichte Publikation [118] ein Verfahren das, auch wenn es sich streng genommen nicht um eine Festigkeits- sondern eine Steifigkeitsprüfung handelt, Torsion in eine Dünnglasplatte einleitete.

Einige der in diesem Kapitel genannten Prüfverfahren wurden von mehreren Autoren, teilweise scheinbar unabhängig voneinander, vorgeschlagen. In diesen Fällen wurde, soweit der Literatur zu entnehmen, der jeweils erste Vorschlag beschrieben. Für die Rotationsbiegeprüfung existieren beispielsweise mehrere Versuchsaufbauten in unterschiedlichen Variationen und Größen, darunter die in Kapitel 4.4 vorgestellte und 2019 erstmals veröffentlichte [12] eigene Prüfmaschine sowie zwei in einer gemeinsamen Publikation mit Zaccaria (AGC) und Louter (TU Delft/Dresden) aus dem Jahr 2022 [94] vorgestellte weitere Varianten des Versuchsaufbaus.

4.3. Mehrprobenverfahren

Die wahrscheinlich einfachste Methode der uniaxialen Biegeprüfung von Dünnglas ist die Verwendung eines verkleinerten Vierschneidenbiegeversuchs, um die Durchbiegung des Glases zu begrenzen. Da sich Spannungen nicht aus der absoluten, sondern aus der relativen Verformung des Materials ergeben, kann ein System unter Beibehaltung der relativen Abmessungen wie Proportionen, Materialstärken und Verformungen „herunterskaliert“ werden, ohne dass sich die absoluten Spannungen ändern ($\sigma = E \cdot \varepsilon$ mit $\varepsilon = \Delta L / L$).

Dies hat allerdings im Vierschneidenbiegeversuch den Nachteil, dass mit der Änderung der Größe auch Prüffläche und somit die statistische Aussagekraft des Prüfverfahrens sinkt. Die gemessenen Festigkeiten wären aufgrund des Größeneffekts [119] [120] (welcher besagt, dass Fehler in der Glasoberfläche zufällig verteilt sind und somit in größerer Prüffläche eine höhere Wahrscheinlichkeit des Versagens bei geringeren Spannungen herrscht) höher als bei größerer Prüffläche. Hier setzt nun das Mehrprobenverfahren an, indem es das Herunterskalieren des Versuchsaufbaus mit dem Beibehalten der Prüffläche (zum Beispiel 200 mm Kantenlänge nach EN 1288-3) kombiniert. Dazu wird eine höhere Anzahl an Proben in einem verkleinerten Versuchsaufbau geprüft und anschließend jeweils mehrere Proben zu einem Versuchsergebnis „kombiniert“.

Ein Beispiel wäre die Prüfung von 60 statt 30 Proben in einem Versuchsaufbau halber Größe, zur Auswertung werden anschließend je zwei Proben zufällig (zum Beispiel nach der Reihenfolge der Prüfung) zu einer Probe zusammengefasst, so dass am Ende ein Ergebnis für 30 Proben voller Größe erzeugt wird.

Das Zusammenfassen der Proben erfolgt nach folgendem Schema: wird der Versuchsaufbau beispielsweise um den Faktor $1/n$ geschrumpft und somit die n -fache Anzahl an Glasproben geprüft, werden jeweils n Proben zufällig aus den Ergebnissen ausgewählt und von diesen Proben die niedrigste gemessene Festigkeit als „gemeinsame“ Festigkeit festgelegt. Somit ist das selbe Ergebnis erzeugt wie wenn die n Proben zusammenhängend als ein Probekörper geprüft worden wären.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Auswahl der jeweiligen zusammenzufassenden Proben zufällig erfolgen muss. Ein Ordnen der Proben nach Festigkeit und beispielsweise die Betrachtung der 30 schwächsten oder stärksten Proben würde die Glasfestigkeit unter- beziehungsweise überschätzen. Natürlich ist es statistisch möglich, dass beim zufälligen Zusammenfassen der Proben genau solch ein Ergebnis auftritt, die Wahrscheinlichkeit dafür wird aber mit steigender Probenzahl immer geringer, so dass die statistische Aussagekraft des Mehrprobenverfahrens nicht beeinträchtigt wird.

Als Versuchsaufbau kann ein wie in Abbildung 9 in Kapitel 2.2.1 dargestellter verkleinerter Normversuchsaufbau dienen, in welchem die Proben nacheinander geprüft werden. Alternativ können zur Zeitersparnis auch, falls der Versuchsaufbau dies erlaubt, mehrere „Teilproben“ einer „virtuellen Probe“ in Normgröße zeitgleich neben- oder übereinander im selben Versuchsaufbau geprüft werden, solange sichergestellt ist dass die Proben identisch belastet sind und sich nicht gegenseitig beeinflussen. In diesem Fall würde bei Bruch der ersten „Teilprobe“ die gesamte „virtuelle Probe“ als gebrochen angesehen und das nicht gebrochene Glas nicht weiter verwendet werden.

Ein Mehrpunktbiegeverfahren wie im vorherigen Kapitel vorgestellt (Abbildung 69 f)) [114] wird nicht empfohlen, da die Spannung in den einzelnen Feldern des Versuchsaufbaus nicht identisch sind [115] und zudem unabsehbare Normalkräfte durch den Rotationswiderstand der Prüfrollen entstehen können.

Praktisch überprüft wurde dieses Verfahren mit zwei Prüfserien von chemisch vorgespanntem 1,1 mm dickem Glas mit der im nächsten Kapitel (4.4) gezeigten Prüfmaschine. In der ersten Serie wurden 28 Proben mit einer Prüflänge (unter gleichmäßiger Spannung stehende Länge der Probe) von 200 mm geprüft, es ergab sich ein 5%-Fraktilwert der Festigkeit von 119,9 MPa. In der zweiten Prüfserie wurden 32 Proben mit einer Prüflänge von 100 mm geprüft, es ergab sich ein 5%-Fraktilwert von 154,8 MPa. Wendet man nun das Mehrprobenverfahren auf diese zweite Serie an und kombiniert (in diesem Fall in Reihenfolge der Prüfung) je zwei Proben, so erhält man 16 „virtuelle“ 200 mm lange Proben, diese zeigen bei der zwei-Parameter-Weibullauswertung (siehe Anhang 7.1) einen 5%-

Fraktilwert der Festigkeit von 121,9 MPa, was sehr nah an der Festigkeit der ersten Serie ist. Für eine nicht nur identische Prüffläche, sondern auch eine identische statistische Aussagekraft hätten in der zweiten Serie 56 Proben geprüft werden müssen, das Bestimmtheitsmaß der 28 ersten Proben ist $R^2=96,6\%$, das der „virtuellen“ zweiten Serie mit 16 Proben nur $R^2=92,0\%$.

Weitere Prüfserien wurden mit diesem Verfahren nicht umgesetzt, da sich keine Notwendigkeit zur weiteren Verifizierung ergeben hat. Die Gesetze der Mechanik und Statistik bestimmen eindeutig, dass es keinen Unterschied macht, ob eine Prüffläche an einem Stück oder in mehreren Teilen geprüft wird, solange nur ein Bruch maßgebend für die Festigkeit ist.

4.4. Biegeprüfmaschine



Abbildung 70: Biegeprüfmaschine im Jahr 2022

Im Jahr 2017 wurde das Institut für Statik und Konstruktion von einem Automobilzulieferer angefragt, ob es möglich sei, bereits einachsrig vorgebogene Dünnglasscheiben (siehe Abbildung 17 auf Seite 21) entsprechend existierender Prüfnormen zu prüfen. Hierfür wurde, da vorhandene Prüfmethode nicht oder nur begrenzt anwendbar waren, ein erster Prototyp der in Abbildung 70 gezeigten Prüfmaschine gebaut und das Glas damit erfolgreich charakterisiert. Der Versuchsaufbau wurde anschließend über sechs Jahre stetig weiterentwickelt und in Details verbessert.

4.4.1. Funktionsprinzip und Geometrie

Wie auch in den Prüfverfahren von Helfinstine [105], Leutgeb und Schallauer [110] und Jotz [116] ist bei dieser Maschine der Ansatz eine kontinuierliche kreisförmige Krümmung in das Glas einzubringen. Allerdings orientiert sich das Verfahren in diesem Fall an der Norm EN 1288-3, wodurch die Konstruktion auf eine Prüflänge (gleichmäßig belasteter Bereich des Glases) von 200 mm ausgelegt ist. Das Glas wird an beiden Enden der Probe eingespannt und durch kontrollierte Bewegung und Verdrehung der Achsen der Maschine bis zum Bruch gebogen, wobei eine den Randbedingungen der EN 1288-3 (Lastrate $2 \pm 0,4$ MPa/s, Prüflänge der Kanten 200 mm) entsprechende statistische Aussagekraft bei Bestimmung der Kantenfestigkeit gegeben ist. Die Bewegungen erfolgen durch Längenänderungen in zwei vertikalen, die Hebelarme und somit das Glas verdrehenden, Linearachsen, sowie in einer horizontalen, einen der beiden Hebelarme verschiebenden, Linearachse zum Längenausgleich der verformten Glasgeometrie.

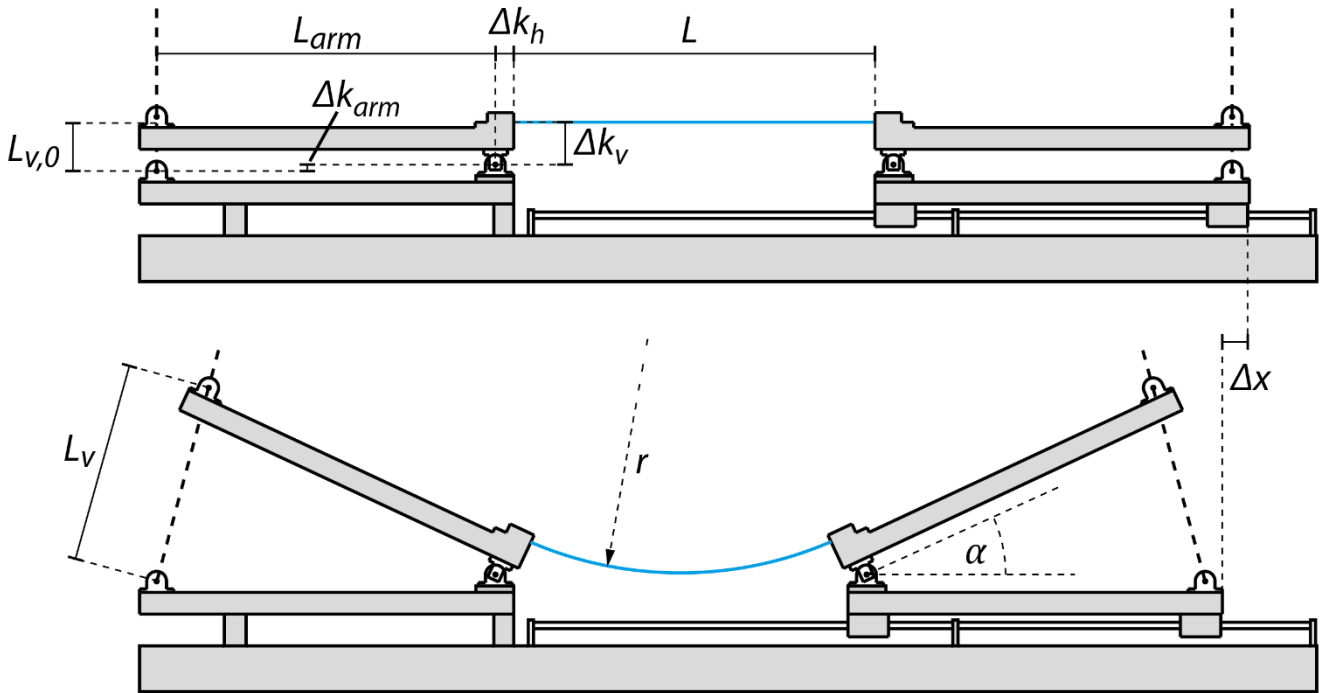


Abbildung 71: Bezeichnung der Variablen der Prüfmaschine an unverformter (oben) und verformter (unten) Geometrie

Als mathematische Beziehungen ergeben sich hier abhängig von der Glasspannung an der Kante σ die in Abbildung 71 gezeigten Variablen. Der Radius r des gekrümmten Glases und der Winkel α der Hebelarme errechnet sich (ohne Beachtung des Poissoneffekts) zu

$$r = \frac{E h}{2 \sigma} \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{L}{2 r} \quad (17)$$

. Daraus ergibt sich die Horizontalverschiebung Δx des Schlittens unter Einberechnung der Glasdicke h zu

$$\Delta x = 2 \cos(\alpha) \left(r + \Delta k_v + \frac{h}{2} \right) - 2 \sin(\alpha) \Delta k_h - L \quad (18)$$

und die Lagerabstände der Vertikalachse L_v mit den Hilfsvariablen d_1 , d_2 und φ_0 zu

$$d_1 = \sqrt{L_{arm}^2 + \Delta k_{arm}^2} \quad (19)$$

$$d_2 = \sqrt{L_{arm}^2 + (L_{v,0} - \Delta k_{arm})^2} \quad (20)$$

einspannen und wie wird die Gefahr herumfliegender Splitter minimiert? Beide Fragen liefern als Ergebnis eine liegende Position des Glases mit nach unten gerichteter Verformung während des Biegens da die Probe nicht während des Spannens durch Eigengewicht verrutschen oder wie bei Leutgeb und Schallauer unter Inkaufnahme eines Auflegens auf die zu prüfenden Kanten möglichen Beschädigungen ausgesetzt würde.

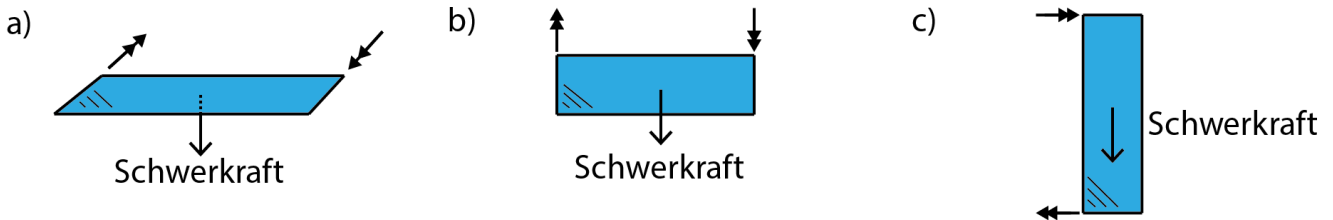


Abbildung 73: Prüfrichtungen; a) liegend, b) auf der belasteten Kante stehend, c) vertikal stehend

Die zweite zu beantwortende Frage war die Methode der Einbringung des Biegemoments. Zur Auswahl standen entweder ein direkter Antrieb der beiden Drehachsen mit Getriebemotoren wie bei Leutgeb und Schallauer [110] oder die Verwendung von Hebelarmen mit Linearantrieben.

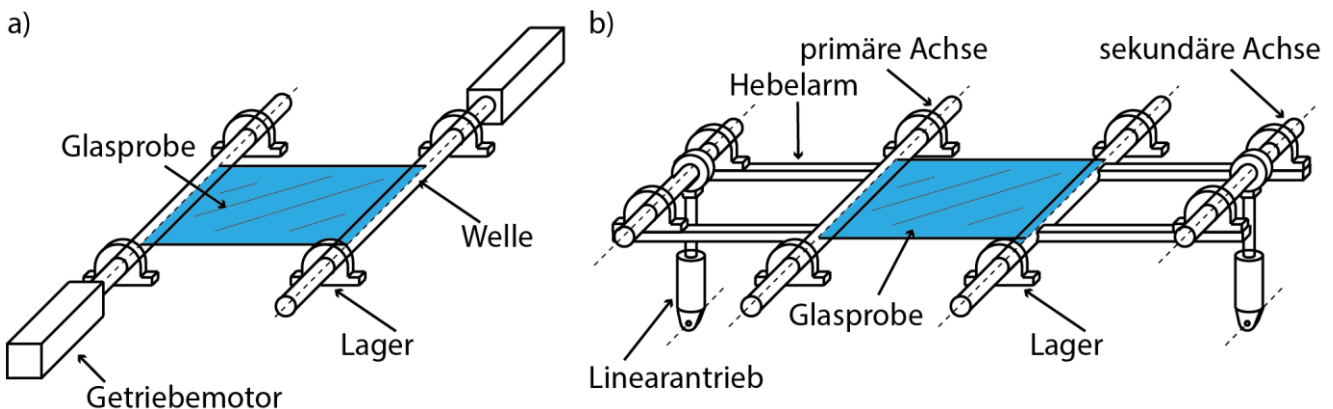


Abbildung 74: schematische Darstellung der zur Auswahl stehenden Antriebsmethoden mit a) Getriebemotoren und b) Hebelarmen

Aus Kostensicht sind Hebelarme deutlich zu bevorzugen. Bereits kleine Linearantriebe aus Schrittmotoren mit Kugelgewinde-/Trapezgewindespindeln sind bei identischem aufgebrachtem Biegemoment deutlich günstiger und schneller verfügbar als schwere Getriebemotoren. Zudem erfordern Getriebemotoren aufgrund der Größe ein Anbringen auf jeweils gegenüberliegenden Seiten, was zusammen mit der nötigen Steifigkeit der Klemmachsen gegen Torsion zusätzliche Verstärkungen an weiteren Teilen der Maschine bedeuten würde, um ungleiche Verdrehungen zu verhindern. Hebelarme drehen die Klemmen symmetrisch, wodurch sich Nachgiebigkeiten aus Torsion nicht aufsummieren, sondern aufheben, somit kann die ganze Konstruktion leichter ausgeführt werden. Für Hebelarme spricht auch die Möglichkeit der einfachen Messung des Biegemoments: ein Torsionssensor zwischen Getriebemotor und Klemmchse wäre nicht nur teuer, er würde auch die Größe und notwendige Steifigkeit zusätzlich erhöhen; bei Hebelarmen hingegen reichen bei bekannter Biegesteifigkeit der Hebelarme bereits aufgeklebte Dehnmessstreifen aus.

Als dritte Frage stellte sich das Problem der Festhaltung und Belastung des Glases. Zwei Methoden wurden zeitgleich untersucht.

Da die Prüfung in Anlehnung an den Vierschneidenbiegeversuch durchgeführt werden sollte, wurde als eine der beiden Lösungen das Anbringen von Last- und Biegerollen auf den Klemmflächen der Prüfeinrichtung untersucht und gebaut (Abbildung 75). Die Prüflänge bleibt hierbei konstant, die Kraftrichtung ist nicht vertikal, sondern durch die Hebelarme entsprechend der Neigung der

Klemmflächen geneigt. Als Vorteil wurde hier insbesondere die Möglichkeit einer direkten Messung des Biegemoments mit Hilfe von unter den Auflagerrollen angebrachter Kraftsensoren und die Verhinderung von Kontakt mit der Zugseite des Glases gesehen.

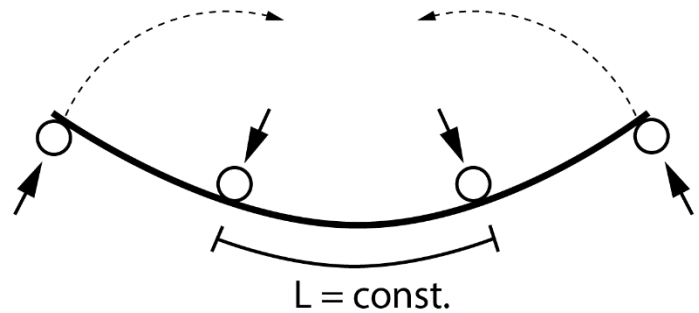
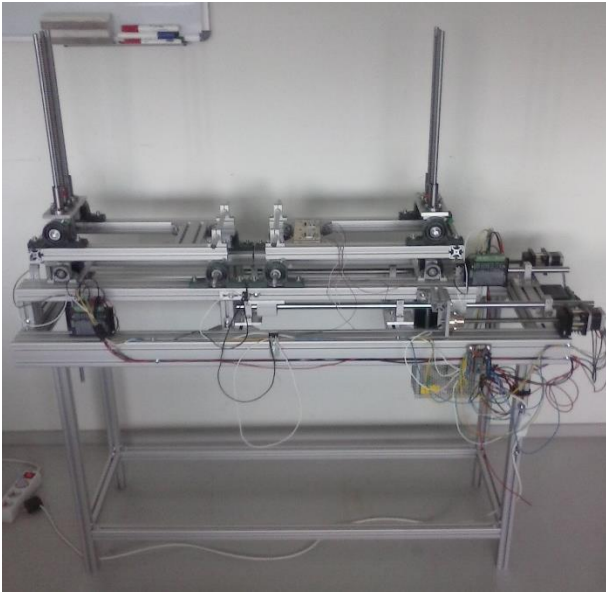


Abbildung 75: Erster Aufbau der Prüfmaschine mit Biegerollen aus dem Jahr 2018; links: gebauter Prototyp, die Enden des Glases liegen (mit einer auf diesem Bild nicht vorhandenen Auflagerrolle) auf Kraftsensoren auf welche das Biegemoment direkt messen; rechts: Prinzipdarstellung

Die ersten Prüfungen an dickerem Glas (≥ 2 mm) waren erfolgreich, jedoch stellten sich schnell zwei Probleme heraus:

Die Biegeform lässt sich mathematisch nur für kleine Verformungen geschlossen lösen da die Kraftrichtung der jeweiligen Paare aus Auflager- und Lastrolle bei größeren Verformungen zueinander verdreht werden, eine Berechnung in Echtzeit wäre aufgrund des Rechenaufwands nur eingeschränkt und nur mit einem leistungsfähigen Prozessor möglich gewesen.

Als zweite Schwierigkeit stellte sich heraus, dass das Einspannen des Glases eine exakte Höhenkorrektur der Auflager- und Biegerollen zueinander bedingt hätte, welche bei jedem Wechsel der Glasdicke eine neue Anpassung des Versuchsaufbaus bedingen.

Für kleine Verformungen (gewöhnlich in dickerem Glas) und kraftgesteuerte Prüfung (kompensiert teilweise die Genauigkeit der Einstellung auf eine Glasdicke) kann diese Methode der Klemmung trotzdem empfohlen werden, da sie dort sehr exakte Ergebnisse liefert.

Die zweite Methode der Festhaltung lehnte sich an die Prüfmaschine von Leutgeb und Schallauer / Lisec an. Hierbei sollte das Glas an beiden Enden in Klemmen gespannt werden. Es wurden jedoch eine Reihe von Entscheidungen dabei anders getroffen, insbesondere sollten die Klemmen Glas beliebiger Länge prüfen können, somit musste ein Durchstecken des Glases durch die Klemmen ermöglicht werden. Als zweite Randbedingung sollte die bei Leutgeb und Schallauer als unnötig große Menge angesehene Zahl aufwändig gefräster oder anderweitig als Sonderanfertigung hergestellter Bauteile minimiert werden (was auch der Grund für die Konstruktion der Grundstruktur aus Aluminium-Nutenprofilen war). Anders als bei den meisten Prüfaufbauten für Dünnglas sollte zudem die Dicke des auf der Klemmfläche aufgetragenen Materials zum Schutz der Glasoberfläche auf ein absolutes Minimum reduziert werden. Es wurde, wie sich in späteren Versuchen zeigte, zurecht vermutet, dass sich dies positiv auf die Genauigkeit des Versuchsaufbaus auswirken würde, und, wie im Verlauf der Nutzung bestätigt, es nicht zu unnötig hohen Spannungen an der Einspannstelle kommen würde. Das Schutzmaterial sollte zudem schnell wechselbar sein, da sich beim Bruch von Dünnglas unweigerlich Bruchstücke in der Oberfläche festsetzen.

Als Resultat wurden die Klemmen, wie auch sämtliche sonstigen nicht fertig zu kaufenden Bauteile der Maschine, aus rechteckigem Aluminium-Plattenmaterial, in welches Löcher und Gewinde eingebracht wurden, gefertigt. Die in einigen Abbildungen zu sehenden Fräsungen an Aluminiumteilen oder sonstige speziell gefertigte Sonderteile sind technisch nicht notwendig und wurden nur aus Zwecken der Ästhetik oder für leicht vereinfachte Bedienbarkeit gefertigt. Bei ausreichend präzisen Maßen (Dicke und Ebenheit) des Rohmaterials lassen sämtliche Bohrungen eine relativ ungenaue Positionierung mit einer Präzision von $\pm 0,3$ mm zu, ohne dass dabei die zu erreichende Justierbarkeit und Genauigkeit sämtlicher Teile einen Wert von $\pm 0,1$ mm überschreitet. Die erste Version der Klemmen ist in Abbildung 76 während der Prüfung der zuvor genannten heißgebogenen Glasproben zu sehen. Kurz darauf wurden die zuvor mit Sechskantschlüsseln anzuziehenden Klemmschrauben durch Exzentranspanner ersetzt, Längs- und Querschnitt der Klemmen sind in Abbildung 77 dargestellt. Als Anmerkung sollte ergänzt werden, dass einige Prüfvorrichtungen für Dünnglas [94] [112] [118] die Klemmen so ausrichten, dass das Glas im Zentrum der Drehachse eingespannt wird. Dieser Ansatz wurde aber sehr schnell verworfen, da ein Versatz des Glases zur Drehachse leicht herauszurechnen ist, konstruktiv aber sehr aufwändig geworden wäre, insbesondere mit unterschiedlichen Glasdicken.

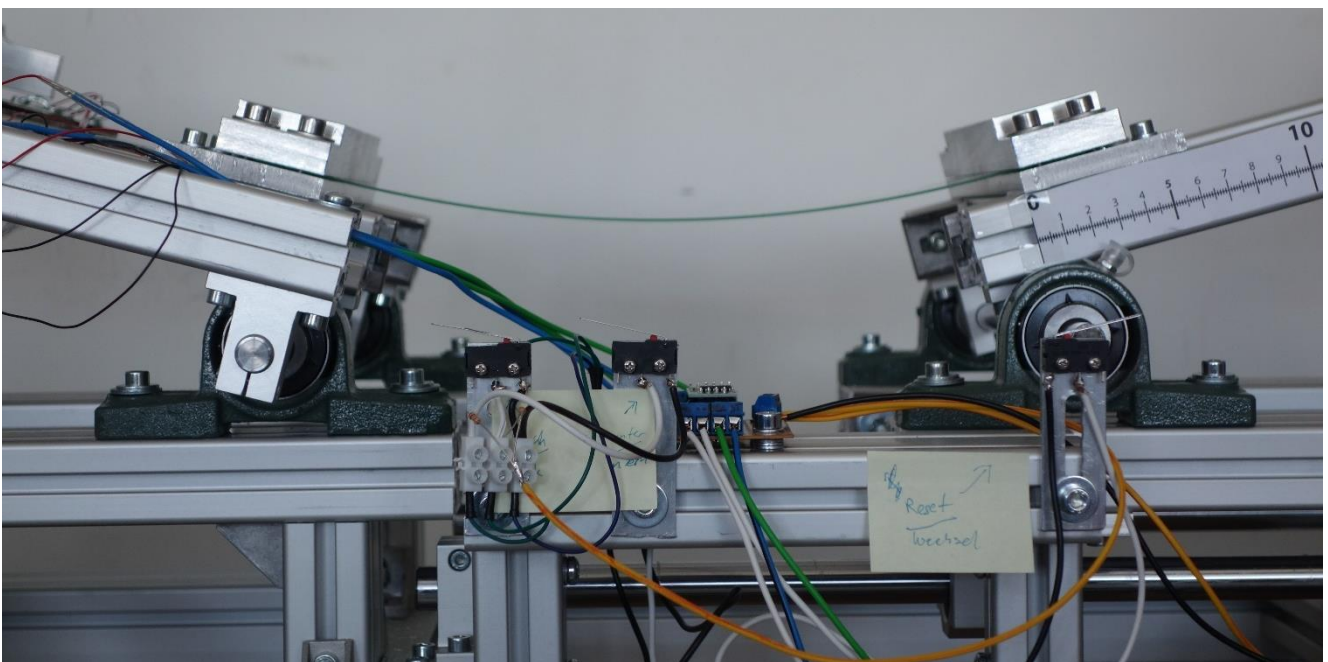


Abbildung 76: Aufnahme während der Prüfung der ersten Prüfserie

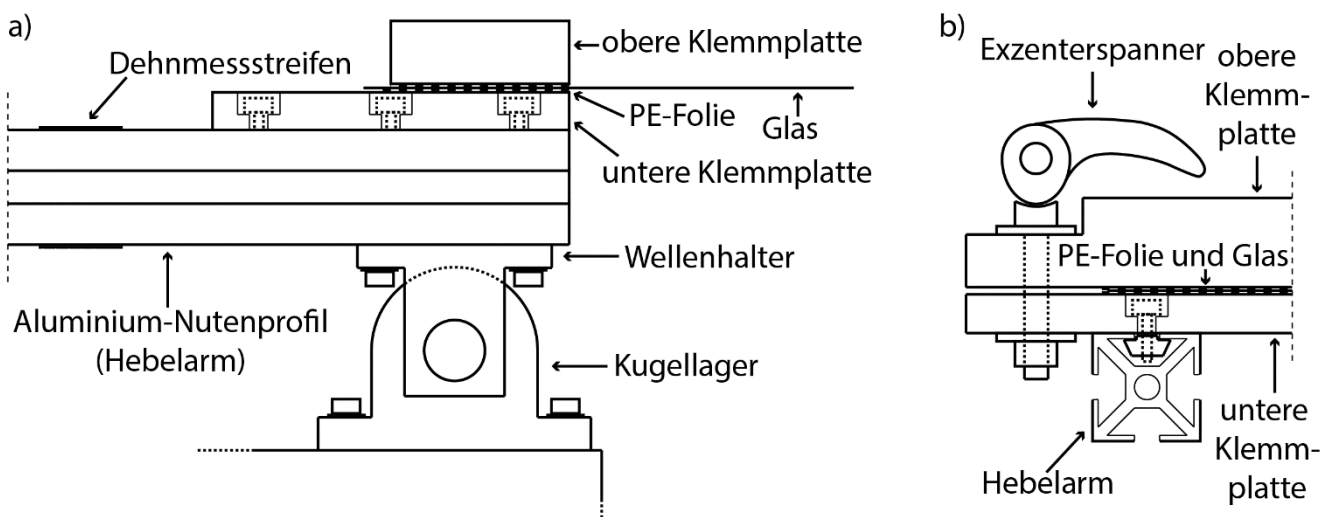


Abbildung 77: Schnittdarstellung der Klemmen der zweiten Generation (2019) im a) Längsschnitt und b) Querschnitt

Als Antwort auf die vierte signifikant wichtige Frage musste bei der Konstruktion die Entscheidung getroffen werden, ob der horizontale Längenausgleich während der Biegung passiv, also mit möglichst leichtgängigen Linearlagern, oder aktiv mit Linearantrieb erfolgen sollte. Grundsätzlich kann hier angemerkt werden, dass mit abnehmender Glasdicke die Leichtgängigkeit der Linearführung zunehmen muss, um keine signifikanten Normalkräfte im Glas zu erzeugen. Aus Erfahrung wurde die Grenze unterhalb derer gewöhnliche Linearführungen einen zu großen Einfluss auf die Normalkräfte im Glas haben auf eine Glasdicke von 0,5 mm geschätzt. Da mit der Prüfmaschine auch dünneres Glas geprüft werden und zudem eine exakte Positionierung in Ausgangsposition (angestrebte Prüflänge von $200,0 \pm 0,1$ mm) sowohl bei ebener als auch vorgekrümmter Geometrie des Probekörpers sichergestellt werden sollte, wurde eine aktive Achse mit zwei parallel und symmetrisch angebrachten Trapezgewindeantrieben mit Schrittmotoren (welche später durch Kugelgewindespindeln aufgrund des geringeren Umkehrspiels ersetzt wurden) gewählt. Es wurden zwei Spindeln gewählt, um ein Verdrehen des Schlittens zu verhindern da sich aus der Toleranz der Linearführung eine minimale Verdrehbarkeit um die vertikale Achse ergibt, welche die angestrebte Systemtoleranz überschritten hätte.

Die letzte den Entwurf stark beeinflussende Frage, war die Frage nach dem Umfang der Steuerungselektronik. Insbesondere in Industriemaschinen ist gewöhnlich selbst für sehr einfache Maschinen eine große Steuerungseinheit mit Schaltschränken, verschiedenen Modulen und einem leistungsfähigen PC als zentrale Steuerungseinheit anzutreffen. Im Gegensatz dazu stehen die im Hobby- und Modellbaubereich, zum Beispiel bei 3D-Druckern, meist anzutreffenden Mikroprozessoren (beispielsweise die sehr beliebte Arduino-Plattform) mit binären Ein- und Ausgängen, welche die Steuerung in einem einzigen Prozess mit wenig benötigter Rechenleistung zusammenfassen. Es war folglich festzustellen, ob ein einzelner Mikroprozessor sowohl die Horizontal- als auch Rotationsbewegungen in Echtzeit steuern und die Messwerte der Dehnmessstreifen an einen PC oder internen Speicher weitergeben kann. Die Frage wurde aus jahrelanger Erfahrung im Eigenbau von 3D-Druckern, CNC-Fräsen und Lasercuttern mit „ja, gerade so, mit einigem zusätzlichem Programmieraufwand“ beantwortet. Diese Antwort stellte sich als korrekt heraus. Als Steuerung der ersten Version der Prüfmaschine wurde ein Arduino Nano gewählt, später wurde dieser wie im nachfolgenden Kapitel genauer erklärt durch einen vielseitigeren Arduino Mega ersetzt.

Grob können die Iterationen der Prüfmaschine in fünf Schritte unterteilt werden:

- Erste Entwürfe 2017 (Abbildung 72 zeigt einen dieser Entwürfe, weitere unterscheiden sich hauptsächlich in der Ausgestaltung der Klemmen) sowie ein verkleinerter gebauter Prototyp (keine Bilder vorhanden)
- Erste in voller Größe gebaute Variante 2018 mit zwei unterschiedlichen Klemmmechanismen (Abbildung 75 und Abbildung 76)
- Zweite, veränderte Variante 2020 mit verbesserten Bauteilen der Drehgelenke, neuen Klemmen (Abbildung 77) und auf geringere von Motoren verursachte Vibrationen optimierter Software
- Dritte, komplett neu gebaute Variante 2022 mit kleineren Außenmaßen und neuer Steuerungselektronik (Abbildung 70), PC-gebunden
- Neue, PC-unabhängige Steuerungssoftware im Jahr 2023 sowie Veränderung der Klemmmechanismen und einiger weiterer Details in Konstruktion und Elektronik (Abbildung 78)

Zudem wurde noch eine „virtuelle“ Version der Prüfmaschine in der parametrischen Modelliersoftware Grasshopper erstellt, mit der die Verfahrenswege der Motoren sowie die Abstände der einzelnen Komponenten zueinander überprüft werden können. Während einer Prüferie wurde so dank regelmäßigem Abgleich mit den Sollmaßen eine aufgrund einer nicht ausreichend angezogenen Madenschraube in seltenen Fällen leicht durchrutschende Wellenkupplung entdeckt, die daraus entstandenen Imperfektionen im verdrehten Zustand in der Größenordnung eines Millimeters wären mit dem bloßen Auge nicht zu entdecken gewesen.

4.4.3. Konstruktionsdetails und Software der aktuellen Version

Nachfolgend werden einige Eigenschaften der aktuellen Version der Prüfeinrichtung aus dem Jahr 2023 vorgestellt.

Grundstruktur

Die Grundstruktur der Maschine besteht aus Aluminium-Konstruktionsprofilen mit Abmessungen von 60 mm x 60 mm (6 mm Nut, Grundmaß 30 mm) welche ein Rechteck bilden und mit Aluminiumwinkeln biegesteif verschraubt sind. Auf diesem Grundgerüst ist von der Benutzerseite gesehen links ebenfalls aus Konstruktionsprofilen (30 mm x 60 mm und 30 mm x 30 mm) die Struktur für den unverschieblichen Hebelarm, sowie rechts auf zwei an jeweils drei Punkten gestützten 16 mm-Präzisionswellen mit vier Linearlagern der verschiebliche Hebelarm, aufgeschraubt. Der lineargeführte Schlitten wird unterhalb der Wellen von zwei Kugelgewindespindeln mit NEMA17-Schrittmotoren verfahren.



Abbildung 78: Aktuelle Version der Prüfmaschine aus dem Jahr 2023 von der „Bedienerseite“ gesehen

Hebelarme

Die Hebelarme (Abbildung 79), welche jeweils bis zu 95° verdrehbar sind, sind jeweils an der Drehachse (12 mm Präzisionswelle) in beidseitigen Stehlagern verdrehbar. Am jeweils anderen Ende sind sowohl am Grundgerüst als auch am Hebelarm zwei Stehlager angebracht, zwischen denen die vertikale Achse spannt. Diese besteht aus einem Kugelgewindeantrieb und zwei Präzisionswellen mit Linearlagern zur Führung. Der Kugelgewindeantrieb wird jeweils von einem NEMA23-Schrittmotor angetrieben und sorgt für Drehmomente der Hebelarme bis zu 2 kNm (wird bei Dünnglas nicht ausgenutzt, ermöglicht aber aufgrund der starken Motoren eine schnelle Beschleunigung der Vertikalachsen auf Prüfgeschwindigkeit). Am unverschieblichen Hebelarm sind vier unidirektionale

Dehnmessstreifen, Typ FLA-2-8 von Tokyo Sokki Kenkyujo [121], als wheatstonesche Messbrücke [122] jeweils an der Ober- und Unterseite der beiden Konstruktionsprofilstreben angebracht. Da diese hauptsächlich zur Bruchdetektion verwendet werden, welche relative Änderungen misst, ist eine exakte Kalibrierung und Temperaturkompensation der Dehnmessstreifen für die üblicherweise durchgeführte weggesteuerte Prüfung nicht notwendig.

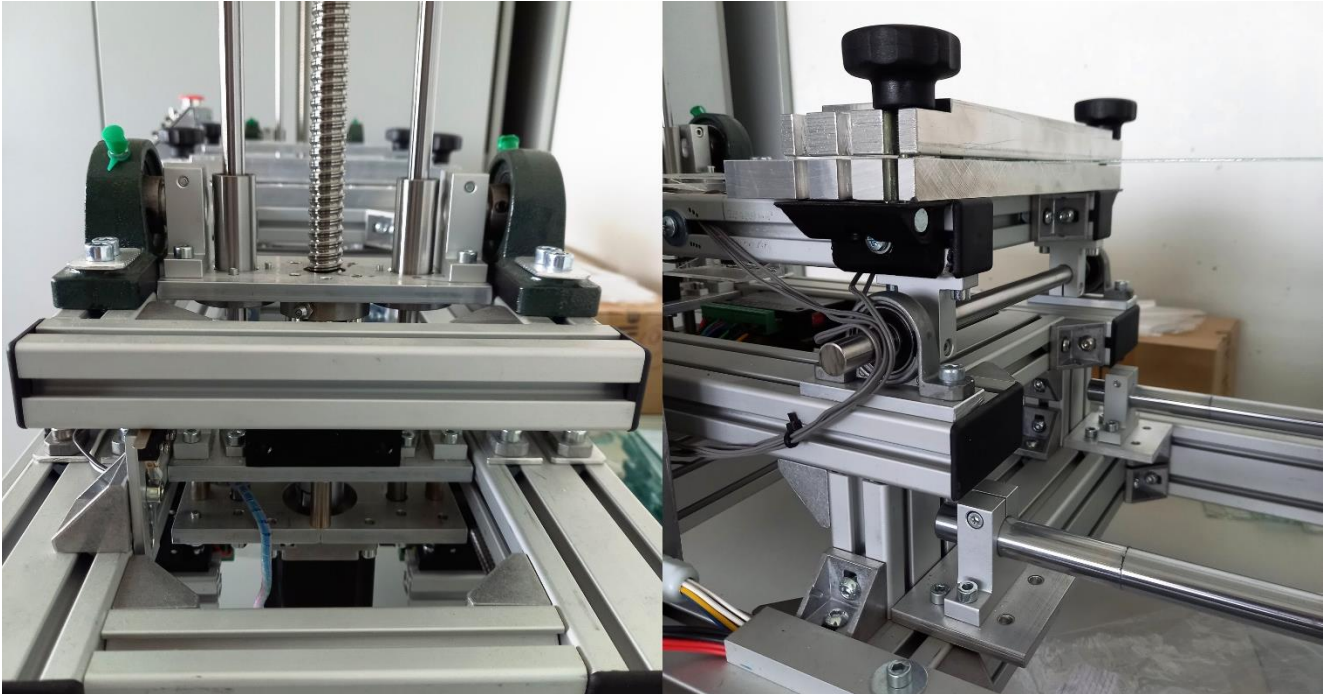


Abbildung 79: Rückansicht der Vertikalachse und Seitenansicht des Klemmbereichs mit geschlossenem Probenhalter und eingespanntem Glas

Probenhalterung

Die Unterseiten der Probenhalter (Abbildung 80) sind jeweils oberhalb der Drehachsen mit 16 versenkten Schrauben fest auf die Hebelarme aufgeschraubt. Diese bestehen aus 15 mm dicken Aluminiumplatten an die seitlich wegklappbare Klemmschrauben angebracht sind. In der aktuellen Version werden Sterngriffschrauben verwendet, welche gegenüber einer Vielzahl anderer getesteter Klemmschrauben (Exzentrerspanner, Flügel-, Rändel-, Kreuzgriff- oder Zylinderknopfschraube, Sechskantschlüssel, Klemmhebel) das beste Verhältnis von Benutzerfreundlichkeit, Dosierbarkeit der Klemmkraft und Geschwindigkeit aufwiesen.

Die Oberseite der Probenhalter besteht aus einer 20 mm dicken Aluminiumplatte. Sowohl die Ober- als auch Unterseite sind geschlitzt um die Klemmschrauben in je einem Handgriff auf beiden Seiten hochklappen und gleichmäßig anziehen zu können.

In dieser Version ist eine Probenbreite bis 200 mm möglich, für breitere Proben müssten breitere Klemmplatten aufgeschraubt werden. Die breitesten im Rahmen kommerzieller Prüfaufträge geprüften Glasproben hatten eine Breite von 160 mm, also nahezu die halbe Breite der 360 mm breiten Normproben der EN 1288-3.

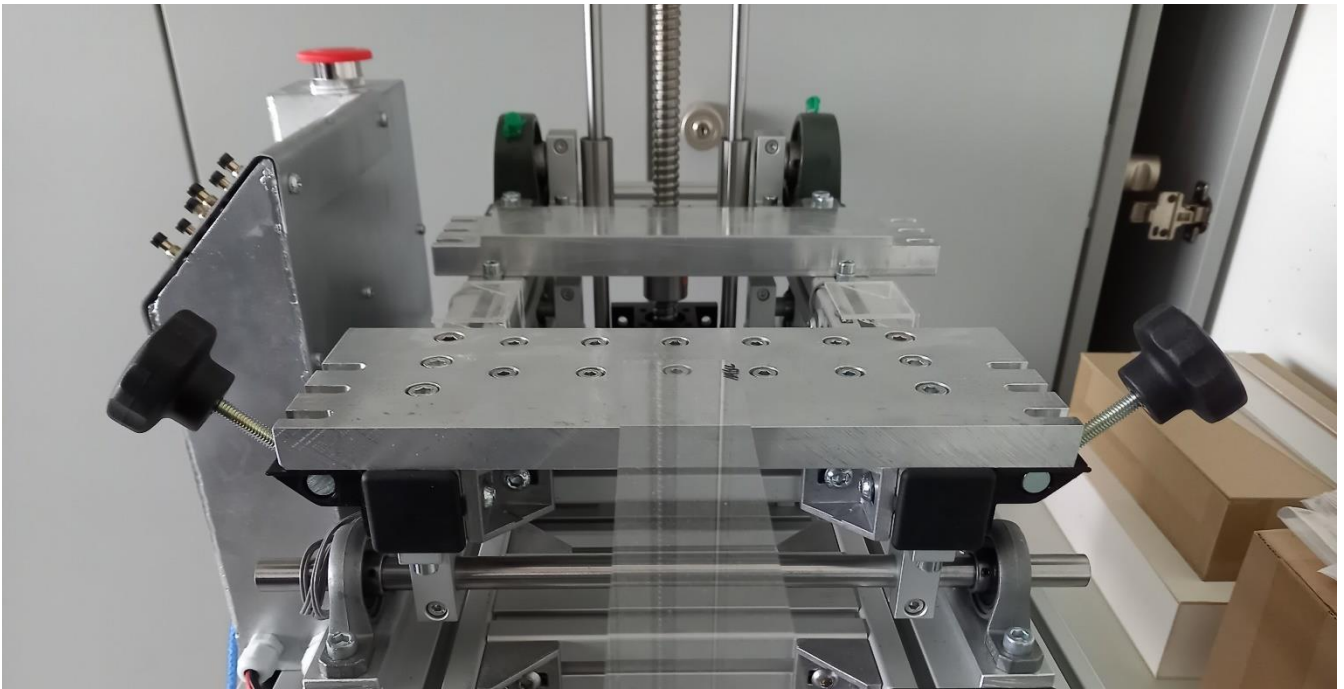


Abbildung 80: Unterseiten der Probenhalter mit seitlich weggeklappten Klemmschrauben

Steuerungseinheit und Leitungen

Die Steuerung (siehe nachfolgenden Abschnitt „Elektronik“) und Stromversorgung (12 V 10 A und 5 V 2 A über ein Schaltnetzteil mit vorgeschaltetem Notausschalter) ist neben dem unverschieblichen Hebelarm in einem geschweißten Stahlkasten untergebracht, dieser enthält auch die Bedienelemente (LEDs in Rot, Orange und Grün, 20x4 I²C-Display, 6 Knöpfe für hoch, runter, links, rechts, Ok und Abbrechen) auf der Oberseite. Die Kabel zur unverschieblichen Seite werden aus der Rückseite der Steuerung direkt ausgeleitet. Die Kabel zur verschieblichen Seite laufen seitlich aus der Steuerung und entlang des Grundgerüsts unter einer Aluminiumabdeckung, bevor sie anschließend durch eine Energieführungskette in den verschieblichen Hebelarm verteilt werden. Die Leitungen der Motorsteuerung treffen in unmittelbarer Nähe der jeweiligen Motoren auf kompakte Schrittmotortreiber, die aus den binären Steuerimpulsen (5 V) und der Stromversorgung (12 V) die notwendigen Signale mit höherer elektrischer Leistung generieren. Die drei Endstops für die zwei Dreh- und eine Linearachse sind jeweils an möglichst geschützten Stellen verbaut. Die Leitungen der Dehnmessstreifen laufen entlang des Hebelarms und um die Drehachse abseits der Motorleitungen, dadurch werden Zugkräfte und induktive Signale in diesen empfindlichen Kabeln reduziert.

Elektronik

Die Steuerung basiert in der aktuellen Iteration auf einem Arduino Mega 2560 Microcontrollerboard mit 54 digitalen und 16 analogen Ein- bzw. Ausgängen. An diesen sind Schrittmotortreiber, Endstops, Display, Uhr, Knöpfe, LEDs, Analog-Digital-Wandler und das Speicherkartenmodul angeschlossen (Abbildung 81). Gegenüber vorherigen Iterationen die auf Arduino Nano Microcontrollerboards (14 digitale und 8 analoge Ein-bzw. Ausgänge) basierten, ermöglicht dies einen vollständig eigenständigen Betrieb. Da Arduino-Microcontroller grundsätzlich zwar nicht-flüchtige Programmspeicher, aber ausschließlich flüchtige Datenspeicher besitzen, sendeten sämtliche vorherigen Iterationen der Prüfmaschine ihre Daten in Echtzeit über eine serielle USB-Schnittstelle an den Steuer-PC, wo auch die Auswertung erfolgte. Sowohl Daten wie Uhrzeit, Glasmaße, Lastrate und Kalibrierungsdaten als auch Sensordaten und Prüfprotokolle mussten vor, während und nach jeder Prüfung übertragen werden, was voraussetzte, dass jeweils ein PC mit der notwendigen installierten Software in der Nähe ist. Ein Anschluss von ausreichend Steuerknöpfen und eines nichtflüchtigen SD-Datenspeichers wäre

nicht direkt möglich gewesen, es waren zu wenig Datenanschlüsse vorhanden. Die Zahl der Datenanschlüsse für den Betrieb am PC sowie den eigenständigen Betrieb sind in Tabelle 9 gegeben. Alle Daten und Steuerimpulse werden über digitale binäre Signale weitergegeben (ggf. auch mit Nutzung der Analoganschlüsse im Digitalmodus).

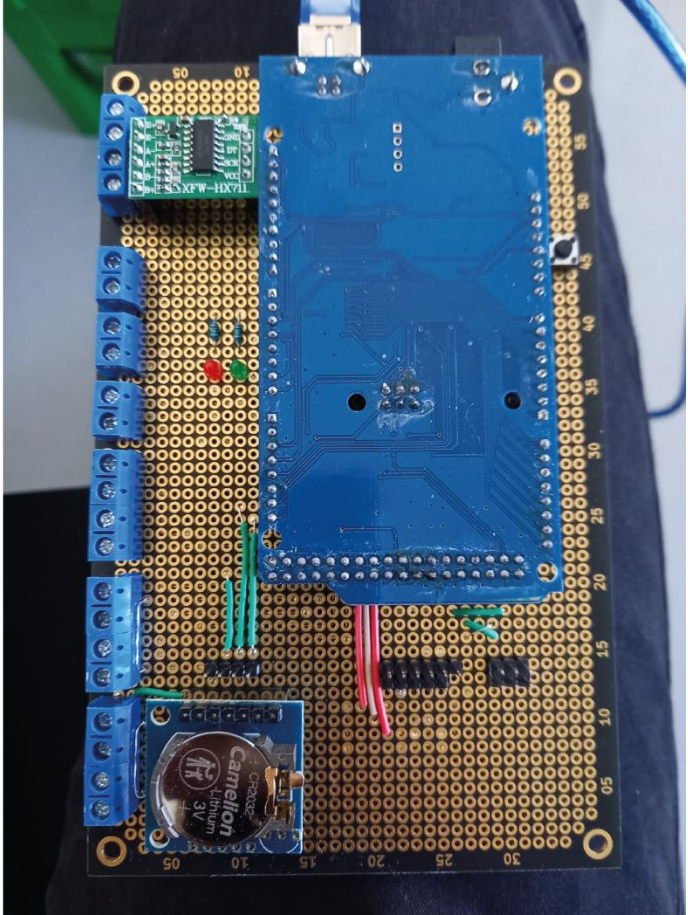
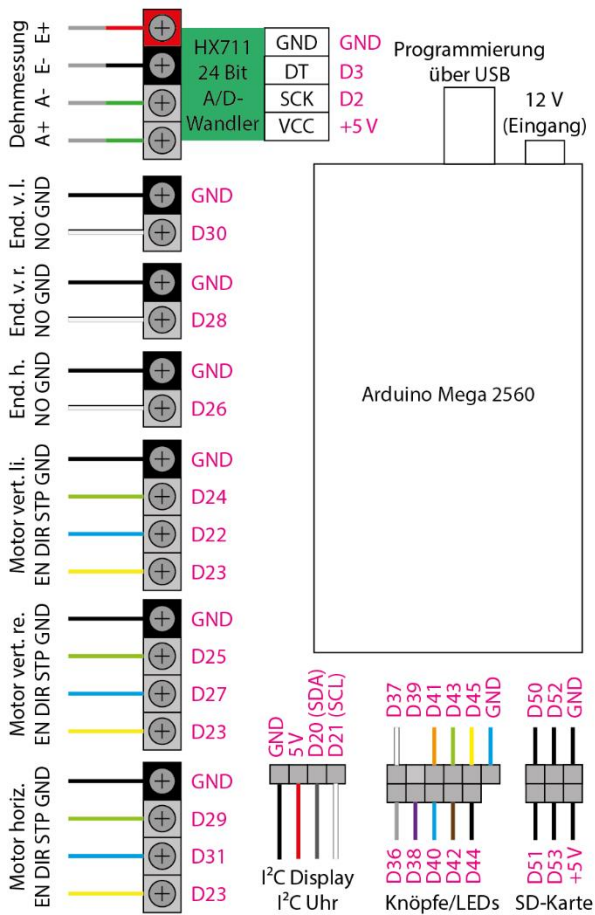


Abbildung 81: Aufbau der Steuerung; links: Übersicht der Anschlüsse; rechts: Hardware der Hauptsteuerung

Tabelle 9: Steuerpins der Prüfmaschine

Anschluss	Betrieb am PC (Arduino Nano)	eigenständiger Betrieb (Arduino Mega)
Programmierung	2 Pins für TX/RX (Datensignale Senden/Empfangen)	
Motorsteuerung	1 Pin für Ein-/Ausschalten der Motoren 3x1 Pin für Motorendrehrichtung 3x1 Pin für Motorenschritt	
Endstopschalter	3x1 Pin für Endpositionen der Achsen	
Display/Uhr	2 Pins für I ² C-Protokoll	
Analog-Digital-Wandler	2 Pins für Datenübertragung zum HX711 24 Bit A/D-Wandler	
Warnleuchten	1 Pin für „Vorsicht“	1 Pin für „Vorsicht“ 1 Pin für „Aktion nötig“ 1 Pin für „in Betrieb“
Steuerknöpfe	1 Pin für „Start/OK“	1 Pin für „Ok“ 1 Pin für „Abbrechen/Zurück“ 4 Pins für „links/rechts/hoch/runter“
Datenspeicher	-	4 Pins für SD-Karten-Modul
Summe	18 Pins	29 Pins

Software

Die Software ist in einer für Arduino-Programmierung üblichen Abwandlung der Programmiersprache C++ geschrieben. Grundlegend kann der Programmaufbau in drei Teile geteilt werden: Start (Initialisierung der Variablen, Laden der Konfiguration und Verbindung mit der Peripherie), Menü (Variablen ändern, Daten anzeigen) und Prüfung (Motorsteuerung während Prüfung, Auslesen der Sensordaten). Während große Teile der Software aus Programmiersicht eher als „Standardaufgaben“ anzusehen sind, war die Steuerung der Motoren mit gleichzeitiger Berechnung der Maschinenbewegung sowie Lesen und Speicherung der Sensordaten auf dem ATMEGA 2560-Mikroprozessor des Arduino mit nur einem Thread komplizierter. Protokolle wie zum Beispiel die Methode für das Auslesen der Sensordaten mussten selbst geschrieben werden, da vorhandene Softwarebibliotheken nicht die nötige Geschwindigkeit ermöglichten ($30 \mu\text{s}$ mit eigener statt $>500 \mu\text{s}$ mit Standardbibliothek). Der relevante Teil des Quellcodes ist in Anhang 7.6 gegeben.

4.4.4. Verfahrensablauf

Für die Durchführung einer Prüfung wird nachfolgend ein Verfahrensablauf beschrieben. Dieser ist sehr allgemein gehalten da sich Software, Hardware und Konstruktion stetig weiterentwickelt. Im Zweifel sei auf eine persönliche Einweisung verwiesen.

Nach dem Einschalten der Maschine und bevor das Hauptmenü erscheint zeigt das Display die Probeneigenschaften, diese können über die Steuerknöpfe verändert werden und sind Elastizitätsmodul, Spannungsrate, Länge und Dicke. Vom Hauptmenü aus ist eine Anpassung auch jederzeit möglich.

Aus dem Hauptmenü kann die Prüfung gestartet werden. Hierzu referenziert sich die Maschine selber, indem sie die bekannten Positionen der Endstops anfährt. Diese Positionen können auch aus dem Hauptmenü angepasst werden, falls die Maschine eine neue Justierung benötigt.

Nach der Selbstreferenzierung fahren die Motoren die „Einspannposition“ an und eine Probe kann eingelegt werden. Hierfür muss die Klemmfläche beider Klemmbacken mit einer Schutzschicht, üblicherweise dünnes Klebeband, bedeckt sein, um einen direkten Kontakt der Aluminiumklemmen mit dem Glas zu verhindern. Diese Klemmfläche sollte zudem vor jeder Prüfung auf Fremdkörper, zum Beispiel Glassplitter aus vorheriger Prüfung, geprüft werden.

Nun wird die Probe (idealerweise mit einer Schicht Klebeband auf der Druckseite, um die Splitter zu binden) eingelegt und die Klemmen mit den Klemmschrauben angezogen, somit ist die Probe eingespannt. Die exakte Klemmkraft ist nicht als Zahlenwert definiert, gewöhnlich wird „handfest“ empfohlen, abhängig der Probendicke und -breite. Da das Glas mit einem Biegemoment belastet wird und bei korrekter Funktion der Maschine keine Zugkräfte in der Klemmung entstehen handelt es sich bei der Klemmung eher um eine „Lagesicherung“ als eine „starre Einspannung“, die obere Klemme übernimmt die Funktion der Lastrollen und die untere die Funktion der Auflagerrollen aus dem Vierschneidenbiegeversuch, mit einem sehr kleinen Hebelarm dazwischen. Die Klemmschrauben müssen lediglich ein Öffnen der Klemmen verhindern.

Mit einem Befehl über die Steuertasten wird die Prüfung gestartet. Die Maschine steigert entsprechend der Randbedingungen stetig die Spannung im Glas bis der Bruch eintritt. Nach dem Bruch wird die Maschine durch Tastendruck gestoppt. Eine automatische Bruchdetektion wurde verworfen, bei dünnem Glas ist die Änderung der Biegemomente so klein, dass bereits Vibrationen oder unbeabsichtigte Berührungen der Maschine falsche Ergebnisse liefern können. Eine Unterscheidung zwischen Bruch und externen Faktoren würde eine deutlich leistungsfähigere Steuerungselektronik bedingen.

Nach dem Stopp des Prüfungsvorgangs wird auf dem Display ein Verlauf der Biegemomente der Maschine der letzten 30 Sekunden gezeigt, nutzerseitig wird nun der Bruchzeitpunkt (üblicherweise an signifikanter Momentenänderung zu erkennen) ausgewählt (Abbildung 82), die Maschine errechnet für diesen Zeitpunkt die Bruchspannung und speichert die Ergebnisse inklusive des Momentenverlaufs für spätere Überprüfung auf dem internen Speicher ab. Die Auflösung der Ergebnisse der

Kantenspannung ist standardmäßig auf 1 MPa eingestellt, was für chemisch vorgespanntes Glas allgemein ausreichend ist, kann aber auch softwareseitig auf bis zu 0,1 MPa verändert werden. Soll eine weitere Prüfung durchgeführt werden kann nun die Maschine wieder in die Prüfposition gefahren werden, alternativ ist eine Rückkehr in das Hauptmenü der Maschine möglich.



Abbildung 82: Darstellung und Auswahl der Biegemomentänderung auf dem Display der Prüfmaschine nach Ende des Versuchs

4.4.5. Ergebnisse

Das erste wichtige Ergebnis der Glasprüfungen mit der vorgestellten Maschine ist auch gleichzeitig die Antwort auf die wahrscheinlich am häufigsten gestellte Frage: „bricht das Glas nicht an der Einspannung?“. Diese Frage kann mit hoher Sicherheit mit „nein“ beantwortet werden, dafür gibt es neben den Erfahrungen aus vielen Prüfserien, bei denen es nie zu einem Indiz für erhöhte Bruchanzahl an oder nahe den Lagern kam, noch weitere Gründe. Zum einen wird das Glas an der Einspannung nicht „gequetscht“ sondern die Ober- und Unterseite der Klemmen übernehmen dieselben Funktionen wie die Last- und Auflagerrollen im Vierschneidenbiegeversuch, nur mit einem deutlich geringeren Hebelarm zum Aufbringen des Momentes. Dadurch kommt es beispielsweise an der Vorderkante der Klemmen nur zu schwachem Kontakt der Zugseite des Glases mit der unteren Klemme da dieses gegen die obere Klemme gedrückt wird. Zudem kann sich an der Einspannung der Poissoneneffekt (Kapitel 3.1.2) nicht so stark einstellen, wodurch die Spannung an dieser Stelle wenige Prozent niedriger ist.

Als nächstes Ergebnis kann festgestellt werden, dass nahezu alle mit der Prüfmaschine untersuchten Prüfserien ein statistisch signifikantes Ergebnis bei Zweiparameterweibullauswertung mit gleichmäßiger Streuung der Glasfestigkeiten in der jeweiligen Prüfserie lieferten. Würde die Maschine das Glas nicht so belasten wie berechnet, müsste sich dies in der statistischen Verteilung der Ergebnisse zeigen. Es sei allerdings angemerkt, dass die Streuung der Prüfergebnisse stark von der Glasqualität abhängt, insbesondere bei chemisch vorgespanntem Glas kommt es häufig in den Prüfserien zu Ausreißern. Nachfolgend werden einige mit der Maschine geprüfte Serien in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Übersicht einiger Prüfergebnisse der Biegeprüfmaschine mit statistischen Daten (Bestimmtheitsmaß R^2 , 5%-Fraktile der Spannung aus Weibullauswertung und Verhältnis der Standardabweichung s zum 5%-Fraktile) mit und ohne eventuelle offensichtliche Ausreißer (nur angegeben falls Ausreißer klar abgrenzbar sind); Prüflänge jeweils 200 mm; CS = chemisch vorgespannt

Anzahl Proben	Dicke [mm]	Typ	alle Proben			offensichtliche Ausreißer	ohne Ausreißer		
			R^2 [%]	$\sigma_{5\%-Fraktile}$ [MPa]	$s/\sigma_{5\%-Fraktile}$ [%]		R^2 [%]	$\sigma_{5\%-Fraktile}$ [MPa]	$s/\sigma_{5\%-Fraktile}$ [%]
32	0,7	Float	95,7	40,3	9,8	-			
30	1,1	Float	95,8	42,5	23,2	-			
30	0,4	Float	97,8	60,2	45,9	-			
33	1,1	Float	92,5	66,8	24,4	-			
30	0,5	Float	91,7	107,0	7,4	-			
33	1,1	CS	83,3	65,9	130,6	12	93,2	271,7	4,1
29	1,1	CS	95,1	97,0	57,2	-			
28	1,1	CS	96,6	119,9	57,2	-			
16	1,1	CS	92,0	121,9	51,3	-			
30	1,1	CS	80,0	138,7	38,2	6	95,8	248,2	5,7
33	1,1	CS	95,1	233,4	22,2	-			
31	0,5	CS	66,8	267,4	3,3	1	95,5	283,2	1,4
31	0,5	CS	59,9	271,1	7,1	1	90,8	310,9	2,5
32	0,5	CS	63,1	292,8	5,2	2	98,1	327,1	1,2
30	0,5	CS	94,2	339,9	3,3	-			

Da die bearbeitungsabhängige Festigkeit der Glasproben – beispielweise Schnittverfahren, Kantenbearbeitung und chemische Vorspanndauer – nicht Schwerpunkt dieser Arbeit ist und einige dieser Daten auf Herstellerwunsch nicht veröffentlicht werden, sind nicht mehr Daten und Eigenschaften dargestellt. An Tabelle 10 lässt sich jedoch bereits erkennen welche Qualitätsschwankungen zu erwarten sind. So sind bei Prüfserien mit chemisch vorgespanntem Glas charakteristische Festigkeiten zwischen 65,9 und 339,9 MPa gemessen worden, bei Floatglas schwankt der Wert zwischen 40,3 und 107 MPa.

Ausreißer mit einem Bruchteil der Festigkeit der restlichen Scheiben kommen immer wieder vor und haben einen sehr großen Einfluss auf die charakteristische Festigkeit und die Standardabweichung der Festigkeiten. Ausreißer oder ganze Prüfserien mit niedrigen Festigkeiten wurden bei allen Herstellern und allen untersuchten Kantenbearbeitungen (geschnittene Kante, geschliffene Kante und Laserschnitt) beobachtet. Das Problem fehlerbehafteter Kanten scheint in der Industrie noch nicht gelöst.

Ein drittes Ergebnis der Prüfungen mit der Biegeprüfmaschine sind die bereits in Kapitel 3.1.5 gezeigten Erkenntnisse zu den entstehenden Bruchwinkeln und dem Nachbruchverhalten. Da bei der Biegeprüfmaschine das Glas nach der Prüfung in Position bleibt, kann es deutlich besser untersucht werden als wenn zusätzliche unkontrollierte Verformungen nach dem Bruch auftreten.

4.5. Prüfung mit Smartphone

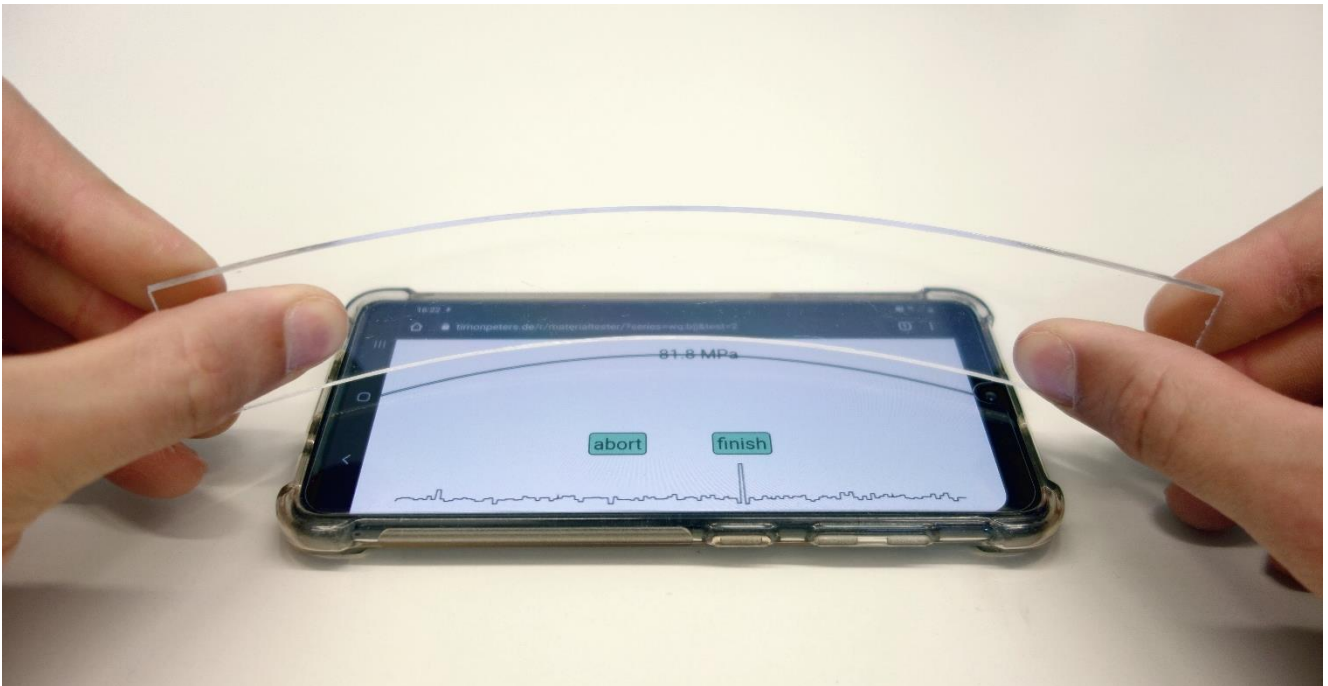


Abbildung 83: Beispielbild zur manuellen Prüfung, eine Scheibe wird über eine auf einem Display dargestellte Linie mit definierter Krümmung gehalten

4.5.1. Funktionsprinzip

Wie auch im zuvor gezeigten Versuchsaufbau der Biegeprüfmaschine soll in diesem Versuch eine konstante Krümmung und somit eine kreisförmige Biegung durch Einbringen eines Biegemomentes von beiden Enden der Glasprobe erzeugt werden. Hierfür wird die nötige Krümmung in einer auf einem Smartphone, Tablet oder sonstigen zu Bildschirmausgabe fähigen Gerät errechnet und auf dem Bildschirm als Linie dargestellt. Aufgabe der anwendenden Person ist nun das Glas während des Prüfvorganges in die vorgegebene Form der sich kontinuierlich entsprechend der gewählten Lastrate verkrümmenden Linie zu bringen. Hierfür wird das Glas entweder wie in Abbildung 83 dargestellt in den Händen gehalten oder mit Hilfe von Glashaltern (welche die mögliche Verkippung und Verdrillung des Glases verhindern, siehe Abbildung 84) symmetrisch eingespannt. Die Standardgröße des Glases orientiert sich in diesem Versuchsaufbau ebenfalls an der EN 1288-3, die Prüflänge sollte idealerweise 200 mm betragen, die Klemmen sind auf eine Aufnahmetiefe von 25 mm und eine Glasbreite von 40 mm ausgelegt, was folglich Proben der Abmessungen 250 mm x 40 mm x h ergibt.

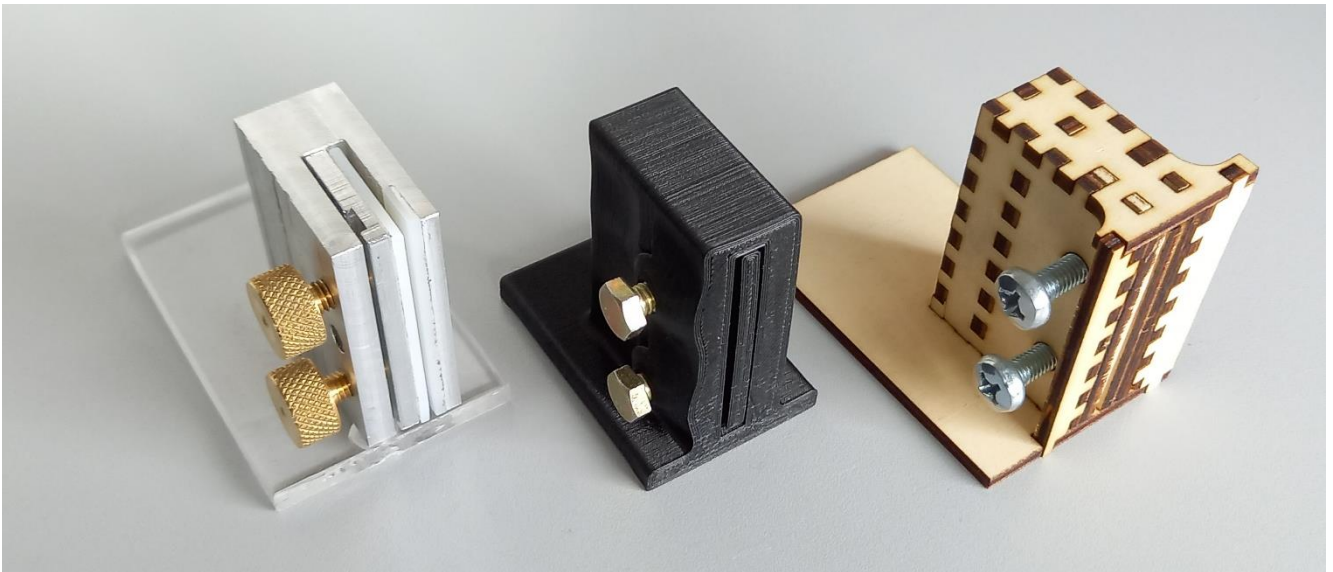


Abbildung 84: drei unterschiedliche Glashalter für die Prüfung; links: gefrästes Aluminium mit Klemmböcken aus Polyethylen und Fuß aus PMMA sowie gerändelten Klemmschrauben aus Messing; Mitte: in einem Stück ohne Nachbearbeitung 3D-gedruckter Halter mit eingesteckten Muttern (M6 flach) und Sechskantschrauben (M6) zum Klemmen des Glases; rechts: Lasergeschnittener Halter aus Sperrholz mit direkt ins Holz eingedrehten Schrauben zur Klemmung



Abbildung 85: optionaler Ständer für den Versuchsaufbau, das Smartphone oder Tablet befindet sich in einer "Schublade" unterhalb einer Glasplatte, dadurch sind auch größere oder dickere Geräte verwendbar; an der Rückseite hat der Ständer zudem einen speziellen Kasten aus PMMA welcher Splitter durch die Neigung der Rückwand nach unten in einen Sammelbehälter abprallen lässt

4.5.2. Aufbau der Software

Die Software wurde in einer ersten Version als Android-App entwickelt, jedoch relativ schnell durch eine webbasierte Browserapplikation ersetzt. Grund dafür waren der vereinfachte Zugang ohne

Installation über einen einfachen Weblink, sowie die Tatsache dass nahezu alle zeitgemäßen Webbrowser die Generierung von Grafiken in Echtzeit sowie einen Zugriff auf das Mikrofon des jeweiligen Endgeräts für die Bruchfeststellung ermöglichen. Daher ist die aktuelle Version clientseitig in HTML und JavaScript sowie serverseitig in PHP geschrieben. Der Server dient hierbei lediglich zur Datenspeicherung, wird daher nicht weiter behandelt.

Im Hauptmenü der Software kann eine vorhandene, auf dem Server gespeicherte Prüfserie geladen oder eine neue erzeugt werden. Jede Prüfserie erhält eine eindeutige, aus sechs Zeichen zusammengesetzte ID (Identifikationsnummer) anstatt einer fortlaufenden Nummer, dieser Algorithmus minimiert aus Datenschutzgründen die Möglichkeit ohne Kenntnis der jeweiligen ID auf die Daten anderer Nutzer zugreifen zu können (die Wahrscheinlichkeit eine ID zu erraten ist kleiner als 10^{-9}), trotzdem kann die Serie mit einem einfachen Weblink „geteilt“ werden. Ein ähnliches System liegt beispielsweise der URL-Generierung von YouTube zum Schutz von nichtöffentlichen Videos zugrunde [123].

Nach dem Laden einer Serie gelangt man in eine Eingabemaske, in der die Parameter der Prüfserie geändert werden können (Abbildung 86 links), darunter Dicke, Länge und Dehnrate. Hier kann der jeweilige Datensatz auch für eine Verwendung in der Forschung freigegeben werden, dies kann helfen größere Datenmengen zu Dünnglas zu sammeln.

Aus der Eingabemaske kann die Liste der einzelnen Proben abgerufen werden. Hier gibt es die Möglichkeit Proben aufzurufen oder neue zu generieren, die Serie per Weibullanalyse (dazu später mehr) zu analysieren oder die Serie zu teilen (Abbildung 86 rechts).

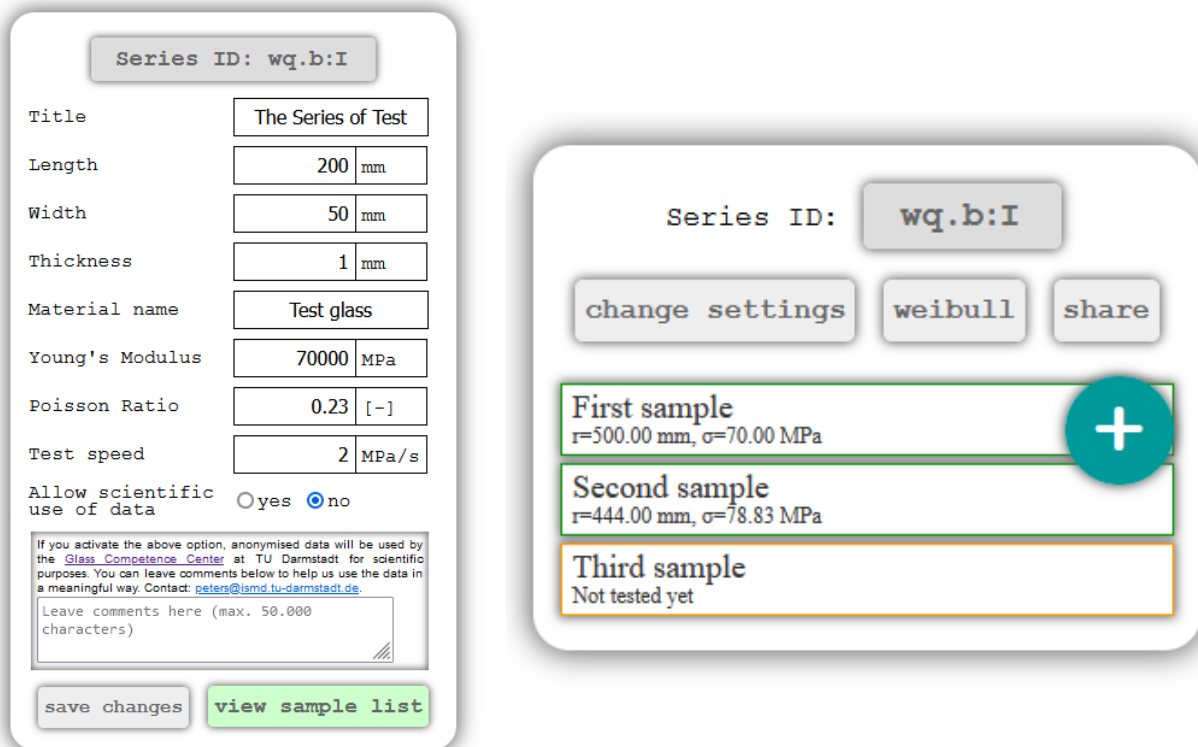


Abbildung 86: links: Menü für Einstellungen der Prüfserie; rechts: Liste der einzelnen Proben

Werden Proben aufgerufen oder neu erstellt, gelangt man auf eine weitere Eingabemaske, in der sofern nötig die für die gesamte Prüfserie festgelegten Werte für einzelne Proben überschrieben werden können (Abbildung 87 links). Von dieser Eingabemaske aus kann die Prüfung begonnen werden.

Das Prüfinterface wird bildschirmfüllend dargestellt. Die Software versucht die Bildschirmauflösung zu ermitteln, bei vielen Geräten (insbesondere Mobiltelefonen) ist dies jedoch nicht zuverlässig möglich,

daher muss gegebenenfalls eine auf dem Display angezeigte Kalibrierskala manuell, beispielsweise durch Vergleich mit einem Lineal, überprüft und angepasst werden (Abbildung 87 rechts). Die Kalibrierdaten werden clientseitig in einem Cookie gespeichert da diese geräteabhängig sind, somit ist üblicherweise eine Kalibrierung nur einmal je Endgerät notwendig.

Im selben Schritt erfolgt auch eine Aktivierung des internen Mikrofons des Endgerätes, üblicherweise fragt das Betriebssystem bei der ersten Verwendung ob ein Mikrofonzugriff für diese Webseite dauerhaft erlaubt werden kann. Auf manchen Endgeräten werden Mikrofonzugriffe grundsätzlich blockiert und müssen manuell freigegeben werden. Das Mikrofonsignal wird zur Kontrolle im unteren Drittel des Interfaces grafisch dargestellt. Eine Nutzung der Software ist auch ohne Mikrofon möglich, hier entfällt dann jedoch die Unterstützung bei der Feststellung des Bruchzeitpunktes.

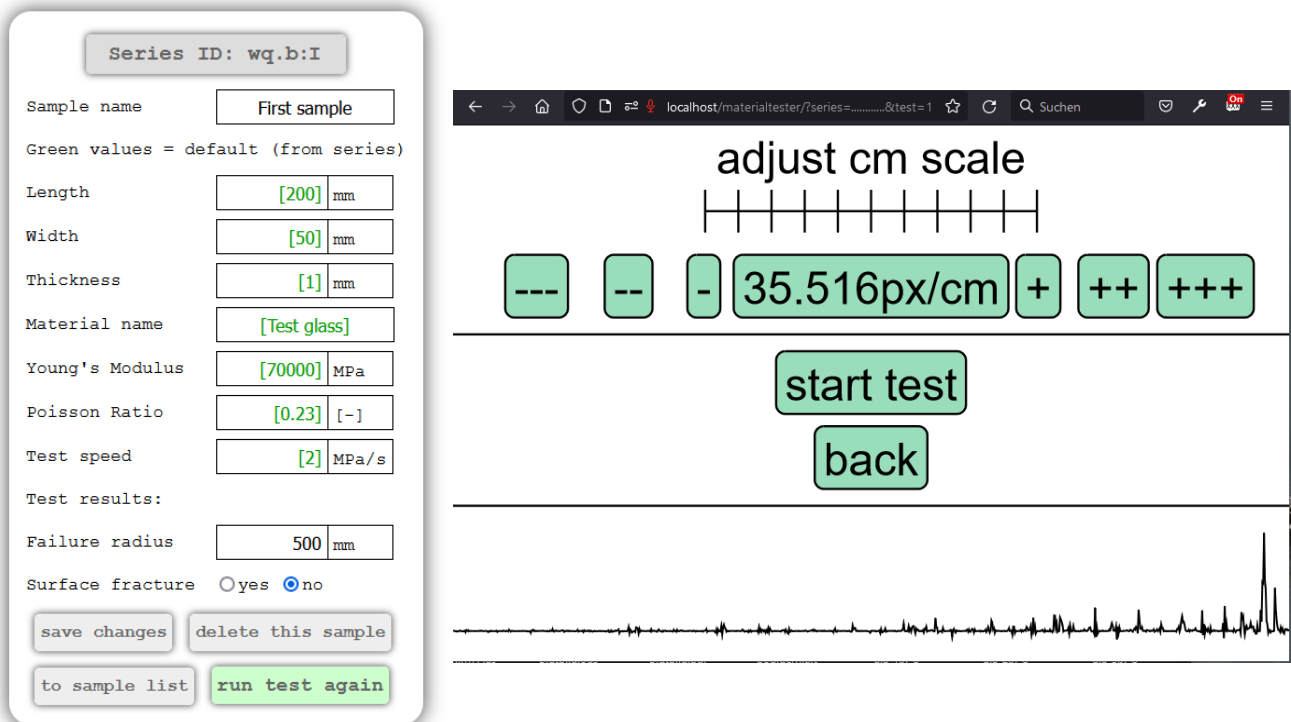


Abbildung 87: links: Menü für die Einstellungen einer einzelnen Probe, in Grün sind die Einstellungen der gesamten Serie übernommen, können jedoch überschrieben werden; rechts: Prüfoberfläche vor dem Start der Tests, oben ist die Skaleneinstellung, unten das Mikrofonsignal gezeigt

Sind Auflösung und Mikrofon kalibriert, kann mit der Prüfung begonnen werden. Auf dem Bildschirm erscheint eine Linie entsprechend der Abmessung der Probe (Abbildung 88 links). Ist die Probe größer als der Bildschirm, wie dies bei den meisten Smartphones üblich ist (das während der Entwicklung verwendete Samsung Galaxy A41 hat beispielsweise eine Bildschirmbreite von ca. 14,5 cm), kann nicht die ganze Linie dargestellt werden und sie wird an beiden Enden symmetrisch abgeschnitten. Eine Darstellung von ungefähr drei Vierteln der Probe hat sich jedoch nicht als merklicher Nachteil erwiesen, die Sehne verkürzt sich zudem während der Prüfung, weshalb die Linie bei höheren Krümmungen meist vollständig abgebildet werden kann.

Ein Countdown zählt nun zum Beginn der Prüfung herunter, nach Ablauf wird die aktuelle rechnerische Spannung eingeblendet und die Linie beginnt sich entsprechend der vorgegebenen Lastrate zu verkrümmen (Abbildung 88 rechts). Das Audiosignal wird währenddessen aufgezeichnet.

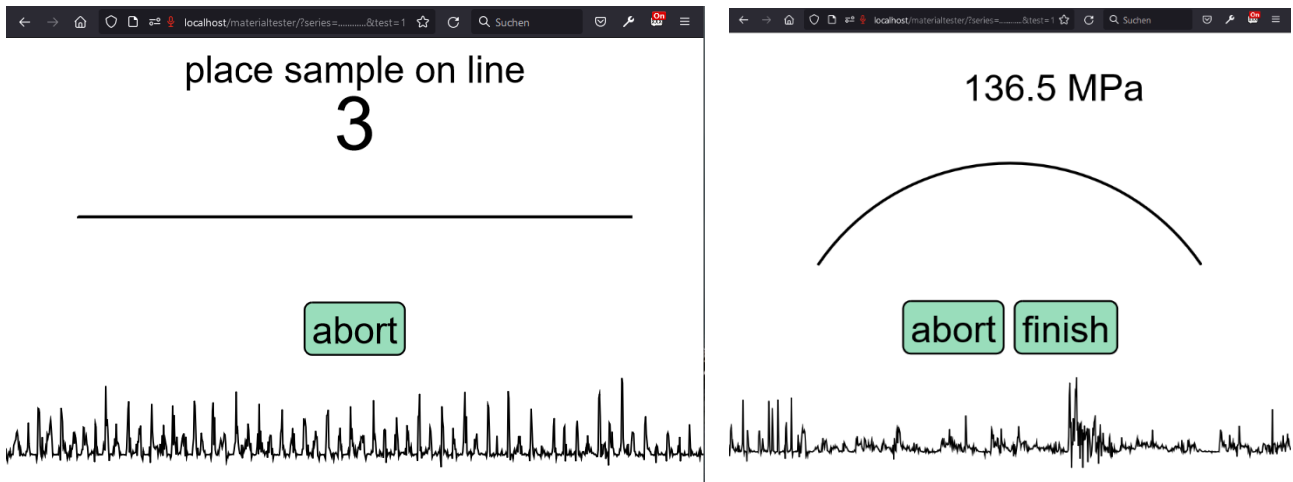


Abbildung 88: links: Prüflinterface vor Beginn mit Countdown; rechts: Prüflinterface während der Prüfung mit gekrümmter Linie

Ist die Probe gebrochen, wird nutzerseitig die Prüfung beendet. Eine automatische Beendigung des Prüfvorgangs wurde bewusst nicht implementiert, da Störgeräusche als falscher Glasbruch gedeutet werden könnten, was die Probe gegebenenfalls unbrauchbar machen könnte.

Nach dem Beenden wird das Audiosignal analysiert, um den Zeitpunkt des Bruches festzustellen. Um beispielsweise Rauschen oder Stimmen vom Bruchsignal zu unterscheiden wurde ein einfacher, aber sehr zuverlässiger Algorithmus entwickelt. Stimmen, Rauschen und viele andere Störsignale haben eine größere Frequenzbreite sowie mehr Unter- und Obertöne als ein Bruchsignal das gewöhnlich nur einen geringen Frequenzbereich einnimmt. Der Abstand eines Audioereignis vom Mikrofon erhöht zudem die Frequenzbreite und Menge an Resonanzen. Deshalb wird das Signal mit Hilfe einer FFT (fast Fourier transform, schnelle Fouriertransformation) in einzelne Frequenzen zerlegt (diese Funktion ist browserseitig standardmäßig vorhanden und musste nicht programmiert werden), die jeweiligen Pegel quadriert und ins Verhältnis zum Gesamtpegel gesetzt. Dadurch werden Ereignisse mit geringeren Frequenzbreiten hervorgehoben (Abbildung 89). Das entsprechend gefilterte Signal wird grafisch dargestellt und das Maximum als möglicher Bruchzeitpunkt markiert. Nutzerseitig kann dieser „Vorschlag“ angenommen oder ein anderer Zeitpunkt im Audiosignal ausgewählt werden. Die Qualität der Bruchdetektion hängt teilweise vom Endgerät und Betriebssystem ab, da die verwendeten Systemfunktionen von unterschiedlichen Herstellern leicht unterschiedlich implementiert werden.

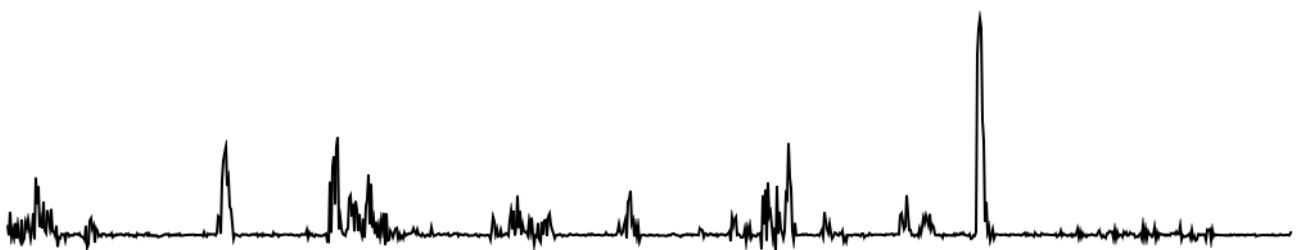
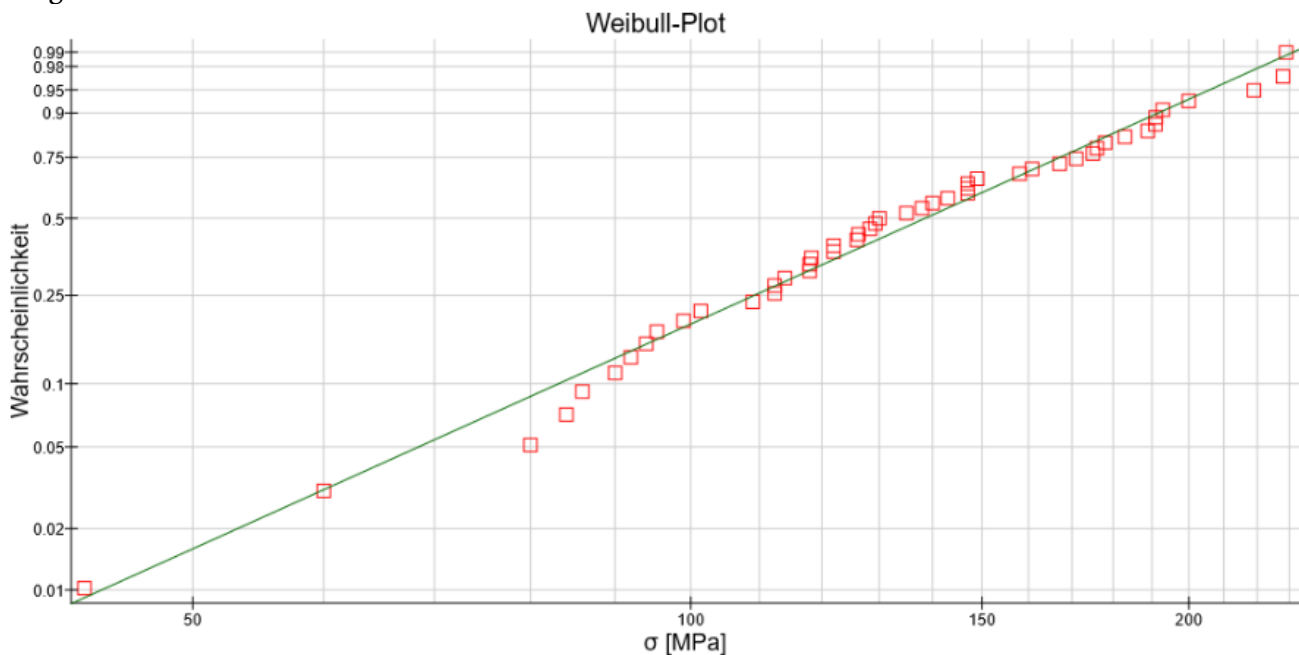


Abbildung 89: gefiltertes Audiosignal nach der Prüfung, der hohe Peak ist ein leises Klirren von Glas, die anderen Peaks stellen gesprochene Sprache mit höherer Schallenergie dar, werden aber geringer bewertet.

Nach der Auswahl des Bruchzeitpunkts wird das Ergebnis gespeichert und die Eingabemaske der Probe aufgerufen. Von hier kann in der Probenübersicht eine weitere Prüfung gestartet oder die aktuelle Prüfung wiederholt werden.

Aus dem Probenmenu kann auch eine Weibullanalyse der Prüfergebnisse durchgeführt werden. Hierfür werden die Daten an ein ebenfalls online verfügbares, auch unabhängig vom Smartphonebiegeverfahren verwendbares, Softwaretool weitergegeben. Dieses führt eine große Zahl

statistischer Auswertungen durch und stellt die Ergebnisse dar (Abbildung 90). Das Tool ist in Anhang 7.1 genauer beschrieben.



Messwerte: 49 (von 43 bis 229)

Regressionsgerade: $y = mx+b$ mit $R^2=0.984967$

Parameter: $m = k = 3.694893$, $b = -18.586862$, $T = e^{-(b/m)} = 152.997073$, $\lambda = 1/T = 0.006536$

Abbildung 90: beispielhafter Weibullplot mit Weibullparametern (weitere statistische Daten sind in der Software unterhalb des gezeigten Ausschnitts, gegebenenfalls durch Scrollen, sichtbar)

Relevante Ausschnitte aus dem Quellcode der Anwendung für das Smartphonebiegeverfahren sind in Anhang 7.7 gezeigt. Die Software ist online unter glas.timonpeters.de verfügbar.

4.5.3. Verfahrensablauf

Vor der Prüfung werden in der Software die nötigen Parameter (Glasdicke, Länge, Spannungsrate, E-Modul) sowie sonstige gegebenenfalls nützliche Daten (Probennummer und -bezeichnung, Querdehnzahl, Glasbreite) eingegeben oder aus vorherigen Proben übernommen. Wie im vorherigen Unterkapitel beschrieben, kann dann auf dem Bildschirm des Endgeräts sofern nötig die richtige Skala eingestellt sowie die Mikrofonfreigabe erteilt werden.

Anschließend (oder vorher) muss die Probe vorbereitet werden. Dazu wird diese idealerweise (nicht zwingend nötig) mit einer auf der Druckseite aufgetragenen Klebebandschicht versehen, welche das Herumfliegen von Splittern minimieren (jedoch nicht ganz verhindern, insbesondere bei hohen Spannungen) kann. Die vorbereitete Probe wird, falls Halter verwendet werden, in beiden Glashaltern eingespannt. Ein Anlegen von Sicherheitsausrüstung (Schutzbrille, Handschuhe) wird grundsätzlich bei der zerstörenden Prüfung von Glas empfohlen, dies sollte spätestens jetzt erfolgen.

Auf dem Bildschirm kann nun die Prüfung gestartet werden. Standardmäßig zählt ein Countdown 5 Sekunden herunter, in dieser Zeit sollte die Probe über der mittig auf dem Display angezeigten Linie platziert werden. Nach dem Ablauf des Countdowns beginnt die Linie sich zu krümmen, nutzerseitig erfolgt eine Anpassung der Glasgeometrie an diese Krümmung.

Nach dem Bruch des Glases sollte zeitnah die Software (durch Tippen auf den Bildschirm) angehalten werden, damit die Analyse des Audiosignals nicht durch weitere Geräusche erschwert wird. Die Software gibt einen möglichen Bruchzeitpunkt an, dieser kann jedoch auch manuell ausgewählt werden.

Nach dem Speichern der Ergebnisse der Probe erscheint wieder das Probenmenu, hier kann nun mit einer weiteren Prüfung begonnen oder das Ergebnis der Prüfsérie statistisch mit einer Weibullanalyse untersucht werden.

4.5.4. Bestimmung des Nutzereinflusses mit Sensoren

Die in Kapitel 3.1.4 untersuchten Imperfektionen müssen bei dieser Art der Glasprüfung für die Festigkeitsbestimmung berücksichtigt werden, da diese im Allgemeinen relevante Größenordnungen erreichen. Um diese zu messen, wurden eine Reihe von Messkonzepten untersucht da die Bestimmung der Position einer Glasscheibe im Raum aufgrund der Transparenz und Krümmung kompliziert sein kann. Zu diesen gehörten:

Photowiderstände

Das erste Konzept zur Messung der Abweichung von der vorgegebenen Form waren an der Glaskante befestigte Photowiderstände, welche die Helligkeit unterhalb der Glaskante messen und somit eine Bestimmung der Abweichung der Glasposition von der auf dem (hellen) Bildschirm dargestellten (schwarzen) Linie ermöglichen.

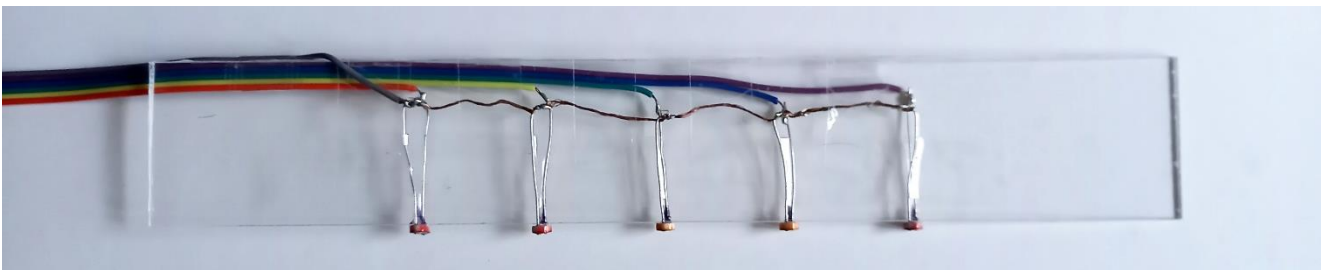


Abbildung 91: Scheibe aus PMMA mit an der Kante befestigten Photowiderständen

Dieses Konzept ließ sich zwar umsetzen, erste Tests brachten verwertbare Resultate, stieß allerdings auf drei Probleme: Eine Benutzung ist nur mit Klemmen und nicht freihändig möglich da sonst Höhenunterschiede das Signal unbrauchbar machen. Zudem ist nur eine Messung zwischen „komplett über der Linie“ und „nicht über der Linie“ möglich, darüberhinausgehende Verformung kann nicht erkannt werden. Als drittes Problem kann die Probe nicht bis zum Bruch belastet werden, ohne dass danach eine aufwändige Herstellung einer neuen Probe notwendig wird. Zusammen mit der nötigen Kontrolle der Umgebungsbeleuchtung führte dies dazu dass das Verfahren nach einigen Tests nicht mehr weiter verfolgt wurde.

Bildkorrelation

Das zweite Konzept beinhaltet die Verwendung photogrammetrischer Methoden über die Korrelation von (mindestens zwei) Kamerabildern, um die Position des Glases im Raum zu bestimmen. Dieses Verfahren wurde aber aufgrund von drei Einschränkungen nicht weiterverfolgt: die vorhandenen technischen Systeme bedürfen sehr kontrollierte Umgebungsbedingungen, insbesondere in Bezug auf Beleuchtung. Zudem ist die relative Position des Koordinatensystems zum Smartphonebildschirm schwer zu kontrollieren. Ein dritter Punkt ist die Notwendigkeit der „Sichtbarmachung“ des Glases oder der Klemmen, beispielsweise durch Aufbringung von Punktmustern. Aus diesen Gründen wurde von dem Verfahren abgesehen.

Eine einzelne Kamera vertikal über dem Display wurde auch in Betracht gezogen, dies wäre jedoch nicht anwendbar gewesen da diese Position gewöhnlich vom Kopf der prüfenden Person eingenommen wird. Eine einzelne schräg angebrachte Kamera hätte keine sinnvollen Daten geliefert.

Dehnmessstreifen

Eine Messung der Verformung mit auf das Glas aufgebrachten Dehnmessstreifen wurde sehr schnell aufgrund des nötigen Aufwands der Probenvorbereitung verworfen, auch wenn diese von allen Verfahren wahrscheinlich am genauesten gewesen wären.

Es wurden lediglich Dehnmessstreifen auf eine dicke Glasprobe (Abbildung 92) aufgebracht um das maximale „angenehme“, also in mehreren Versuchen ohne große Anstrengung aufbringbare Biegemoment zu bestimmen. Dieses wurde aus dem Mittelwert von Versuchen, bei denen die Person jeweils gebeten wurden 60 Sekunden ein „nicht zu anstrengendes“ Biegemoment in die Glasprobe einzubringen, zu 0,44 Nm (Wertebereich von 0,23 Nm bis 0,86 Nm) errechnet, was einer Spannung von 66 MPa in 1 mm dickem sowie 413 MPa in 0,4 mm dickem jeweils 40 mm breitem Glas entspricht. Es zeigt somit, dass dieses Verfahren insbesondere für Dünnglas unter 0,5 mm Dicke für die meisten Benutzer geeignet ist, ohne zu anstrengend zu werden, für einige auch bis zu 1 mm Dicke. Unter hoher Anstrengung wurden kurzzeitig bis zu 4,5 Nm Biegemoment mit dem Aufbau gemessen, Momente in dieser Größenordnung sind aber nicht zu empfehlen, da bei zu hoher Anstrengung sowohl die Präzision als auch Motivation der Nutzenden sinkt.

Die in diesem Versuchsaufbau gemessenen Werte für das Biegemoment passen auch zu den Erfahrungen aus den Versuchen an 0,4 mm dickem und 40 mm breitem Glas mit in der Versuchsdurchführung unerfahrenen Personen, während der Prüfung merkte eine Person bei Spannungen in der Größenordnung von 200 MPa an „jetzt wird es anstrengend“, was etwa 0,21 Nm entspricht und somit das untere Ende der gemessenen angenehmen Biegemomente reflektiert. Für die restlichen Versuchsteilnehmenden war die Prüfung mehrerer Proben mit dieser Glasdicke auf Nachfrage nicht merklich physisch anstrengend. Für sämtliche Versuche wurde eine Klemmenlänge von 40 mm und eine Dicke von 20 mm gewählt, diese Abmessungen können bei Bedarf erhöht werden um die Grenzen zu verschieben.

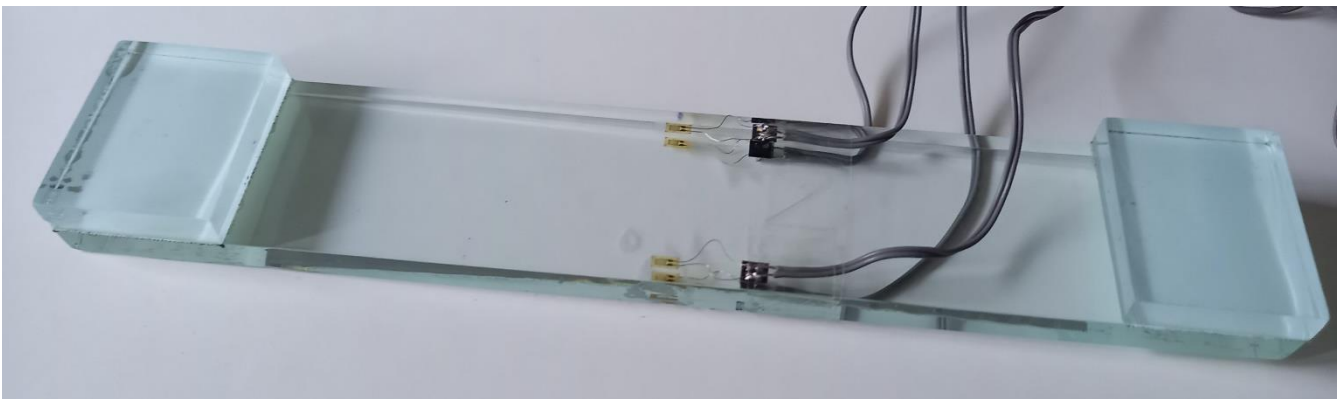


Abbildung 92: 10 mm dicke Glasprobe mit vier Dehnmessstreifen als Wheatstonebrücke zur Bestimmung des maximalen angenehm aufbringbaren Biegemoments; an beiden Enden sind an die Glasklemmen angelehnte Verdickungen als „Griffbereiche“ aufgeklebt, welche die Geometrie der Klemmen abbilden

Laserreflektor

Das dritte untersuchte Verfahren ist der in Kapitel 4.6.2 vorgestellte Laserreflektor. Durch die Bestimmung der Position von Reflektionen an der Glasoberfläche auf einem Schirm lassen sich bei einer ausreichenden Zahl von Laserpunkten und bekannten Randbedingungen die Verformungen des Glases bestimmen. Es ist zudem keine besondere Bearbeitung der Proben und Kontrolle der Umgebungsbedingungen notwendig. Allerdings trat auch hier eine Schwierigkeit auf, welche dafür sorgte dass dieses Verfahren im Vergleich zu dem als nächstes genannten verworfen wurde: die messbare Verdrehung ist begrenzt da die Reflektionen wieder auf den Messschirm treffen müssen. Auch ist die Auswertung aufgrund der nötigen Bildanalyse aufwändiger (siehe Kapitel 4.6.2).

Gyroskop- und Beschleunigungssensoren

Da das Glas nur an beiden Enden gehalten und von dort manipuliert wird ist eine Bestimmung der Biegeform des Glases theoretisch möglich, sofern die Position und Verdrehung der Glasenden im Raum errechnet werden kann. Daher verfolgt dieses Verfahren den Ansatz diese Werte direkt zu messen. Hierfür werden an den beiden Klemmen kombinierte Beschleunigungs- und Gyroskopsensoren, welche gewöhnlich für Drohnen eingesetzt werden, verbaut (Sensortyp: MPU6050) (Abbildung 94).

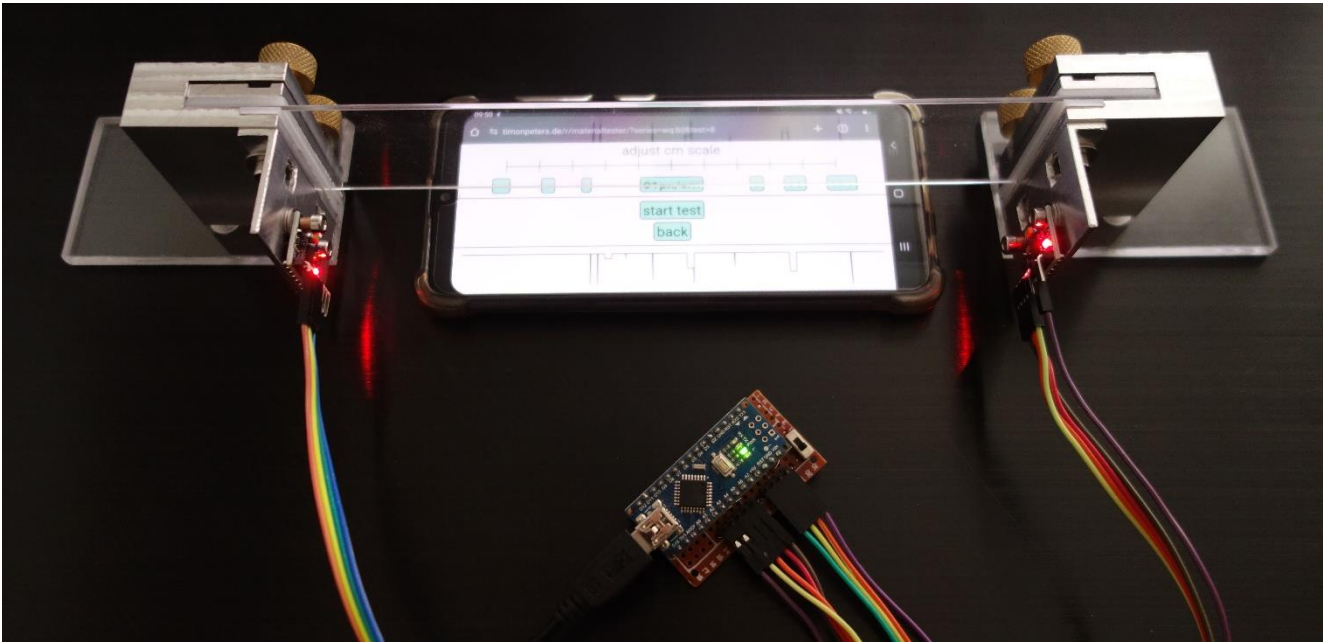


Abbildung 93: Klemmen mit angebrachten Beschleunigungs- und Gyroskopsensoren und Arduino Nano zur Datenweitergabe an den PC auf dem ein Python-Script die serielle Kommunikation übernimmt und die Daten abspeichert

Die Signale werden in diesem Fall mit einer Frequenz von 50 Hz ausgelesen, über eine Arduino Nano-Mikroprozessor als serielle Daten an ein Python-Script auf dem PC weitergegeben und bei der Auswertung in Excel die absolute Position durch Integration der Geschwindigkeitssignale (Beschleunigung und Drehgeschwindigkeit) von der Startposition aus errechnet. Anschließend müssen diese Signale, um verwertbar zu sein, korrigiert werden. Hierbei müssen zwei Korrekturen erfolgen, da Signale dieser Art gewöhnlich einen sogenannten „Drift“ aufweisen. Für ein Gyroskop- oder Beschleunigungssensor bedeutet dieser Drift das „Verlieren“ des absoluten Bezugs zum Raum, beispielsweise kann ein Gyroskopsensor nach einiger Zeit eine falsche räumliche Orientierung und eine konstante Rotation ausgeben, obwohl er stillsteht (Abbildung 94).

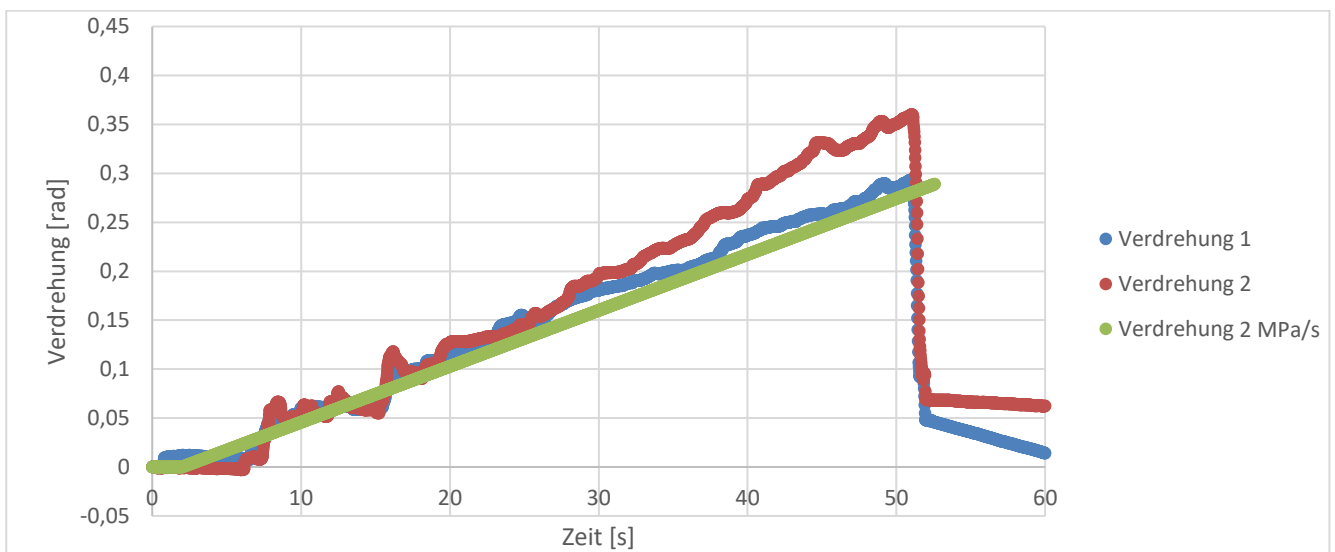


Abbildung 94: Verdrehungssignale an beiden Enden der Probe ohne Korrektur des Gyroskopdrifts im Vergleich zum vorgegebenen Signal des Smartphones, nach der Messung wurden die Klemmen wieder in Ausgangsposition gebracht. Beide Signale „enden“ nicht bei der Ausgangsverdrehung, Verdrehung 1 zeigt zudem eine starke scheinbare konstante Drehbewegung.

Hierbei gibt es zwei Formen des Drifts die korrigiert werden müssen, den konstanten und den zeit- und bewegungsabhängigen Drift.

Der konstante Drift ist der Wert, den der Sensor jeweils in Ruheposition anzeigt. Dieser kann sehr leicht kompensiert werden, einige Sekunden ohne Berührung der Klemmen reichen aus um einen stabilen Mittelwert des konstanten Drifts zu errechnen, dieser kann dann von allen Messwerten abgezogen werden.

Der zeit- und bewegungsabhängige Drift des Signals ergibt sich einerseits aus der Ungenauigkeit des Sensors selbst (hauptsächlich als sich aufbauende scheinbare Rotationsgeschwindigkeit), andererseits aus der Tatsache dass die Bestimmung der Position durch Integration von diskreten Werten (Zeitschritt multipliziert mit dem gemessenen Dreh/Beschleunigungswert) erfolgt (als scheinbare absolute Rotation). Somit entsteht bei jeder Bewegung ein kleiner Fehler, die Fehler summieren sich mit der Zeit auf (Abbildung 94). Ein interner regelbarer Tiefpassfilter im Sensor hilft zwar den Einfluss von hochfrequenten Vibrationen zu minimieren (bei Drohnen beispielsweise erzeugt durch die Motoren), trotzdem ist anschließend eine mathematische Korrektur notwendig. Es müssen für jedes Signal zwei Werte errechnet werden, den Unterschied zum absoluten Koordinatensystem sowie die scheinbare Bewegung in Ruhelage. Dafür werden die Klemmen vor und nach der Prüfung in eine identische Position gebracht und die Differenz errechnet. Die entstandenen Fehler werden zeitlich nicht als konstant zunehmend verrechnet, sondern proportional zur Wurzel des Betrags der einzelnen Bewegung verteilt (je größer die Bewegung, desto größer die Driftänderung), der Drift in einem stillstehenden Sensor wurde als vernachlässigbar klein bestimmt (ca. 1% im Vergleich zu einem während gewöhnlicher Glasprüfung bewegten Sensor, bezogen auf die selbe Zeitdauer).

Die erhaltenen Daten werden nach den Gesetzen der Geometrie in räumliche Koordinaten umgerechnet, da nur die Verformung des Glases bestimmt werden muss reicht eine relative Position der beiden Klemmen zueinander. Daraus wird die konstante Verdrehung und die imperfektionsbedingte Abweichung davon errechnet, die Spannungen ergeben sich nach den in Kapitel 3.1.1 und 3.1.4 gezeigten Formeln.

Da insbesondere die zusätzliche Spannung während des Bruches bestimmt werden soll und die Klemmen direkt danach in eine kontrollierte Position gebracht werden ist die errechnete zusätzliche Spannung insbesondere zu diesem Zeitpunkt sehr verlässlich da die Driftkorrektur hier genauer ist als beispielsweise nach der Hälfte der Prüfzeit, wenn der maximale zeitliche Abstand zu kontrollierter Anfangs- und Endposition herrscht.

Anwendungsgrenzen ergeben sich in diesem Verfahren hauptsächlich durch die Tatsache, dass die Sensoren an den Klemmen verschraubt werden, eine komplett freihändige Prüfung ist nicht möglich. Angenähert werden kann diese aber durch Halten der Klemmen in der Luft ohne Kontakt zum Untergrund, hierbei sind auch Effekte aus Verdrehung messbar. Alternativ müssen die Sensoren für jede Probe neu mit der Glasoberfläche verbunden werden.

4.5.5. Prüfergebnisse

Als wichtigstes Ergebnis kann festgehalten werden, dass die nutzerbedingten Imperfektionen als näherungsweise absoluter und nicht als relativer Wert gesehen werden können. Sie sind insbesondere zu Beginn der Prüfung, wenn die versuchsdurchführende Person sich jedes Mal neu an den Versuch „gewöhnen“ und gegebenenfalls den Griff der Klemmen „anpassen“ muss, groß und nehmen üblicherweise mit der Zeit sogar ab. Bei sehr großen Verdrehungen (über ungefähr 60°) nehmen sie absolut gesehen wieder leicht zu, insbesondere da sich eine leichte Spannungserhöhung in Plattenmitte im Vergleich zum Bereich der Klemmen einstellt, relativ zur Spannung nehmen sie aber immer noch deutlich ab (Abbildung 95).

Dies hat zur Folge, dass sich das Verfahren umso mehr eignet, je größer die die Verformung des Glases werden, da die Imperfektionen relativ gesehen einen geringeren Einfluss auf die ermittelten Bruchspannungen haben.

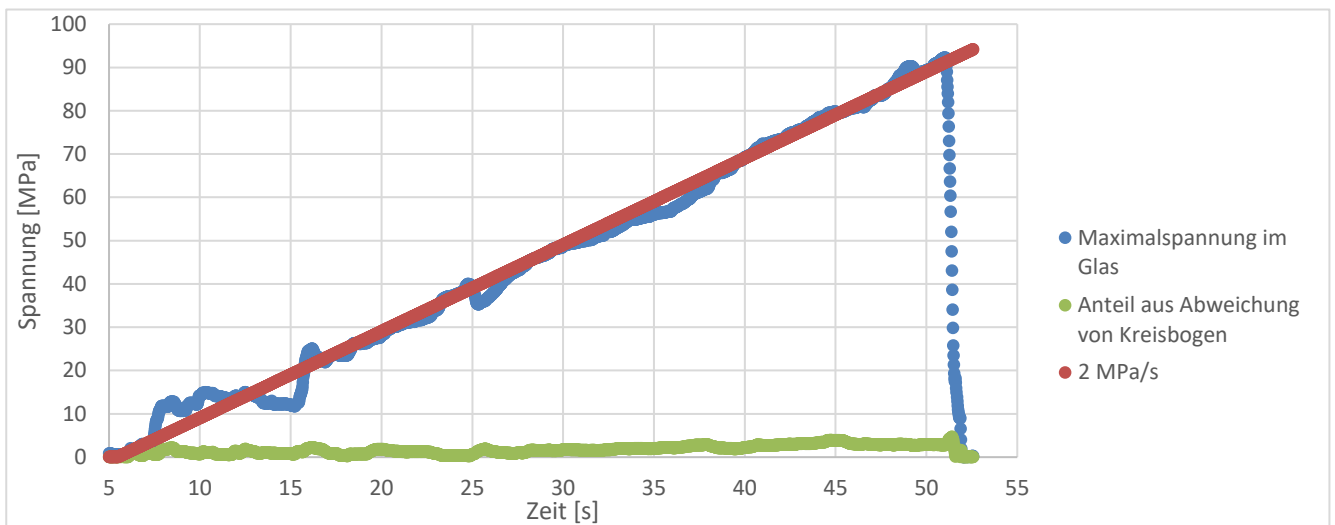


Abbildung 95: Maximalspannungen im Glas, errechnet aus mit Sensoren ermittelter Imperfektion und Krümmung (korrigierte Daten aus der vorherigen Abbildung), während eines typischen Biegevorgangs im Vergleich zur vorgegebenen Spannung (mit Versuchsdurchführung durch den Autor)

Als zweites Ergebnis kann gezeigt werden, dass die Ergebnisse aus der manuellen Prüfung mit dem Smartphoneverfahren, zumindest bei ausreichender Fähigkeit der Anwender und technischer Voraussetzung durch Klemmen die Krümmung händisch präzise zu erzeugen, nahe genug an den Ergebnissen beispielsweise der Biegeprüfmaschine sind um vergleichbar zu sein.

Um dies zu überprüfen, wurden vier Serien identischen nicht vorgespannten Glases (Glasdicke 0,4 mm, Prüflänge 200 mm) mit je 30 Proben in beiden Verfahren, also im Smartphonebiegeverfahren (auf einem Samsung Galaxy A41) und mit der Biegeprüfmaschine, geprüft.

Zuerst erfolgte beim Smartphoneverfahren eine Versuchsdurchführung durch den Autor. Die Ergebnisse sind mit Maschine und händisch statistisch signifikant ($R^2 > 95\%$) und weichen zudem nicht statistisch signifikant voneinander ab, die Weibullgeraden liegen jeweils innerhalb des 95%-Konfidenzintervalls (nach Studentischer T-Verteilung, Anhang 7.1) der anderen Serie (Abbildung 96).

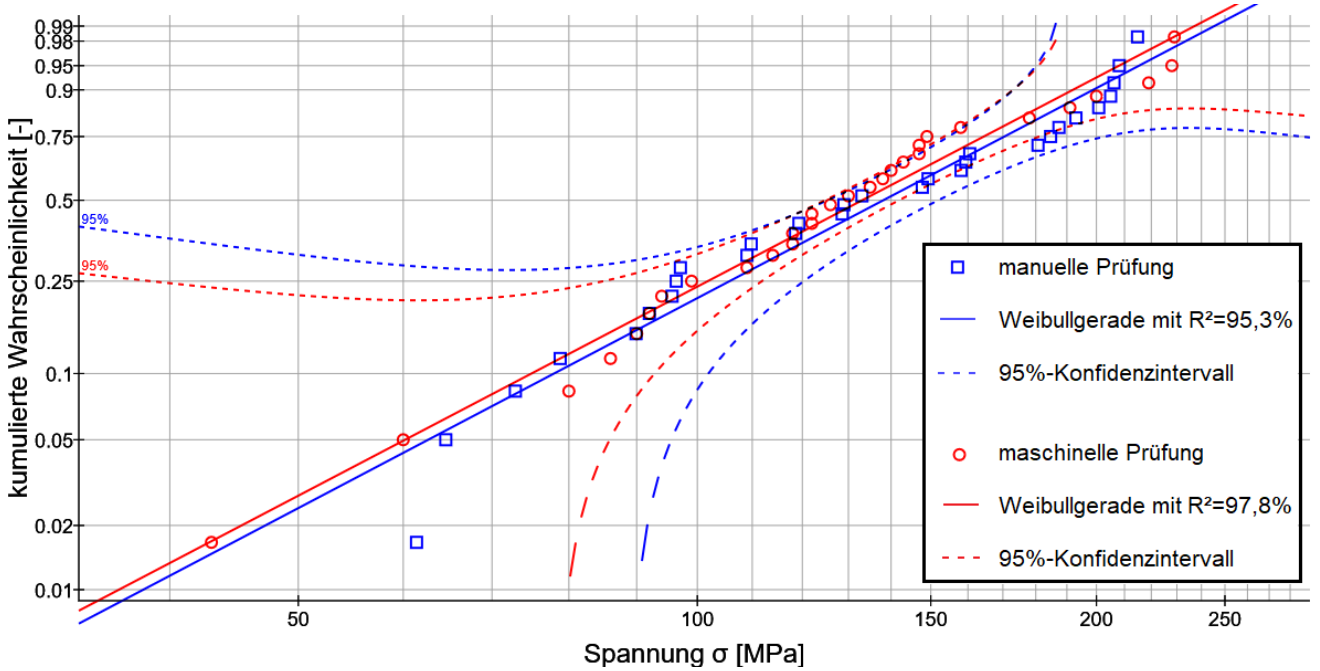


Abbildung 96: kombinierter Weibullplot aus einer manuell geprüften und einer maschinell geprüften Serie von je 30 Proben desselben Glases (0,4 mm Glasdicke, 40 mm Breite, 200 mm Prüflänge) mit jeweiligem 95%-Konfidenzintervall der Prüferien

Anzumerken ist, dass vor diesem Versuch ein signifikanter Unterschied erwartet wurde, dass dies nicht der Fall ist wurde sehr überrascht zur Kenntnis genommen. Um einen „Extremfall“ im Gegensatz zur langjährigen Erfahrung im Umgang mit Dünnglas des Autors zu produzieren wurde daher eine weitere Prüferie mit 6 Personen aus dem Bauingenieurwesen durchgeführt, die jeweils ohne vorherige Erfahrung fünf Proben in diesem Verfahren prüften. Das Ergebnis wurde nicht statistisch signifikant ($R^2=86,9\%$), die Messwerte streuten zu ungleich. Es zeigte sich trotzdem dass das Ergebnis mit den ersten beiden Serien vergleichbar ist, die Weibullkurven liegen jeweils innerhalb der 95%-Konfidenzintervalle der beiden anderen Serien (Abbildung 97). Auch wenn die Abweichungen und Unsicherheiten größer sind kann somit ebenfalls kein signifikanter Unterschied bestätigt werden.

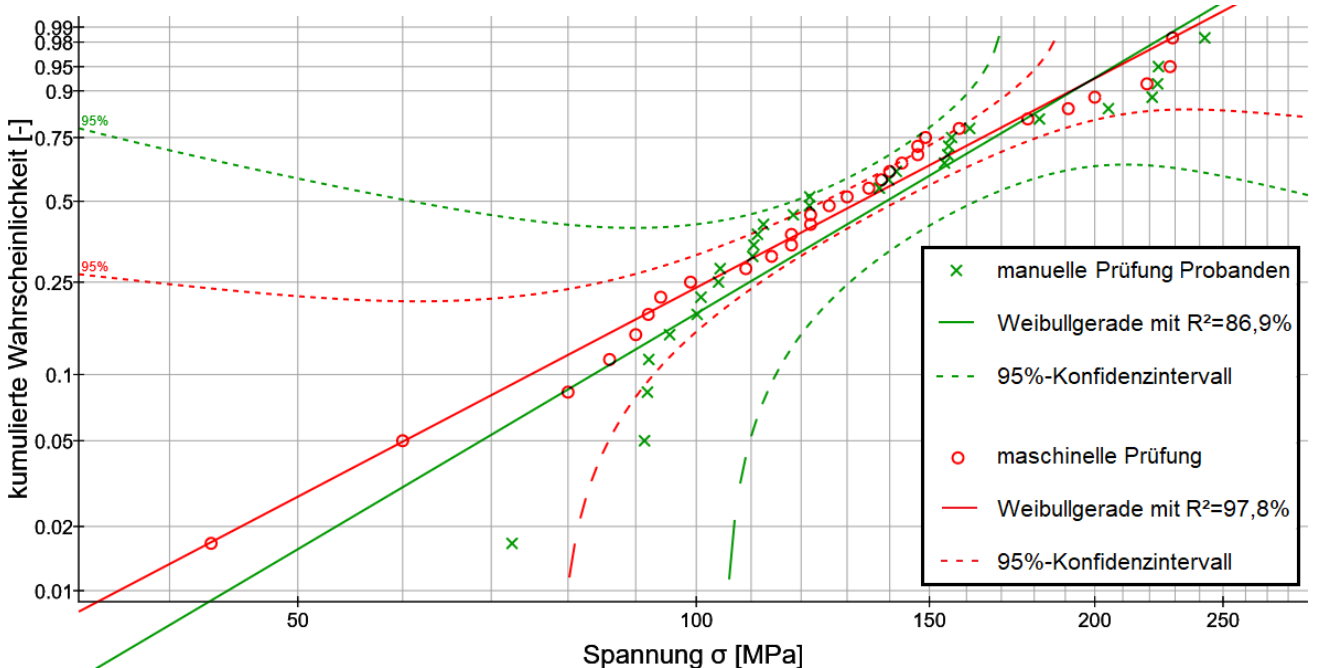


Abbildung 97: Vergleich von maschineller Prüfung und manueller Prüfung durch Probanden

Als weiterer „Extremfall“ wurde die Glasprüfung (durch den Autor) so „mobil“ wie möglich vorgenommen, indem das Glas ohne Klemmen mit den Händen gehalten wurde, hierbei zeigte sich dass das Ergebnis deutlich abweicht, die gemessene Festigkeit ist signifikant geringer (46,1 MPa statt 60,2 MPa) und die Weibullkurven verlassen jeweils das 95%-Konfidenzintervalle der anderen Serien (Abbildung 98).

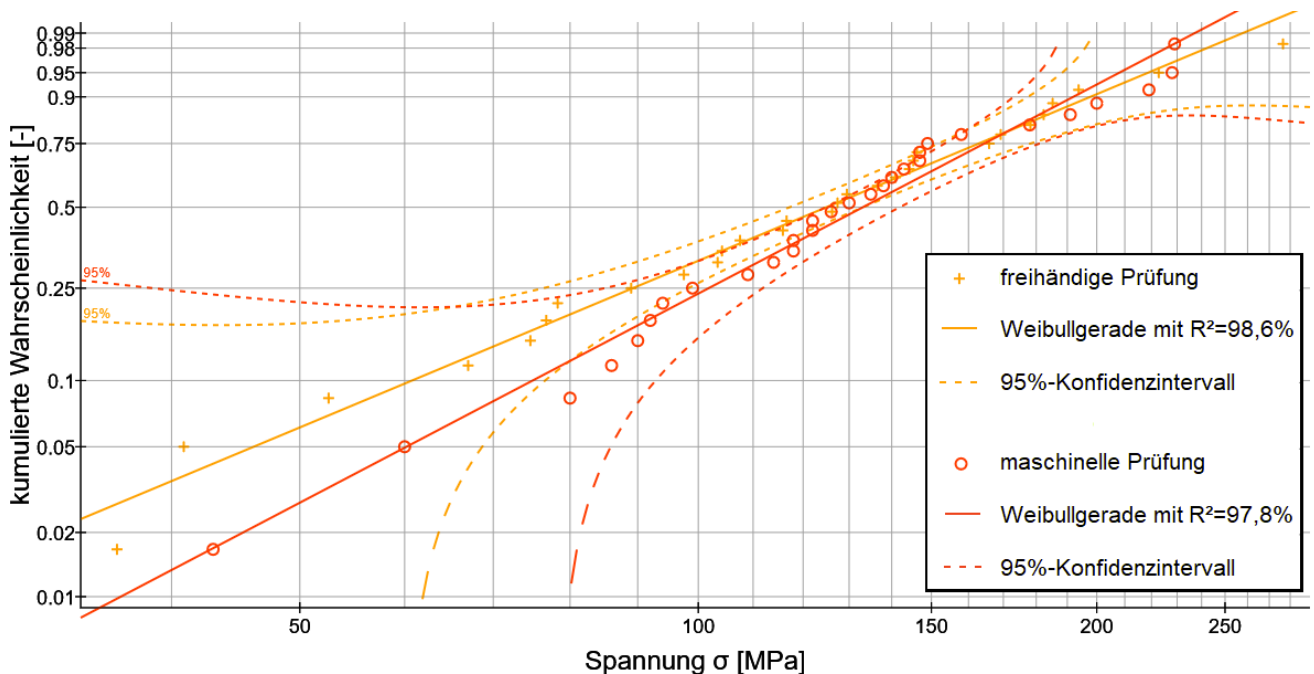


Abbildung 98: Vergleich von maschineller Prüfung und freihändiger Prüfung durch den Autor

Zusammenfassend sind die Ergebnisse stark von der Erfahrung der durchführenden Person bei Dünnglasprüfung sowie den technischen Voraussetzungen das Glas präzise zu führen abhängig. Im Allgemeinen kann der Nutzereinfluss jedoch als geringer als ursprünglich angenommen gesehen werden. Dies ist möglicherweise auch darauf zurückzuführen, dass die meisten Nutzer der Bewegung der Linie auf dem Display „folgen“ anstatt ihr „vorauszuweichen“, das bedeutet dass die Krümmung des Glases der Krümmung der Linie immer wieder angepasst wird wenn diese stärker als das Glas gekrümmt scheint. Dadurch ist der gleichmäßige Anteil der Krümmung durchschnittlich niedriger als von der Linie auf dem Display vorgegeben. Da Glas ein zeitabhängiges Festigkeitsverhalten hat beeinflusst dies die Festigkeit umgekehrt zu den Spannungssteigerungen aus Imperfektionen in der Führung, beide Effekte heben sich zumindest teilweise auf.

Da bei der Prüfung mit Klemme diese auf einer Unterlage „ruht“ wurde beobachtet, dass Nutzer eher dazu verleitet sind der Linie zu „folgen“, somit ist die durchschnittliche Spannung im Glas (wie auch bei der Validierung mit Sensoren festgestellt) geringer, dieser Effekt überwiegt gegenüber den Imperfektionen. Es wird daher eine höhere Festigkeit als bei der maschinellen Prüfung gemessen (Abbildung 99).

Bei der freihändigen Prüfung kann das Glas nicht „ruhen“, daher sind die Spannungsverringernungen aus dem „Folgen“ geringer. Zudem nehmen die Imperfektionen aufgrund der fehlenden Klemmen zu, dieser Effekt überwiegt nun, es werden daher geringere Festigkeiten gemessen (Abbildung 99).

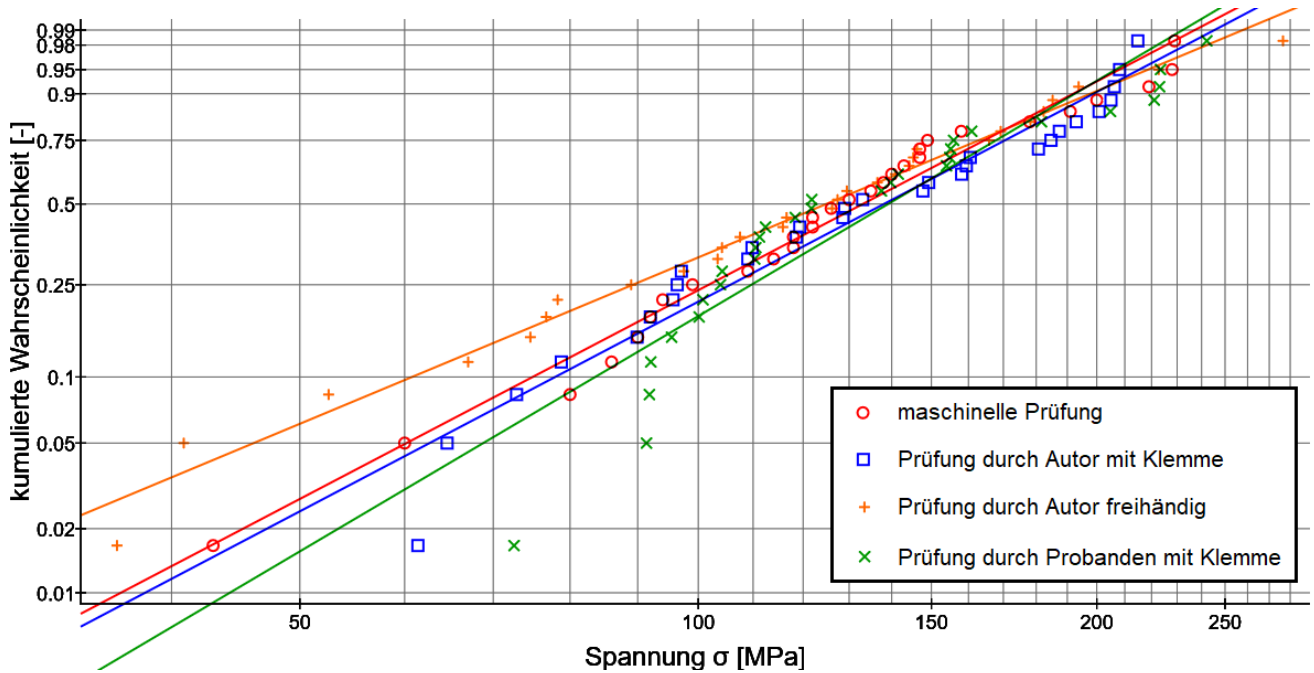


Abbildung 99: Vergleich der vier Prüfserien, mit Weibullgeraden

Genau wie bei der Biegeprüfmaschine kann bei diesem Verfahren zudem festgestellt werden, dass Brüche nahe der Klemmen nicht signifikant häufiger als in anderen Bereichen des Glases werden, hier spielt aber auch wieder Nutzererfahrung und das Vorhandensein von Klemmen eine Rolle. Bei der freihändigen Prüfung brach eine von 30 Proben durch das „Eindrücken“ des Daumens in die Glasoberfläche, hier ist der Einfluss möglicherweise größer.

Für eine exakte quantitative Bestimmung des Nutzereinflusses sind eine deutlich größere Anzahl an Messungen und Versuchsserien als hier gezeigt notwendig. Von einer Durchführung von mehr Prüfungen wurde im Rahmen dieser Arbeit abgesehen, mehrere hundert oder sogar tausende Proben hätten durch unterschiedliche Versuchsdurchführende untersucht werden müssen um eine verlässliche Aussage zu bekommen, die genaue Zahl ist schwer abzusehen. Aus diesem Grund wird die für die Durchführung des Verfahrens notwendige Software im Internet frei zur Verfügung gestellt (glas.timonpeters.de). In der Software integriert ist die Möglichkeit durch Anwahl einer Menüoption und Eingabe zusätzlicher Informationen die Ergebnisse für die Forschung bereitzustellen, somit sind in Zukunft größere Datenmengen zu erwarten.

Möchte man aus den bisher gesammelten Versuchsdaten mögliche Sicherheitsbeiwerte für die manuelle Prüfung ableiten, bewegt man sich außerhalb des Bereiches der „zuverlässigen“ Statistik. Trotzdem kann die Größenordnung abgeschätzt werden: nimmt man an dass die manuell gemessene charakteristische Glasfestigkeit um eine Standardabweichung von einem maschinell gemessenen Ergebnis abweicht, und möchte man nun als Sicherheitsbeiwert die dreifache Standardabweichung angeben, ergibt sich, unter Verwendung von Glasklemmen, für ungeübte Versuchsdurchführende ein Beiwert von $3 \cdot (1 - (60,2 \text{ MPa} / 68,8 \text{ MPa})) = 37,5\%$ sowie für den Autor $3 \cdot (1 - (60,2 \text{ MPa} / 62,7 \text{ MPa})) = 12\%$. Bei einer größeren Datenmenge würden diese Sicherheitsbeiwerte eventuell kleiner angesetzt werden können da weniger statistische Unsicherheit besteht.

Für die freihändige Prüfung ergäbe sich nach dieser Berechnungsmethode ein Sicherheitsbeiwert nahe 100%, diese wird ohne genauere Untersuchungen nicht empfohlen.

Trotz der Unsicherheit lässt sich aus den gewonnenen Daten eine Brauchbarkeit des Versuchsaufbaus erahnen, insbesondere für schnelle Produktkontrollen. Im Gegensatz zu anderen Verfahren ist der technische Aufwand und die Geschwindigkeit der Versuchsdurchführung deutlich komfortabler.

4.6. Sonstige Prüfverfahren

Nachfolgend werden weitere vorgeschlagene Prüfverfahren gezeigt. Einige dieser Verfahren wurden, da sie Abänderungen zuvor gezeigter oder sonstig vorhandener, bereits vertieft untersuchter Verfahren, darstellen, nicht weiter als gezeigt ausgearbeitet. Bei anderen Verfahren wurde eine Anwendbarkeit als zu beschränkt im Vergleich zu anderen Ansätzen bewertet (insbesondere beim Laserreflektor) oder eine Umsetzung hätte den Umfang der Arbeit unverhältnismäßig erhöht (beispielsweise bei der Vibrationsprüfung).

4.6.1. Papierbasiertes Verfahren

Analog zum Smartphoneprüfverfahren (Kapitel 4.5) ist es auch möglich die händische Glasprüfung ohne elektronische Geräte durchzuführen. Hierbei wird anstatt auf einem Display die nötige Krümmung auf Papier abgebildet, die Probe wird Schritt für Schritt von einer zur nächsten Linie bewegt, die Krümmung der Linien nimmt stetig zu. Es wurde ein Softwaretool entworfen (Quellcode in Anhang 7.8) das unter Eingabe der Glasdicke, Länge, Spannungsrate, E-Modul, Papierabmessungen, Maximalkrümmung und Feinheit der Lastschritte entsprechende Druckvorlagen generiert. Als Zeitgeber kann beispielsweise eine tickende Uhr dienen.

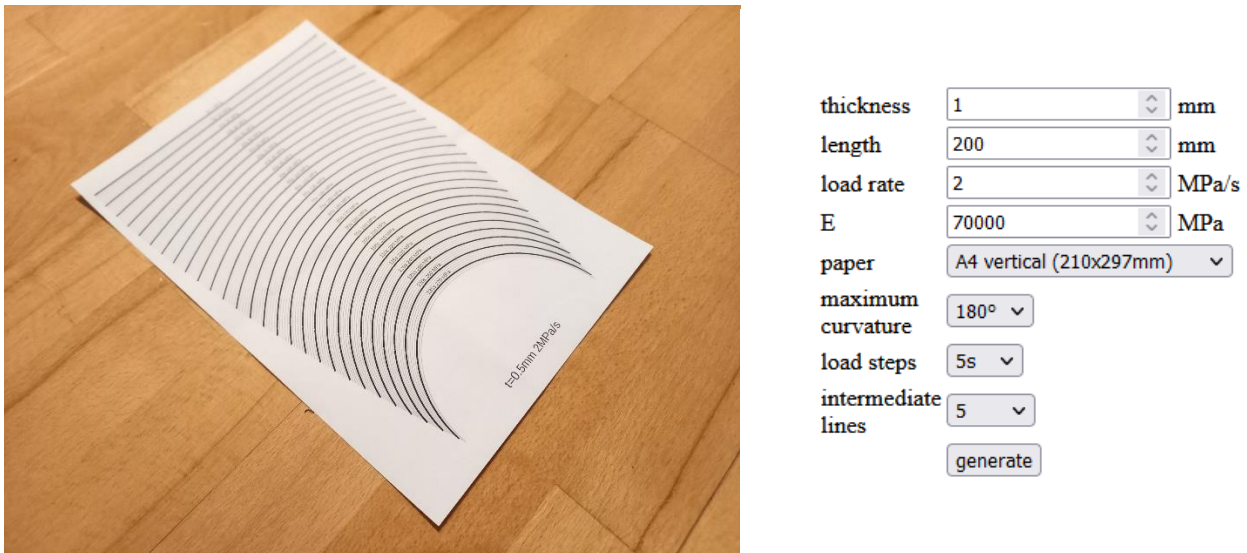


Abbildung 100: links: generiertes Testpapier mit gekrümmten Linien, die dicken Linien markieren je 10 Sekunden Abstand, die dünnen je 2 Sekunden; rechts: Software-Eingabemaske

Es ist davon auszugehen, dass der Einfluss von Imperfektionen ähnlich hoch wie bei dem zuvor analysierten Smartphoneverfahren ist. Die Feststellung der Bruchspannung ist der anwendenden Person überlassen, hier könnten zusätzliche kleine Imperfektionen auftreten, die aber insbesondere bei hohen Bruchspannungen als nicht sonderlich hoch zu bewerten sind.

Wie das später gezeigte Steckblockverfahren lässt sich die Vorlage für dieses Verfahren auch mit Zirkel und Geodreieck händisch zeichnen.

4.6.2. Laserreflektor

Eine weitere Variante der manuellen Prüfung stellt die Messung von Laserreflexionen auf der Glasoberfläche dar. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau entworfen, bei dem das Glas in definiertem Abstand von zu Identifikationszwecken zueinander verdrehten Lasern mit länglichem Strahl an mindestens drei Positionen angestrahlt und die Reflektion auf einem Schirm mit Hilfe einer Kamera gemessen wird (Abbildung 101, Abbildung 102, Abbildung 103). Aus der Position der Reflektion kann

die Krümmung und Schiefstellung des Glases gemessen werden. Sinnvoll ist hier die Kombination mit dem Smartphonebiegeverfahren zur Vorgabe der Krümmung.

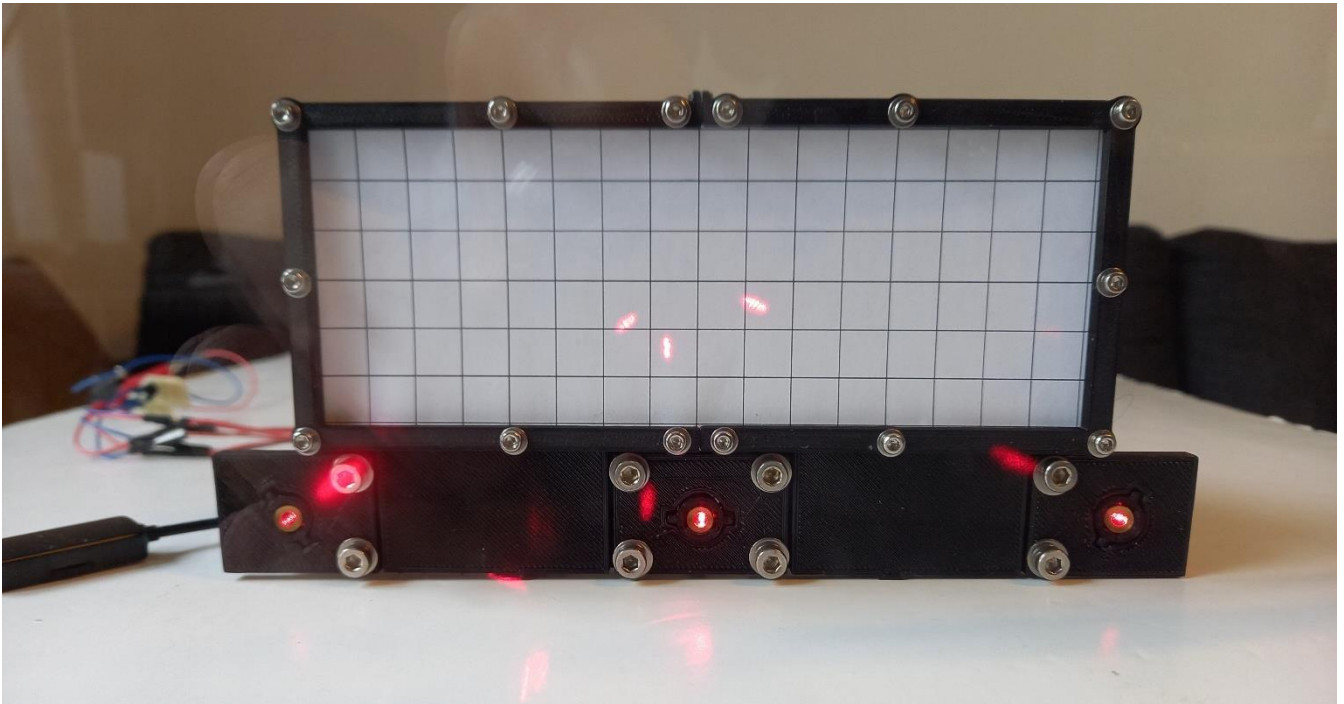


Abbildung 101: Durch den Probekörper aufgenommener Laserreflektor mit Reflektion von drei zu Identifikationszwecken zueinander verdrehten länglichen Lasern auf dem Schirm

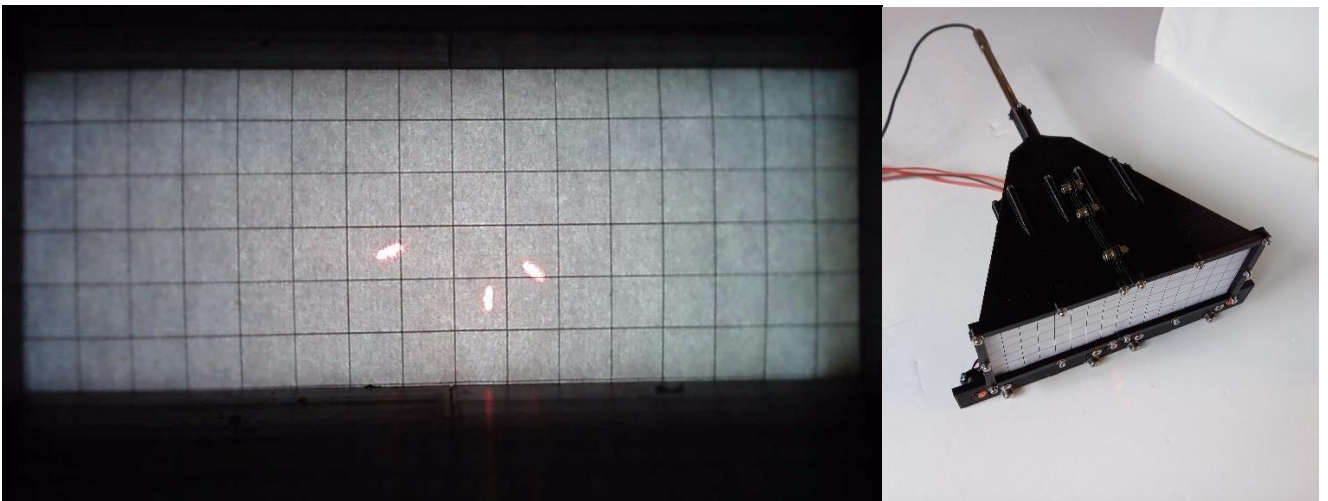


Abbildung 102: links: Kamerabild mit Raster zur automatisierten Auswertung; rechts: Reflektor von hinten mit eingesteckter USB-Kamera

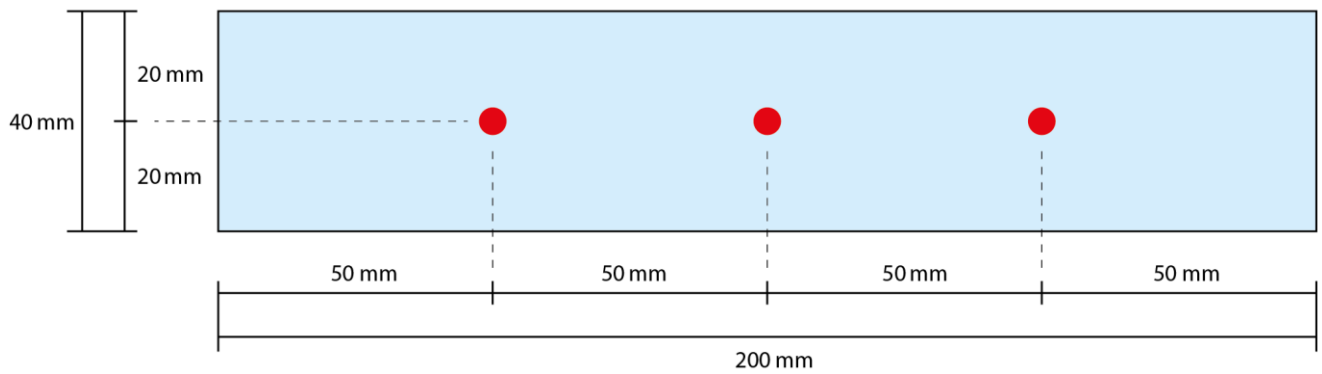


Abbildung 103: Abstand der Beleuchtungspunkte auf der Probe in Ausgangsposition

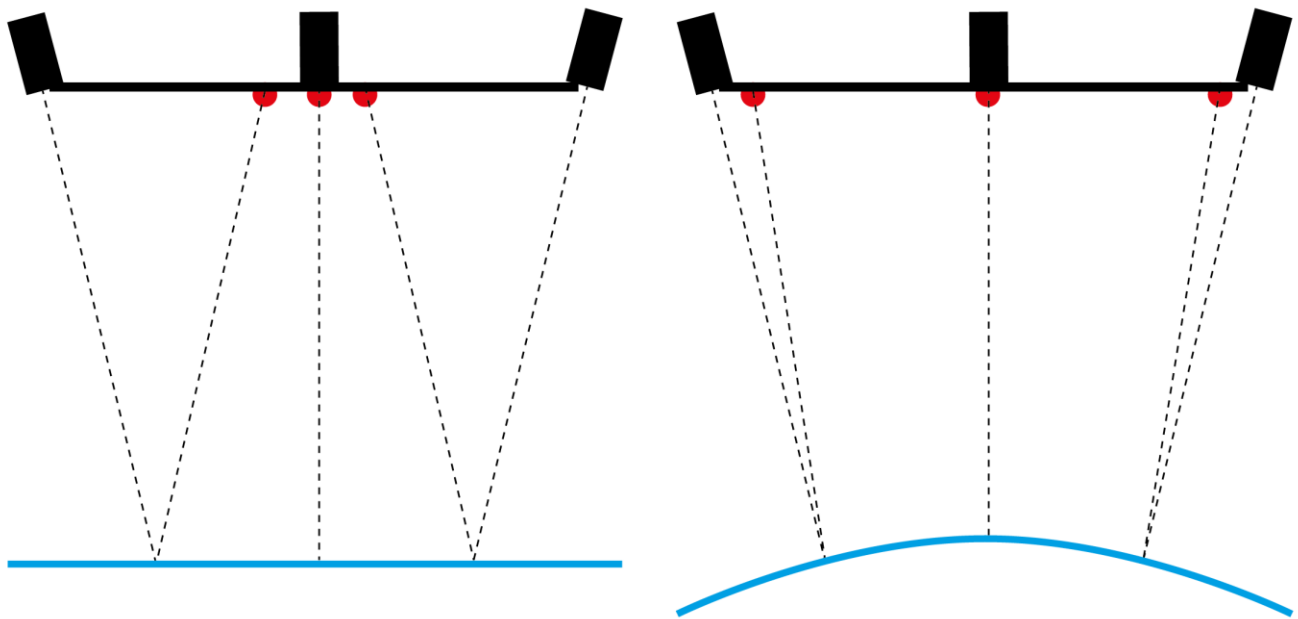


Abbildung 104: Prinzip der Reflektion

Die jeweilige Stellung der Glasoberfläche errechnet sich gemäß dem Reflektionsgesetz (Einfallswinkel = Reflektionswinkel), wird daher nicht gesondert aufgeführt (Abbildung 104). Bei der Auswertung (entweder zeitversetzt oder in Echtzeit) kann Software wie das Rhino3D-Plugin Grasshopper helfen, welche geometrische Berechnungen übernehmen kann, ohne dass diese durch aufwändige Programmierung implementiert werden muss.

Imperfektionen errechnen sich durch die ungleichmäßige Verschiebung der Reflektionspunkte auf dem Schirm, die Auswirkungen sind analog zur Smartphoneprüfung, für die dieses Verfahren beispielsweise auch zur Validierung eingesetzt werden kann. Durch eine vierten Laser kann die Anzahl der gemessenen Imperfektionen erhöht werden, drei Laser haben sich jedoch als ausreichend erwiesen da der Abstand vom Schirm als nahezu konstant und somit aus Tiefenunterschieden entstehende Imperfektionen vernachlässigt werden können.

Die Sicherheit der Laser wurde dadurch gegeben dass, wie beispielsweise in Präsentationspointern, nur Laser der Klasse II verbaut wurden, für das Verfahren ist dies selbst in hellem Tageslicht ausreichend während für die Versuchsdurchführenden keine Sicherheitsmaßnahmen nötig sind.

Anwendungsgrenzen ergeben sich bei der möglichen Krümmung des Glases, da die Reflektionen wieder auf den Schirm treffen müssen. Ein breiterer Schirm oder ein anderer Einfallswinkel der Laser würden diese zwar erhöhen, trotzdem sind die möglichen Krümmungen verglichen mit anderen Verfahren sehr gering.

In ersten Tests wurde das Verfahren mit Hilfe eines Python-Skripts mit der OpenCV-Bibliothek (Open Computer Vision, opencv.org), welche das Kamerasignal interpretiert und die Position der Lichtpunkte errechnet, implementiert und anschließend in Excel ausgewertet. Eine grundsätzliche Nutzbarkeit wurde damit bestätigt. Da ein anderes Verfahren zur Messung der Verformung beim Smartphonebiegeverfahren zur Anwendung kam, wurde auf eine weitere Entwicklung sowie die exakte Kalibrierung und Auswertung der Genauigkeit des Verfahrens verzichtet. Die theoretische Genauigkeit der Positionsmessung des Glases kann als sehr hoch eingeschätzt werden, da das zugrunde liegende physikalische Verfahren der Reflektion kaum fehleranfällig ist.

4.6.3. Analoge Biegeprüfmaschine

Auch die Biegeprüfmaschine (Kapitel 4.4) kann ohne elektronische Komponenten betrieben werden. Es wurde ein Konzept entworfen bei dem die Maschine über eine durch einen Rastmechanismus „tickende“ Handkurbel, welche somit eine Steuerung der Spannungsrate ermöglicht, angetrieben wird. Alle Bewegungen werden über Zahnräder übertragen, je nach Glasdicke ist lediglich die taktgebende „Tickscheibe“ zu wechseln. Die Horizontalbewegung der beweglichen Klemmbacke wird über eine speziell generierte Walze gesteuert, diese koordiniert Horizontalbewegung und Lagerverdrehung.

4.6.4. Steckblockverfahren

Ähnlich dem Verfahren von Jotz [116] wird bei dieser Art der Prüfung das Glas manuell stufenweise jeweils in eine definierte Krümmung gebracht, daher ist es auch beispielsweise für Produktionskontrollen im Werk besonders geeignet. Hierfür wird das Glas fester Länge an beiden Enden in einen ausreichend schweren, geschlitzten (Metall-)block, mit im Schlitzbereich weichen und möglichst rutschhemmenden Oberflächen (z.B. mit Polymerschicht), gesteckt und die Probe in diesem Zustand auf einem mit Aussparungen für unterschiedliche Krümmungen vorgesehenen Ständer abgelegt, der Krümmungsradius wird so entsprechend erhöht (Abbildung 105). Das Eigengewicht der (Metall-)blöcke erzeugt (abhängig der Größe) in dünnem Glas ausreichend Biegemoment um beim händischen Ablegen und Gleiten in die vorgegebene Position für eine möglichst konstante Krümmung des Probekörpers zu sorgen. Anders als bei Jotz werden keine nutzerbedingten Normalkräfte oder lokale Biegespannungen an den Enden des Probekörpers erzeugt. Zudem kann der Probekörper über längere Zeit kontrolliert gehalten werden, um die Effekte von zeitabhängigem Risswachstum auf die Festigkeit einzubeziehen. Als weiterer Vorteil ist die feste, gegebenenfalls normgerechte (200 mm) Prüflänge ähnlich der Biegeprüfmaschine (Kapitel 4.4) oder dem Smartphoneverfahren (Kapitel 4.5) zu nennen.

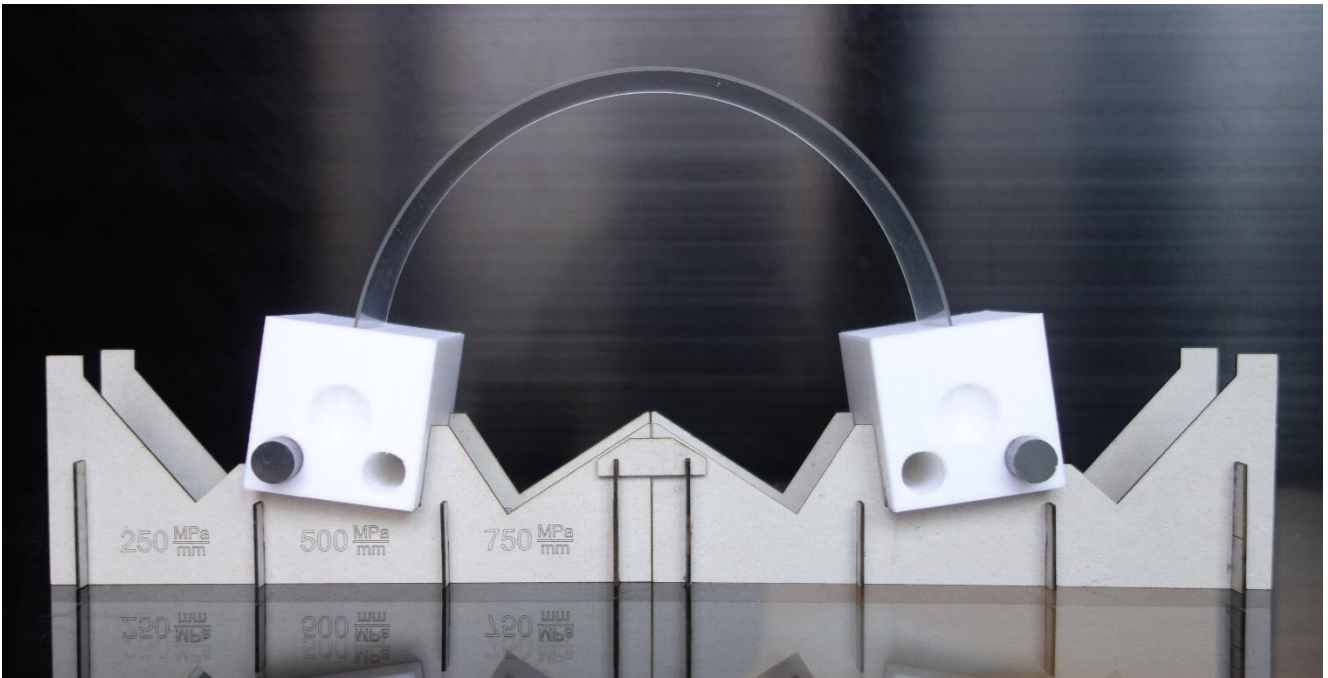


Abbildung 105: Beispiel für das Steckblockverfahren mit normgerechter Prüflänge von 200 mm und drei Spannungsstufen in einem Ständer (250, 500 und 750 MPa je mm Dicke); die Steckblöcke sind 3D-gedruckt und haben Einschübe für Gewichte (in diesem Fall Wolframstäbe), der Ständer ist mit der Software Grasshopper parametrisch generiert und lasergeschnitten

Beim Versetzen der Blöcke ist allerdings insbesondere bei sehr dünnem Glas darauf zu achten, dass es möglichst nicht zu ungleichmäßiger Spannungsverteilung kommt, ein Transport der Blöcke durch Greifen nahe dem Schwerpunkt sollte ermöglicht werden, in Abbildung 105 wurde daher mittig jeweils eine Vertiefung eingebracht.

Ein Herstellen des Versuchsaufbaus kann für Ultradünnglas vereinfacht werden, da bereits ein geringeres Eigengewicht des Blocks nötig ist, so kann ein per Kreissägeschnitt geschlitzter Holzblock oder ein 3D-Druck ausreichend sein. An die Materialeigenschaften der Unterkonstruktion sind geringere Anforderungen gestellt, diese muss lediglich mit ausreichender Präzision das Gewicht der Steckblöcke tragen.

Das nötige Gewicht der Blöcke kann nach dem Zusammenhang errechnet werden, dass das Eigengewicht der Blöcke (beziehungsweise der eingeschobenen Gewichte) multipliziert mit dem sich aus der Lagerung ergebenden Hebelarm (Abstand des äußersten Auflagerpunkts zum Schwerpunkt des Blockes/Gewichtes in Richtung der wirkenden Auflagerkraft) mindestens dem rechnerisch nötigen Biegemoment in der Scheibe entspricht ($M=EI/r$).

Je nach Anzahl der gewünschten Spannungsstufen kann es sinnvoll sein, mehrere Ständer zu erzeugen um die Auflagefläche für jede Spannungsstufe ausreichend groß zu halten, da diese sich sonst zu stark überlagern.

Die Geometrie des Ständers muss nicht zwangsweise am PC errechnet werden, eine einfache geometrische Konstruktion (Kreisbogen mit Rechtecken an beiden Enden) mit Zirkel und Geometriedreieck und ein anschließendes Ausschneiden (beispielsweise aus Holz mit einer Stichsäge) lässt sich ohne großen Aufwand umsetzen (Abbildung 106).

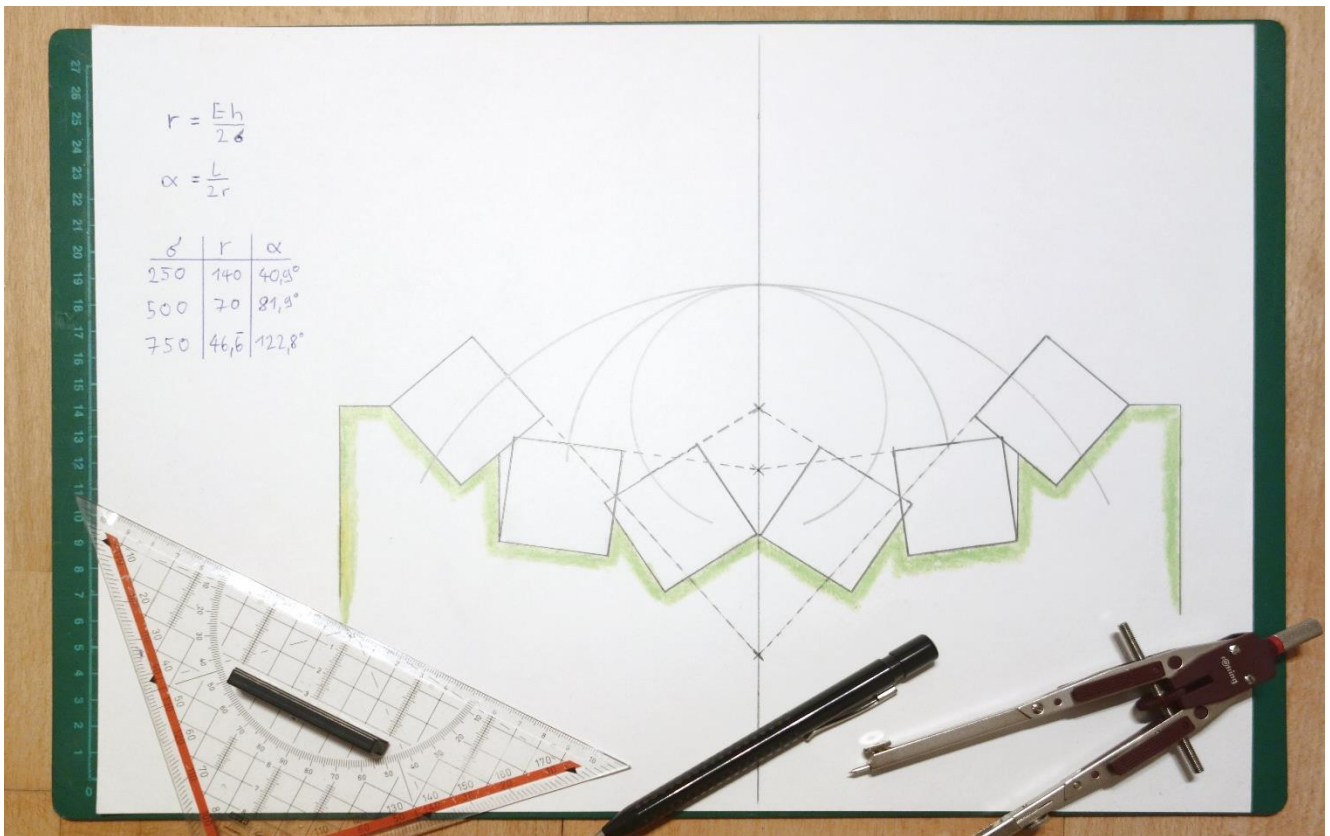


Abbildung 106: händisch konstruierte Vorlage für den Steckblock aus der vorherigen Abbildung mit allen nötigen Berechnungen und Werkzeugen

4.6.5. Spiralprüfverfahren

Ist bei einer Biegeprüfung die nötige Krümmung nicht herstellbar da sich beispielsweise die Enden des Glases treffen oder die geometrischen Grenzen der Prüfeinrichtung erreicht werden, kann dem abgeholfen werden, indem das Glas bei der Prüfung leicht schräg eingespannt und anschließend zu einer „Spirale“ aufgerollt wird (Abbildung 107).

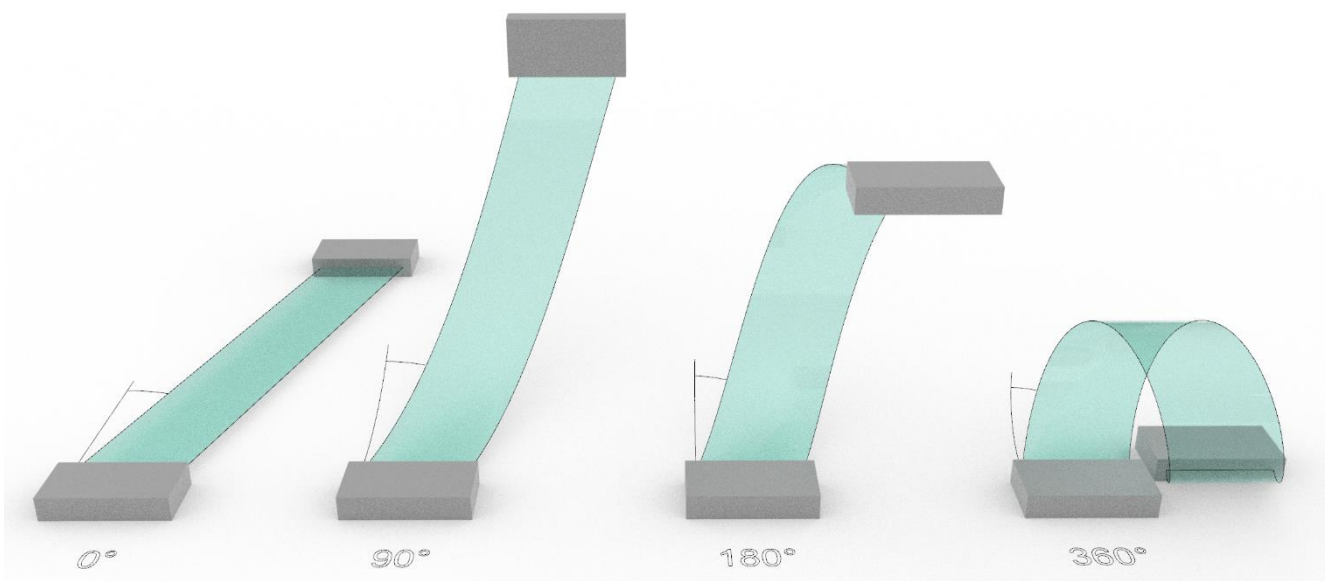


Abbildung 107: schematische Darstellung des Spiralprüfverfahrens mit eingezeichnetem Schrägstellungswinkel

Je nach Probenlänge und -breite ist eine Schrägstellung unterschiedlichen Ausmaßes nötig, diese sorgen für eine kleine Spannungsverringering in Kantenrichtung, die Spannung entlang der Kanten ergibt sich zu

$$\sigma_{Kante} = \sigma_{OhneScherung} * \cos(\text{Winkel der Schrägstellung}) \quad (23)$$

Die Prüflänge erhöht sich bei der Schrägstellung um den Kehrwert des Cosinus des Schrägstellungswinkels. Schmale Proben verringern den nötigen Schrägstellungswinkel.

4.6.6. Rolleneindrückverfahren

Im Vergleich zum Versuchsaufbau von Jotz [116] soll in diesem Prüfverfahren der Nutzereinfluss reduziert werden. Dazu wird das Glas nicht in den Händen gehalten, sondern auf eine weiche Unterlage, beispielsweise Schaumstoff oder ein an zwei Enden hängendes Band, platziert und durch Belasten mit Rollen definierten Durchmessers in die jeweilige gewünschte Form gedrückt (Abbildung 108). Die Spannung kann so schrittweise durch Rollen mit geringeren Durchmessern gesteigert werden. Zudem kann die Spannung kontrollierter gehalten werden, als dies händisch möglich ist.

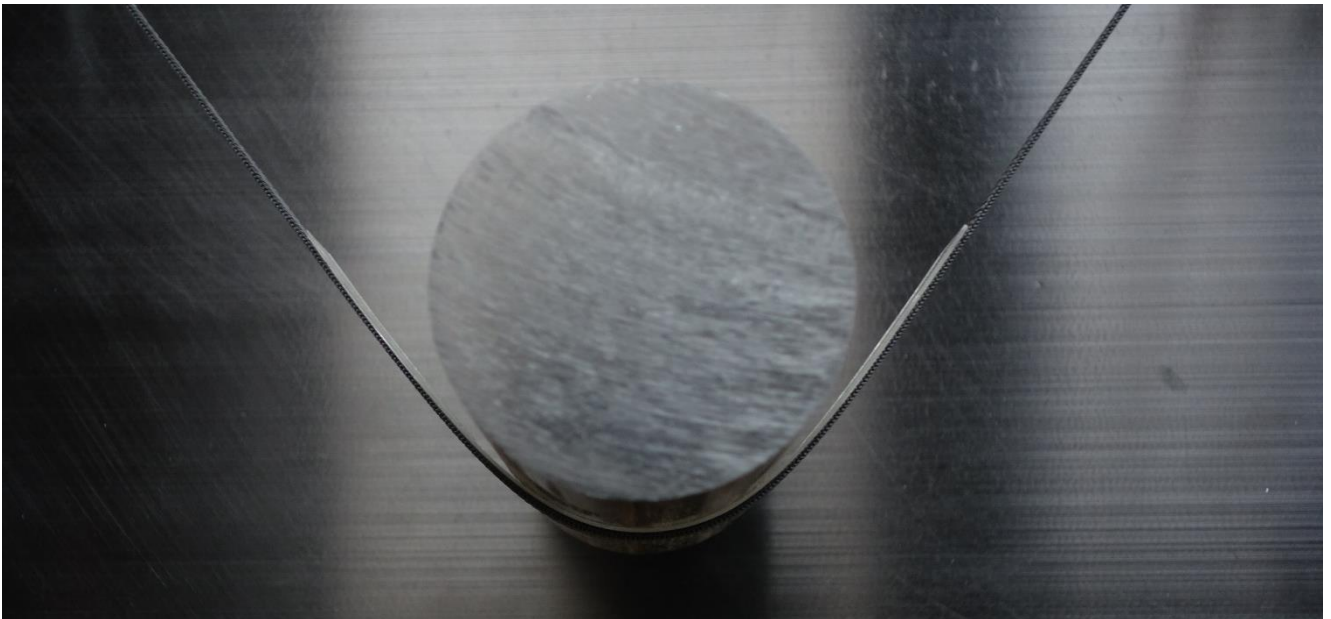


Abbildung 108: Das Glas liegt auf einem hängenden (und leicht schmaleren als die Glasbreite) Gurtband auf, die Rolle wird von oben auf das Glas gelegt, die unter Zug stehenden Kanten können einer gleichmäßigen Spannung ohne Kontakt zu anderen Materialien ausgesetzt werden

Alternativ zu einem Band oder Schaumstoff kann ein Luftkissen für eine bessere Verteilung der Last und eine großflächigere Anpressung an die Rollen sorgen, insbesondere wenn dies in einer passenden Ausgangsform hergestellt wurde.

Im Gegensatz zum Steckblockverfahren und dem Verfahren von Jotz ist die Zugseite des Glases hier allerdings im Kontakt mit anderen Materialien, daher ist auf eine möglichst schonende Oberfläche zu achten, gegebenenfalls kann (wie in Abbildung 108) die Breite der Auflagefläche leicht geringer als die Breite des Glases gewählt werden, damit die Kanten nicht in Kontakt mit anderen Oberflächen kommen.

4.6.7. Bandprüfverfahren

Beim Bandprüfverfahren wird die statistische Aussagekraft eines Vierschneidenbiegeversuchs, welcher bei sehr dünnem Glas nur mit geringen Spannweiten möglich ist, dadurch erhöht, dass das Glas während der Prüfung durch Rollen hin und her gefahren und somit eine größere Prüffläche untersucht werden kann (Abbildung 109). Hierfür kann beispielsweise in einem normgerechten Vierschneidenbiegeversuch der Auflagerabstand reduziert und ein Auflager mittels Motor verdreht werden. Die entsprechende Belastungsdauer errechnet sich dann aus der Zeit, die der jeweilige Punkt der Glasoberfläche zwischen den beiden Lastrollen verbracht hat.

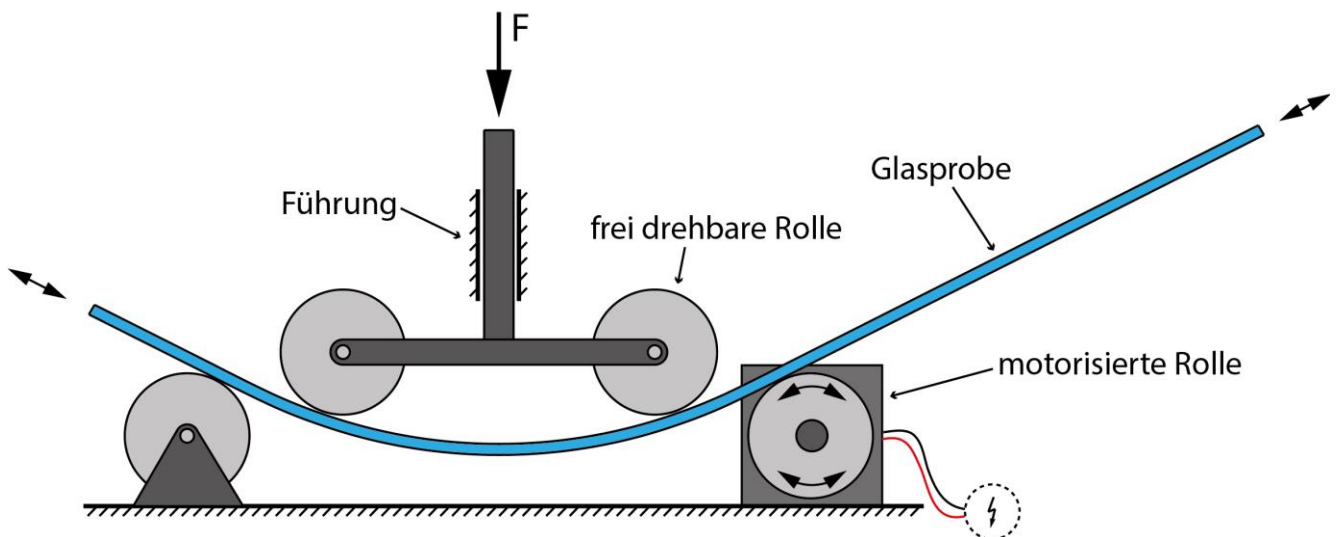


Abbildung 109: schematische Darstellung des Bandprüfverfahrens in der seitlichen Ansicht

Zur Minimierung der Knickgefahr und von Normalkräften ist auf eine freie Drehbarkeit mit geringem Widerstand der nicht angetriebenen Stütz- und Lastrollen zu achten oder es sind mehrere Rollen zu motorisieren. Bei mehreren Rollen ist jedoch der Längenausgleich bei Verformung zu berechnen und automatisiert zu kompensieren.

Als Alternative zu vier nacheinander angeordneten Biegerollen kann das Bandprüfverfahren auch mit zwei Rollenpaaren erfolgen, wobei das Glas jeweils zwischen zwei Rollen eingeklemmt ist und die Länge des Bereichs dazwischen verändert wird (Abbildung 110). Hier kommt es allerdings je nach Aufbau gegebenenfalls nicht zu einer gleichmäßigen Spannungsverteilung, was die statistische Aussagekraft der Prüfung reduzieren kann, sofern dies nicht in die Belastungsdauer eingerechnet ist.

In beiden Fällen ist als Nachteil der Kontakt der Rollen mit der zu prüfenden Kante oder Oberfläche zu nennen, die Auswirkungen müssen bei Verwendung des Verfahrens untersucht und einberechnet werden.

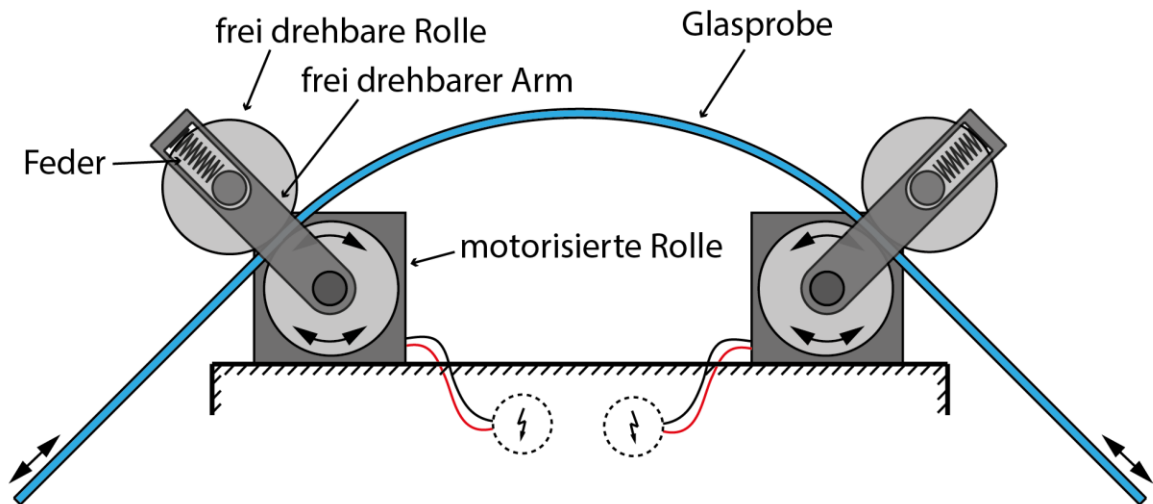


Abbildung 110: alternativer Aufbau für das Bandprüfverfahren in der seitlichen Ansicht

4.6.8. Stempelzugverfahren

Auch wenn es sich bei diesem Verfahren nicht um ein Verfahren zur Biegeprüfung handelt, dient es, unter Beibehaltung der für einachsige Biegung getroffenen Annahme dass die Kantenfestigkeit insbesondere für nicht vorgespanntes Glas signifikant geringer als die Flächenfestigkeit ist, ebenso vorwiegend zur Bestimmung der Kantenfestigkeit, weswegen es in diesem Kapitel aufgeführt ist.

Das Grundproblem für die einachsige Zugprüfung von Materialien ist, dass es an der Einspannung gewöhnlich zu einer lokalen Erhöhung der Spannungen und somit bei gleichbleibendem Querschnitt dort ebenso bevorzugt zum Versagen des Materials kommt. Insbesondere für duktile Materialien oder Materialien mit geringer Steifigkeit wurden daher Konzepte für Zugstäbe entwickelt, beispielsweise nach EN ISO 527 [124], welche an der Einspannung einen größeren Querschnitt aufweisen und somit ihr Spannungsmaximum im gewünschten, schmaleren Bereich der Probe aufweisen (Abbildung 111). Kleinere Imperfektionen, Risse und andere spannungserhöhende Faktoren werden dabei durch große, meist plastische Verformungen ausgeglichen. Bei Glas stößt dieses Konzept allerdings auf eine Reihe von Problemen.

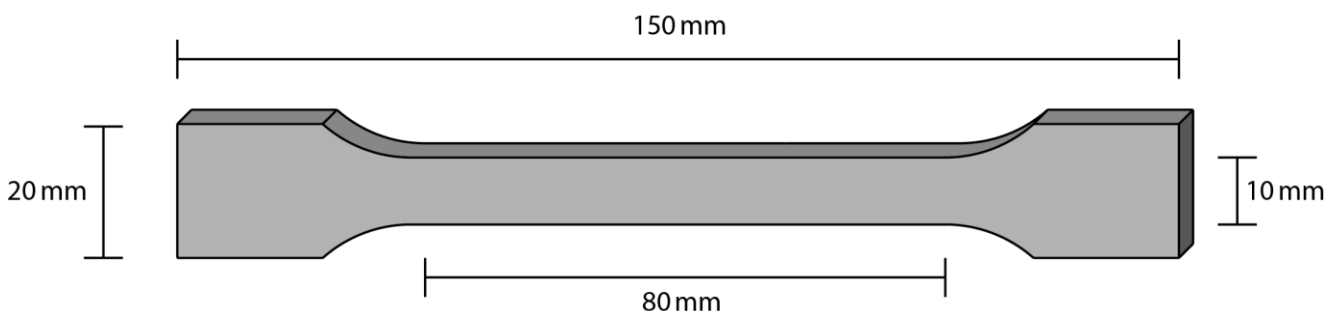


Abbildung 111: beispielhafter Zugstab nach DIN EN ISO 527 Typ 1A für Prüfung von Polymerwerkstoffen

Die erste Schwierigkeit entsteht in der Herstellung der Probekörper. Da die Festigkeit von Glas im Vergleich zu vielen anderen Materialien sehr stark von der Kantenqualität abhängt und diese gewöhnlich gemessen werden soll, muss die Herstellung der Kanten mit einem Verfahren erfolgen welches äquivalent zu den Herstellungsverfahren der späteren Bauteile ist. Das Herstellen einer wie in Abbildung 111 gezeigten Geometrie ist in vielen Fällen, beispielsweise bei einer geritzten und anschließend gebrochenen Kante, nicht möglich. Lediglich wenige Verfahren wie ablativer, vollständig

trennender Laserschnitt (siehe Kapitel 2.1.5) oder sehr tiefe Schliffe ermöglichen eine entsprechende Formgebung.

Eine weitere Schwierigkeit stellt die oft notwendige Vorspannung des Glases dar, insbesondere bei thermischer, aber auch bei chemischer Vorspannung kann es zu ungleichmäßigen Spannungsverteilungen kommen, wie sie bei ESG beispielsweise an Bohrlöchern zu sehen sind [125]. Als dritte Schwierigkeit ist die glatte Oberfläche des Glases zu nennen welche ein Greifen der Probe nur bei Oberflächen mit hoher Haftreibung und hoher Druckkraft ermöglicht, im Gegensatz zu vielen Kunststoffen und Metallen ist auch eine gezahnte Grifffläche nicht möglich. Weisen insbesondere die Kanten des im Verhältnis zu den meisten Materialien sehr harten Glases scharfe Grate oder Rauigkeiten auf, ist zudem mit einer schnellen Abnutzung der Klemmbacken zu rechnen. Dieses Problem ist bei der Zugprüfung deutlich ausgeprägter als bei der hauptsächlich normal zur Oberfläche Kräfte einleitenden Biegeprüfung.

Eine vierte Schwierigkeit bilden die Spannungsspitzen, beispielsweise an der Innenseite der Rundungen, welche bei hoher Steifigkeit und mangelnder Plastizität des Materials deutlich größeren Einfluss auf die gemessene Festigkeit haben als beispielsweise in Metallen oder Polymeren.

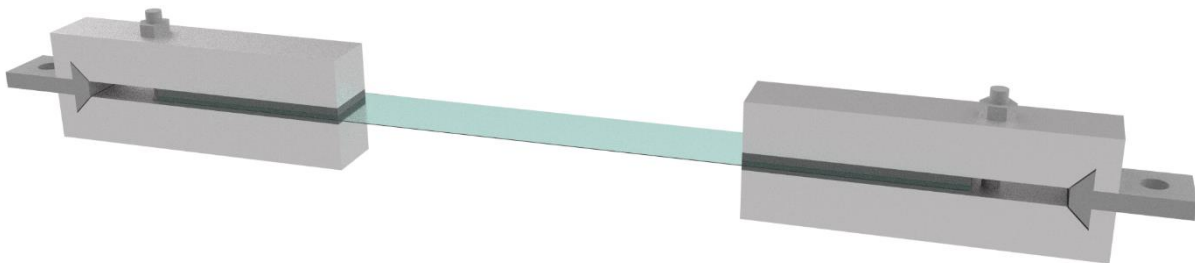


Abbildung 112: beispielhafter Versuchsaufbau für die Zugprüfung von Dünnglas, das Glas wird auf 3/4 der Breite und größerer Länge symmetrisch geklemmt

Die Zugprüfung für Dünnglas wird bei diesem Konzept daher unter folgenden Randbedingungen vorgeschlagen (Abbildung 112):

- Das Glas wird als rechteckiger Probekörper gefertigt, somit sind Standardverfahren aus der Glasherstellung sowie eine gleichmäßige Vorspannung möglich
- Die Klemmung erfolgt in ausreichendem Abstand vom Probenrand und auf einer möglichst großen Probenfläche, damit sich ähnlich dem Biegemoment im Vierschneidenbiegeversuch langsam ein Bereich konstanter Spannung aufbauen und auf die gesamte Querschnittsbreite verteilen kann (Abbildung 114), dies bedingt eine in Zugrichtung langgezogene Klemmfläche (Abbildung 113).
- Die Klemmung erfolgt mit einem Material geringer Härte und hoher Haftreibung (genannt „Stempel“, daher der Name des Verfahrens), gewöhnlich erfüllen einige Elastomere diese Bedingungen.

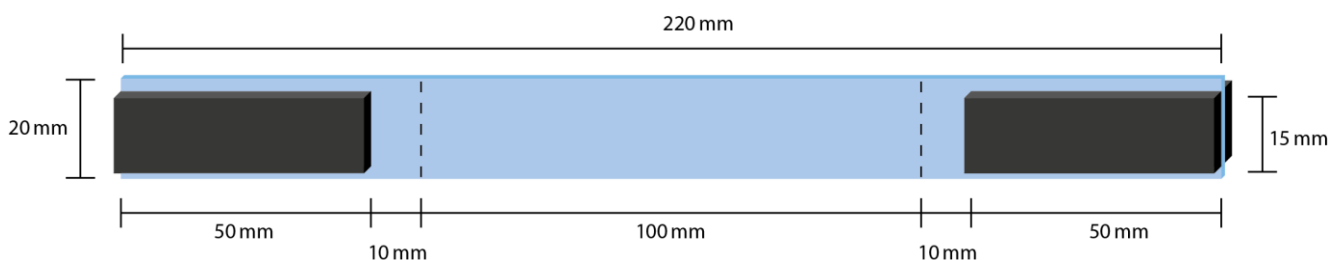


Abbildung 113: Beispielhafte Abmessungen der Probe und der Stempelflächen mit einer Prüflänge von 100 mm

Den größten Vorteil kann diese Art der Zugprüfung bei sehr dünnem Glas ausspielen, da es unter uniaxialem Zug im Gegensatz zur Biegeprüfung nicht aufgrund geringer Biegesteifigkeit große

Verformungen erfährt, der Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung ist dickenunabhängig. Andererseits sinkt mit geringerer Dicke die Anforderung an die Klemmkraft und das Klemmenmaterial, speziell für Ultradünnglas ist der Versuchsaufbau sehr viel einfacher zu fertigen als für Normalglas.

Ein weiterer Vorteil ist, dass im Gegensatz zur Biegeprüfung alle vier Kanten auf Zug geprüft werden, dies ermöglicht eine kürzere (=halbe) Probenlänge bei identischer Prüflänge der Kanten (sofern nicht eine Unterscheidung von beispielsweise geritzter und ungeritzter Oberfläche oder Zinn- und Luftseite notwendig wird).

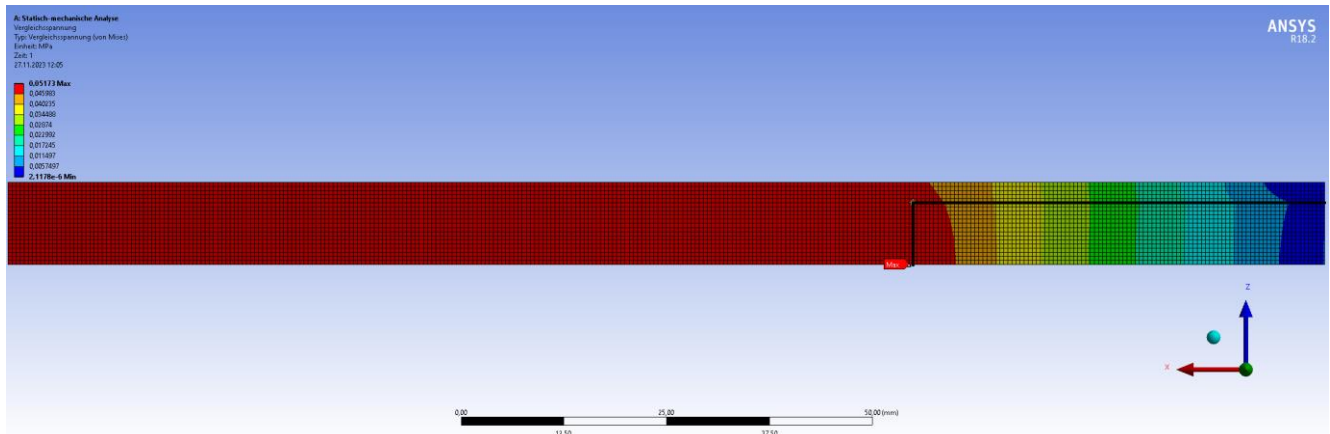


Abbildung 114: FE-Simulation eines Viertelmodells (Symmetrie links und unten) mit gezeigter Klemmfläche (2 mm Naturkautschuk) und Vergleichsspannungsverlauf (von Mises, siehe Anhang 7.11); Das Spannungsmaximum in der Fläche ist bei einer Klemmbreite von 75% nur 3,6% höher als im Bereich konstanter Spannung an der Kante, ca. 10 mm vom Klemmbereich kann die Spannung als konstant verteilt angesehen werden

Als Einschränkungen sind folgende Einflussfaktoren zu beachten:

- Die Steifigkeit des Klemmmaterial muss gegebenenfalls an die Glasdicke und die zu erwartenden Spannungen beziehungsweise Zugkräfte angepasst werden
- Insbesondere bei sehr dünnem Glas muss die Klemmung von beiden Seiten möglichst gleichmäßig erfolgen, da es sonst lokal zu signifikanten Biegeverformungen durch Eindrücken des Klemmenmaterials in die Oberfläche kommt
- Schmale Probekörper reduzieren in diesem Versuch die nötige Klemm- und Zugkraft. Diese sind unter Umständen jedoch schwieriger zu fertigen und erhöhen im Gegensatz auch wieder die Anforderungen an das Klemmmaterial.
- Es ist darauf zu achten das Glas mittig zu klemmen, um keine Biegemomente in das Glas zu bringen welche für ungleichmäßige Belastung der Kanten sorgen. Dies kann mit sinnvollen Führungselementen und Gelenken im Versuchsaufbau gegebenenfalls beeinflusst werden
- Aufgrund der geringen Verformung werden höhere Anforderungen an die Genauigkeit und Steuerbarkeit der Zugprüfeinrichtung gestellt als dies beispielsweise im Vierschneidenbiegeversuch der Fall ist

4.6.9. Weitere Konzepte

Weitere Konzepte zur einachsigen Prüfung von Dünnglas, die aber nicht weiter ausgearbeitet wurden, sind:

Prüfung in Spalt

Ähnlich der Prüfung unter Eigengewicht, dem Klemmblockverfahren und den Verfahren von Jotz [116] und dem Zweipunktbiegeversuch von Gulati [109] wird das Glas anstatt unter Eigengewicht belastet zu werden gekrümmt zwischen zwei Körpern eingeklemmt, der Abstand der Körper kann zum Beispiel über Stufen auf beiden Seiten geändert werden (Abbildung 115). Wie auch beim vorherigen

Verfahren kommt es hier nicht zu einer konstanten Spannungsverteilung, was die Aussagekraft der Prüfung mindert. Dieses Verfahren bietet sich ebenfalls für die Produktionskontrolle an.



Abbildung 115: Beispielbild zur Prüfung im Spalt, jede "Stufe" entspricht einer definierten Spannungssteigerung

Vibrationsprüfung

Durch das Einbringen von Vibrationen, sei es durch Schall oder Bewegungen, werden im Glas stehende oder sich bewegende Wellen definierter Frequenz und Amplitude eingebracht, diese führen zu definierten Spannungen. Vom Prinzip gleicht es dem „Trick“ des „Zersingens“ von Weingläsern der gerne im populärwissenschaftlichen Umfeld gezeigt wird [126], Weingläser sind hier im Vergleich zu dickeren Behältergläsern aufgrund ihrer geringen Glasdicke und Eigenfrequenz anfälliger, was als Parallele zu Dünnglas gesehen werden kann.

Dieses Verfahren ist sowohl ein- als auch zweiachsig anwendbar, eine zweiachsige Prüfung wird hier als vielversprechender angesehen weshalb der Aufbau dort (Kapitel 5.7.1) genauer behandelt wird.

Temperaturwechselprüfung

Das Glas wird beispielsweise mit definierter Geschwindigkeit durch einen Spalt gefahren in dem es kontrolliert erhitzt und somit lokalen Ausdehnungen welche Spannungen erzeugen ausgesetzt wird. Alternativ ist beispielsweise lokale Erhitzung mit Laser denkbar. Dieses Verfahren ist ebenso sowohl ein- als auch zweiachsig anwendbar.

4.7. Vergleich und Empfehlungen

Die gezeigten Prüfverfahren sind für unterschiedliche Anwendungsfälle geeignet. Üblicherweise gibt es zwei Hauptanwendungsfälle, präzise Festigkeitsprüfung unter Laborbedingungen und schnelle Produktionskontrolle während der Herstellung oder Weiterverarbeitung. Weiterhin unterscheiden sich diese im nötigen technischen Aufwand. Der zeitliche Aufwand während der Prüfung ist aufgrund vorgegebener Spannungsraten und Belastungsdauern im Allgemeinen weniger relevant. Nachfolgend werden in Tabelle 11 für die vorgestellten Prüfverfahren einige relevante Kriterien bewertet.

Tabelle 11: Bewertung der vorgestellten Verfahren nach ausgewählten Kriterien, von Vorteil (Grün) bis Nachteil (Rot), in Reihenfolge der Vorstellung in dieser Arbeit, sowie optimale Glasdicken von „dick“ (Dunkelblau) bis „dünn“ (Hellblau) aus Literaturangaben, alternativ eigene Schätzung aus den Ergebnissen der Analysen im Rahmen der Arbeit (markiert mit *)

Prüfverfahren	Feste Prüflänge	Konstante Krümmung / Spannung	Steuerbare Spannungsrate	Kein Nutzereinfluss	Kein Oberflächenkontakt auf Zugseite	Geringer technischer Aufwand	Mobil nutzbar	Optimale Glasdicke [mm]
Normversuch nach EN 1288-3	+	+	+	+	+	+	-	>3
Zylinderpresstest	+	+	-	+	-	0	-	0,7-1,1
Vierpunktbiegeversuch mit Kantenbelastung	+	+	+	+	0	0	-	>1,1
Zweipunktbiegeversuch zwischen Platten	-	-	+	+	-	+	-	0,4-0,7
Rotationsbiegeprüfstand	+	+	+	+	+	-	-	0,7 - 4
Zweipunktbiegeversuch ohne Oberflächenkontakt	+	-	+	+	+	0	-	>2
Mehrpunktbiegeverfahren	+	0	+	+	+	-	-	2
Zylinderpasstest	-	+	-	-	0	0	+	0,1
Mehrprobenverfahren	+	+	+	+	+	+	-	>1*
Biegeprüfmaschine	+	+	+	+	+	-	-	0,4-2*
Smartphonebiegeverfahren	+	+	+	-	+	+	+	0,3-1*
Papierbasiertes Verfahren	+	+	+	-	+	+	+	0,3-1*
Laserreflektor (eigenständige Nutzung)	-	-	-	-	+	-	0	0,5-1*
Analoge Biegeprüfmaschine	+	+	+	0	+	-	0	0,4-1,5*
Steckblockverfahren	+	+	-	0	+	+	+	0,1-0,5*
Spiralprüfverfahren	+	+	+	+	+	-	-	<0,2*
Rollen-eindrückverfahren	-	+	-	0	-	+	0	0,05-0,3*
Bandprüfverfahren	0	0	+	+	-	-	-	0,2-1*
Stempelzugverfahren	+	+	+	+	+	0	-	<1*

Wie bereits beschrieben eignen sich unterschiedliche Prüfverfahren für unterschiedliche Anwendungen, daher kann nicht pauschal eine Empfehlung für ein Verfahren gegeben werden. Unabhängig davon werden nachfolgend einige Empfehlungen gegeben.

Im Allgemeinen wird die Prüfung mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Biegeprüfmaschine mit konstanter Krümmung für die präzise Prüfung als eigener Favorit gesehen, die Prüfung liefert präzise, mit den Normversuchen nach EN 1288-3 vergleichbare, Ergebnisse bei Glasdicken zwischen ungefähr 0,4 und 2 mm. Für dünneres Glas wäre der Bau einer Spiralprüfmaschine ein vergleichbarer Ersatz, alternativ kann das Mehrprobenverfahren auf die Biegeprüfmaschine angewandt und beispielsweise mehrere kürzere Proben, deren Prüflänge in Summe 200 mm ergibt, parallel eingespannt und zeitgleich geprüft werden.

Steht keine Biegeprüfmaschine mit konstanter Krümmung zur Verfügung und soll der technische Aufwand bei Beibehaltung hoher Präzision geringgehalten werden, liefert das Mehrprobenverfahren im verkleinerten Vierschneidenbiegeversuch nach EN 1288-3 bei dickerem Glas (≥ 1 mm) ebenfalls präzise Werte ohne großen technischen Mehraufwand gegenüber dem normgerechten Vierschneidenbiegeversuch. Bei dünnerem Glas (< 1 mm) kann die nötige Menge an Teilungen der Proben allerdings sehr groß werden, hier bietet das Stempelzugverfahren eine brauchbare, leicht umsetzbare Alternative.

Sowohl das Prinzip der Biegeprüfmaschine mit konstanter Krümmung als auch das Mehrprobenverfahren werden zudem als aussichtsreichste Kandidaten für eine Standardisierung/Normung gesehen, da die zugrundeliegenden Prinzipien sehr klar und eindeutig zu beschreiben sind.

Für die schnelle und mobile Prüfung im mittleren Dickenbereich (0,3 – 1 mm) wird grundsätzlich das Smartphonebiegeverfahren bevorzugt, entsprechende Endgeräte sind üblicherweise überall verfügbar. Klemmen zum Halten des Glases, welche einfach herzustellen sind, bieten einen Vorteil bei der Präzision, freihändige Prüfung liefert gegebenenfalls aber auch brauchbare Ergebnisse. Bei diesem Verfahren, wie auch bei den anderen vorgestellten Versuchsaufbauten mit Nutzereinfluss, sind allerdings mehr Daten für eine exakte Bewertung möglicher Fehler nötig, dies sollte bei der Interpretation der gemessenen Festigkeiten berücksichtigt werden.

Für sehr schnelle Prüfung, beispielsweise wenn nur eine Mindestfestigkeit gewährleistet werden soll, eignet sich das Steckblockverfahren aufgrund der konstanten Krümmung und Prüflänge sowie der einfachen Herstellung bei verhältnismäßig hoher Präzision für Glas unterhalb von ungefähr 0,5 mm. Darüber kann der Zylinderpresstest, welcher sich auch mobil umsetzen ließe, gegebenenfalls schnelle Ergebnisse liefern, allerdings sollte der Oberflächenkontakt auf der Zugseite des Glases beachtet werden.

Grundsätzlich nicht empfohlen werden Prüfverfahren die keine konstante Spannungsverteilung liefern, insbesondere das Zweipunktbiegeverfahren. Auch von Verfahren ohne konstante Prüflänge (Zylinderpasstest und Rolleneindruckverfahren) wird aufgrund der fehlenden statistisch verwertbaren flächenbezogenen Festigkeit abgeraten. Die statistische Aussagekraft wird im Vergleich zu beispielsweise der einfachen und schnellen Umsetzbarkeit als wichtiger angesehen.

Es sei abschließend noch anzumerken, dass grundsätzlich eine Festigkeitsprüfung an kleineren Prüfflächen mit einer anschließenden Umrechnung auf Normgröße über den Größeneffekt auch brauchbare Ergebnisse liefern kann, so kann jeder der gezeigten Versuchsaufbauten für entsprechende Glasdicken skaliert werden. Eine quantitative Untersuchung des Flächen- und Kantenlängeneinflusses auf die Glasfestigkeit sowie weitere in diese Richtung führende statistische Untersuchungen zum Größeneffekt sind jedoch nicht Fokus dieser Arbeit.

5. Zweiachsige Prüfverfahren zur Festigkeitsermittlung von Dünnglas

In Kapitel 2.2.2 wurden die Doppelringbiegeversuche nach EN 1288-2 [81] und EN 1288-5 [2] sowie in Kapitel 3.23.1 das mechanische Verhalten von Dünnglas unter zweiachsiger Biegung vorgestellt. Ziel dieses Kapitels ist es nun, unter diesen Randbedingungen einerseits mögliche Erweiterungen der Anwendungsgrenzen des Normversuchs für dünneres Glas, andererseits weitere mögliche vergleichbare Prüfverfahren für die Anwendung bei der einachsigen Dünnglasprüfung – sowohl aus der Literatur als auch eigene Entwicklungen – zu untersuchen.

5.1. Grenzen des Doppelringbiegeversuchs nach EN 1288-2 und EN 1288-5

Sowohl die Versuchsaufbauten nach EN 1288-2 (Doppelringbiegeversuch mit Druckluft an großen Prüfflächen) als auch nach EN 1288-5 (Doppelringbiegeversuch ohne Druckluft an kleinen Prüfflächen) haben bedingt durch die bei dünnerem Glas höheren Einflüsse von Membraneffekten Grenzen für prüfbare Glasdicken. Diese Grenzen sind einerseits in den jeweiligen Normen festgelegt, andererseits können sinnvolle Grenzen für die Anwendung bei Dünnglas auch durch theoretische Überlegungen entwickelt werden.

5.1.1. Doppelringbiegeversuch ohne Druckluft (EN 1288-5)

Werden die Spannungen mit der Kirchhoffschen Plattentheorie (siehe Anhang 7.8) oder durch lineare Berechnungen mit Finiten Elementen (siehe Anhang 7.10) berechnet, erhält man den in Formel 24 dargestellten, von einem dimensionslosen Faktor K und dem Quadrat der Glasdicke abhängigen linearen Last-Spannungsverlauf unter dem Lastring:

$$\sigma = K * \frac{F}{h^2} \quad (24)$$

Die Werte für K (mit $\mu=0,23$) sind in Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Werte für K im Vergleich

	EN 1288-5 (quadratische Platte)	Kirchhoffsche Plattentheorie (runde Platte)	FE mit SOFiSTiK (runde Platte) ($h=1$ mm)	FE mit SOFiSTiK (quadratische Platte) ($h=1$ mm)
K ($r_2=45$ mm)	1,088	1,063456359	1,088	1,046
K ($r_2=30$ mm)	1,088	1,063456359	1,092	1,056

Werden die Spannungen allerdings nichtlinear berechnet, so kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse, je kleiner die Glasdicke wird, immer weiter vom linearen Ergebnis abweichen. Zudem ist zu erkennen, dass die Spannung in Plattenmitte aufgrund von Membraneffekten (das Glas „hängt“ wie eine Membran „durch“, dadurch entstehen Normalkräfte, die zu einer Spannungumlagerung im Glas führen) geringer als unter dem Lastring wird (siehe Abbildung 116). Vergleichsspannungen (siehe Anhang 7.11) bei unterschiedlicher Glasdicke sind in Abbildung 117 und Abbildung 118 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass für 3 mm dickes Glas im Versuchsaufbau mit $r_2 = 45$ mm (R45) und für 2 mm dickes Glas im Versuchsaufbau mit $r_2 = 30$ mm (R30) die tatsächlichen Spannungen im gezeigten Spannungsbereich sehr nahe am mit Hilfe der Norm berechneten Wert liegen, bei der jeweils halben Glasdicke jedoch schon bei Spannungen ab 100 MPa erhebliche Abweichungen auftreten.

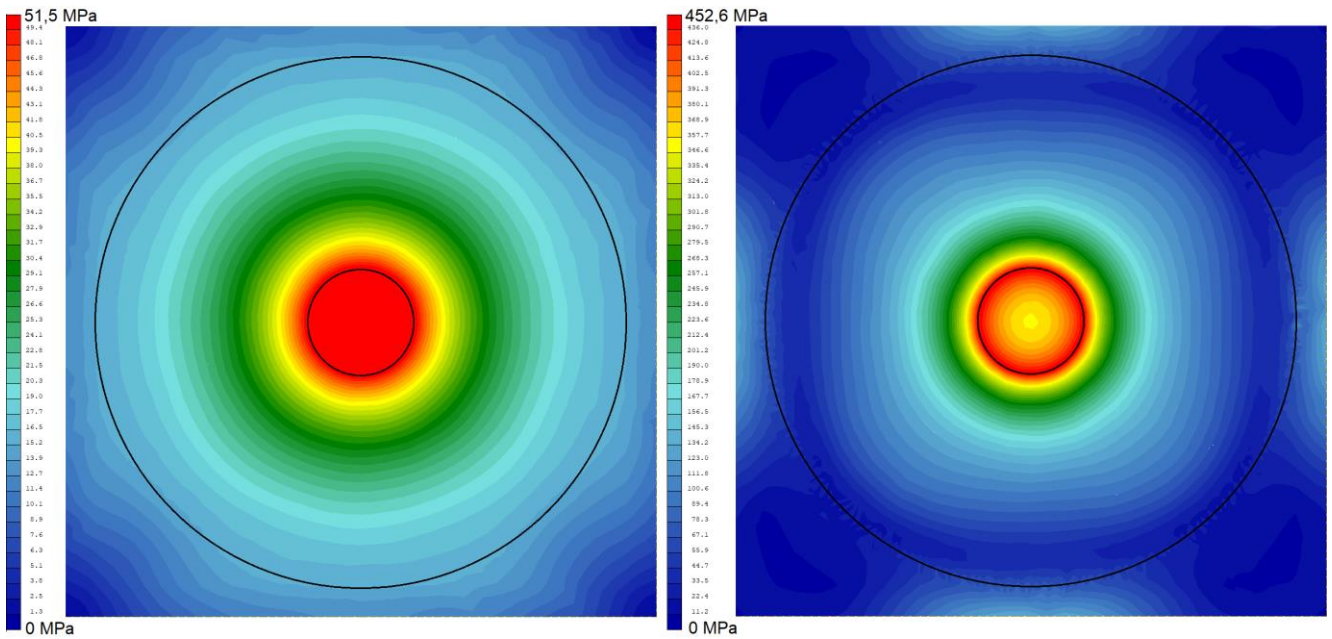


Abbildung 116: Vergleichsspannungsverteilung (siehe Anhang 7.11) der Glasunterseite im Versuchsaufbau R45 bei einer Last von 1,2 kN für 5 mm (links) und 1 mm (rechts) dickes Glas mit Position von Stütz- und Lastring. Bei 5 mm dickem Glas herrscht eine nahezu konstante Spannungsverteilung unter dem Lastring (roter Bereich), bei 1 mm fällt die Spannung vom Lastring zur Probenmitte deutlich sichtbar ab.

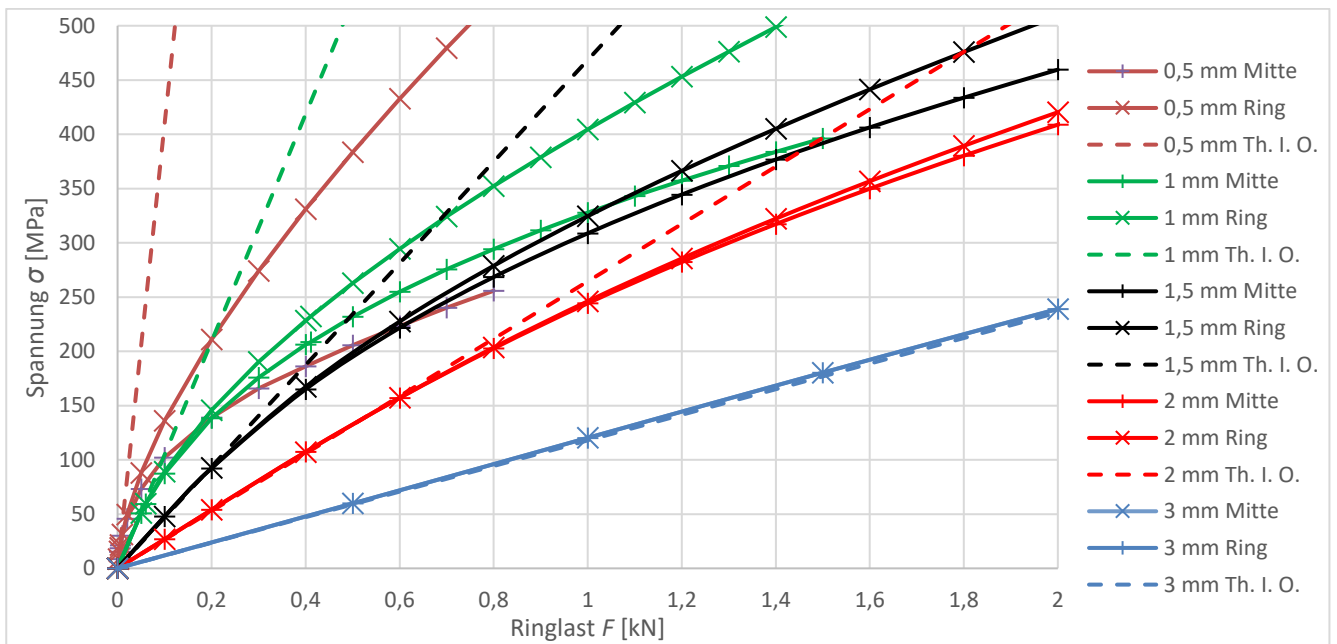


Abbildung 117: Versuchsaufbau nach EN 1288-5 mit $r_2=45$ mm (R45) und viereckiger Scheibe; Spannungsverläufe aus nichtlinearer FE in Scheibenmitte, unter dem Lastring und nach Th.I.O.

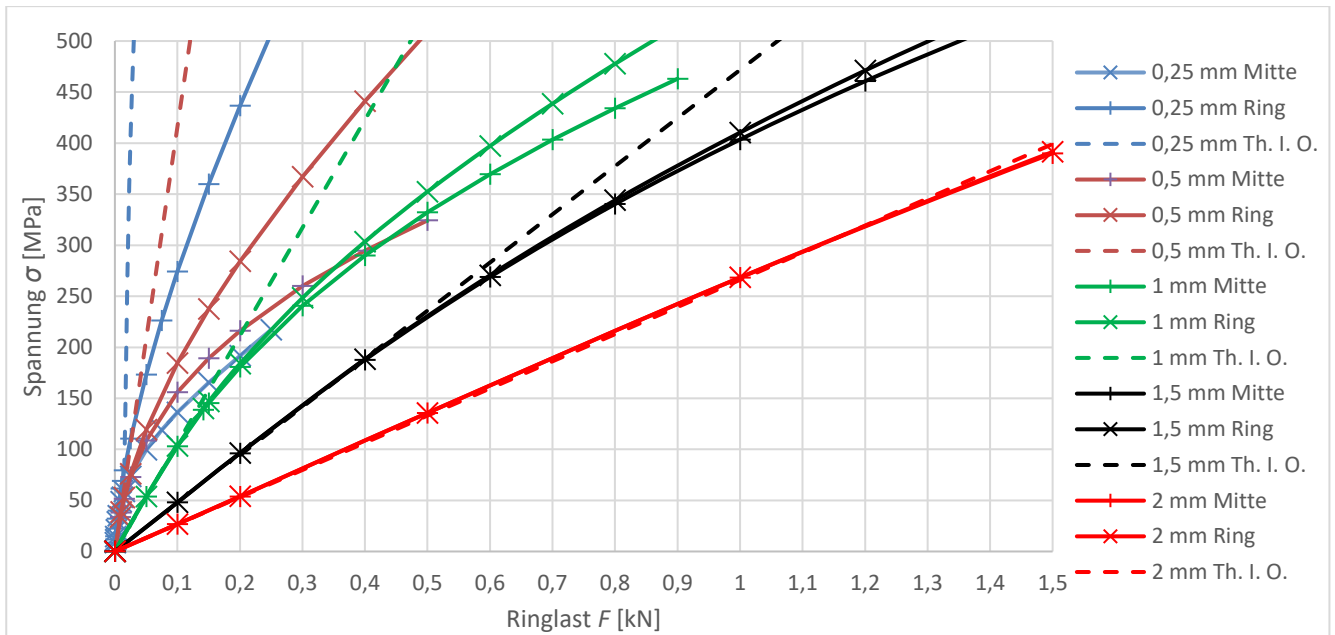


Abbildung 118: Versuchsaufbau nach EN 1288-5 mit $r_2=30$ mm (R30) und viereckiger Scheibe; Spannungsverläufe aus nichtlinearer FE in Scheibenmitte, unter dem Lastring und nach Th. I. O.

Aus diesem Grund ist die Anwendung in der EN 1288-5 auf die in Tabelle 13 gezeigten Glasdicken beschränkt.

Tabelle 13: Dickenabhängige maximal zulässige Spannungen je Dicke in EN 1288-5 mit Abweichung der Spannungen bei nichtlinearer FE-Berechnung zu linearer Berechnung nach Th. I. O.

Maximale Spannung σ_{bb} [MPa]	$r_2 = 30$ mm (R30)			$r_2 = 45$ mm (R45)		
	Minimale Glasdicke h [mm]	Minimale Abweichung zu Th. I. O. [%]	Maximale Abweichung zu Th. I. O. [%]	Minimale Glasdicke h [mm]	Minimale Abweichung zu Th. I. O. [%]	Maximale Abweichung zu Th. I. O. [%]
100	1,0	-1,4	-1,8	2,0	+1,8	+2,1
200	1,5	-0,5	-0,8	2,5	+0,2	+0,5
300	2,0	+0,2	+0,5	3,0	+0,2	+0,5
400	2,5	+0,7	+1,0	3,5	0	+0,4
500	3,0	+1,3	+1,6	4,0	+0,5	+0,8
600	3,5	+1,1	+1,4	4,5	+0,6	+0,8

Diese Grenzen der Anwendbarkeit ließen sich theoretisch verschieben, wenn die Grenze der erlaubten Spannungsabweichungen von der linearen Lösung oder zwischen dem Bereich unter dem Lastring und der Probenmitte erhöht und dies in die Spannungsbestimmung einbezogen würde. Da die zulässige Abweichung der Spannungsrate in der Norm 20% beträgt, wäre eine sinnvolle Grenze eine Spannungsabnahme in Plattenmitte von 20% gegenüber der Normspannung, dann kann die konstante Spannungsrate von 2 MPa/s nicht nur bezogen auf die Normspannung, sondern auch auf die minimale Spannung innerhalb des Lastrings für die gesamte Versuchsdauer beibehalten werden und es sind keine Veränderungen an der Steuerung der Prüfmaschine notwendig. Der Spannungsabfall gegenüber dem Normwert kann dann als Korrekturfaktor vom nach Norm berechneten Ergebnis abgezogen werden. Abbildung 119 zeigt Kurven für mögliche Spannungen bei Abweichungen in Plattenmitte von 10% und 20% gegenüber dem Normwert. Es lässt sich erkennen, dass mit der genannten Grenze 1 mm dickes Glas bis zu einer Spannung von $252 \cdot 0,8 = 202$ MPa (statt 100 MPa in der Norm) im

Versuchsaufbau mit $r_2 = 30$ mm (R30) und bis zu $110 \cdot 0,8 = 88$ MPa bei $r_2 = 45$ mm (R45) (Dicke nicht erlaubt gemäß Norm) geprüft werden kann.

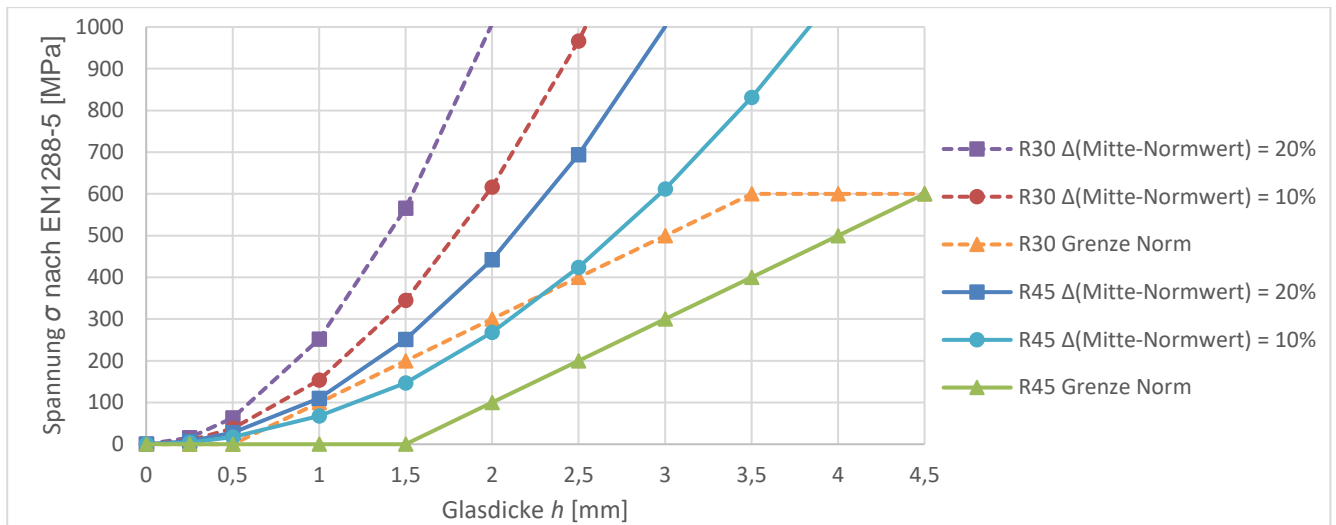


Abbildung 119: Grenzwerte bei erlaubten Abweichungen der Spannungen vom Normwert in Plattenmitte von 10% und 20% im Vergleich zu den Grenzen der EN 1288-5

Mit einer Beschränkung über den Spannungsunterschied zwischen Plattenmitte und den Bereich unter dem Lastring lässt sich die Grenze noch erheblich weiter verschieben. Die jeweiligen Grenzen für eine maximale Abweichung der Spannung in Probenmitte von der Lösung der Norm von 10% und für Abweichungen zwischen der Spannung unter dem Lastring und in Probenmitte von 10% sind beispielhaft in Abbildung 120 dargestellt. Mit einer zulässigen Abweichung von 10% von der linearen Lösung würde beispielsweise eine Prüfung von 2 mm dickem Glas bis zu einer Spannung von ca. $617 \text{ MPa} \cdot 0,9 = 555 \text{ MPa}$ im Versuchsaufbau mit $r_2=30$ mm (R30) und bis zu $268 \text{ MPa} \cdot 0,9 = 241 \text{ MPa}$ im Versuchsaufbau mit $r_2=45$ mm (R45) möglich sein, bei einer erlaubten Abweichung von 10% zwischen dem Bereich unter dem Lastring und der Probenmitte wären sogar für 1 mm dickes Glas Spannungen bis zu $979 \text{ MPa} \cdot 0,47 = 463 \text{ MPa}$ im Versuchsaufbau mit $r_2=30$ mm (R30) und bis zu $447 \text{ MPa} \cdot 0,47 = 209 \text{ MPa}$ im Versuchsaufbau mit $r_2=45$ mm (R45) möglich.

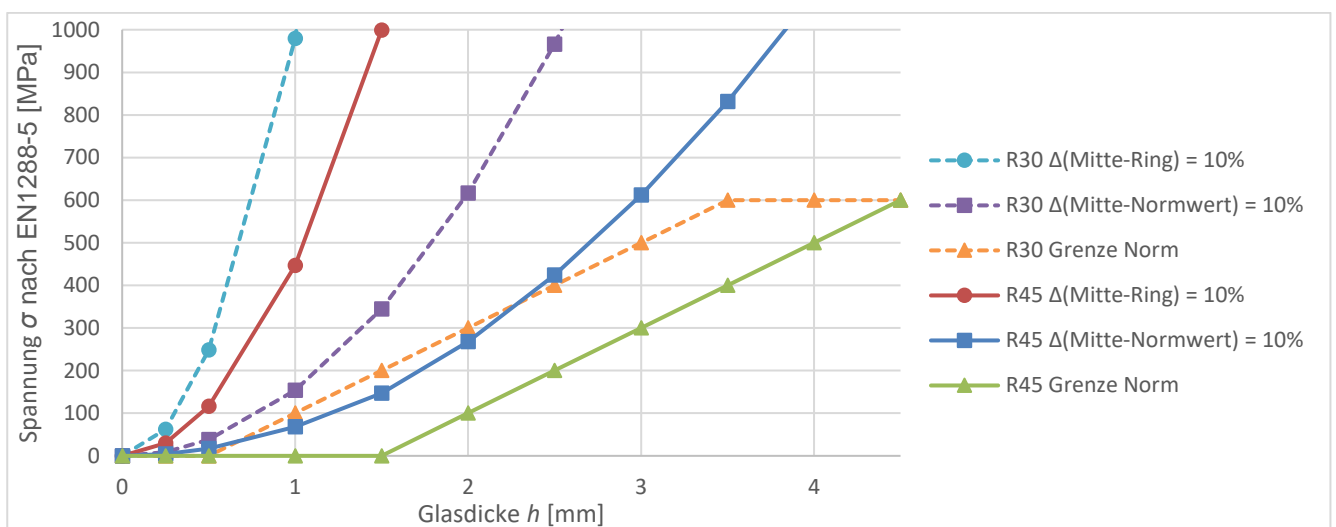


Abbildung 120: Grenzwerte für unterschiedliche erlaubte Arten der Spannungsabweichung im Vergleich zur Grenze der EN 1288-5 für $r_2=30$ mm (R30) und $r_2 = 45$ mm (R45)

Ist der Spannungsunterschied zwischen Normwert und in Plattenmitte größer als 20% stellt dies wie bereits erwähnt erheblich größere Ansprüche an den Versuchsaufbau und die Auswertung. Während des Versuchs muss die Spannungsrate kontinuierlich angepasst werden, um im Normbereich von $2 \text{ MPa} \pm 0,4 \text{ MPa}$ zu bleiben, zudem müssen bei der Auswertung die Normwerte der Spannung mit einem Korrekturfaktor multipliziert werden. In Abbildung 121 sind beispielhaft Laststeigerungskurven, in Abbildung 122 Korrekturwerte der normgerecht berechneten Spannung für 1 mm dickes Glas gegeben.

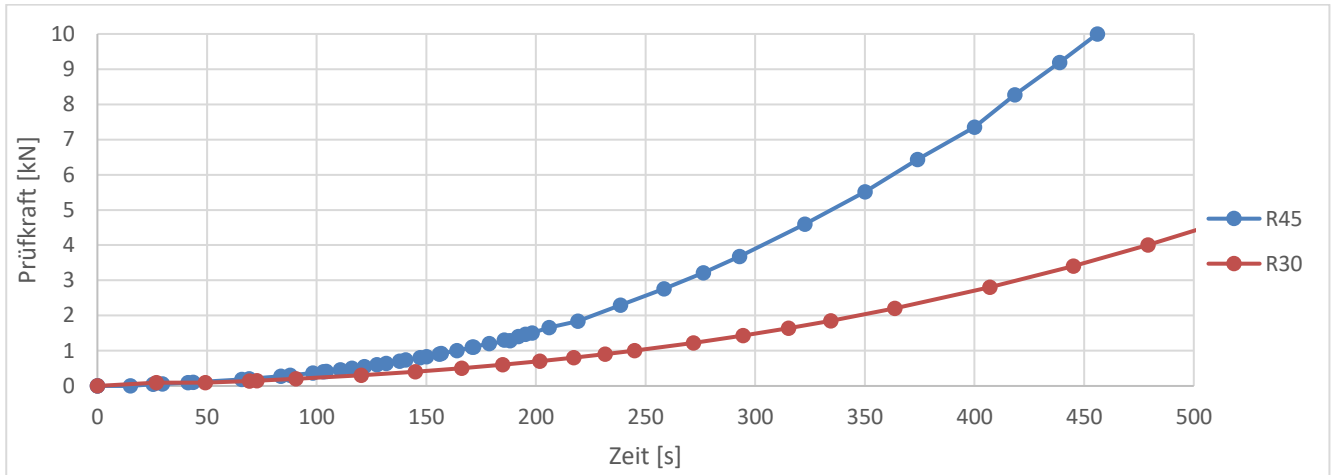


Abbildung 121: Last-Zeit-Diagramm für Glasdicke $h=1 \text{ mm}$, aus FE-Simulation

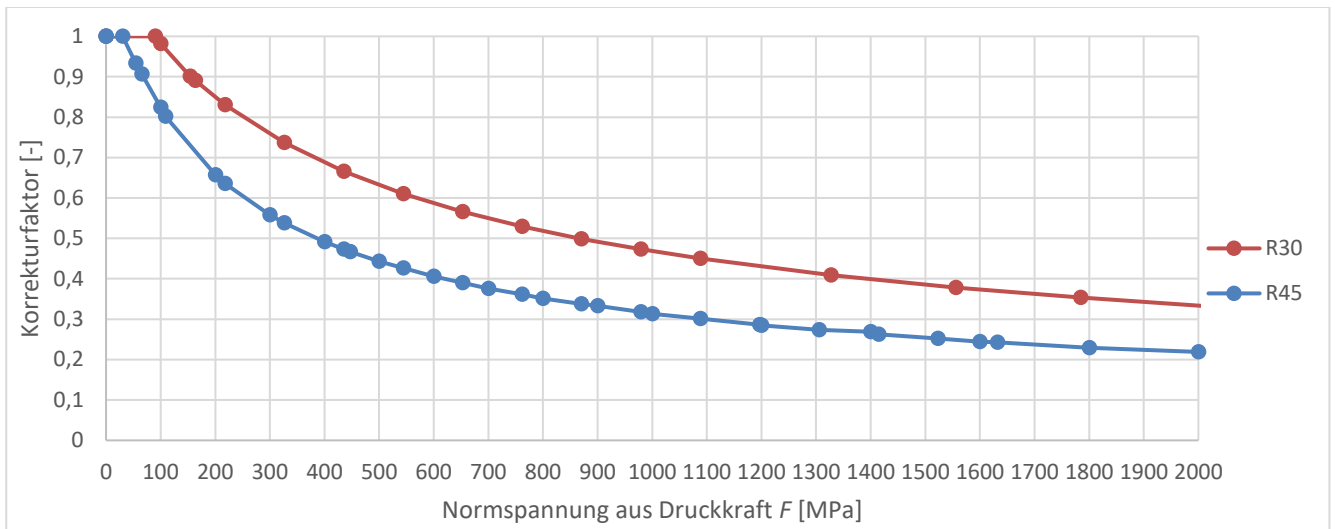


Abbildung 122: Korrekturfaktor für Glasdicke $h=1 \text{ mm}$, aus FE-Simulation

Alternativ (oder zusätzlich) zu den genannten Verschiebungen der Grenzwerte der Anwendbarkeit könnte der gesamte Versuchsaufbau auch verkleinert werden, hierbei ist die mögliche Glasdicke bei identischer Spannung proportional zur Größe des Versuchsaufbaus, das bedeutet dass zum Beispiel bei halbiertes Versuchsgröße auch die mögliche Glasdicke halbiert werden kann. Ein Nachteil dieser Größenänderung ist die Änderung der statistischen Aussagekraft der Versuche, zudem wird die Handhabung der Proben und ausreichend genaue Positionierung der Ringe gegebenenfalls komplexer. Eine Halbierung der Größe des Versuchsaufbaus würde zu einer Viertelung der Prüffläche führen. Diese Prüfflächenänderung kann entweder statistisch über den Größeneffekt [120] oder mit den in Kapitel 5.3 vorgestellten Mehrprobenverfahren berücksichtigt werden.

Ein zusätzlich beim Doppelringbiegeversuch nach EN 1288-5 anzumerkender Umstand ist, dass mit Zunahme der Membranspannungen auch die Randspannung des Probekörpers relativ zur Spannung in Plattenmitte zunimmt. Da hierbei aber die bei dickerem Glas vorherrschenden tangentialen Zugspannungen an der Glasunterseite mit aus den Membraneffekten entstehenden tangentialen Druckspannungen (es bildet sich ein Druckring in der Platte) überlagert werden, führt dieser Effekt bei Glas nicht zum vorzeitigen Bruch durch Zugversagen an den Rändern. Diese bei dickerem Glas bis zu einem Drittel der Zugspannung in Plattenmitte betragenden Zugspannungen nehmen im Gegenteil ab. Erst wenn die Stabilitätsgrenze der Glaskante überschritten wird (Knicken), kann dieser Effekt die Anwendungsgrenzen verändern, allerdings wird dies beim Versuchsaufbau nach EN 1288-5 erst bei hohen Spannungen in sehr dünnem Glas theoretisch relevant, der Versuchsaufbau wird vorher allerdings durch den von Membranspannungen verursachten Spannungsabfall in Plattenmitte unbrauchbar. Abbildung 123 zeigt die Konzentration der Ringdruckspannung in der Mitte der Kanten einer 1 mm dicken Platte im Versuchsaufbau unter einer Spannung in Plattenmitte von ca. 1000 MPa. In Abbildung 124 ist das Verhältnis der Vergleichsspannungen (siehe Anhang 7.11) am Scheibenrand zu den Vergleichsspannungen in Plattenmitte für $r_2=45$ mm und $\sigma_{Norm}=100$ MPa beispielhaft dargestellt, es ist zu erkennen, dass die Randspannungen insbesondere unterhalb einer Glasdicke von 0,5 mm deutlich zunehmen.

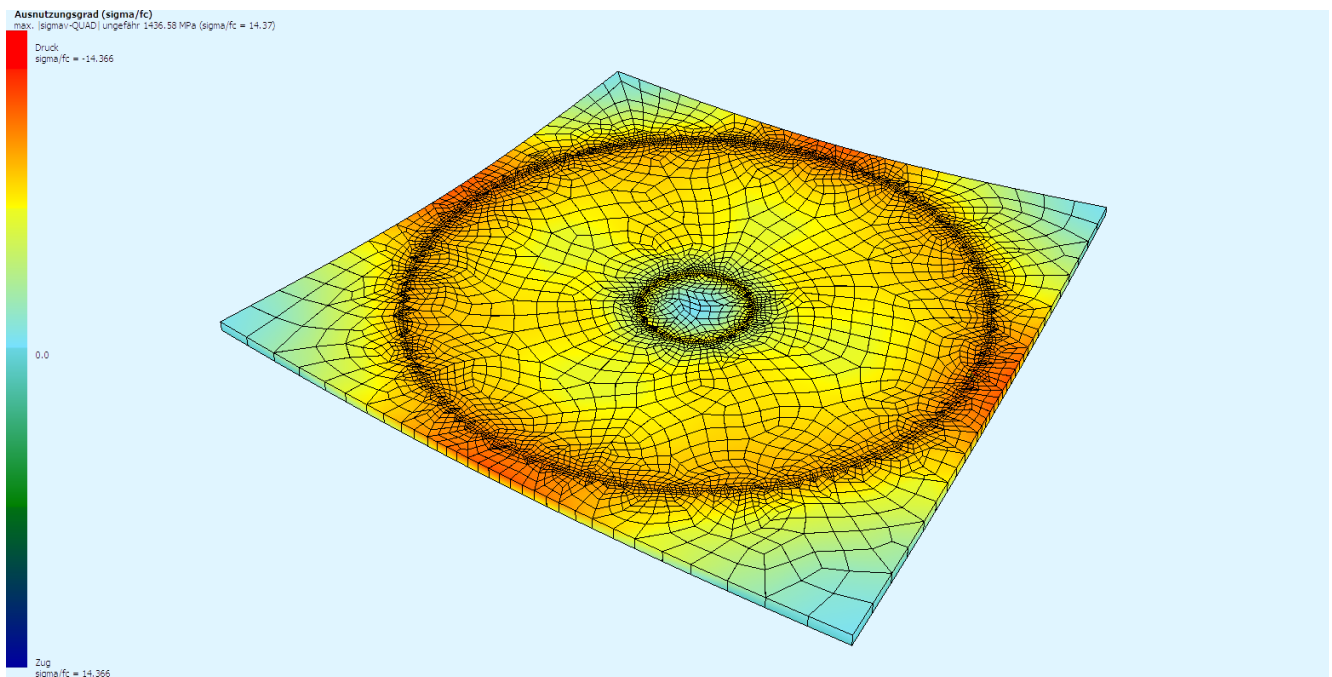


Abbildung 123: Vergleichsspannung (von Mises, siehe Anhang 7.11) in einer 1 mm dicken Glasplatte im Versuchsaufbau R30 mit Zugspannungen von ca. 1000 MPa in Plattenmitte, die Druckspannung am Plattenrand beträgt ca. das 1,4-fache.

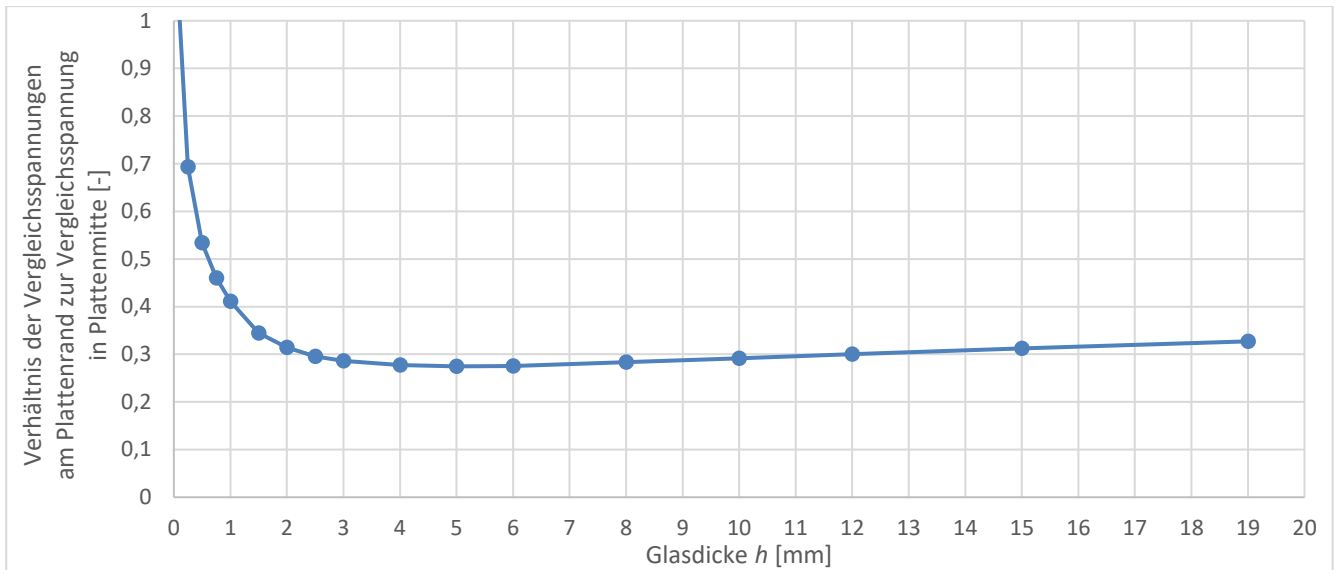


Abbildung 124: Verhältnis der Vergleichsspannungen am Plattenrand zur Vergleichsspannung in Plattenmitte für unterschiedliche Glasdicken mit den Randbedingungen $r_z=45$ mm und $\sigma_{Norm}=100$ MPa, aus FE-Simulation

Die Knickgefahr des Glasrandes kann in FE, selbst wenn kein kompliziertes Modell mit Kontaktbedingungen verwendet wird, über die Auflagerkräfte des Stützrings ermittelt werden. Sobald diese lokal kleiner oder gleich null werden (Glas hebt lokal von Stützring ab) besteht Knickgefahr. Alternativ müssen die Kontaktbedingungen in nur eine Richtung definiert werden, da sonst das Stabilitätsversagen durch „Kleben“ des Glases am Stützring behindert wird. Allerdings ist hier anzumerken, dass in der Realität bereits sehr kleine Abweichungen bei der Positionierung der Scheibe und des Lastrings im Versuchsaufbau, Vibrationen des Versuchsaufbaus und andere kleine Imperfektionen, zum Beispiel in der Glasdicke, das Knickrisiko stark erhöhen können. Zudem haben bei FE-Simulationen ebenfalls Modellierungs-, Algorithmus- und Genauigkeitsunterschiede einen großen Einfluss. Aus diesen Gründen und aufgrund der geringen Relevanz wurde darauf verzichtet, Grenzwerte für das Knicken aus FE-Simulationen oder Versuchen anzugeben, es wird empfohlen dies bei Bedarf experimentell zu überprüfen.

Abbildung 125 zeigt das Beispiel eines Grenzfalles aus einer Versuchsserie im Rahmen einer studentischen Arbeit [127], in dem Knicken des Randes in einigen nicht vorgespannten Proben relevant wurde. Der Versuchsaufbau war bewusst vergrößert, überträgt man diese Ergebnisse auf die Normmaße des Versuchsaufbaus, würde bei ca. $h=0,3$ mm im Versuchsaufbau R45 und $h=0,2$ mm im Versuchsaufbau R30 Knicken für nicht vorgespanntes Glas relevant.

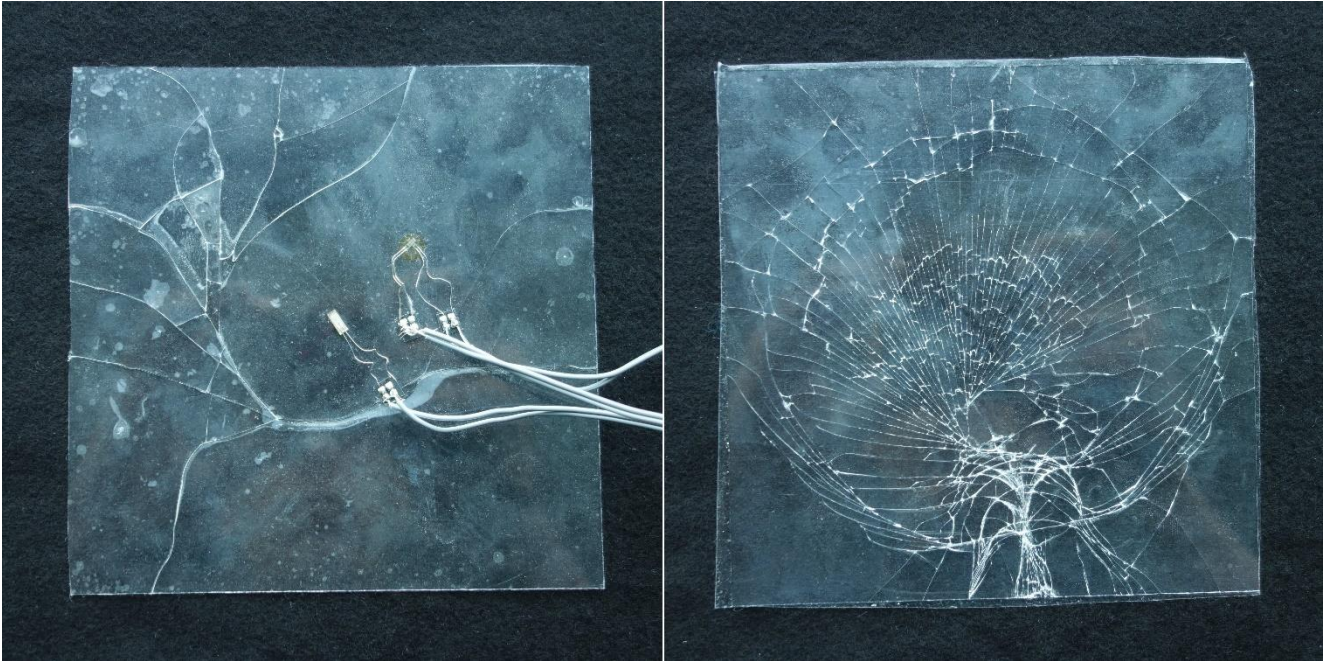


Abbildung 125: im vergrößerten Doppelringbiegeversuch ($r_1=30$ mm, $r_2=60$ mm, Kantenlänge=140 mm) gebrochene 0,36 mm dicke Scheiben; links: ringförmiger Bruch unterhalb des Lastrings; Rechts: Knicken am Rand

5.1.2. Doppelringbiegeversuch mit Druckluft (EN 1288-2)

Die Anwendbarkeit der EN 1288-2 ist in der Norm für Glasdicken ab 3 mm festgelegt. Ob dies tatsächlich insbesondere für Glas mit höheren Festigkeiten, insbesondere chemisch vorgespanntes Glas, in dieser Dicke umsetzbar ist, ist zu bezweifeln. Die Norm selbst gibt für diese Glasdicke nur Berechnungswerte bis zu einer Spannung von ungefähr 50 MPa an (Abbildung 126). Auf dünneres Glas umgerechnet ergeben sich bei 2 mm dickem Glas Maximalspannungen von 22,2 MPa und für 1 mm dickes Glas 5,5 MPa.

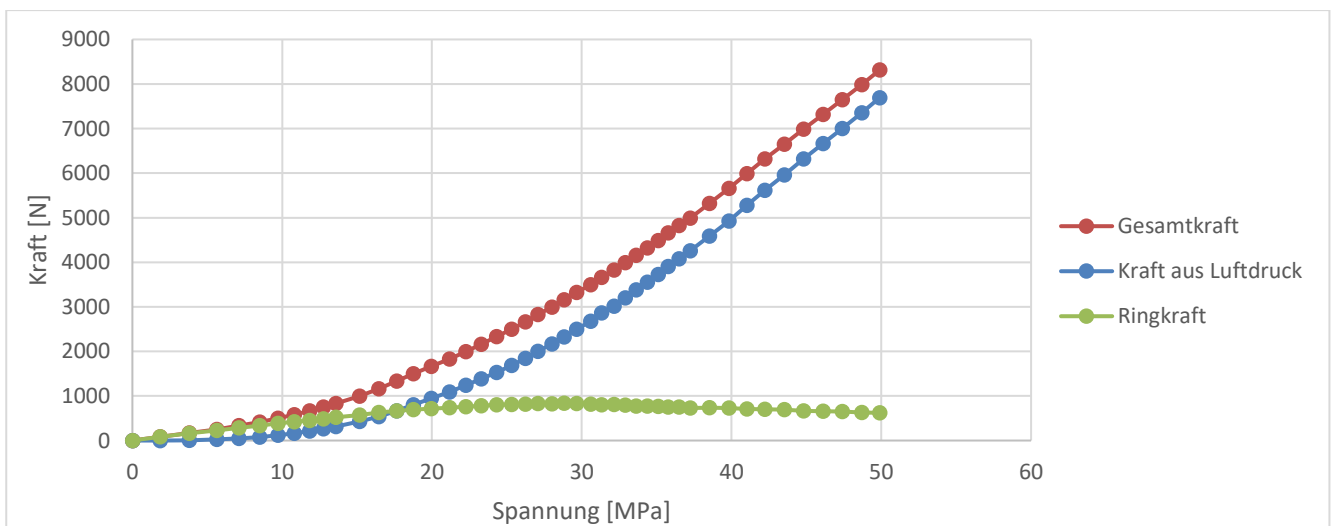


Abbildung 126: Kraft-Spannungs-Verlauf für gleichmäßige Spannungsverteilung in 3 mm dickem Glas nach den Formeln aus EN1288-2

Gibt man zudem diese Anfang der 1980er Jahre berechneten Werte in ein zeitgemäßes Finite-Element-Programm mit nichtlinearer Berechnung ein, erhält man stark von einer „gleichmäßigen Spannungsverteilung innerhalb des Lastrings“ abweichende Ergebnisse, die unter einer einigermaßen

gleichmäßigen Spannung stehende Fläche nimmt mit zunehmender Spannung ab (Abbildung 127), hiervon sind insbesondere die Tangentialspannungen betroffen (Abbildung 128).

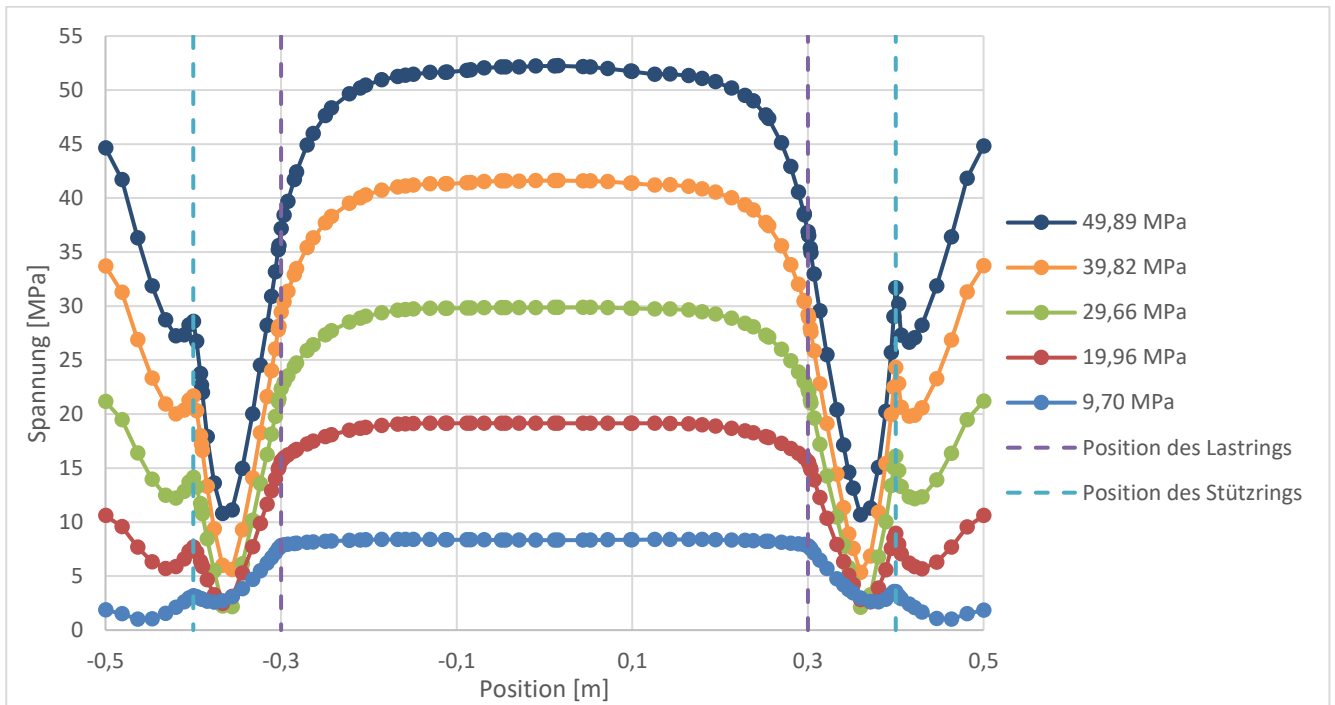


Abbildung 127: Vergleichsspannung an der Plattenunterseite in 3 mm dickem Glas im Querschnitt für die jeweils in der Legende nach EN 1288-2 angegebenen "gleichmäßigen" nach Norm berechneten Spannungen unter dem Lastring, aus FE-Berechnung

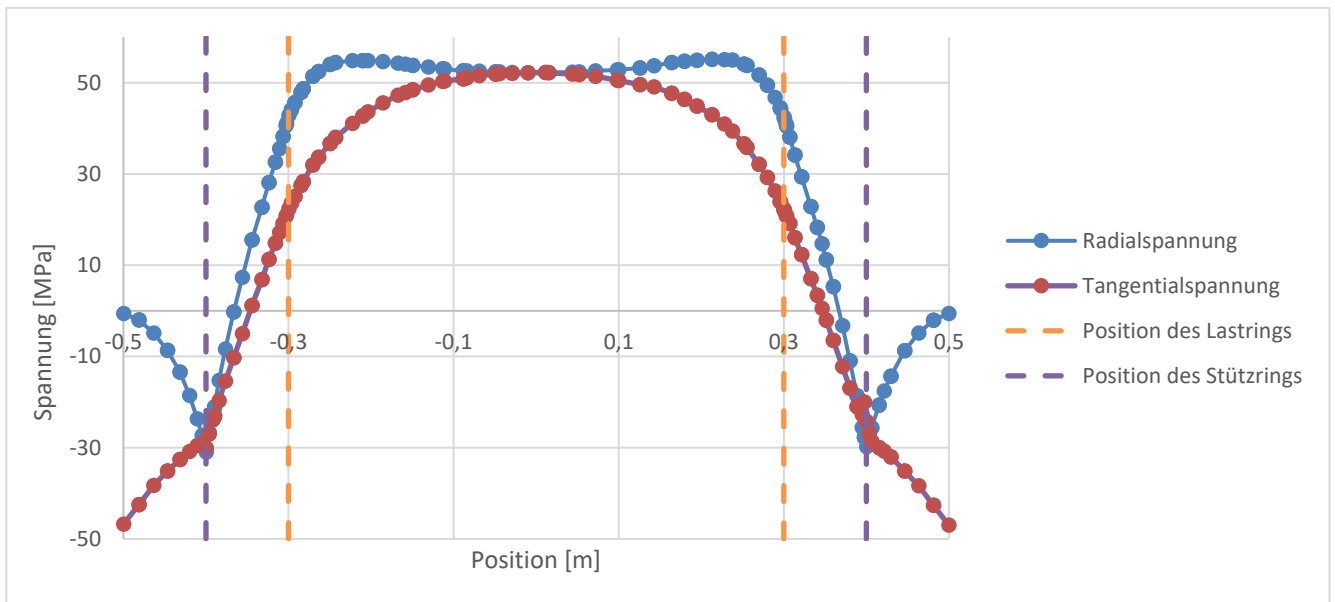


Abbildung 128: Vergleich von Radial- und Tangentialspannungen für eine 3 mm dicke und unter einer nach EN 1288-2 mit 49,89 MPa angegebenen Spannung stehende Glasplatte, aus FE-Berechnung

Wie bereits in einer Publikation zur EN 1288-3 gezeigt [103] sollten in den 1980er Jahren erstellte und teilweise für Normen als Grundlage dienende Berechnungen im Kontext ihrer Zeit und der damaligen technischen Mittel gesehen und mit Vorsicht betrachtet werden.

Sollen im Glas höhere Spannungen als in der Norm vorgesehen erzeugt werden, so könnte man theoretisch die in Abbildung 126 gezeigten Kurven extrapolieren oder neu berechnen. Allerdings würde dies schnell zu dem Ergebnis führen, dass die Belastung aus Luftdruck nahezu der Prüfkraft entspräche, wodurch der Lastring keinen weiteren Zweck erfüllen würde als die Luft zu halten (die Prüfkraft der Prüfmaschine kann nicht niedriger sein als die Kraft aus Luftdruck, ansonsten entweicht die Luft). Zudem würde sich die Spannungsverteilung, wie in Abbildung 127 zu erahnen, zunehmend ungleichmäßiger ausprägen.

Aufgrund der Dimensionen der Proben in diesem Verfahren kann zudem das Limit der Anwendbarkeit bereits durch die mögliche Größe des Ausgangsglases bestimmt sein, viele Dünnglasprodukte sind nicht in der geforderten Abmessung von 1 m x 1 m verfügbar (siehe Tabelle 1 auf Seite 7). Auch limitieren die deutlich höheren Kosten je Glasfläche (aus Erfahrung im Schnitt eine Zehnerpotenz höher) die Anwendbarkeit, die nötige Glasfläche ist im Versuchsaufbau nach EN 1288-2 um den Faktor 100 höher als im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 (1 m² statt 0,01 m²), wodurch der Glaspreis im Verhältnis zu Lohnkosten eine signifikante Rolle spielt.

Mit dazu kommenden Problemen beim Handling, der subjektiv festgestellten geringen Verbreitung des Versuchsaufbaus sowie zu erwartenden Stabilitätsproblemen wurde davon abgesehen, vertiefte Untersuchungen zu weiteren Anwendungsgrenzen dieses Versuchsaufbaus durchzuführen und dieser in Originalgröße für Dünnglas als grundsätzlich ungeeignet bewertet. Im später vorgestellten Mehrprobenverfahren wäre ein proportional verkleinerter Aufbau theoretisch denkbar, allerdings selbst dann nur begrenzt sinnvoll.

5.2. Stand der Technik bei zweiachsiger Dünnglasprüfung

Im Gegensatz zu einachsiger Prüfung von Dünnglas ist die Forschung zu zweiachsiger Prüfung nicht sehr umfangreich. Es existieren neben der Diplomarbeit [128] und Dissertation [129] von Schmitt als Grundlage für die Norm EN 1288-2 einige weitere Ansätze, die sich bisher jedoch in der Praxis nicht durchgesetzt haben. Ein möglicher Grund ist die Tatsache, dass die Doppelringbiegeversuche nach EN 1288-5 für geringere Glasdicken einsetzbar sind als die einachsigen Biegeversuche nach EN 1288-3 und sich daher keine Notwendigkeit für weitere Prüfverfahren ergeben hat. Zudem ist es möglich, dass in den relevanten Industrien, beispielsweise in der Elektronikbranche, die Kantenfestigkeit bei Dünnglas eine erheblich größere Rolle als die Flächenfestigkeit spielt.

Verkleinerter Doppelringbiegeversuch

Wie auch bei der einachsigen Biegeprüfung stammen die ersten Veröffentlichungen zur zweiachsigen Biegeprüfung von Dünnglas aus der Forschung von Corning Inc., insbesondere von Suresh T. Gulati. Im Jahr 2002 [130] wurde eine Untersuchung zum Doppelringbiegeversuch an „ultradünnen AMLCD - Glassubstraten“ mit Dicken von 0,26 bis 0,67 mm veröffentlicht. Zur Prüfung wurde ein deutlich kleinerer Doppelringbiegeversuch mit einem Stützringdurchmesser von $\frac{1}{2}$ “ (12,7 mm) und einem Lastringdurchmesser von $\frac{1}{4}$ “ (6,35 mm). Durch die geringen Abmessungen wurde hier dem Membraneffekt entgegengewirkt.

Es ist zudem zu erwähnen, dass als Ergebnis in dieser Veröffentlichung festgestellt wurde, dass die Festigkeit von (Ultra-)Dünnglas nicht von der Dicke, sondern lediglich der Oberflächenqualität abhängt. Dies mag logisch erscheinen, wurde sonst jedoch kaum publiziert.

Stempelversuch

Eine Alternative zum Lastring im Doppelringbiegeversuch ist die von Neugebauer [111] vorgeschlagene Verwendung eines Elastomerstempels anstelle des Lastrings. Dies sorgt in den jeweiligen Anwendungsbereichen unterschiedlicher Druckstempel für eine ausgeglichene Lastverteilung, die den „Doppelringbiegeversuch“ für dünneres Glas ermöglicht.

Die Anfälligkeit des Polymerstempels für Beschädigungen durch Glassplinter, das komplexe nichtlinear elastische Verhalten des Polymers und die damit einhergehenden Verformung des Stempels sowie die Notwendigkeit unterschiedlicher Stempel für unterschiedliche Testszenarien schränken dieses Verfahren in seiner breiten Anwendbarkeit allerdings ein.

5.3. Mehrprobenverfahren

Analog zum Mehrprobenverfahren bei einachsiger Biegung (siehe Kapitel 4.3) wäre es auch bei zweiachsiger Biegung möglich dieselbe statistische Aussagekraft eines Tests einzelner Proben durch den Test von Gruppen von Proben mit jeweils Bruchteilen der Prüffläche zu erreichen. Eine Halbierung der Größe des Versuchsaufbaus würde mit einer Halbierung der möglichen Glasdicke und einer Viertelung der Prüffläche einhergehen, was je vier Proben in einer Probengruppe bedeuten würde. Skaliert man den Versuchsaufbau um den Faktor $\sqrt{2}$, sind nur zwei Proben je Gruppe notwendig und die Glasdicke reduziert sich ebenfalls um denselben Faktor $\sqrt{2}$. Auch hier sind beliebige Teilungen möglich, die Formeln zur Spannungsberechnung aus den Normen EN 1288-2 und EN 1288-5 lassen sich zudem ohne Änderung nutzen, da diese von den relativen, nicht den absoluten Abmessungen abhängen und daher dimensionslos verwendet werden können.

Wie bereits beim einachsigen Mehrprobenverfahren macht es jedoch keinen Unterschied für das Ergebnis, ob die einzelnen Teile einer virtuellen größeren Probe zusammen oder nacheinander geprüft werden. Ein beispielhafter Versuchsaufbau, mit dem die Proben einer Gruppe zur Zeitersparnis zeitgleich getestet werden können, ist in Abbildung 129 gezeigt. Hier handelt es sich um zwei übereinander angebrachte Doppelringaufbauten, das Eigengewicht des mittleren Teils wird durch an Umlenkrollen befestigte Gewichte kompensiert, damit beide Proben dieselbe Belastung erfahren.

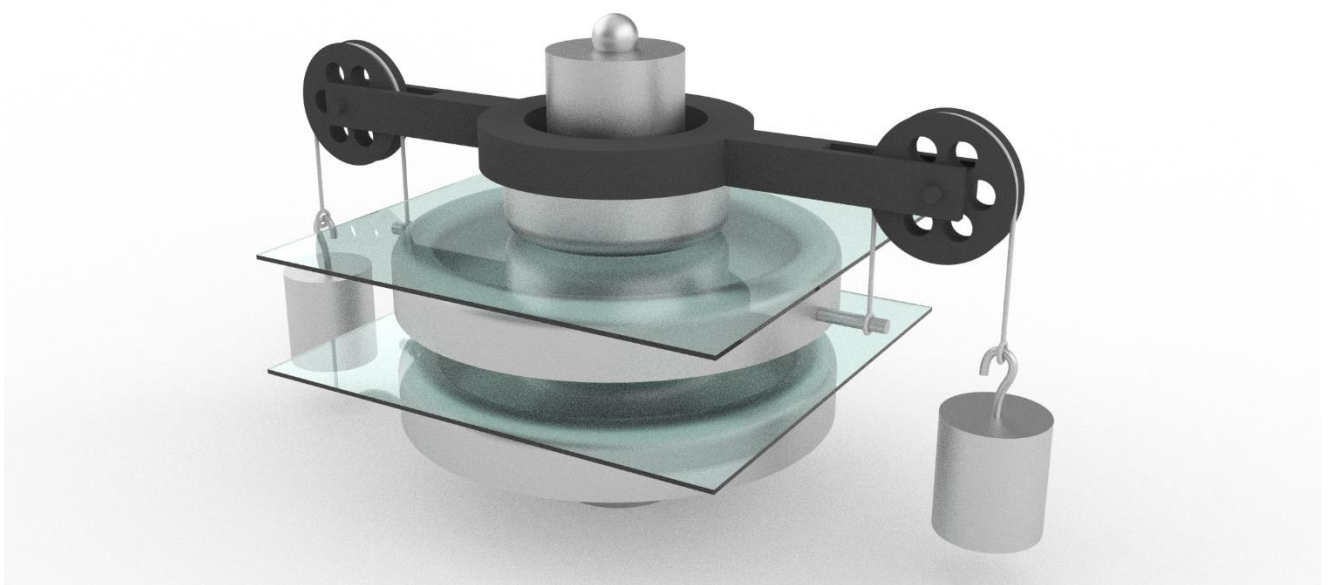


Abbildung 129: beispielhafter Versuchsaufbau für das Mehrprobenverfahren im Doppelringbiegeversuch, das Gewicht des Mittelteils wird über ein Rollensystem in das Oberteil weitergeleitet, um für eine gleichmäßige Belastung der beiden Scheiben zu sorgen

5.4. Druckluftunterstütztes Verfahren für kleine Doppelringe (Überdruckverfahren)

Auch wenn der Versuchsaufbau für EN 1288-2 (Doppelringbiegeversuch mit Druckluftunterstützung für große Prüfflächen) in Kapitel 5.1.2 nicht für Dünnglas empfohlen wurde, so ist im erheblich kleineren Versuchsaufbau nach EN 1288-5 eine Druckluftunterstützung umsetzbar.

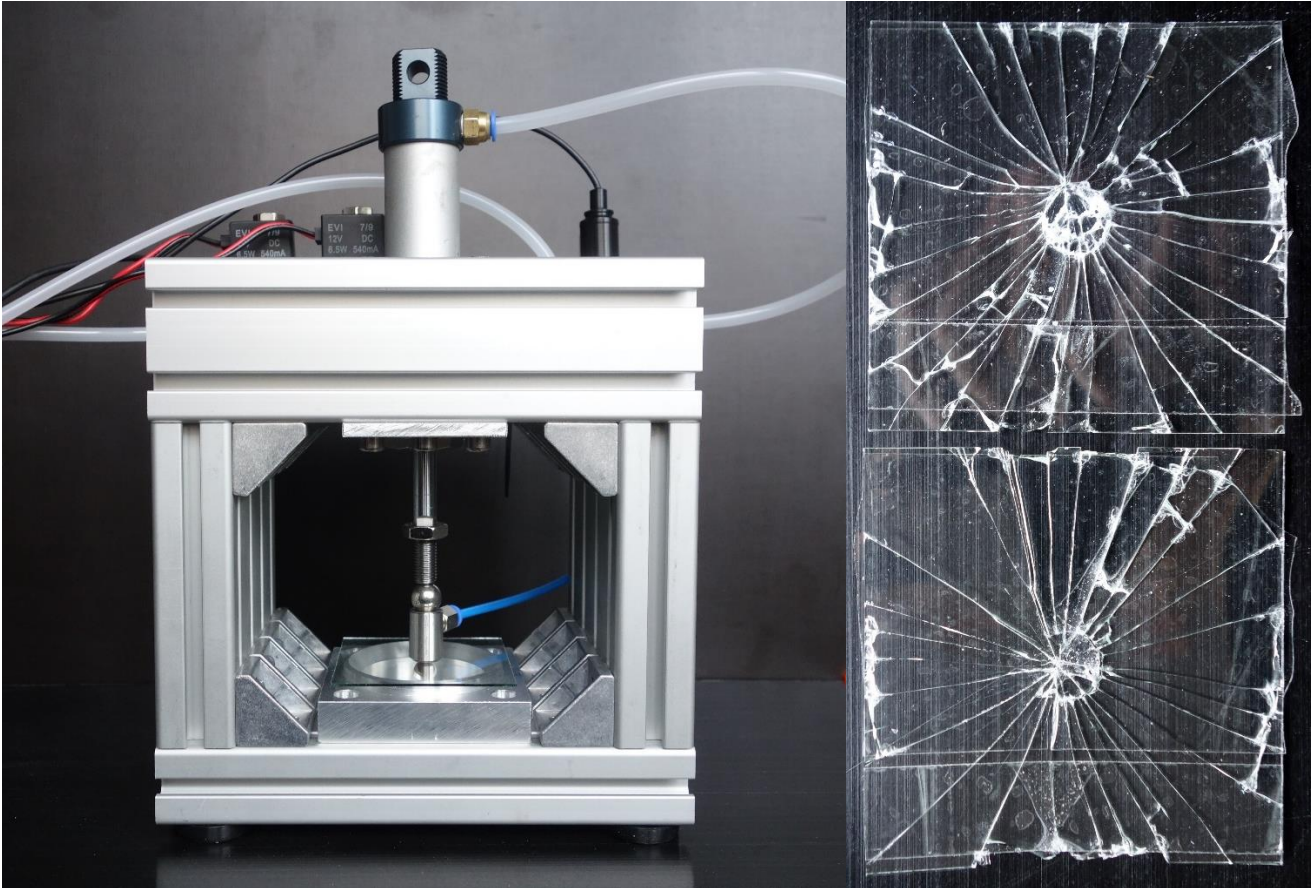


Abbildung 130: links: Versuchsaufbau für den Doppelringbiegeversuch R30 nach EN 1288-5 mit Druckluft; rechts: damit gebrochenes, 1,1 mm dickes Floatglas, oben ohne Druckluftunterstützung, daher Bruch unter dem Lastring, unten mit Druckluftunterstützung und Bruch in der Fläche innerhalb des Lastring; der Abdruck des Lastring entstand nach dem Bruch durch das erneute Auftreffen des durch den Pneumatikzylinder der Prüfmaschine beschleunigten Lastring

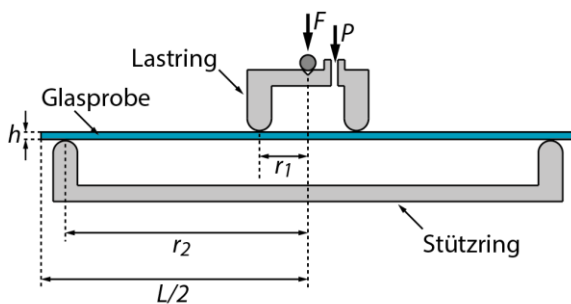
5.4.1. Funktionsprinzip und Konstruktion des Versuchsaufbaus

Der Versuchsaufbau entspricht dem Versuchsaufbau nach EN 1288-5 (siehe Kapitel 2.2.2) mit zusätzlichem Druckluftanschluss am Lastring zur Aufbringung eines Luftdrucks innerhalb desselben (Abbildung 131 a)). Der Spannungsabfall innerhalb des Lastring im Normversuch nur mit Ringlast wird durch die vom Luftdruck erzeugte Spannungsüberhöhung kompensiert, bei idealem Verhältnis heben sich die beiden Effekte nahezu auf und es entsteht ein näherungsweise linearer Spannungsverlauf.

Bei der Berechnung des Spannungsverlaufs ist es möglich zwei unterschiedliche Ansätze zu verfolgen. Einerseits können wie in EN 1288-2 die Lastverhältnisse so berechnet werden, dass die Spannung in Plattenmitte nahezu gleichmäßig ist (vergleiche Abbildung 127), hier fällt die Spannung jedoch vor Erreichen des Lastring ab und die unter nahezu gleicher Spannung stehende Prüffläche wird „auf der unsicheren Seite liegend“ zu klein. Alternativ kann auf der sicheren Seite liegend die Spannung so berechnet werden, dass sie unter dem Lastring und in Plattenmitte denselben Wert erreicht, dazwischen kommt es dann zu einem kleinen Anstieg, somit ist eine Mindestspannung für die gesamte

Prüffläche gewährleistet. Hier wurde letzterer Ansatz verfolgt (Abbildung 131 b)), die Vorgehensweise nach EN 1288-2 wird als unsicher bewertet.

a) Versuchsaufbau nach EN 1288-5 mit Druckluft



Versuchsaufbau:	R30	R45
Probenabmessung L:	66 mm	100 mm
Stützringradius r_2 :	30 mm	45 mm
Lastringradius r_1 :	6 mm	9 mm

b) Spannungsverläufe bei großen Verformungen

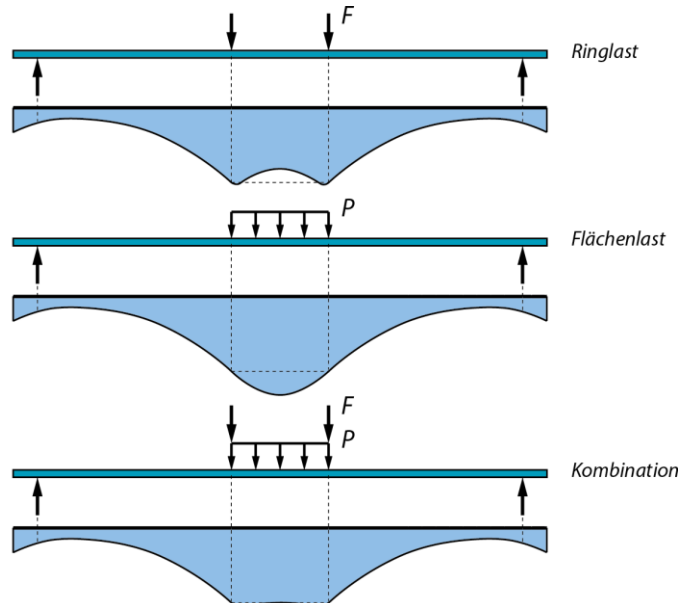


Abbildung 131: a) Schnittdarstellung des Versuchsaufbaus; b) schematische Schnittdarstellung des Kraftverlaufs unter Ringlast, Flächenlast aus Druckluft und einer Kombination beider Lasten

Für den experimentellen Versuchsaufbau wurde eine einfache Prüfmaschine für die Versuchsgröße R30 nach EN 1288-5 gebaut, welche hier nur kurz beschrieben wird (Abbildung 130 links). Die Maschine besteht aus einem Aluminiumrahmen aus Konstruktionsprofilen in den an der Oberseite ein Pneumatikzylinder und an der Unterseite ein Stützring eingeschraubt sind. Der aus Aluminium gedrehte Stützring hat, anderes als die meisten für dickeres Glas verwendeten Stützringe, an der Rückseite eine Öffnung damit sich bei großen Verformungen und beim Bruch kein Überdruck aufgrund der Volumenverkleinerung bildet. Es wurde für die Aufbringung der Prüfkraft Druckluft verwendet da die Maschine bereits für den Lastring Druckluft bereitstellen muss, somit verringert sich die Komplexität, da nicht zwei unterschiedliche Technologien (Motoren und Pneumatik) verbaut sind. Sowohl der Luftdruck unter dem Lastring als auch die Prüfkraft über den Pneumatikzylinder sind mit einer Kombination aus Drucksensor und Magnetventil regelbar (Abbildung 134).

Die Größe R30 wurde aus mehreren Gründen gewählt, ein Hauptgrund waren dabei aber die im nächsten Kapitel dargestellten breiteren Anwendungsgrenzen.

5.4.2. Druckluft im Versuchsaufbau nach EN 1288-5

Für die Anwendung ergeben sich bei diesem Versuchsaufbau gegebenenfalls Anwendungsgrenzen durch die Verfügbarkeit und sichere Anwendbarkeit von Druckluft. Im Vergleich zur EN 1288-2 sind die benötigten Drücke um mehrere Größenordnungen höher, hier ergeben sich unter anderem Sicherheitsbedenken, aber auch Einschränkungen in der Verfügbarkeit.

Druckluftanlagen, wie sie beispielsweise in vielen Industrie- und Forschungsanlagen zentral verbaut sind, liefern Drücke in der Größenordnung von 10 bar (üblicherweise zwischen 8 bar und 16 bar). Multipliziert man nun die Fläche unter einem Lastring nach EN 1288-5 mit diesem Druck, so erhält man für 10 bar Druck eine maximale Kraft von ungefähr 254 N im Versuchsaufbau R45 sowie 113 N im Versuchsaufbau R30 die als Drucklast auf das Glas aufgebracht werden kann. Damit ist in 0,5mm dickem Glas maximal für eine Spannung von 323 MPa eine Kompensation der Membranspannungen möglich (Abbildung 132), mit kleinerem Lastring oder dickerem Glas steigt diese Grenze (Abbildung 133). Wie in Kapitel 5.1.1 bei den Anwendungsgrenzen bereits beschrieben, treten im Versuchsaufbau

R45 bei ungefähr 0,3 mm und im Versuchsaufbau R30 bei ungefähr 0,2 mm Glasdicke Stabilitätsprobleme am Rand auf.

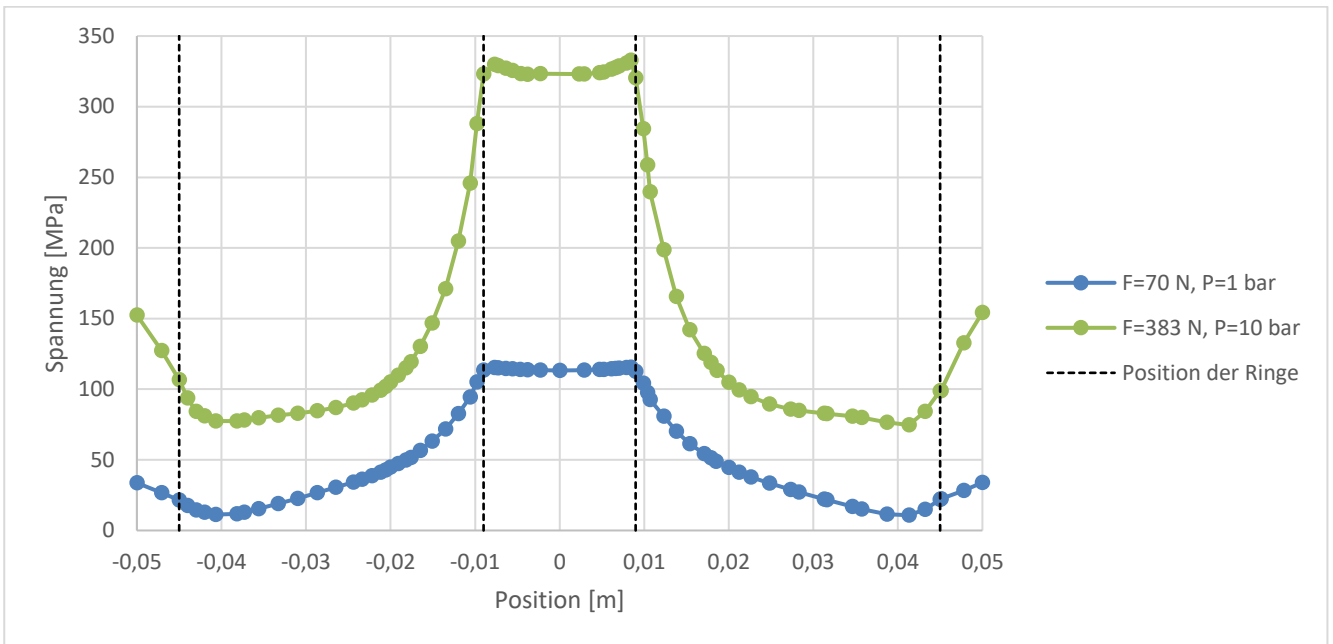


Abbildung 132: Doppelringbiegeversuch mit Druckluftunterstützung im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-3, Vergleichsspannung (siehe Anhang 7.11) im Schnittverlauf an Plattenunterseite in 0,5 mm dickem Glas mit optimierter Luftdruckunterstützung (Spannung unter Lastring gleich Spannung in Plattenmitte) für zwei unterschiedliche Drücke

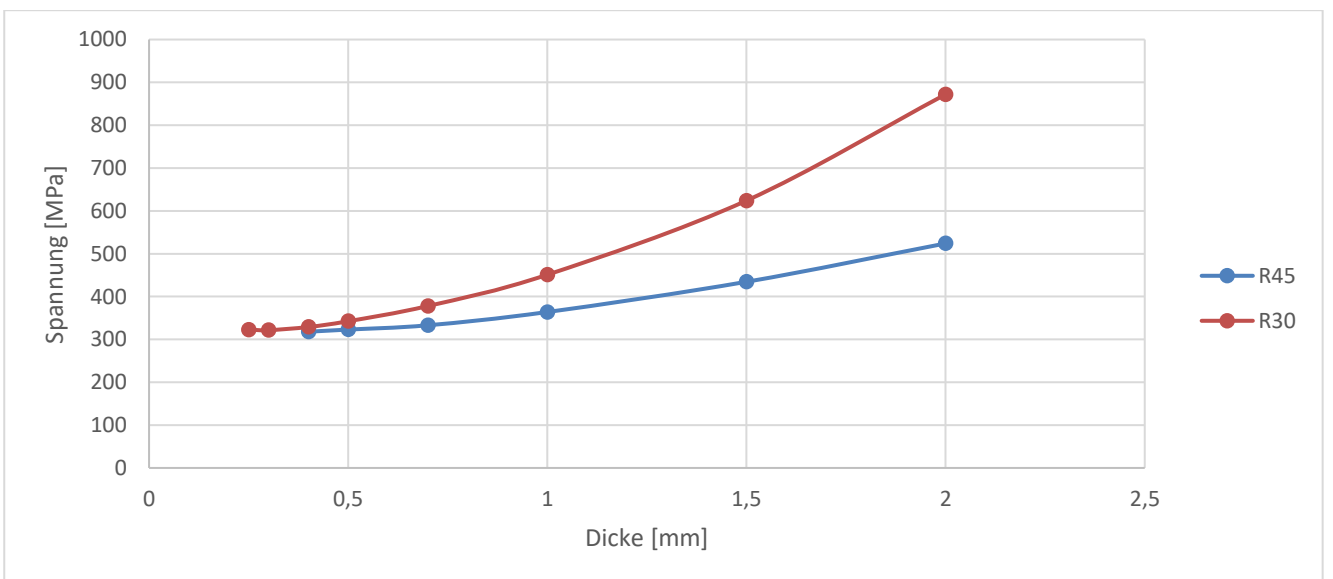


Abbildung 133: Vergleichsspannung (von Mises, siehe Anhang 7.11) unter dem Lastring für unterschiedliche Glasdicken für die Versuchsaufbauten R30 und R45 nach EN 1288-5 bei denen die Membranspannung durch einen Druck von 10 bar kompensiert werden kann

Der Versuchsaufbau ist also grundsätzlich für die in Dünnglas zu erwartenden Spannungen geeignet, bei sehr hoch chemisch vorgespanntem Glas würde allerdings in einigen Fällen gewöhnliche Druckluft nicht ausreichen.

Flaschengase sind üblicherweise mit Drücken von 200 bar verfügbar, hier erhöht sich unter Maximaldruck die mögliche Last aus Luftdruck auf ungefähr 5,1 kN (R45) beziehungsweise 2,3 kN (R30). Die Verwendung von Druckluft dieser Größenordnung geht allerdings mit erheblichen

Gefährdungen einher. Die meisten Druckluftkomponenten sind zudem auf einen maximalen Arbeitsdruck von 10 bar, teilweise bis 16 bar, ausgelegt, bei höheren Drücken wäre aufwändigere Technik nötig. Daher wird grundsätzlich von der Verwendung von Drücken über 16 bar abgeraten. Auch bei Druckluft von 10 bar sollte sichergestellt werden, dass beispielsweise bei Bruch des Glases die Druckluft nicht ungebremst nachströmen kann. Hierfür sollten zumindest Durchflussbegrenzer nahe dem Lastring eingebaut und das Luftvolumen danach soweit möglich reduziert werden (Abbildung 134), ansonsten könnten womöglich der leichte Lastring durch die ausstoßende Luft beschleunigt in eine Richtung sowie Glassplitter in andere Richtungen „fliegen“, was Schäden am Versuchsaufbau und gegebenenfalls bei fehlenden Schutzeinrichtungen der Maschine an Personen verursachen würde.



Abbildung 134: beispielhafter Aufbau der Regelung mit Lastring R45 links, dann Drucksensor, Durchflussregler und Magnetventil mit Druckluftkupplung; das Luftvolumen zwischen Magnetventil und Durchflussregler sollte möglichst klein sein um den Druck kontrolliert ansteigen lassen zu können, ansonsten kommt es zu größeren Drucksprüngen, alternativ wäre ein ansteuerbarer Durchflussregler sinnvoll

Für die Versuchsdurchführung sind aufgrund des nichtlinearen Kraft-Spannungs-Verlaufs Belastungskurven notwendig (siehe auch Abbildung 121 und Abbildung 122 in Kapitel 5.1.1). Nachfolgend sind diese für den gebauten Versuchsaufbau R30 und unterschiedliche Glasdicken gegeben (Abbildung 135), können jedoch auch für Glas in eineinhalbfacher Dicke näherungsweise im Versuchsaufbau R45 genutzt werden. Die Last aus Luftdruck kompensiert hierbei in einem großen Bereich den Spannungsabfall aus Membranspannungen, in der Praxis bei einem Luftdruck von maximal 10 bar jedoch nur bis zu den in Abbildung 133 dargestellten Grenzwerten.

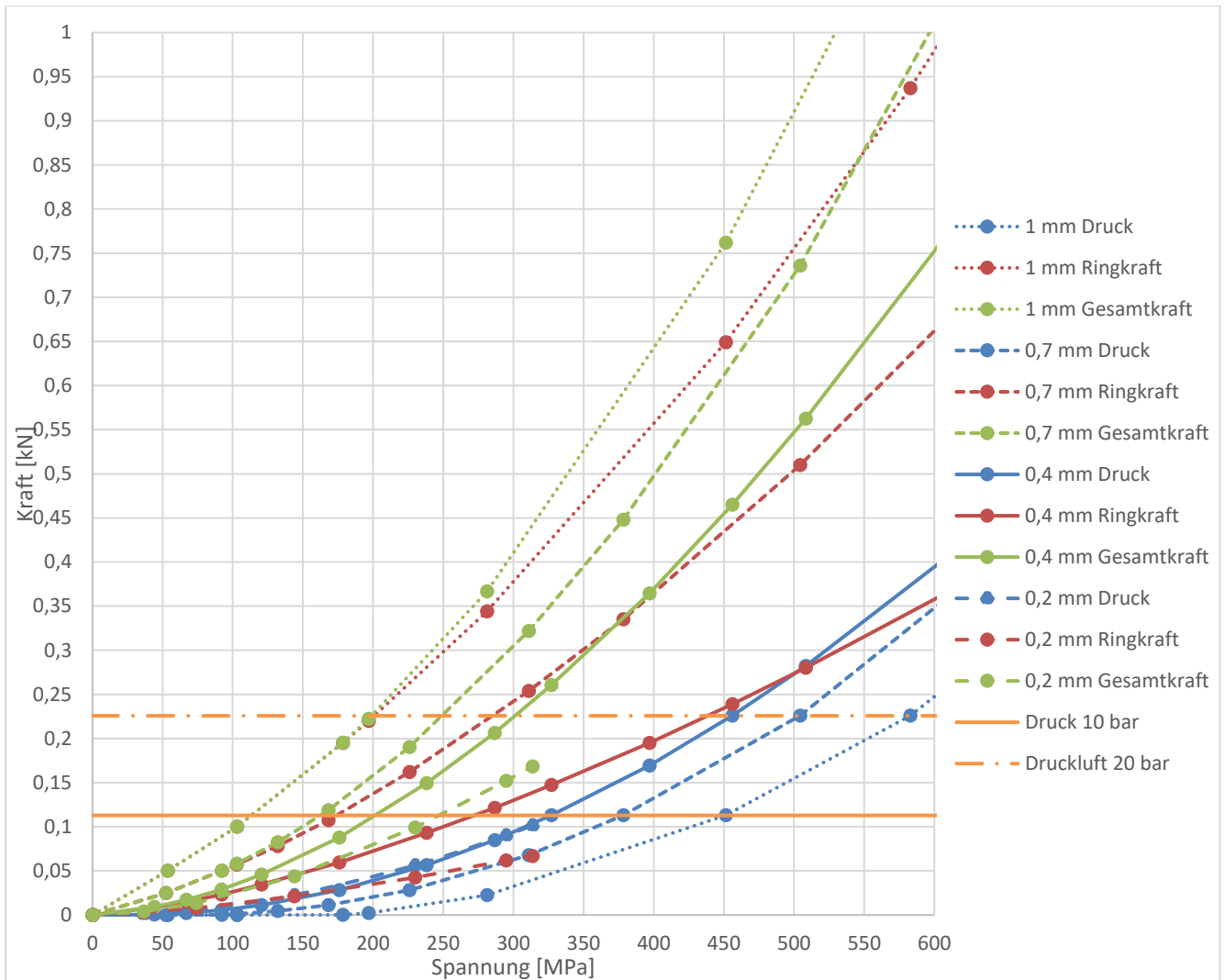


Abbildung 135: Last-Vergleichsspannungs-Diagramm für den Versuchsaufbau R30 nach EN 1288-5 mit Druckluftunterstützung; die 0,2 mm-Kurve endet da Stabilitätsprobleme bei ungefähr 330 MPa auftreten

Zwischen dem Lastring und der Plattenmitte steigt, wie bereits erwähnt, die Spannung auf der sicheren Seite liegend an, die maximale Lastüberhöhung ist in Abbildung 136 gegeben. Es ist zu sehen, dass, um im gesamten Bereich innerhalb des Lastrings die angegebene Mindestspannung zu erhalten, nur eine geringe „Überspannung“ notwendig ist. Diese steigt selbst bei hohen Spannungen nicht sonderlich stark an, flacht stattdessen eher ab.

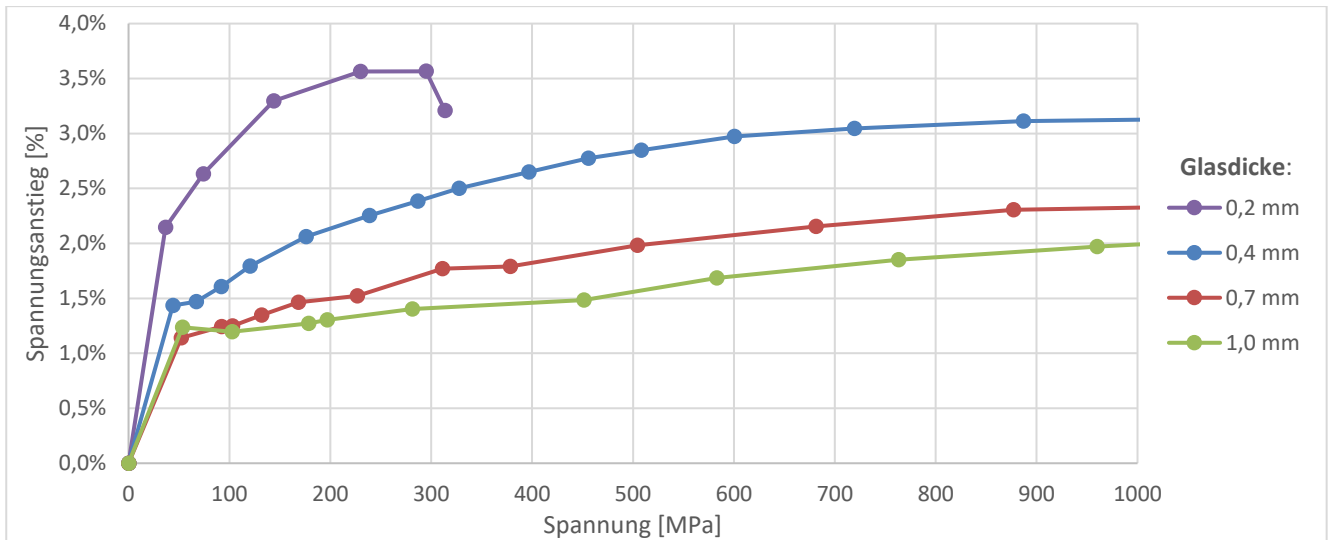


Abbildung 136: Laststeigerung zwischen Ring und Scheibenmitte bei Spannungen aus vorheriger Abbildung und unterschiedlichen Glasdicken; ein kleiner Fehler aus dem FE-Modell ist zu erkennen, die Spannungen können nicht kontinuierlich an jedem Punkt ausgelesen werden, nur an den Elementgrenzen sind Daten verfügbar

5.4.3. Druckluft mit größeren Durchmessern als in EN 1288-5

Wie aus Kapitel 5.1.2 (Grenzen EN 1288-2) und Abbildung 133 bereits zu ersehen, ist eine Druckluftunterstützung für größere Ringdurchmesser tendenziell schlechter für Dünnglas umzusetzen, bei einer Größe wie in EN 1288-2 wird der Versuchsaufbau komplett unbrauchbar.

Oft wird bei der Doppelringbiegeprüfung auf größere Last- und Stützringdurchmesser als in EN 1288-5 vorgeschrieben zurückgegriffen. Bei dickem Glas kann das Ergebnis nach Norm dann immer noch nahe genug an der Realität liegen, allerdings sind größere Durchmesser in vielen Fällen unbrauchbar. Beispielhaft ist nachfolgend (Abbildung 137) ein Schnittkraftverlauf für eine 3 mm dicke Platte im Versuchsaufbau mit Stützringradius von 80 mm und Lastringradius von 40 mm gegeben. Nach Norm (Theorie I. Ordnung) gerechnet ergeben sich erheblich höhere Spannungen als tatsächlich (nichtlinear gerechnet), zudem sind deutliche Membranspannungen sichtbar.

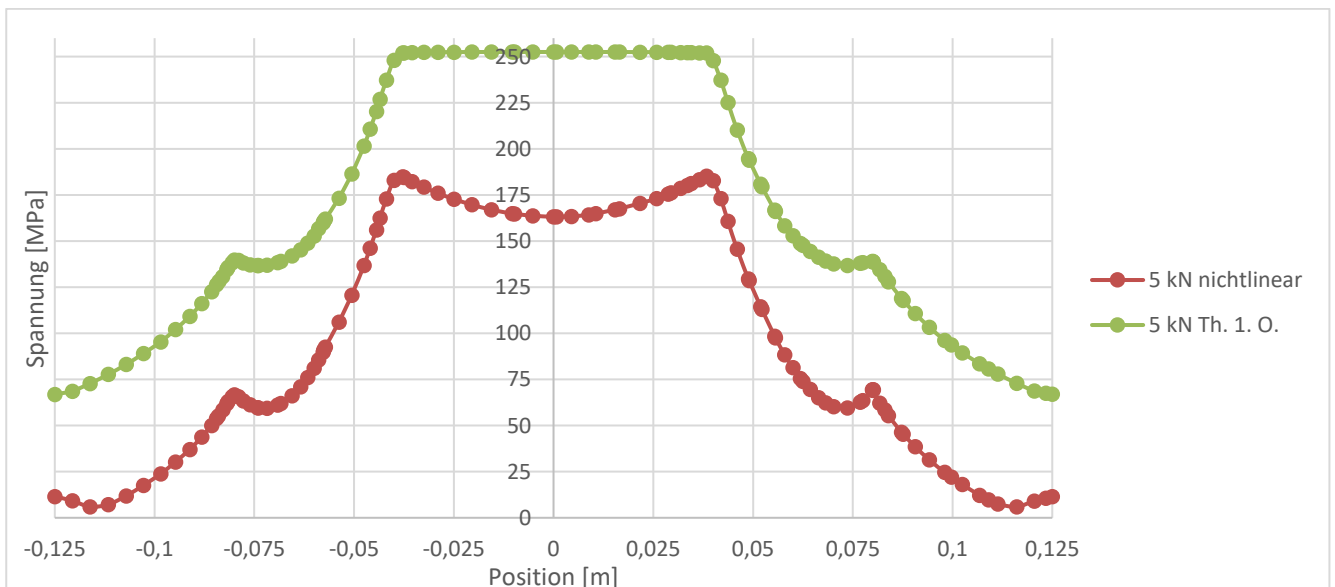


Abbildung 137: Vergleichsspannung (von Mises, siehe Anhang 7.11) an Plattenunterseite im Schnitt bei Stützringradius von 40 mm und Lastringradius von 80 mm in einer 3 mm dicken Platte mit Kantenlänge von 250 mm und einer Last von 5 kN, aus FE

In einer Bachelorarbeit aus dem Jahr 2019 von Finger [127] wurde ein Versuchsaufbau mit Stützringradius von 60 mm und Lastringradius von 30 mm untersucht und ein Diagramm ähnlich Abbildung 135 generiert. Bei dieser Dicke stellt sich das Knicken des Glases bereits als deutliches Problem heraus. Nach den Berechnungen knickt Glas der Dicke 0,2 mm bereits bei ungefähr 30 MPa, 0,27 mm bei ungefähr 60 MPa, 0,4 mm bei ungefähr 80 MPa und 0,5 mm bei knapp über 100 MPa. Knicken bei größeren Glasdicken wurde zwar nicht gezeigt, eine Brauchbarkeit des Versuchsaufbaus ist aber erst ab einer Dicke von 1 mm anzunehmen. Negativ ist bei dieser Größe zudem der nötige Luftdruck zu nennen, bei 1 mm dickem Glas ist ungefähr 2,3 bar für eine Spannung von 150 MPa zur Kompensation des Membraneffekts nötig, im Versuchsaufbau R30 nach EN 1288-5 ist der Luftdruck hingegen vernachlässigbar klein, selbst im Versuchsaufbau R45 ist nur ein Druck von ungefähr einem bar nötig.

5.4.4. Bewertung

Ähnlich wie beim Versuchsaufbau nach EN 1288-2 (große Prüffläche mit Druckluftunterstützung) kann die Druckluft bei höheren Belastungen in dünnem Glas nicht mehr den Spannungsabfall aus Membranspannungen kompensieren. Wie auch beim nächsten Verfahren (Unterdruckverfahren) gezeigt, wird die Ringlast für Extremfälle im Vergleich zur Last aus Druckluft irrelevant, es ist somit nur ein reines Druckluftkissen relevant, was vom Prinzip dem Stempelversuch von Neugebauer ähnelt. Allerdings wird dieser Punkt in den Versuchsaufbauten nach EN 1288-5 erst bei Spannungen deutlich über 1000 MPa erreicht, vorher wird meist Stabilität relevant. Daher ist dies in den Versuchsaufbauten nicht relevant.

Im Zwischenbereich (wenn weder eine reine Ringlast ausreicht noch der Luftdruck die Verformung nicht mehr kompensieren kann) ist dieses Verfahren jedoch sehr gut anwendbar, die Grenzen der Anwendbarkeit der EN 1288-5 lassen sich so deutlich verschieben. Auch ist der „Fehler“ der Spannungen zwischen Lastring und Plattenmitte verhältnismäßig gering, selbst in Extremfällen scheint er nicht über 4% (Abbildung 136) zu steigen, zudem liegt er auf der „sicheren Seite“.

Allerdings sind die nötigen Drücke ein Grund, warum dieses Verfahren in der Praxis gegebenenfalls an Anwendungsgrenzen stoßen würde, insbesondere bei chemisch vorgespanntem Glas. Für größere Durchmesser ist es tendenziell weniger zu empfehlen, sowohl die nötigen Drücke als auch Stabilität limitieren die Anwendung.

Nachteilig wirkt sich bei diesem Versuchsaufbau die nötige Druckluftsteuerung aus, diese ist aus Erfahrung bei den wenigsten Prüfmaschinen vorhanden. Eine Regeltechnik wie in Abbildung 134 lässt sich allerdings schnell aufbauen. Alternativ kann das später vorgestellte Mehringverfahren die Komplexität reduzieren.

5.5. Unterdruck unter Stützring (Unterdruckverfahren)

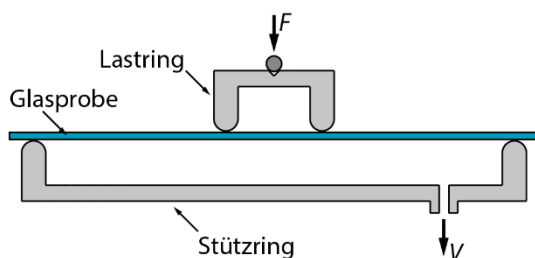
Im nachfolgend gezeigten Verfahren wird das Prinzip der Kompensation von Membranspannungen durch Druckluftbelastung dadurch umgesetzt, dass der Druck auf die gesamte Fläche innerhalb des Stützringes wirkt.



Abbildung 138: links: zu Testzwecken gebauter Vakuumpstützring für Ultradünnglas mit 22,5 mm Radius, eine Gummidichtung umschließt die Kontaktfläche des Stützringes, im Inneren befindet sich ein Filter aus Metall um Ansaugen von Glassplittern zu verhindern; rechts: damit gebrochene 0,27 mm dicke Floatglasscheiben, nur ein Teil der geprüften Scheiben konnten mit einem vollen Vakuum zum Bruch gebracht werden, es wären bei einigen Probekörpern höhere Drücke notwendig

5.5.1. Prinzip und Versuchsaufbau

a) Versuchsaufbau mit Vakuum



b) Versuchsaufbau mit Druckkammer

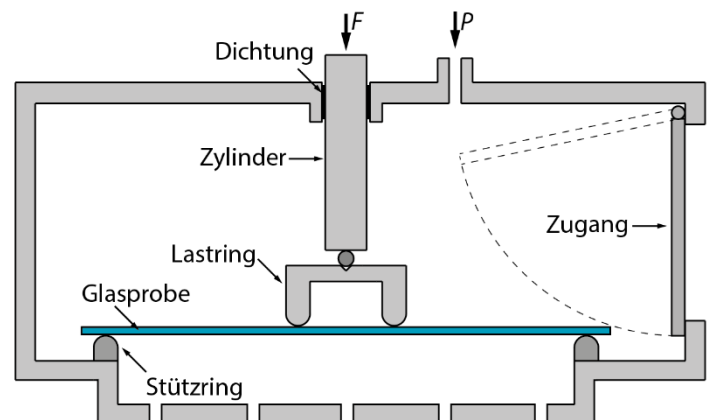


Abbildung 139: zwei mögliche Versuchsaufbauten für das Unterdruckverfahren, jeweils mit optionalem Lastring; a) am Stützring wird ein Vakuum gezogen; b) über dem Stützring befindet sich eine Druckkammer mit Zugang (die Klappe ist auf der Innenseite angebracht damit sie durch den Überdruck selbstschließend wirkt); F =Vertikalkraft einer optionalen Prüfmaschine, V =Vakuum, P =Druckluft

Anders als bei der Druckluftunterstützung im Doppelringbiegeversuch nach EN 1288-2 oder wie im vorherigen Kapitel für kleinere Ringradien untersucht, ist es auch möglich auf der Zugseite des Glases einen Unterdruck im Verhältnis zur Umgebung aufzubringen. Dies kann mit zwei Methoden erreicht werden: entweder durch Aufbringen eines Vakuums unter dem Stützring oder durch einen Überdruck an der gegenüberliegenden Oberfläche, also oberhalb des Stützrings (Abbildung 139). Für Letzteres ist allerdings größerer technischer Aufwand durch Bau einer Druckkammer nötig.

Zudem kann dieses Verfahren mit einem Lastring kombiniert oder eigenständig geprüft werden. Ohne Lastring ist es sehr einfach umzusetzen (Abbildung 138), daher wird in einem ersten Schritt dieses Verfahren betrachtet.

5.5.2. Ohne Lastring

Wird eine Glasprobe auf eine Stützring aufgelegt und unter dem Ring ein Vakuum gezogen (oder auf der gegenüberliegenden Seite der Druck entsprechend erhöht), so kommt es in dickem Glas zu einer nahezu parabelförmigen Spannungsverteilung mit einem zur Glasdicke umgekehrt proportionalen Spannungsmaximum in Plattenmitte. Bei Dünnglas beginnen allerdings Membranspannungen eine signifikante Rolle zu spielen und das Spannungsprofil flacht sich ab (Abbildung 140). Theoretisch wäre dieser Effekt für eine gleichmäßige Spannungsverteilung gewollt, allerdings kommt es an den Rändern des Glases zu im Gleichgewicht mit den Membranzugkräften stehenden Druckkräften die im Vergleich zu den Zugkräften im Plattenmitte höher als bei Doppelringbelastung (Abbildung 124 nach EN 1288-5 ohne Druckluft und Abbildung 127 nach EN 1288-2 mit Druckluft) sind und somit eine höhere Knickgefahr des Randes darstellen.

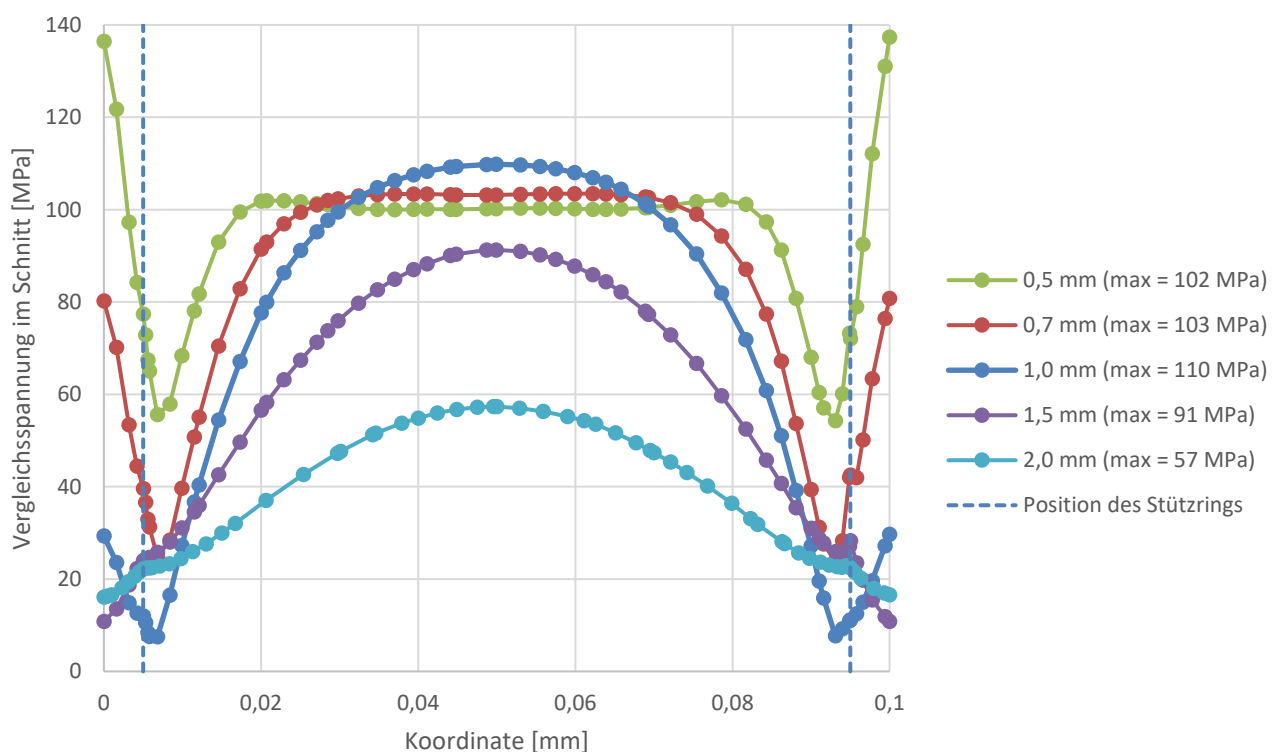


Abbildung 140: Spannungsverläufe der Vergleichsspannung (siehe Anhang 7.11) an der Plattenunterseite im Schnitt für unterschiedliche Glasdicken (angegeben sind zudem die Maximalspannungen innerhalb des Stützrings) im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 ohne Lastring, stattdessen mit vollem Vakuum (-1 bar) unter dem Stützring; bei 0,5 mm dickem Glas werden die Druckkräfte am Rand größer als die Zugkräfte in der Mitte

Wird die Randbreite leicht verändert, so können die Randspannungen in einem kleinen Bereich optimiert werden, allerdings nur minimal. Wird diese sehr stark erhöht (mehr als die doppelte Probengröße bei gleichem Stützring), so kann die Knickgefahr minimiert werden, allerdings ergibt sich stattdessen nun eine starke Biegung mit Zugkräften an der Oberseite da das Glas über den Stützring „gezogen“ wird (Abbildung 141).

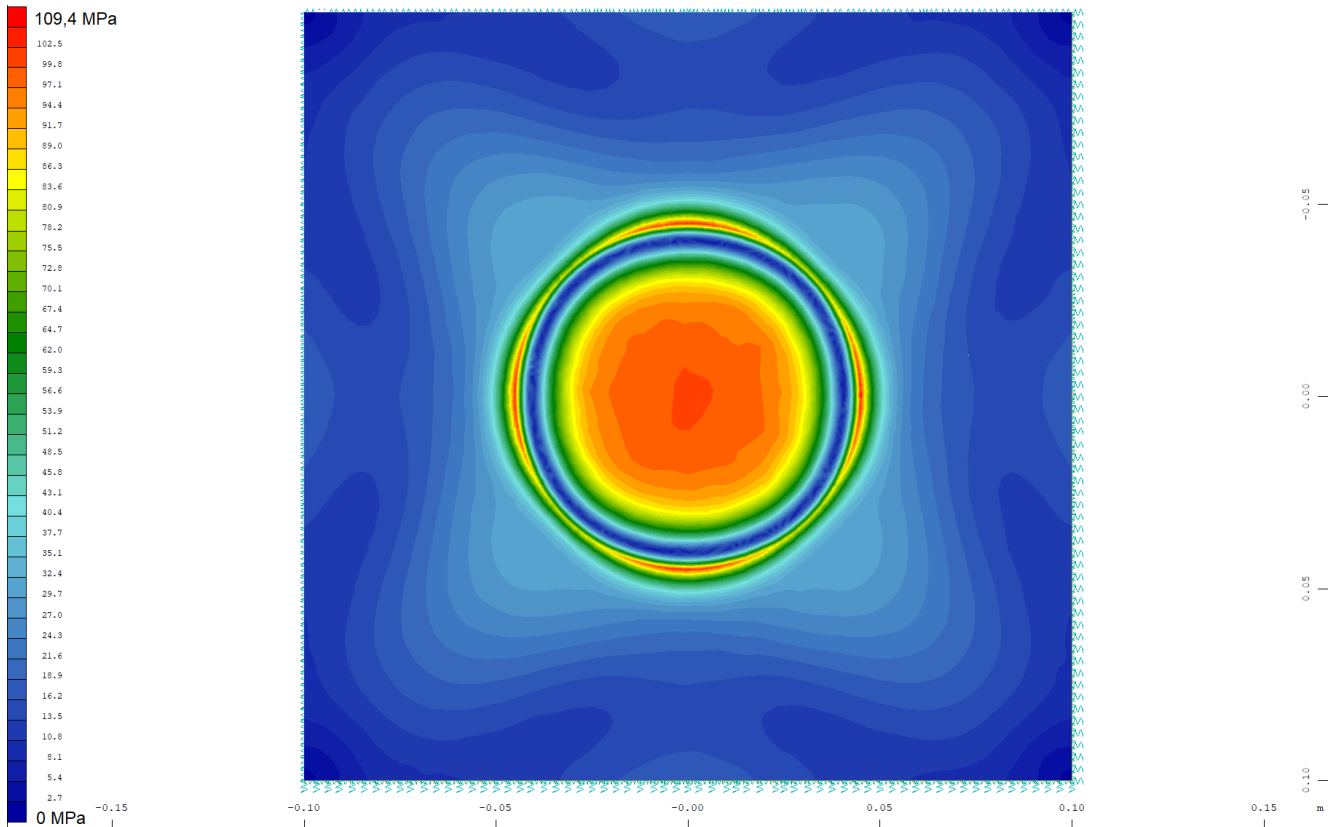


Abbildung 141: Vergleichsspannung für eine 0,5 mm dicke Scheibe mit doppelter Kantenlänge (200 mm) mit Vakuum (-1 bar) unter dem Stützring R45 unter einer Spannung von ca. 100 MPa, das Glas wird über den Rand "gezogen" und erhält lokal hohe Biegezugspannungen die größer als die Zugspannungen im Mittelbereich werden

5.5.3. Mit Lastring

Ein Vorteil der Anwendung von Unterdruck mit Lastring wäre, dass im Gegensatz zum druckluftunterstützten Verfahren die aufgebrachte Last aus Druck die Prüfkraft des Lastringes überschreiten kann, im druckluftunterstützten Verfahren kann der Druck innerhalb des Lastringes maximal so groß wie die Prüfkraft sein, ansonsten entweicht Luft. Zudem sind bei diesem Verfahren Lastring und Vakuum-/Drucklufteinheit getrennt, was gegebenenfalls die Konstruktion vereinfacht.

In einer Untersuchung für einen vergrößerten Doppelringbiegeversuch (Stützringradius = 80 mm, Lastringradius = 40 mm) wurde eine mögliche Anwendung eines Vakuums in Kombination mit einem Lastring untersucht (Abbildung 142).

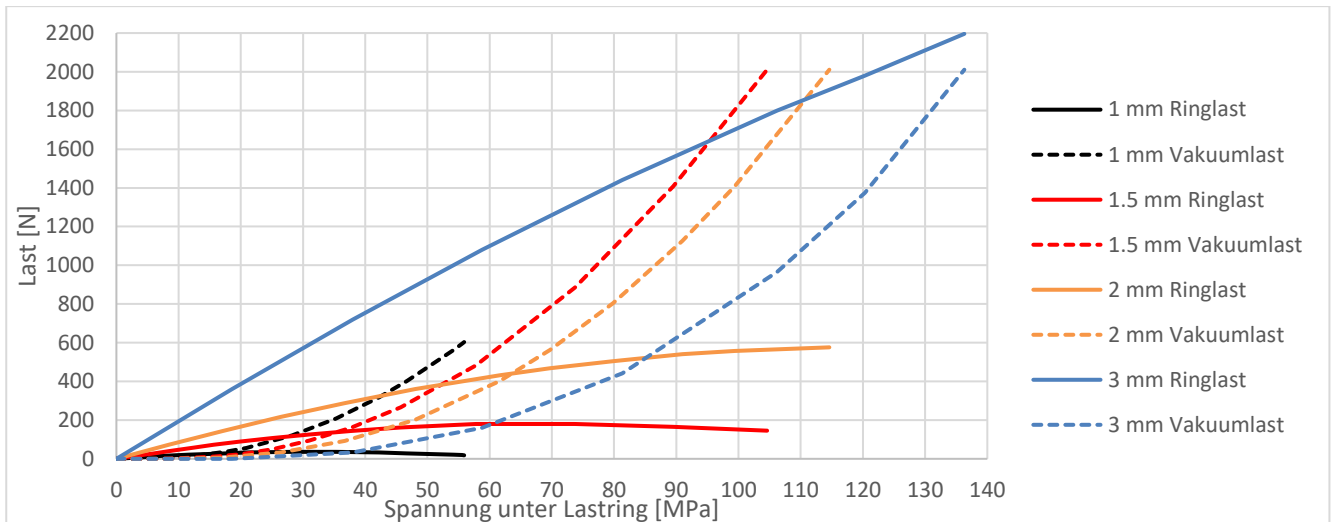


Abbildung 142: vakuumunterstützter Doppelringbiegeversuch bei unterschiedlichen Glasdicken mit 40 mm Lastringradius und 80 mm Stützringradius, gezeigt sind das Verhältnis von nötiger Last aus Vakuum und Stützring um eine konstante Lastverteilung unter dem Lastring zu erhalten, aus FE-Simulation

Es zeigt sich, dass (wie auch im vorherigen Kapitel zur Druckluftunterstützung und in Kapitel 5.1.2 beim Versuchsaufbau nach EN 1288-2) insbesondere für dünnes Glas eine Vakuum-/Druckluftunterstützung den Großteil der Last aufbringen muss, die Auswirkungen des Lastring sind sehr klein, daher wird eine zusätzliche Verwendung eines Lastring als unverhältnismäßig großer Aufwand gegenüber einem reinen Vakuum/Überdruck mit gegebenenfalls notwendigen Korrekturfaktoren gesehen. Dies gilt auch für die Versuche in Normgröße.

Zudem treten hier dieselben Probleme wie im vorherigen Unterkapitel (Druckspannungen außerhalb des Stützrings sind höher als bei anderen Belastungsarten) auf.

5.5.4. Bewertung

Theoretisch ließe sich der Versuchsaufbau ohne Druckkammer, wie in Abbildung 138 zu sehen, sehr leicht bauen und Prüfungen schnell und mobil durchführen. Eine Limitierung ergibt sich für die Verwendung eines Unterdrucks allerdings durch die von der Umgebungsluftfeuchte abhängige Festigkeit von Glas [131], bei Unterdruck auf der Zugseite nimmt die absolute Feuchte ab und es werden höhere Spannungen gemessen. Zudem kann in der Erdatmosphäre maximal ein „volles“ Vakuum von -1 bar aufgebracht werden, dies sorgt im Allgemeinen nicht für ausreichend hohe Spannungen (vergleiche Abbildung 140 unter maximalem Unterdruck). Somit ist ein Vakuum in diesem Kontext als grundsätzlich unbrauchbar zu bewerten.

Wie bereits angedeutet, ist der technische Aufwand bei einem über ein absolutes Vakuum hinausgehenden Druck durch Bau einer Druckkammer unverhältnismäßig hoch. Die Druckspannungen am Rand der Proben limitieren zudem den Anwendungsbereich. Nicht zu vernachlässigen ist auch, dass sowohl mit als auch ohne Lastring insbesondere bei Verwendung einer Druckkammer ein hohes Risiko durch plötzlich freiwerdende große Luftmengen und dadurch entstehende Druckwellen oder fliegende Splitter besteht. Stattdessen sei, sofern eine konstante Spannungsverteilung tatsächlich benötigt wird, im Zweifelsfall eine Unterstützung mit Druckluft unter dem Lastring (die geringeren Luftmengen und besseren Ausbreitungsmöglichkeiten bergen ein geringeres Risiko) oder das im nächsten Kapitel gezeigte Mehrerringverfahren zu empfehlen. Eine Alternative zu Druckluft in der Druckkammer wäre (lediglich zur Risikominimierung) bei diesem Versuchsaufbau eine Verwendung eines hydraulischen Fluids zur Lastaufbringung, allerdings steigt hier der technische Aufwand noch weiter.

Als Ergebnis kann dieser Versuchsaufbau nicht empfohlen werden.

5.6. Mehrringprüfung

5.6.1. Funktionsprinzip und Versuchsaufbau

Alternativ zu der Verwendung von nur einem Lastring oder zusätzlicher Druckluft-/Vakuumunterstützung ist es auch möglich zwei oder mehr Last- oder Stützringe zu verwenden. Hierbei können die Membranspannungen je nach Auswahl des Lastverhältnisses teilweise kompensiert werden. Je nach Konstruktion können die Lastringe einzeln oder gemeinsam angesteuert werden. In Abbildung 143 ist ein Konstruktionsbeispiel für einen doppelten Lastring mit gleichmäßiger Verteilung der Last auf beide Ringe gezeigt.



Abbildung 143: Rendering eines beispielhaften doppelten Lastringes mit einfacher Hebelmechanik zur gleichmäßigen Lastverteilung auf beide Ringe



Abbildung 144: im Mehringverfahren gebrochene Glasscheiben; links: 0,4 mm dickes Glas mit Bruch innerhalb des inneren Lastringes; rechts: 1,1 mm dickes Glas mit Bruch zwischen den beiden Lastringen; der scheinbar doppelte Abdruck der Lastringe entstand durch das erneute Auftreffen des durch den pneumatischen Prüfzylinder beschleunigten Lastringes nach dem Bruch; die Versuche wurde mit dem in Kapitel 5.4.1 gezeigten Versuchsaufbau durchgeführt

5.6.2. Lastverteilung

Verwendet man beispielsweise zwei Lastringe ist die Frage zu beantworten, in welchem Verhältnis zum ursprünglichen Lastring der zweite Lastring zu belasten ist.

In Abbildung 145 sind Spannungsprofile für den Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 mit 0,5 mm dicker Glasplatte und einer Gesamtbelastung von 100 N, 250 N und 1000 N gegeben, jeweils einmal ohne zusätzlichen Lastring, einmal mit zweitem Lastring mit halber Gesamtlast und einmal mit zweitem Lastring mit einem Viertel der Gesamtlast. Der zweite Lastring hat den halben Durchmesser des ersten Rings. Es ist zu erkennen, dass insbesondere bei Lastaufbringung im Verhältnis 3:1 die Spannungsverteilung im gesamten untersuchten Bereich sehr viel gleichmäßiger als mit nur einem Lastring wird.

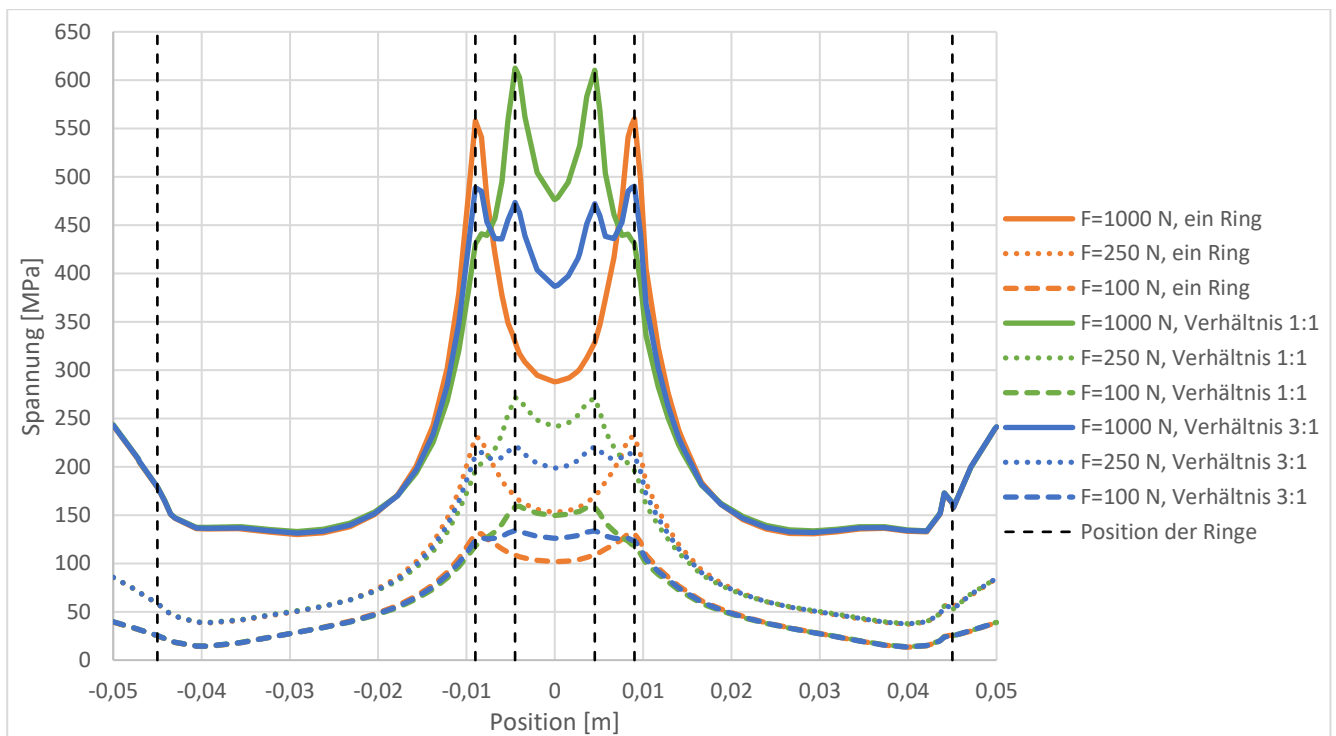


Abbildung 145: Spannungsverteilung der Vergleichsspannung (siehe Anhang 7.11) an Plattenunterseite im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 für 0,5 mm dickes Glas, unterschiedliche Lasten F und unterschiedliche Ringkonfigurationen (ein Ring, zwei Ringe mit gleicher Lastaufteilung, zwei Ringe mit Aufteilung im Verhältnis 3:1), aus Finite-Element-Berechnung

Je nach Glasdicke und Versuchsaufbau kann somit ein günstiges Verhältnis der Ringkräfte gewählt werden. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Belastungen und Doppelringaufbauten wurde hier auf eine Berechnung der jeweils optimalen Verhältnisse für alle Fälle verzichtet. Für den Versuchsaufbau R45, Spannungen von 100 MPa, 200 MPa und 500 MPa und einen zweiten Lastring mit halbem Durchmesser sind die optimalen Verhältnisse (Vergleichsspannung (siehe Anhang 7.11) in Plattenmitte gleich der Vergleichsspannung unter dem äußeren Lastring, dazwischen auf der sicheren Seite liegend leicht höhere Spannungen) für einige Glasdicken (Abbildung 146) sowie die Prüfkraft (Abbildung 147) und die Spannungserhöhung zwischen den Mittelpunkt und äußerem Lastring (Abbildung 148) gegeben. Dies ist näherungsweise auf andere Aufbauten übertragbar (für den Versuchsaufbau R30 sind die Werte für $2/3$ der Glasdicke anwendbar), zudem ist der Anwendungsbereich für geringere und höhere Spannungen relativ groß (vergleiche Abbildung 145). Die Auswahl des Hebelverhältnisses sollte idealerweise nach der mittleren zu erwartenden Glasfestigkeit getroffen werden.

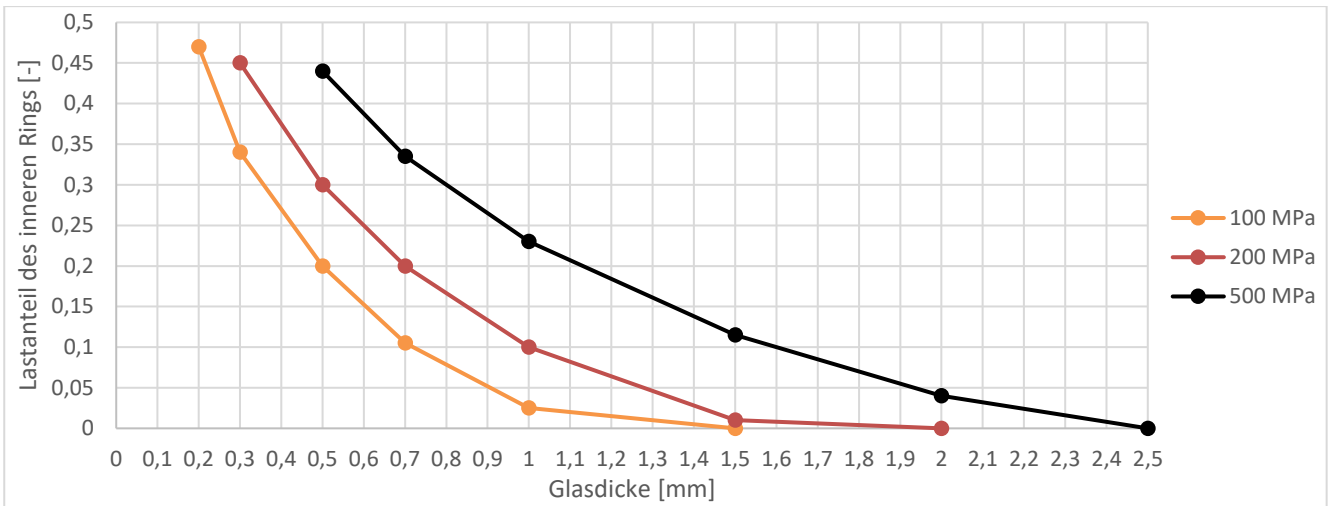


Abbildung 146: optimales Verhältnis der Lastverteilung für die beiden Lastringe (innerer Lastring mit halbem Radius) im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 für unterschiedliche minimale Spannungen unter den Lastringen aus FE-Simulation; bei Dicken bei denen unter der gegebenen Spannung ein Verhältnis oberhalb von ungefähr 0,5 nötig wird treten Stabilitätsprobleme auf

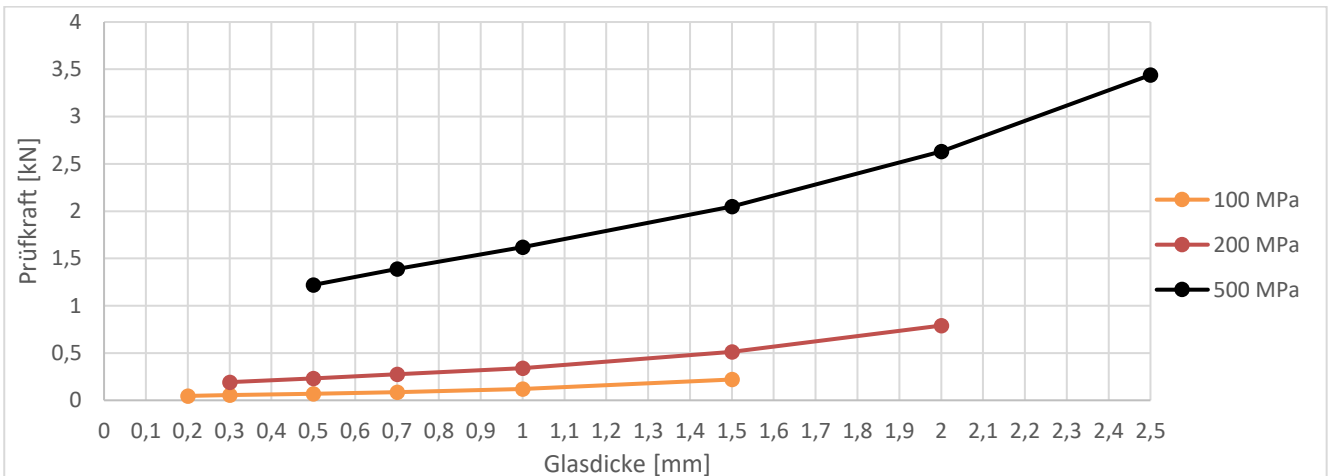


Abbildung 147: Gesamtprüfkraft für die vorherige Abbildung, der Zusammenhang ist nicht linear von der Dicke abhängig

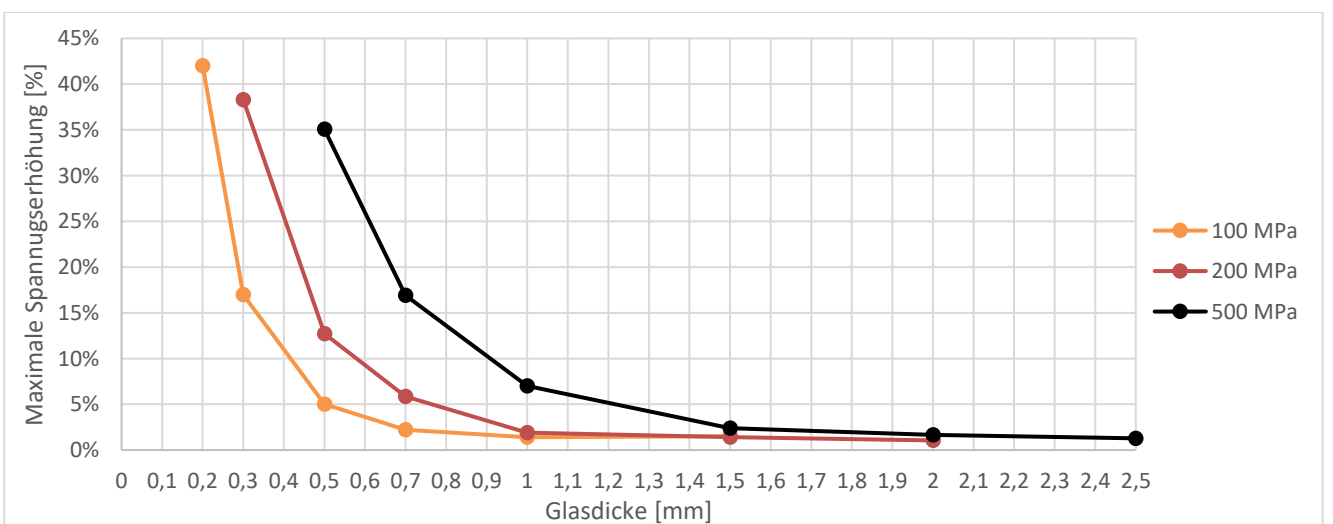


Abbildung 148: maximale Spannungserhöhung über dem Wert in Plattenmitte und unter dem äußeren Lastring für die Daten aus den vorherigen beiden Abbildungen

Mehr als zwei Lastringe und womöglich sogar mehrere Stützringe zu verwenden, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert untersucht da das Verhältnis von Aufwand zu möglichen Vorteilen als ungünstig eingeschätzt wurde. Beispielhaft sei nachfolgend nur ein Spannungsplot für zwei Stützringe gegeben, die Spannungen am Rand reduzieren sich (Abbildung 149).

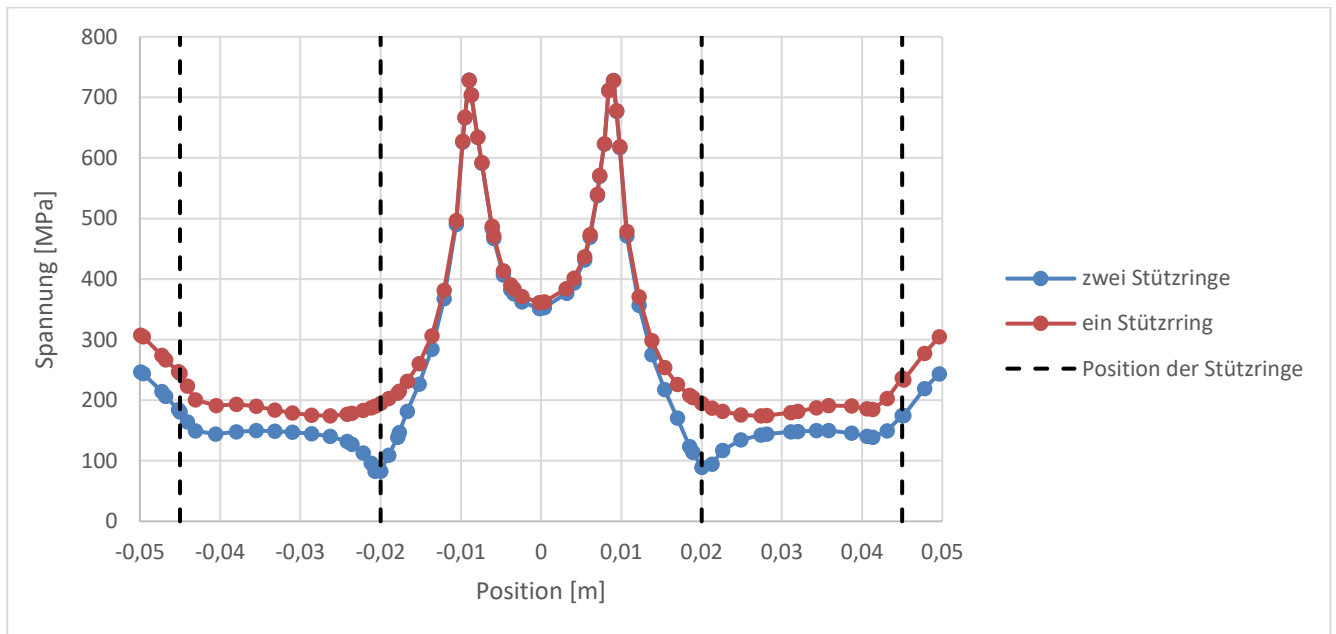


Abbildung 149: Vergleichsspannungsverläufe im Schnitt für eine 0,5 mm dicke, mit einer Last von 1,5 kN belastete Glasscheibe im Versuchsaufbau R45, einmal ohne und einmal mit einem zweiten Stützring ($r=20$ mm) der 1/3 der Last aufnimmt

Weiche und breite Last- oder Stützringe, ähnlich dem Stempelverfahren von Neugebauer [111], wurden nicht untersucht, könnten jedoch ebenfalls die Last gleichmäßiger verteilen. Die Anfälligkeit des Materials für Beschädigungen durch Glassplitter, Alterung und Abrieb sowie das nichtlinear elastische Verhalten werden hier als ungünstig gesehen, daher wird dieser Ansatz nicht weiterverfolgt und es werden ausschließlich metallische Stütz- und Lastringe verwendet.

5.6.3. Konstruktionsvarianten

Abbildung 150 zeigt mögliche Konstruktionen des Hebelmechanismus (vergleiche Abbildung 143) für variabel verstellbare Lastringe für den Versuchsaufbau nach EN 1288-5. Die kleine Größe (Radius des äußeren Rings maximal 9 mm) spielt dabei eine entscheidende Rolle, in größerer Ausführung ließen sich „komfortablere“ Mechanismen umsetzen (Abbildung 151). Zudem ist in Abbildung 150 ein sehr einfacher Aufbau für einen kleinen doppelten Lastring mit fester Lastverteilung dargestellt, der Winkel der Kontaktflächen bestimmt die Lastverteilung.

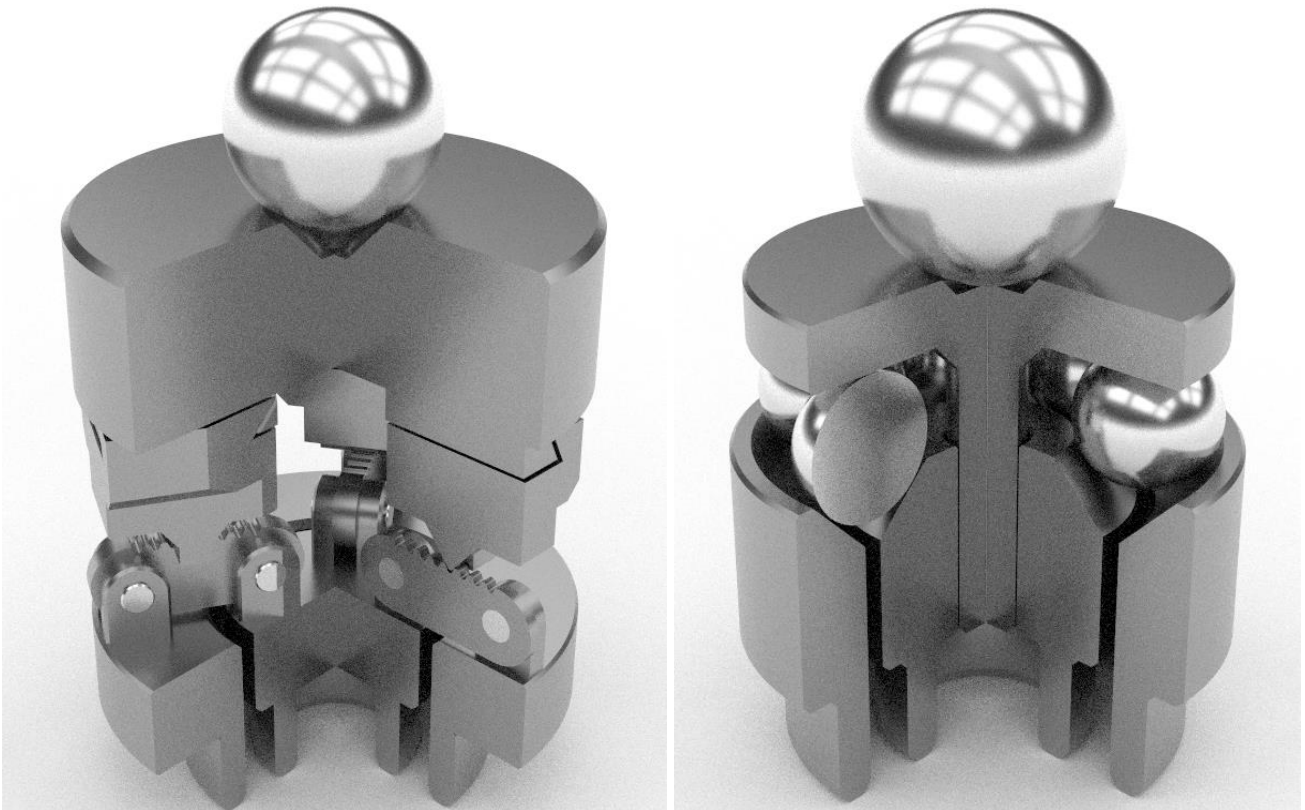


Abbildung 150: verschiedene Aufbauten für einen kleinen doppelten Lastring, geschnittene Renderdarstellung; links: verstellbare Lastaufteilung durch Rastmechanismus mit Schwalbenschwanzführung; rechts: feste Lastaufteilung mit Kugeln zur Lastübertragung

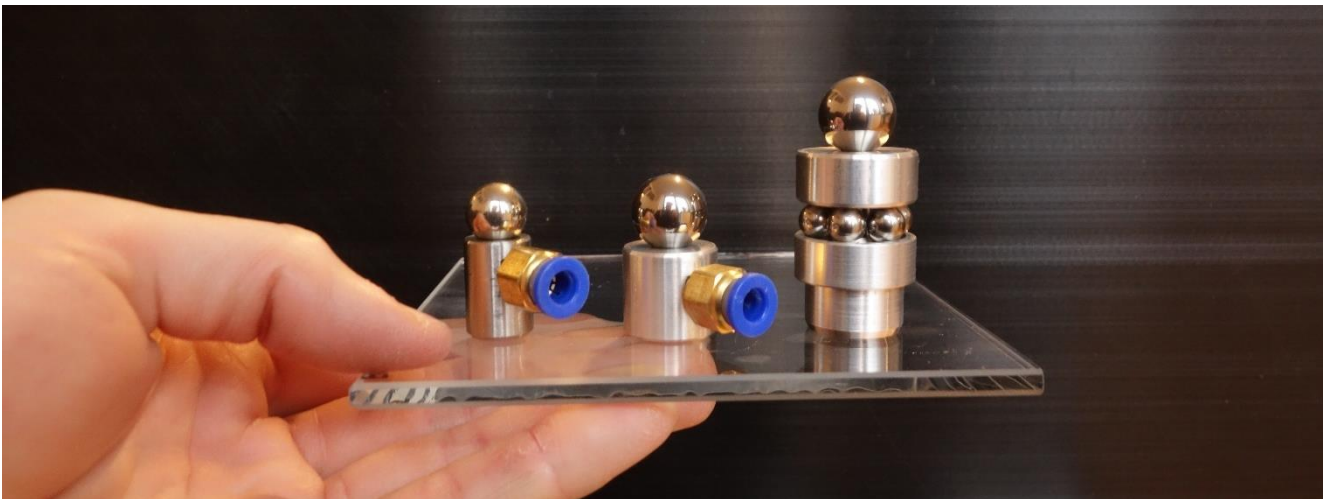


Abbildung 151: Lastringe im Größenvergleich zu einer menschlichen Hand; links: Lastring R30 (mit Druckluftanschluss); Mitte: Lastring R45 (mit Druckluftanschluss); rechts: Lastring R45 mit zwei Ringen, ausgeführt wie in vorheriger Abbildung gezeigt

Ob fest eingestellte, kompliziertere verstellbare Lastringe oder unabhängige Lastringe mehr Sinn ergeben ist je nach Anwendungsfall zu prüfen.

Eine variable Anpassung der Lastverteilung ließe sich selbst für nichtlineare Zusammenhänge konstruieren, um während einer Prüfung immer das optimale Verhältnis beizubehalten. Ein schematisch dargestellter Beispielmehanismus ist in Abbildung 152 dargestellt, verschiedene andere Mechanismen sind denkbar. Allerdings kann der dafür nötige Aufwand schnell unverhältnismäßig werden.

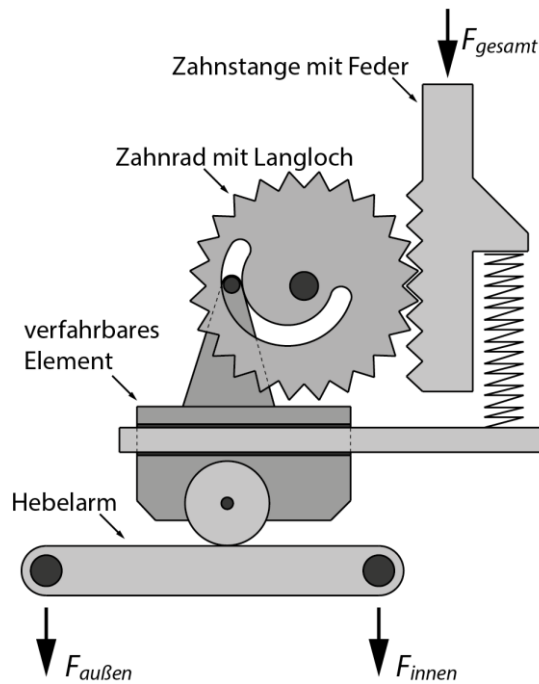


Abbildung 152: schematisch dargestellter Beispielmechanismus für variable Lastverteilung, die Form des Langlochs im Zahnrad und die Federsteifigkeit beeinflussen die lastabhängige Lastverteilung

5.6.4. Bewertung

Es zeigt sich, dass mit diesem Verfahren der Anwendungsbereich der EN 1288-5 noch weiter als bereits in Kapitel 5.1.1 errechnet verschieben lässt (vergleiche Abbildung 119 und Abbildung 120), für 0,5 mm dickes Glas im Versuchsaufbau R45 wäre nach EN 1288-5 keine Prüfung möglich, mit den auf 20% zulässige Spannungsabweichung verschobenen Grenzen mit einem Lastring wären bis ungefähr 100 MPa erreichbar, in diesem Verfahren hingegen problemlos über 300 MPa bei einer ebenfalls nur 20% abweichenden Spannung die zudem noch auf der sicheren Seite liegt.

Der Versuchsaufbau ist abgesehen von der Herstellung der Lastringe nicht komplizierter als das Standardverfahren nach EN 1288-5, es ist auch beispielsweise keine Druckluftregelung nötig, die gesamte Last wird an einem Punkt aufgebracht. Die Steuerung erfordert allerdings eine nichtlineare Lasterhöhung für eine konstante Dehnrage, dies ist mit zeitgemäßen Prüfmaschinen jedoch im Allgemeinen kein Problem. Alternativ kann eine mittlere Kraftsteigerungsrate im Bereich der zu erwartenden Festigkeit errechnet und diese auf den gesamten Prüfvorgang angewendet werden, solange die $\pm 0,4$ MPa/s der Norm im relevanten Bereich eingehalten werden.

5.7. Sonstige Prüfverfahren

Nachfolgend sind, wie bereits bei der einachsigen Biegeprüfung, einige Verfahren gezeigt, die möglicherweise als Alternativen zu EN 1288-2 und EN 1288-5 für die Bestimmung der Flächenfestigkeit an Dünnglas geeignet sind, jedoch nicht weiter untersucht wurden.

5.7.1. Vibrationsprüfung

Wie bereits bei der einachsigen Prüfung erwähnt, ist ein weiteres theoretisch mögliches Prüfverfahren die Einleitung von Vibrationen in das Glas, insbesondere Schallwellen. Im Gegensatz zur einachsigen Biegeprüfung hat die zweiachsige Biegeprüfung in diesem Verfahren den Unterschied, dass die Welle nicht mit konstanter Energie in eine Richtung durch einen Glasstreifen, sondern sich radial ausbreitend und dabei mit dem Kehrwert des Abstandes abnehmend durch das Glas wandert (Abbildung 153). Dadurch ist eine maximale Spannung in der Fläche zu erreichen, die Kanten werden weniger belastet. Wird die Schallquelle zudem symmetrisch mittig im Glas platziert, treffen sich die Reflektionen der Wellen an den Kanten wieder in der Mitte, hier ist gegebenenfalls ein runder Probekörper ideal. Alternativ kann, beispielsweise durch einen Polymerring, versucht werden, die Wellenenergie in einem definierten Abstand der Schallquelle wieder zu absorbieren.



Abbildung 153: Prinzipdarstellung von runder Glasplatte und Lautsprecher mit überhöhten Verformungen im Glas aufgrund von Vibrationen, welche zum Rand hin abnehmen

Dieses Verfahren wurde aufgrund des komplizierten Reflektions- und Absorptionsverhaltens der Wellen in einem realen Aufbau (das Glas muss gehalten werden, ansonsten wären das System und die Berechnungen deutlich einfacher) nicht weiter betrachtet.

5.7.2. Streifenprüfung

Auch wenn es sich bei diesem Verfahren streng genommen nicht um eine gleichmäßige zweiachsige Biegung handelt, kann es dennoch zur Ermittlung der Flächenfestigkeit herangezogen werden. Das Prinzip besteht in der Biegung eines Glasstreifens nicht von den schmalen, sondern von den breiten Kanten aus. Dabei wird das Glas beidseitig von einem Klemm-/Steckmechanismus mit geringer Torsionssteifigkeit gehalten, wodurch das Glas in der Mitte eine hohe Biegespannung erhält, die

aufgrund der Verdrillung der Halterung zu den Enden abnimmt, damit stehen die Kanten unter geringer Spannung und ein Bruch tritt vornehmlich in der Fläche auf.

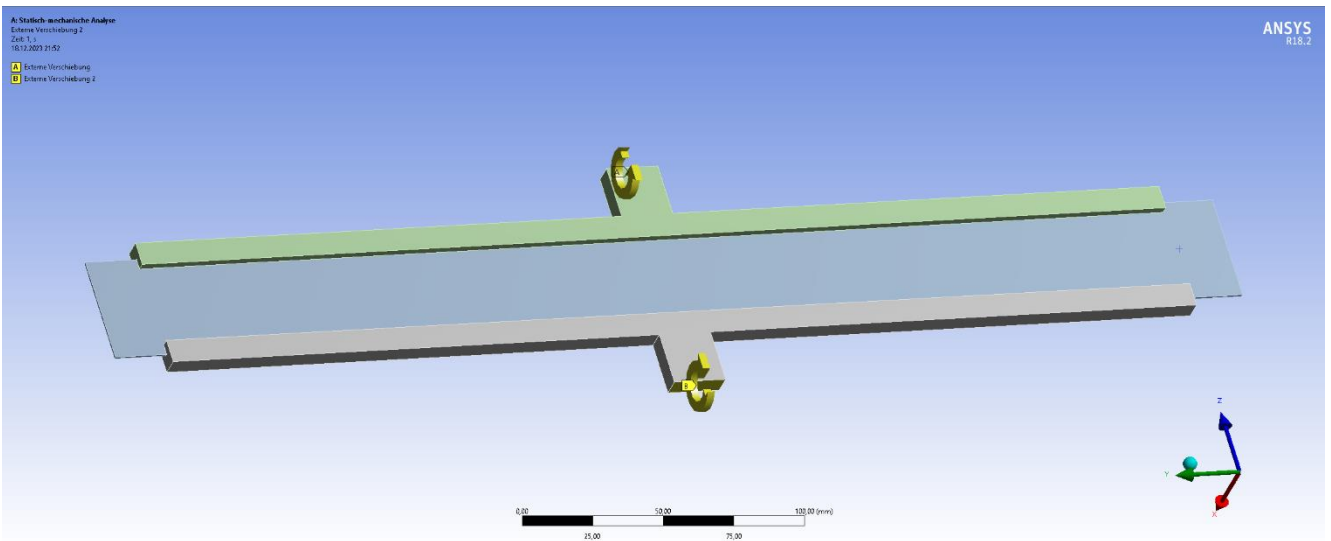


Abbildung 154: beispielhafte Geometrie und Belastung (Auflagerverdrrehung 0,01 rad)

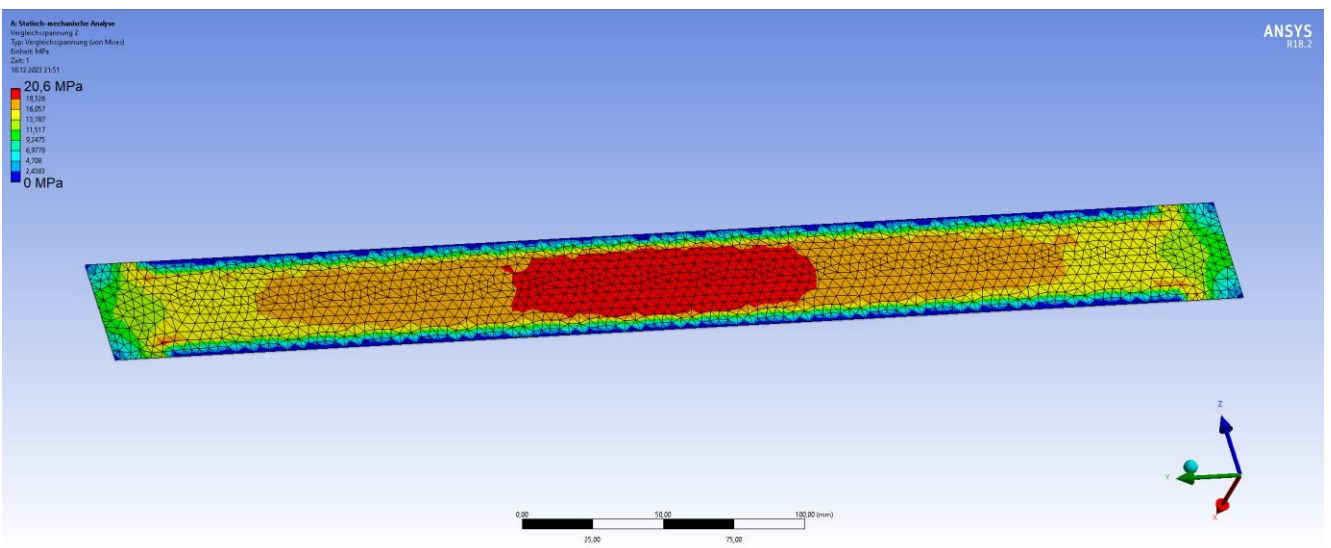


Abbildung 155: Spannungsverteilung der Vergleichsspannung (von Mises) im Glas für das zuvor gezeigte System

Alternativ ist auch ein auf die Fläche konzentriertes Zugprüfverfahren in einem breiten Glasstreifen äquivalent zum für die einachsige Prüfung in Kapitel 4.6.8 gezeigten Stempelzugversuch denkbar.

5.8. Vergleich

Verglichen mit der einachsigen Biegeprüfung aus Kapitel 4 unterscheiden sich die für die zweiachsige Biegeprüfung gezeigten Verfahren weniger in technischem Aufwand und Mobilität, auch Nutzereinfluss tritt bei keinem der gezeigten Verfahren signifikant auf. Trotzdem zeigen sich für die Verfahren in einigen für die Praxis wichtigen Punkten abweichende Voraussetzungen und Anwendungsgrenzen, einige sind in Tabelle 14 dargestellt. Der „große“ Doppelringbiegeversuch nach EN 1288-2 wird in diesem Vergleich nicht mehr behandelt, da dieser bereits in Kapitel 5.1.2 als ungeeignet für Dünnglas bewertet wurde.

Tabelle 14: Vergleich einiger Kriterien für die vorgestellten Prüfverfahren in chronologischer Reihenfolge der Nennung, von Vorteil (Grün) bis Nachteil (Rot)

Verfahren	Maximale Spannung in Größe R45 bei 1 mm dickem Glas [MPa]	Statistisch aussagekräftige gleichmäßige Mindestspannung auf konstanter Fläche	Benötigt keine Druckluft-/Unterdruckregelung	Benötigt keine Universalprüfmaschine (oder vergleichbar)	Benötigt keine sonstigen technisch aufwändigen Sonderteile
Normversuch nach EN 1288-5	0	+	+	-	+
Höhere erlaubte Spannungsabweichung bei EN 1288-5	209	+	+	-	+
Doppelringbiegeversuch an sehr kleinen Prüfflächen	-	0 (geringere statistische Aussagekraft)	+	-	0 (kleine Ringe)
Stempelversuch	Keine Daten	+	+	-	0 (Stempel)
Mehrprobenverfahren an kleineren Prüfflächen (ohne Aufbau für zeitgleiche Prüfung)	-	+	+	-	0 (kleine Ringe)
Doppelringbiegeversuch nach EN 1288-5 mit Druckluft (max. 10 bar)	364	+	-	-	+
Vakuumsauger ohne Lastring	108	0	-	+	+
Unterdruckverfahren mit Druckkammer ohne Lastring	Keine Daten (> 108)	0	-	+	- (Druckkammer)
Vakuumsauger mit Lastring	Keine Daten (> 108)	+	-	-	+
Unterdruckverfahren mit Druckkammer mit Lastring	Keine Daten (>> 108)	+	-	-	- (Druckkammer)
Mehrringverfahren	>500	+	+	-	0 (Mehrring)
Vibrationsprüfung	Keine Daten	-	+	+	- (Halterung, Tongeber, akustische Steuerung)
Streifenprüfung	>500	-	+	-	0 (Klemmen)

Es wurden keine Verfahren zur schnellen Produktionskontrolle explizit vorgestellt, lediglich die Vakuumprüfung ohne Lastring ließe sich theoretisch ohne eine vollständige Prüfeinrichtung mit Lastregelung und somit mobil umsetzen, allerdings begrenzt der auf der Erdoberfläche herrschende Luftdruck von einem bar den möglichen Unterdruck und somit die maximal möglichen Spannungen, mit einem höheren Atmosphärendruck wäre das Verfahren weitaus praktikabler.

Da die restlichen Verfahren (abgesehen von Vibrations- und Streifenprüfung) ein ähnliches Grundprinzip und ähnliche Aufbauten haben, ist bei der Auswahl des Prüfverfahrens jeweils eine den Anwendungen und Zielen entsprechende Entscheidung zu treffen. Einige Empfehlungen können trotzdem gegeben werden.

Da sich die Grenzen des Doppelringbiegeversuchs nach EN 1288-5 bei größerer zulässiger Toleranz der Spannungen verschieben lassen, wird insbesondere ab einer Glasdicke von 1 mm empfohlen, dieses Verfahren, gegebenenfalls mit den in Kapitel 5.1.1 gezeigten Korrekturwerten, im Versuchsaufbau unverändert bis zu den gezeigten maximalen Grenzen zu verwenden.

Darüber hinaus und bei dünnerem Glas werden drei Verfahren als besonders geeignet bewertet, um mit EN 1288-5 vergleichbare statistische Festigkeitswerte zu erhalten: das Mehrprobenverfahren, der Doppelringbiegeversuch mit Druckluft und das Mehrringverfahren.

Vom technischen Aufwand ist das Mehrprobenverfahren (sofern keine zeitgleiche Prüfung von mehreren Teilproben erfolgen soll) das günstigste, allerdings kann der zeitliche Aufwand deutlich steigen, insbesondere bei sehr dünnem Glas, wenn eine sehr große Zahl einzelner Teilproben geprüft werden muss.

Der Doppelringbiegeversuch nach EN 1288-5 mit zusätzlicher Druckluftunterstützung ist aufgrund der nötigen Druckluftsteuerung technisch am aufwändigsten. Ist eine entsprechend einsetzbare Steuerung im Laborumfeld bereits vorhanden und technisch nutzbar, ist dieses Verfahren aufgrund der hohen Genauigkeit und ansonsten einfachen Umsetzung besonders zu empfehlen.

Ist keine Druckluftsteuerung vorhanden und soll trotzdem schnell und effizient mit geringem technischem Aufwand geprüft werden, kann das Mehrringverfahren eingesetzt werden. Es besteht abgesehen von der einmaligen Herstellung des mehrfachen Lastrings keine Notwendigkeit für größeren technischen Aufwand als im Normversuch nach EN 1288-5. Eine vergleichbare Alternative könnte womöglich das Stempelverfahren bieten, allerdings sind hier nicht genug Daten für eine genaue Bewertung vorhanden.

Alle drei Verfahren bieten sich zudem für eine Standardisierung/Normung an, insbesondere jedoch das Doppelringbiegeverfahren mit Druckluftunterstützung und das Mehrprobenverfahren, da diese sehr exakte und technisch gut zu beschreibende Ergebnisse liefern.

Unterhalb einer Glasdicke von ungefähr 0,3 mm stoßen die zuvor genannten Verfahren an ihre Grenzen, gegebenenfalls ist eine Kombination des Mehrprobenverfahrens mit dem Versuchsaufbau mit Druckluftunterstützung oder mit dem Mehrringverfahren sinnvoll, generell ist das Messen einer mit den Normwerten nach EN 1288-5 vergleichbaren Festigkeit bei diesen Dicken allerdings als sehr aufwändig zu bewerten. Da sich diese Arbeit hauptsächlich auf Anwendungen von Dünnglas im Bauwesen bezieht, ist jedoch davon auszugehen, dass eine Prüfung solch geringer Glasdicken in der Praxis selten nötig wird.

Wie auch bei der einachsigen Biegeprüfung sei abschließend noch anzumerken, dass grundsätzlich eine Festigkeitsprüfung an kleineren Prüfflächen mit einer anschließenden Umrechnung auf Normgröße über den Größeneffekt auch brauchbare Ergebnisse liefern kann, so kann jeder der gezeigten Versuchsaufbauten für entsprechende Glasdicken skaliert werden. Eine quantitative Untersuchung des Flächen- und Kantenlängeneinflusses auf die Glasfestigkeit sowie weitere in diese Richtung führende statistische Untersuchungen zum Größeneffekt sind jedoch nicht Fokus dieser Arbeit.

6. Fazit und Ausblick

6.1. Fazit

6.1.1. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das mechanische Verhalten von Dünnglas analysiert und auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse gezeigt, dass neben den Normprüfverfahren der Einzelnormen der EN 1288 (oder vergleichbarer Normen) eine Reihe von Verfahren mit äquivalenter statistischer Aussagekraft denkbar sind, die eine Prüfung von Dünnglas für normgerechte Bemessung von Tragwerken ermöglichen.

Mit den gezeigten Verfahren lässt sich eine statistisch verwertbare Festigkeit in unterschiedlichen Szenarien ermitteln. Hierfür müssen die Verfahren eine vergleichbare Prüffläche, Spannungsverteilung und Lastrate ermöglichen.

Für einachsige Prüfung, welche hauptsächlich für die Bestimmung der Kantenfestigkeit herangezogen wird, lag der Fokus auf zwei selbst entwickelten Verfahren, der Biegeprüfmaschine und dem Smartphonebiegeverfahren. Beide Verfahren, wie auch einige andere untersuchte Versuchsaufbauten, stellen brauchbare Alternativen zum Vierschneidenbiegeversuch der EN 1288-3 dar.

Für zweiachsige Prüfung, welche zur Ermittlung der Flächenfestigkeit dient, kann die Entwicklung des Mehringverfahrens als einfach umzusetzende Erweiterung des Doppelringbiegeversuchs hervorgehoben werden. Weiterhin stellte sich die Druckluftunterstützung im Doppelringbiegeversuch als sehr präzise Methode mit breitem Anwendungsbereich heraus.

In beiden Anwendungsfällen, der einachsigen und zweiachsigen Biegeprüfung, bietet sich zudem für eine mit den Versuchen der Normen der Reihe EN 1288 vergleichbare statistische Aussagekraft das Mehrprobenverfahren an, welches zudem von allen Verfahren am einfachsten umzusetzen ist.

6.1.2. Empfehlungen für die Praxis

Je nach Glasdicke und Ziel der Prüfung (schnelle, einfache Festigkeitsbestimmung oder sehr exakte Prüfung) eignen sich entsprechend unterschiedliche Verfahren, diese Arbeit kann als Entscheidungshilfe herangezogen werden. In den Kapiteln 4.7 und 5.8 sind die Verfahren übersichtlich verglichen und es werden Empfehlungen für bestimmte Anwendungsgebiete und -fälle gegeben.

In der Praxis richtet sich die Wahl des geeignetsten Verfahrens häufig nach den technischen Voraussetzungen und Verfügbarkeiten sowie dem Verhältnis von Aufwand bei der Herstellung des Versuchsaufbaus zu Probenzahl. Werden regelmäßig größere Mengen Glas geprüft bietet sich die einmalige Herstellung eines aufwändigeren Versuchsaufbaus, der die Versuchsdurchführung vereinfacht und gegebenenfalls die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse erhöht, eher an als bei vereinzelt Prüfungen.

6.2. Ausblick

6.2.1. Potenzial für zukünftige Forschung

Als wichtigstes Potential für zukünftige Forschung kann die praktische Versuchsdurchführung in den gezeigten Verfahren in größerem Umfang genannt werden. Hierbei sind nicht nur größere Mengen an Daten zu Glasfestigkeit und statistischer Verteilung von großem Interesse, auch die praktische Nutzererfahrung in Bezug auf Ergonomie, Präzision und Zeitaufwand kann helfen die geeignetsten Verfahren klarer herauszustellen und mögliche Standards zu etablieren.

Weiterhin bieten einige in dieser Arbeit nur angeschnittene Verfahren, beispielsweise das Stempelzugverfahren oder die Vibrationsprüfung, in der nahen Zukunft noch viel Potential für vertiefte Ausarbeitung.

6.2.2. Technologischer Fortschritt

Neben dem kurzfristigen Potential für weitere Forschungen ist zu erwarten, dass sich, insbesondere aufgrund des aktuellen schnellen Fortschritts von Technologien auf Basis künstlicher Intelligenz, neue Möglichkeiten für aktuell kaum vorstellbare Technologien ergeben.

Ein vergangenes Beispiel für durch technologischen Fortschritt ermöglichte neue Prüfverfahren ist das Smartphonebiegeverfahren, vor 20 Jahren wäre es kaum denkbar gewesen dass mobile Endgeräte mit den für das Verfahren notwendigen Fähigkeiten eine solch flächendeckende Verbreitung finden würden. Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung der Leistungsfähigkeit von Finite-Element-Berechnungen, zu den Zeiten als die aktuell gültigen Prüfnormen und die dafür als Grundlage dienenden Forschungsarbeiten verfasst wurden, wären einige der in dieser Arbeit gezeigten Berechnungen nicht oder nur mit sehr langen Rechenzeiten möglich gewesen.

Darüber welche neuen Technologien die Zukunft bringen könnte lässt sich nur spekulieren, beispielsweise ob eine die Mechanik von Werkstoffen intuitiv verstehende künstliche Intelligenz einen großen Teil der Berechnungen und Prüfverfahren ersetzen kann.

6.2.3. Auswirkungen

Aus den Ergebnissen der Arbeit lässt sich ein großes Potential für Standardisierung und Normung von Prüfverfahren für Dünnglas in Architekturanwendungen ableiten. Dies beginnt bei der Verschiebung möglicher Anwendungsgrenzen und der Zulassung alternativer, aber statistisch vergleichbarer Versuchsaufbauten in existierenden Normen, beispielsweise die Biegung mit konstanter Krümmung in einer Biegeprüfmaschine als Erweiterung von EN 1288-3 oder das Mehrprobenverfahren bei sämtlichen Prüfnormen der Reihe EN 1288. Es bietet sich aber auch die Möglichkeit, neue eigenständige Normen zu entwickeln, beispielsweise die Druckluftunterstützung am kleinen Doppelringbiegeversuch als weitere Möglichkeit neben EN 1288-2 und EN 1288-5.

Wird die Festigkeitsprüfung von Dünnglas genormt, kann sich daraus eine deutlich größere Verbreitung des Werkstoffes im Bauwesen ergeben. Mit den standardisierten, vergleichbaren Prüfverfahren kann das Tragverhalten objektiv vergleichbar analysiert und normgerechte Bemessung von entsprechenden Bauteilen ermöglicht werden.

Aus der sich ergebenden größeren Verbreitung von Dünnglas im Bauwesen könnten anschließend weitere Vorteile folgen, beispielsweise eine flächendeckend bessere Ökobilanz durch leichtere und effizientere Bauteile.

7. Anhang

7.1. Weibull-Auswertung

Im Rahmen der Arbeit wurde für die Auswertung von Versuchen zur Biegefestigkeit ein digitales Werkzeug zur Auswertung nach dem Zwei-Parameter-Weibullverfahren erstellt. Dieses ist unter der Creative-Commons-Lizenz (CC BY-NC-SA 3.0 DE) veröffentlicht und befindet sich online auf der Webseite des Autors (glas.timonpeters.de).

Das Werkzeug bekommt als Eingabe eine Reihe von Fließkommazahlen, die nach dem Weibullverfahren ausgewertet werden. Ausgegeben werden dabei unter anderem alle notwendigen Weibullparameter (m , k , b , T , λ), Fraktilwerte (einstellbar), statistische Daten (Mittelwert etc.) sowie Konfidenzintervalle nach der Studentschen T-Verteilung. Graphisch kann der Weibullplot sowohl in logarithmischer als auch linearer Darstellung mit und ohne Konfidenzintervalle ausgegeben werden (siehe Abbildung 156). Die Konfidenzintervalle werden numerisch über eine Approximation der Eulerschen Gamma-Funktion über Stirling-Reihen berechnet.

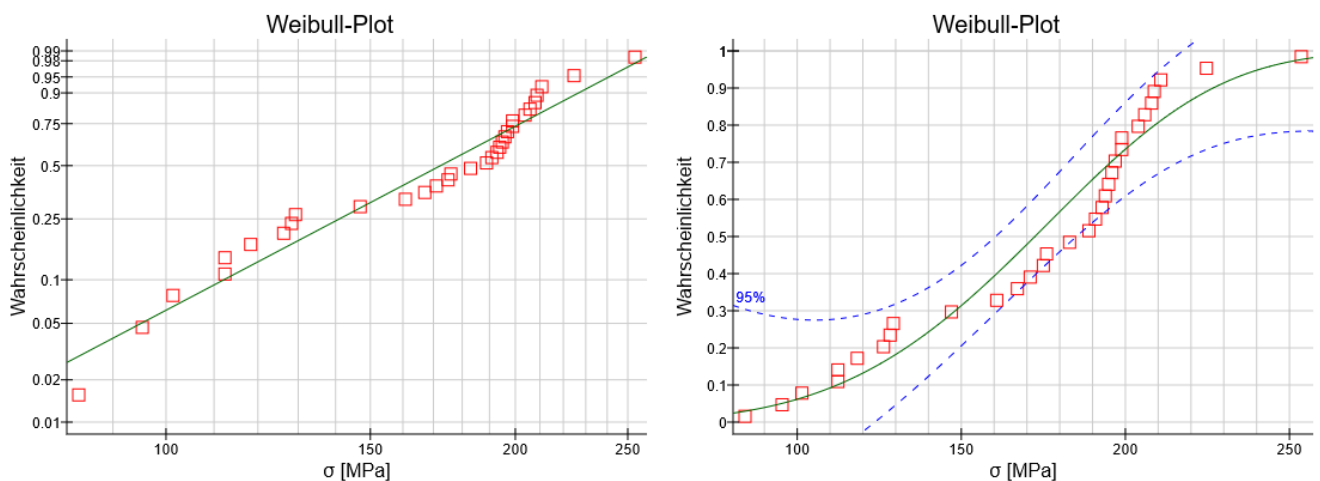


Abbildung 156: Weibull-Plots in logarithmischer (links) und linearisierter (rechts, mit 95%-Konfidenzintervall) Darstellung.

Ausschnitt aus dem für die Berechnung relevanten JavaScript-Teil des Quelltextes des Werkzeugs mit Stand vom 02.08.2023 (der volle Quelltext ist auf der Webseite einsehbar):

```
function auswerten() {
    //Eingabewerte lesen
[...]
```

```
    //Eingabewerte werden sortiert in Liste gespeichert
    ein=in_f.value.replace(/\s/g, '').split(",")
    ein.sort(function(a, b){return a-b});
    n = ein.length;
    jl=4;
    nkk=Math.pow(10, set_dn);
[...]
```

```
    //-----
    //Berechnung Ausgangswerte
    for (i=0;i<n;i++) {
        out[0][i]*=1.0;
        if (set_ber ==1) {
            out[1][i]=(i+0.5)/n;
        } else {
            out[1][i]=(i+1)/(n+1);
        }
    }
}
```

```

        out[2][i]=Math.log(out[0][i]);
        out[3][i]=Math.log(Math.log(1/(1-out[1][i])));
    }
    //-----
    //Ausgabe Tabelle Ausgangswerte
[...]
```

```

    //-----
    //Lineare Regression
    sum_x_0 = 0;
    sum_x = 0;
    sum_y = 0;
    sum_xy = 0;
    sum_xx = 0;
    sum_yy = 0;

    for (var i = 0; i < n; i++) {
        sum_x_0 += out[0][i];
        sum_x += out[2][i];
        sum_y += out[3][i];
        sum_xy += (out[2][i]*out[3][i]);
        sum_xx += (out[2][i]*out[2][i]);
        sum_yy += (out[3][i]*out[3][i]);
    }

    wb_m = (n * sum_xy - sum_x * sum_y) / (n*sum_xx - sum_x * sum_x);
    wb_b = (sum_y - wb_m * sum_x)/n;
    wb_r2 = Math.pow((n*sum_xy - sum_x*sum_y)/Math.sqrt((n*sum_xx-
sum_x*sum_x)*(n*sum_yy-sum_y*sum_y)), 2);

    //Weitere Weibull-Parameter
    wb_t = Math.exp(-wb_b/wb_m);
    wb_lambda = 1/wb_t;
    y_05 = Math.log(Math.log(1/(1-0.5)));
    mue_0 = (y_05-wb_b)/wb_m;
    x_quer = sum_x/n;
    x_quer_0 = sum_x_0/n;

    //Ausgabe
[...]
```

```

    //Fraktilwerte
    ot += "<br /><h3>Fraktilwerte</h3>Werte entsprechend Achsteilung der Y-
Achse, einstellbar.<br />";
    for (i=0;i<proby.length;i++) {
        ot += (proby[i]*100)+"%: "+sv(Math.exp((Math.log(Math.log(1/(1-
proby[i]))) -wb_b)/wb_m))+"<br />";
    }
    ot += "<br />";

    ot += "<h3>Statistik</h3>";
    sx_quadrat = 0;
    sx_quadrat_0 = 0;
    for (i=0;i<n;i++) {
        sx_quadrat += Math.pow(out[2][i]-x_quer,2);
        sx_quadrat_0 += Math.pow(out[0][i]-x_quer_0,2);
    }
    sx_quadrat /= n;
    sx_quadrat_0 /= n;
    s_x= Math.sqrt(sx_quadrat);
    s_x_0= Math.sqrt(sx_quadrat_0);

    ot += "x&#772; (linear): "+sv(x_quer_0)+"<br />";

```

```

ot += "x&#772; (logarithmisch): "+sv(x_quer)+"<br />";
ot += "s² (linear): "+sv(sx_quadrat_0)+"<br />";
ot += "s² (logarithmisch): "+sv(sx_quadrat)+"<br />";
ot += "s (linear): "+sv(s_x_0)+"<br />";
ot += "s (logarithmisch): "+sv(s_x)+"<br /><br />";

if (set_konf) {
ot += "t-Werte der Student'schen t-Verteilung mit n="+n+" zur Bestimmung
der gewählten Konfidenzintervalle (einstellbar):<br />";
//Konfidenzintervall
/*
Zeige Konfidenzintervalle: set_konf
Konfidenzen: set_konf_wert
Farbe: im_konf_f
Linienstärke: im_konf_s
*/
t=new Array();
okonfwert=set_konf_wert;
ot += "t-wert zu Konfidenz "+sv(set_konf_wert)+":
"+sv(student_t(set_konf_wert,n<=set_t_grenz?n:set_t_grenz,set_t_int))+"<br />";
set_konf_wert = new Array(0.5+set_konf_wert/2,0.5-set_konf_wert/2);
for (i=0;i<set_konf_wert.length;i++) {

t[i]=student_t(set_konf_wert[i],n<=set_t_grenz?n:set_t_grenz,set_t_int);
ot += "t-wert zu Konfidenz "+sv(set_konf_wert[i])+": "+sv(t[i])+"<br
/>";
}
s_y = 0;
for (i=0;i<n;i++) {
s_y += Math.pow(out[3][i]-(wb_m*out[2][i]+wb_b),2);
}
s_y =Math.sqrt(s_y/(n-2));
//zu berechnen: y_-, s_y, (x_stern-x_quer)^2

y_max_m=y_05+t*s_y*Math.sqrt(1/n);
y_min_m=y_05-t*s_y*Math.sqrt(1/n);
y_max_m2=y_05+t*s_y*Math.sqrt(1+1/n);
y_min_m2=y_05-t*s_y*Math.sqrt(1+1/n);

ot += "&mu;<sub>0</sub>: "+mue_0+"<br />";
ot += "T-score: "+t+"<br />";
ot += "s<sub>y</sub>: "+s_y+"<br />";
ot += "y&#770;<sub>min</sub>(x&#772;): "+y_min_m+"<br />";
ot += "y&#770;<sub>max</sub>(x&#772;): "+y_max_m+"<br />";
ot += "korrigiert:<br />";
ot += "x&#772;: "+Math.exp(x_quer)+"<br />";
ot += "&mu;<sub>0</sub>: "+Math.exp(mue_0)+"<br />";
ot += "s<sub>y</sub>: "+ky(s_y)+"<br />";
ot += "y&#770;<sub>min</sub>(x&#772;): "+ky(y_min_m)+"<br />";
ot += "y&#770;<sub>max</sub>(x&#772;): "+ky(y_max_m)+"<br />";*/

}
[...]
```

```

}
function yk(k_wert) {
    return Math.log(Math.log(1/(1-k_wert)));
}
function student_f(s_eta,s_t) {
    //student-f-Verteilung
    return
gamma((s_eta+1)/2)/(Math.sqrt(s_eta*Math.PI)*gamma(s_eta/2))*Math.pow(1+s_t*s_t/s_
eta,-(s_eta+1)/2);
}
function student_t(wkeit,wanz,genau) {
    //integral über die Student'sche t-Verteilung
    wt=0;
    winterv=genau;
    wneu=0.5;
    winv=false;
    if (wkeit >0&&wkeit<1) {
        if (wkeit<0.5) {
            wkeit = 1-wkeit;
            winv = true;
        }
        wtf=student_f(wanz,wt);
        while(wneu<wkeit) {
            wt+=winterv;
            wtfn=student_f(wanz,wt);
            wneu+=(wtf+wtfn)/2*winterv;
            wtf=wtfn;
        }
    } else {
        wneu=0;
    }
    return winv?-wt:wt;
}
function beta(b_wert_1,b_wert_2) {
    //Eulersche Beta-Funktion
    return gamma(b_wert_1)*gamma(b_wert_2)/gamma(b_wert_1+b_wert_2);
}
function gamma(g_wert) {
    //Eulersche Gamma-Funktion
    return fak(g_wert-1);
}
function fak(fak_w) {
    //Dreieckige Approximation der Fakultät über Stirling-Reihen oder
Fakultäten. Sehr genau für n! mit n>2 (darunter nur mit Vorsicht zu genießen!)
    if (fak_w == parseInt(fak_w)) {
        return i_fak(fak_w);
    } else if (fak_w<0.5) {
        return f_fak(fak_w);
    } else if (fak_w<2.0) {
        return s_fak(fak_w);
    } else {
        return e_fak(fak_w);
    }
}
function f_fak(fakw) {
    //einfache Approximation von n! mit den ersten vier Gliedern der Stirling-
Reihe, kleiner Fehler
    //Fehler: 0! 2,3% 1! 0,4% 10! 0,0066%, 100! 0,00007%
    return Math.sqrt(Math.PI/3*(6*fakw+1))*Math.pow(fakw/Math.E,fakw);
}
function s_fak(fakw) {

```



```

//aufwändigere Approximation von n! mit der Stirling-Reihe mit mehr
Reihengliedern, fehler winzig, ab 0.5 nutzbar
//Fehler: 1! 0,05% 2! 0.002% 5! 0.000024% 10! 0.000001% 100! <<0.0000001%
if (fakw ==0) {
    return 1;
} else {
    return Math.pow(fakw,fakw)*Math.sqrt(2*Math.PI*fakw)*Math.exp(-
fakw)*(1+1/12/fakw+1/288/fakw/fakw-139/51840/Math.pow(fakw,3)-
571/2488320/Math.pow(fakw,4));
}
}
function e_fak(fakw) {
    //noch aufwändigere Approximation von n! mit der Stirling-Reihe mit noch
mehr Reihengliedern, Fehler gegen 0, ab 2 nutzbar
//Fehler: 2! 0.00141% 3! <<0.000001%
    bernoulli=new Array(1,1/2,1/6,0,-1/30,0,1/42,0,-1/30,0,5/66,0,-
691/2730,0,7/6,0,-3617/510,0,43867/798,0,-174611/330,0,854513/138,0,-
236364091/2730,0);
    fako=fakw*Math.log(fakw)-fakw+1/2*Math.log(2*Math.PI*fakw);
    for (faki=1;faki<bernoulli.length/2;faki++) {
        fako += bernoulli[2*faki]/(2*faki-1)/2/faki/Math.pow(fakw,2*faki-1);
    }
    if (fakw ==0) {
        return 1;
    } else {
        return Math.exp(fako);
    }
}
function i_fak(fakw) {
    //genaue Berechnung von n! für ganze Zahlen
    fako=1;
    for (faki=2;faki<=fakw;faki++) {
        fako*=faki;
    }
    return fako;
}

```

7.2. Thermischer Vorspannofen

Der folgende Abschnitt enthält eine kurze Beschreibung des thermischen Vorspannofens, mit dem die in der Einleitung (Kapitel 2.1.5) erwähnten Versuche zur thermischen Vorspannung von Glas unterschiedlicher Dicken, bis hin zu Dünnglas, durchgeführt wurden.

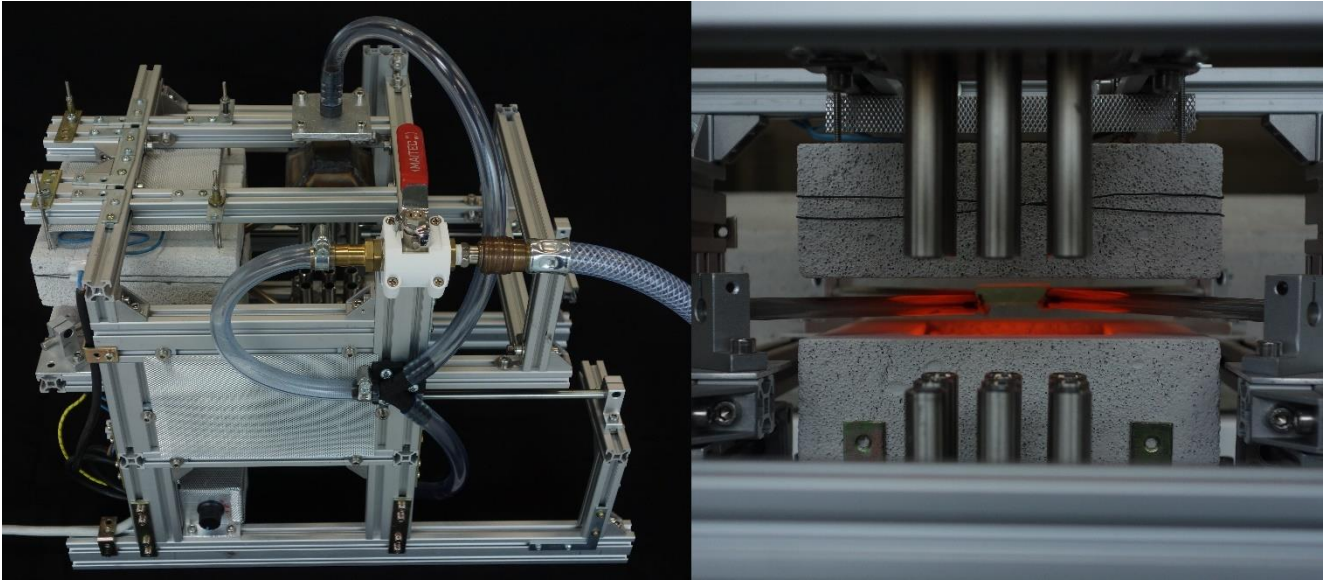


Abbildung 157: thermischer Vorspannofen; links: Gesamtansicht; rechts: Blick in die Heizkammer mit Kühldüsen im Vordergrund

Kommerzielle Vorspannöfen, bei denen das Glas auf Rollen transportiert wird, haben gewöhnlich Beschränkungen bei der minimalen Glasgröße und -dicke. Dies hängt mit dem Rollenabstand (der beim Kühlen des Glases genug Luftstrom ermöglichen muss) und der Verformung des Glases unter Eigengewicht (welche bei abnehmender Dicke zunimmt) zusammen. Kleine oder dünne Glasproben würden in diesen Ofen zu große Verformungen erhalten oder zwischen den Rollen hindurchfallen. Aus Erfahrung kann die untere Grenze mit einer Kantenlänge von ca. 25cm und einer Dicke von ca. 2mm angegeben werden. Um dennoch kleinere oder dünnere Glasproben thermisch vorspannen zu können musste daher ein eigener Vorspannofen gebaut werden.

Im Gegensatz kommerziellen Vorspannöfen sind die Proben in diesem Ofen nicht auf Rollen gelagert sondern an allen vier Ecken durch dünne Finnen aus 0,1 mm starkem Edelstahlblech gehalten, die an einem horizontal verfahrbaren Schlitten, der vom Heiz- in den Kühlbereich fährt, befestigt sind. Die Finnen können in ihrem Abstand verändert werden und somit Glasgrößen von 1x1 cm bis zu 8x8 cm aufnehmen. Es wurde festgestellt, dass diese Art der Lagerung aufgrund des geringen Querschnitts und der geringen Wärmespeicherfähigkeit der dünnen Edelstahlfolie weder zu thermischen Spannungsbrüchen noch zu signifikanten Änderungen des Spannungsprofils in den Glasecken führt.

Die Heizkammer besteht aus zwei ausgehöhlten Porenbetonsteinen in denen Nickel-Chrom-Spiralheizdrähte, die durch eine variable Phasenanschnittsteuerung mit Strom versorgt werden, befestigt sind (Siehe Abbildung 158).

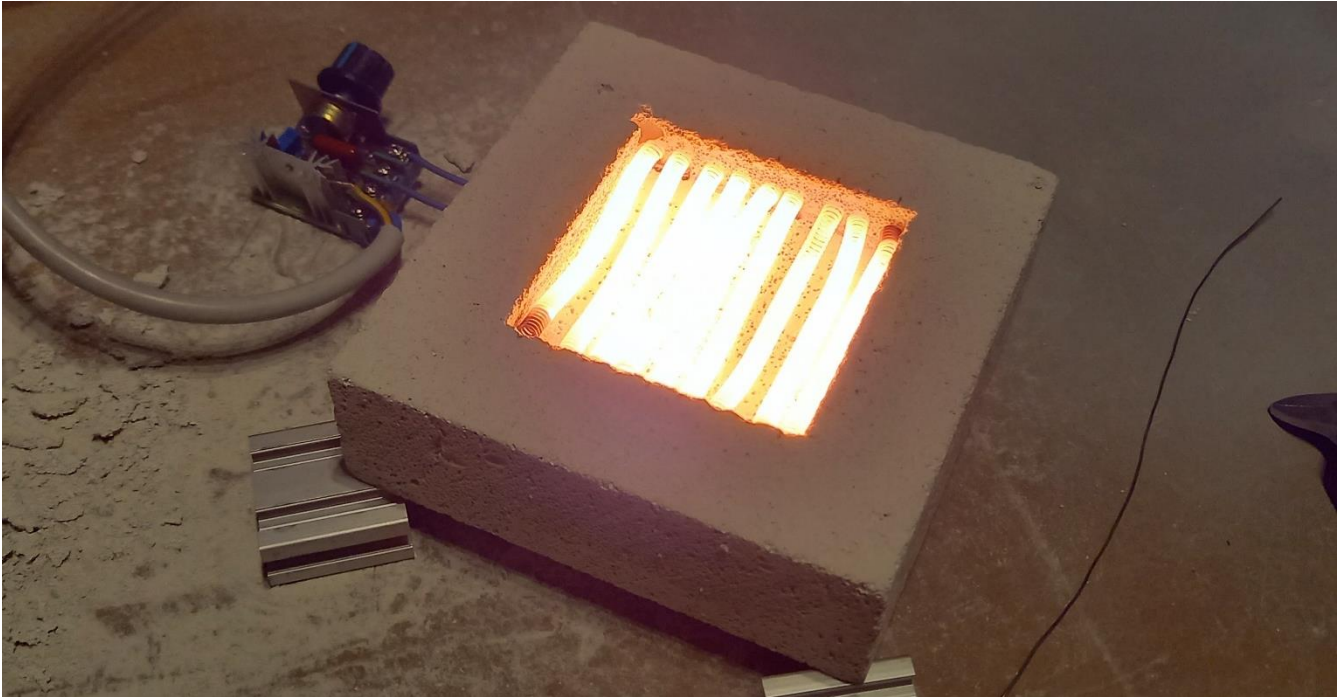


Abbildung 158: Offene Heizkammer mit NiCr-Drähten und angeschlossener Phasenanschnittsteuerung im Bauzustand

Im Kühlbereich sind auf jeder Seite des Glases neun Kühldüsen in rechteckiger (3x3) Anordnung senkrecht zur Glasoberfläche ausgerichtet. Die Düsen (gedrehte Edelstahlrohre 12x1,5 mm) wurden von der Geometrie so ausgewählt, dass der Luftstrom möglichst laminar und gleichmäßig auf die Glasoberfläche trifft. In den vorgespannten Glasproben wurden keine signifikanten Anisotropien festgestellt, daher scheint die Düsenkonfiguration sinnvoll gewählt. Die Luftversorgung der Kühlung erfolgt über eine Druckluft-Schnellkupplung der ein Druckregler vorgelagert ist aus der zentralen Druckluftversorgung der Werkhallen oder alternativ aus einem Kompressor.

Der Vorspannprozess läuft mit diesem Ofen allgemein wie folgt ab:

- Die Glashalter werden, falls nicht bereits geschehen, auf den nötigen Abstand eingestellt
- Das Glas wird eingelegt, der Schlitten befindet sich dabei vor den Vorspanndüsen außerhalb der Heizkammer
- Die Heizkammer wird, üblicherweise für ca. 30 Sekunden falls der Ofen vorher in Betrieb war, vorgeheizt.
- Die Glasscheibe wird mit dem Schlitten in die Mitte der Heizkammer gefahren.
- Die Scheibe wird, üblicherweise in zwei bis fünf Minuten, auf eine Temperatur oberhalb von T_g , meist ungefähr 700 °C, gebracht. Die ausreichende Temperatur lässt sich mit einiger Erfahrung auch durch die Glühfarbe (Dunkelrot) des Glases erkennen.
- Die Druckluft wird aufgedreht, im selben Moment wird das Glas möglichst schnell aus dem Heizbereich in den Kühlbereich gefahren
- Der Probekörper wird mit maximalem Kühldruck abgekühlt bis keine Farbveränderung durch Glut mehr zu erkennen ist (Glut von Glas ist gewöhnlich bis ca. 500 °C, also unterhalb von T_g mit den Augen wahrnehmbar), damit hat das Glas seinen finalen Eigenspannungszustand erreicht.
- Mit reduziertem Kühldruck wird das Glas noch ca. 30-60 Sekunden weiter gekühlt, bis es dem Ofen entnommen und zum vollständigen Abkühlen auf eine wärmefeste Unterlage (z.B. Porenbetonstein) gelegt werden kann.

7.3. Grasshopper-Karamba-Modell zur Biegeberechnung im einachsigen Biegeversuch und PRBM zur Überprüfung

Um die Biegeform bei Imperfektionen, also Abweichungen von der perfekten Kreisform durch Auflagerverdrehungen im einachsigen Biegeversuch berechnen zu können, wurde ein Modell implementiert das Steifigkeits- und Maßstabsunabhängig die Biegeform ermittelt. Dies basiert auf einer geraden Linie, die in Einzelstücke unterteilt wird, generell hat sich bei ca. 50 Stücken eine sehr gute Konvergenz gezeigt. Das erste und letzte Segment bekommen die halbe Länge der übrigen Segmente um eine Vergleichbarkeit mit dem Validierungsmodell zu gewährleisten (wäre sonst nicht nötig). Die Berechnung erfolgt nach dem Zusammenbau eines Stabwerk-Berechnungsmodells (siehe zum Beispiel [132]) unter der Belastung „Prescribed Displacement“ mit dem „Large Deformation Analysis“-Solver in Karamba. Die Querschnitte wurden dehnsteif und biegeweich gewählt. Nachdem die verformte Geometrie erzeugt wurde, erfolgt eine Krümmungsanalyse an der verformten Geometrie, es werden Anfangskrümmung, Endkrümmung und die Maximalkrümmung mit Positionsangabe ausgegeben. Anders als bei den meisten FE-Simulationen lassen sich viele Ergebnisse zeitgleich berechnen, die sehr genauen Kurven in Abbildung 159 wurden in einer Rechenzeit von 6 Sekunden erzeugt und ausgewertet, was ca. 200 ms je Kurve entspricht. Bei geringerer, jedoch meist hinreichender, Genauigkeit, sind Zeiten unter 10 ms je Lösung möglich. Dies und die Tatsache, dass mit einem Verschieben eines Schiebereglers oder ändern eines Datenstroms sofort eine weitere Serie von Zuständen simuliert werden kann, sind nicht nur ein großer Zeitvorteil, sondern erlauben auch die Verwendung bei zum Beispiel der Überprüfung des Smartphone-Biegeversuchs (Kapitel 4.5) in Echtzeit.

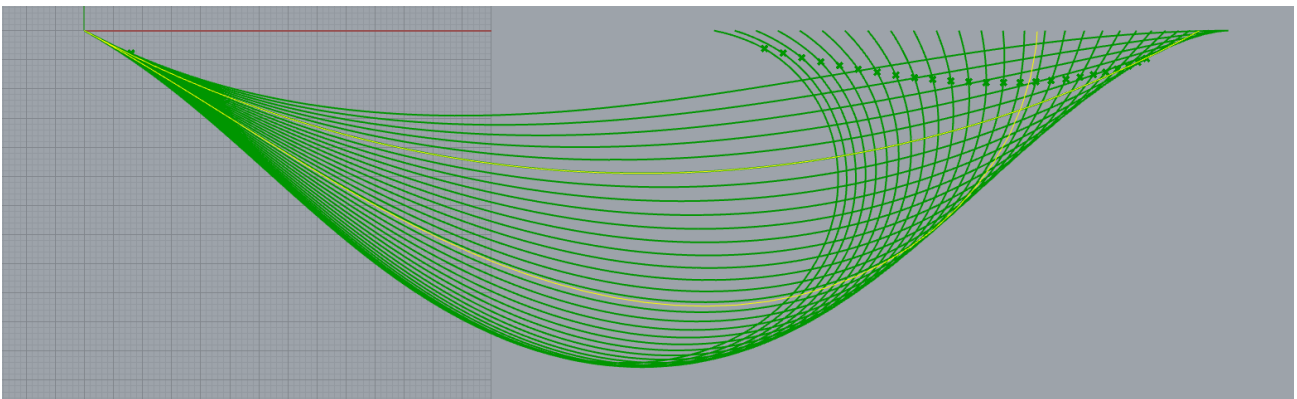


Abbildung 159: Beispielhafte Ergebnisse für asymmetrische Verformung mit dem Karamba-Modell (Grün, mit markierten Punkten maximaler Krümmung) und dem PRBM (Gelb)

Die Validierung dieses Modells erfolgte mit einem Pseudo-Rigid Body Model (PRBM) [133] [134] [135] [136] welches ebenfalls in Grasshopper implementiert wurde. Ein PRBM stellt ein Stabwerk als Reihe von mit Torsionsfedern äquivalenter Steifigkeit verbundenen biege- und dehnstarrten Elementen dar. Für manche Geometrien (z.B. symmetrische Biegung) lässt sich das Modell geschlossen eindeutig lösen, für andere Fälle erfolgt eine rekursive Optimierung von üblicherweise drei charakteristischen Parametern. Beim horizontal verschieblich gelagerter Biegeprüfung sind diese Parameter ein konstant wirkendes Biegemoment, die vertikale Auflagerreaktion und der Abstand der Auflager. Bei horizontal gehaltener Biegeprüfung ist der dritte Parameter die horizontale Auflagerkraft anstatt des Auflagerabstands.

Der Vorteil des PRBM ist, dass es im Gegensatz zu Berechnungen mit Finiten Elementen keine „Black Box“ ist, sondern jeder Berechnungsschritt und alle Ergebnisse nachprüfbar und nachvollziehbar sind. Somit sind auch gewöhnlich Modellinstabilitäten und Konvergenzprobleme sowie generell Effekte wie „element locking“ (siehe Kapitel 3.3) ausgeschlossen, diese Berechnungsmethode kann also als verhältnismäßig „vertrauenswürdig“ angesehen werden.

Der wichtigste Teil des C#-Quellcodes für die Implementierung mit verschieblichen Auflagern und ein Screenshot (Abbildung 160) seien nachfolgend gegeben. Die Implementierung mit unverschieblichen Auflagern erfolgt analog unter dem zusätzlichen Einfluss der horizontalen Auflagerkraft.

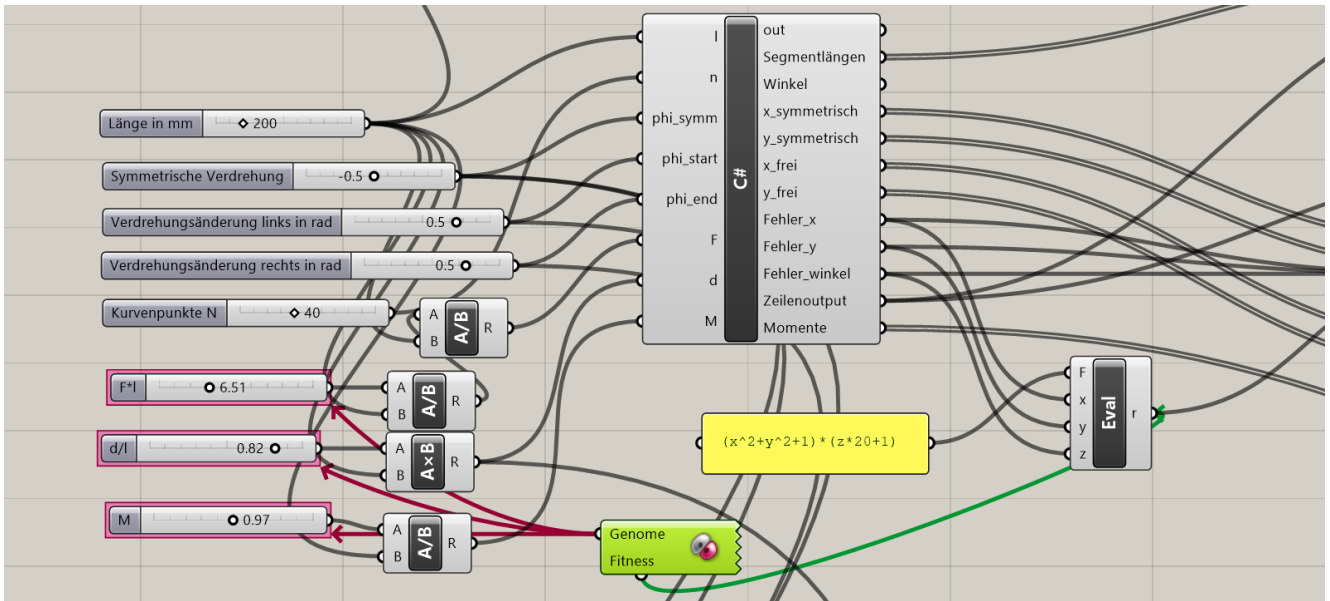


Abbildung 160: Screenshot der Implementierung des PRBM in Grasshopper

Quellcode:

```
private void RunScript(double l, int n, double phi_symm, double phi_start, double
phi_end, double F, double d, double M, ref object Segmentlängen, ref object
Winkel, ref object x_symmetrisch, ref object y_symmetrisch, ref object x_frei, ref
object y_frei, ref object Fehler_x, ref object Fehler_y, ref object Fehler_winkel,
ref object Zeilenoutput, ref object Momente)
{
    double[] segment_l = new double[n];
    for (int i = 0; i < n - 1; i++) {
        if (i == 0 || i == n - 2) {
            segment_l[i] = 0.5 * l / (n - 2);
        } else {
            segment_l[i] = l / (n - 2);
        }
    }
    segment_l[n - 1] = 0;
    Segmentlängen = segment_l;
    //Berechnung der Form unter symmetrischen Bedingungen
    double phi_symm_i = 2 * phi_symm / (n - 2);
    double[] psi_symm = new double[n];
    double[] x_symm = new double[n];
    double[] y_symm = new double[n];
    x_symm[0] = 0;
    y_symm[0] = 0;
    psi_symm[0] = -phi_symm;
    for (int i = 0; i < n - 1; i++) {
        psi_symm[i + 1] = psi_symm[i] + phi_symm_i;
        x_symm[i + 1] = x_symm[i] + Math.Cos(psi_symm[i]) * segment_l[i];
        y_symm[i + 1] = y_symm[i] + Math.Sin(psi_symm[i]) * segment_l[i];
    }
    x_symmetrisch = x_symm;
}
```



```

y_symmetrisch = y_symm;
//Asymmetrische Berechnung
double[] x_asymm = new double[n];
double[] y_asymm = new double[n];
double[] phi_asymm = new double[n];
double[] psi_asymm = new double[n];
double[] m_asymm = new double[n];
x_asymm[0] = 0;
y_asymm[0] = 0;
phi_asymm[0] = -phi_symm + phi_start;
psi_asymm[0] = phi_asymm[0];
m_asymm[0] = M - F * d;
for (int i = 0; i < n - 1; i++) {
    x_asymm[i + 1] = x_asymm[i] + Math.Cos(psi_asymm[i]) * segment_l[i];
    y_asymm[i + 1] = y_asymm[i] + Math.Sin(psi_asymm[i]) * segment_l[i];
    m_asymm[i + 1] = m_asymm[0] + x_asymm[i + 1] * F;
    phi_asymm[i + 1] = m_asymm[i] * l / (n - 1);
    psi_asymm[i + 1] = psi_asymm[i] + phi_asymm[i + 1];
}
x_frei = x_asymm;
y_frei = y_asymm;
//Fehlerberechnung und Ausgabe
Fehler_x = Math.Abs(d - x_asymm[n - 1]);
Fehler_y = Math.Abs(y_asymm[n - 1]);
Fehler_winkel = Math.Abs(psi_asymm[n - 2] - (phi_symm + phi_end));
double m_max = 0;
double pos_max = 0;
double cum_l = 0;
for (int i = 0; i < n - 1; i++) {
    if (Math.Abs(m_asymm[i]) > m_max) {
        m_max = Math.Abs(m_asymm[i]);
        pos_max = cum_l;
    }
    cum_l += segment_l[i];
}
//string sep = "\t";
string sep = "\t";
Zeilenoutput = l + sep + phi_symm + sep + phi_start + sep + phi_end + sep + F
+ sep + d + sep + M + sep + m_max + sep + pos_max;
Momente = m_asymm;
}

```

7.4. Weitere Beispiele für Bruchbilder in einachsiger gebogenem Dünnglas

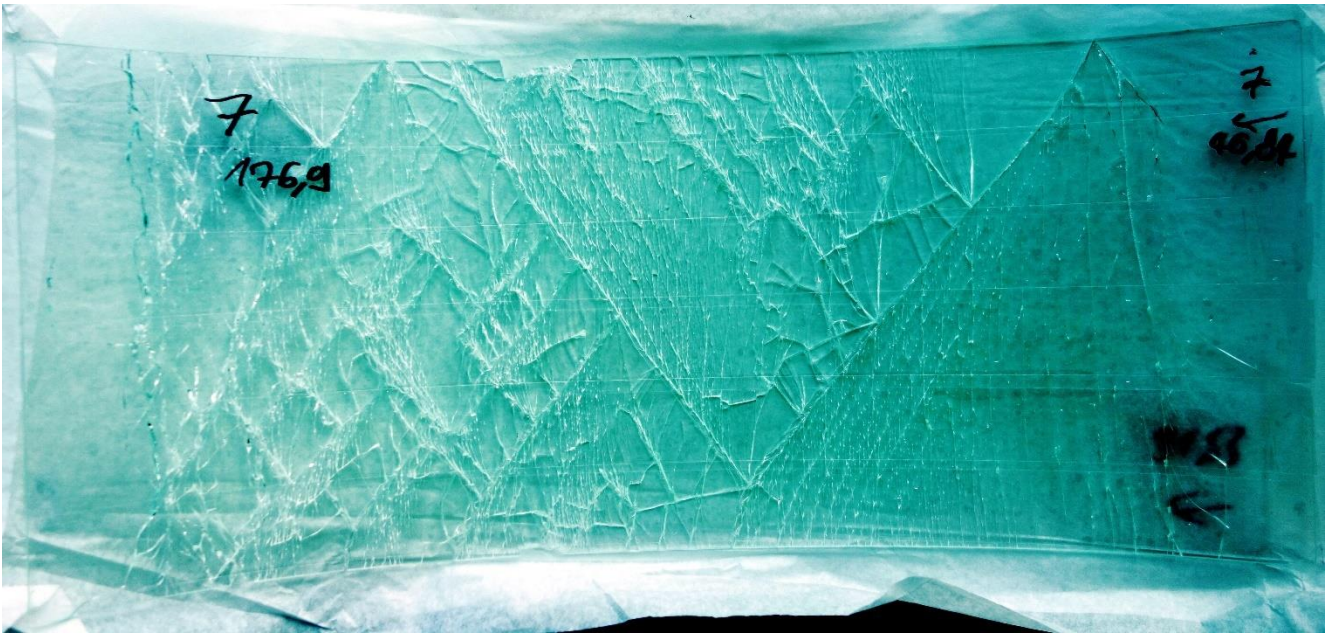


Abbildung 161: unter einer Spannung von ca. 218 MPa nahe der Einspannung (oben rechts) gebrochenes 1,1 mm dickes chemisch vorgespanntes Dünnglas



Abbildung 162: unter einer Spannung von ca. 213 MPa gebrochenes 1,1 mm dickes chemisch vorgespanntes Dünnglas

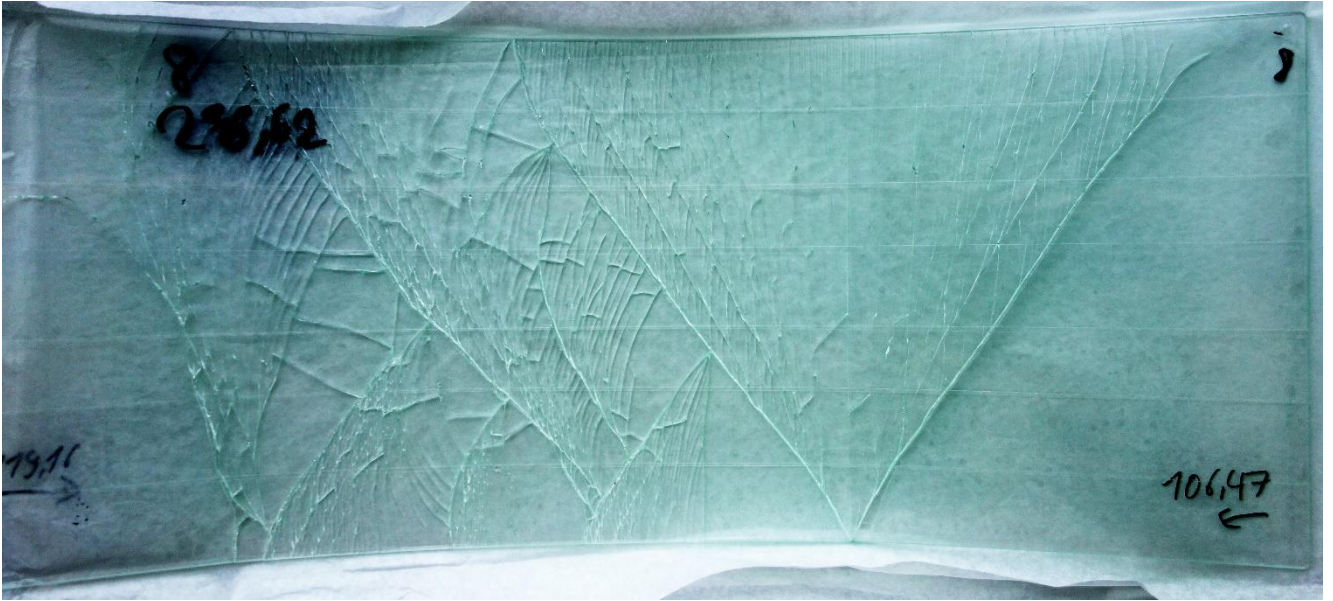


Abbildung 163: unter einer Spannung von ca. 163 MPa gebrochenes 1,1 mm dickes chemisch vorgespanntes Dünnglas mit einseitigen Sekundärbrüchen und auf der anderen Seite im Auflager nicht durchlaufendem primären Bruchtrichter



Abbildung 164: Flächenbruch in Nahaufnahme, die Bruchkegel heben sich an der Oberseite an, die Bruchflächen sind leicht geneigt



Abbildung 165: Flächenbruch (aus vorheriger Abbildung) in Nahaufnahme, Unterseite mit Bruchursprung



Abbildung 166: Bruchstücke von chemisch vorgespanntem Dünnglas welches nach dem Bruch nicht am Klebeband haften blieb, Dicke ca. 0,4 mm bis 1,1 mm

7.5. Vereinfachtes mathematisches Modell für den Vierschneidenbiegeversuch

In Kapitel 2.2.1 wurde ein vereinfachtes mathematisches Modell zur Bestimmung der maximal erreichbaren Spannung für einen modifizierten Vierschneidenbiegeversuch genutzt, um die Grenzen dieses Versuchs aufzuzeigen. Das Modell vereinfacht die Geometrie der verformten Probe zu einem Kreisbogen zwischen den Lastrollen und einer kubischen Parabel (Biegeform eines Kragarms mit Einzellast am Ende) zwischen Last- und Stützrollen (Abbildung 167). Zudem wird bei der Berechnung die Glasdicke vernachlässigt. Die verwendeten Variablen sind in Abbildung 167 gezeigt, die Formeln zur Berechnung in Tabelle 15. Die Formel in der letzten Zeile muss nach der unbekannt Variable c aufgelöst werden, dies wurde aufgrund der Komplexität der Formeln numerisch gelöst (automatisierte Zielwertsuche über Makros in Excel).

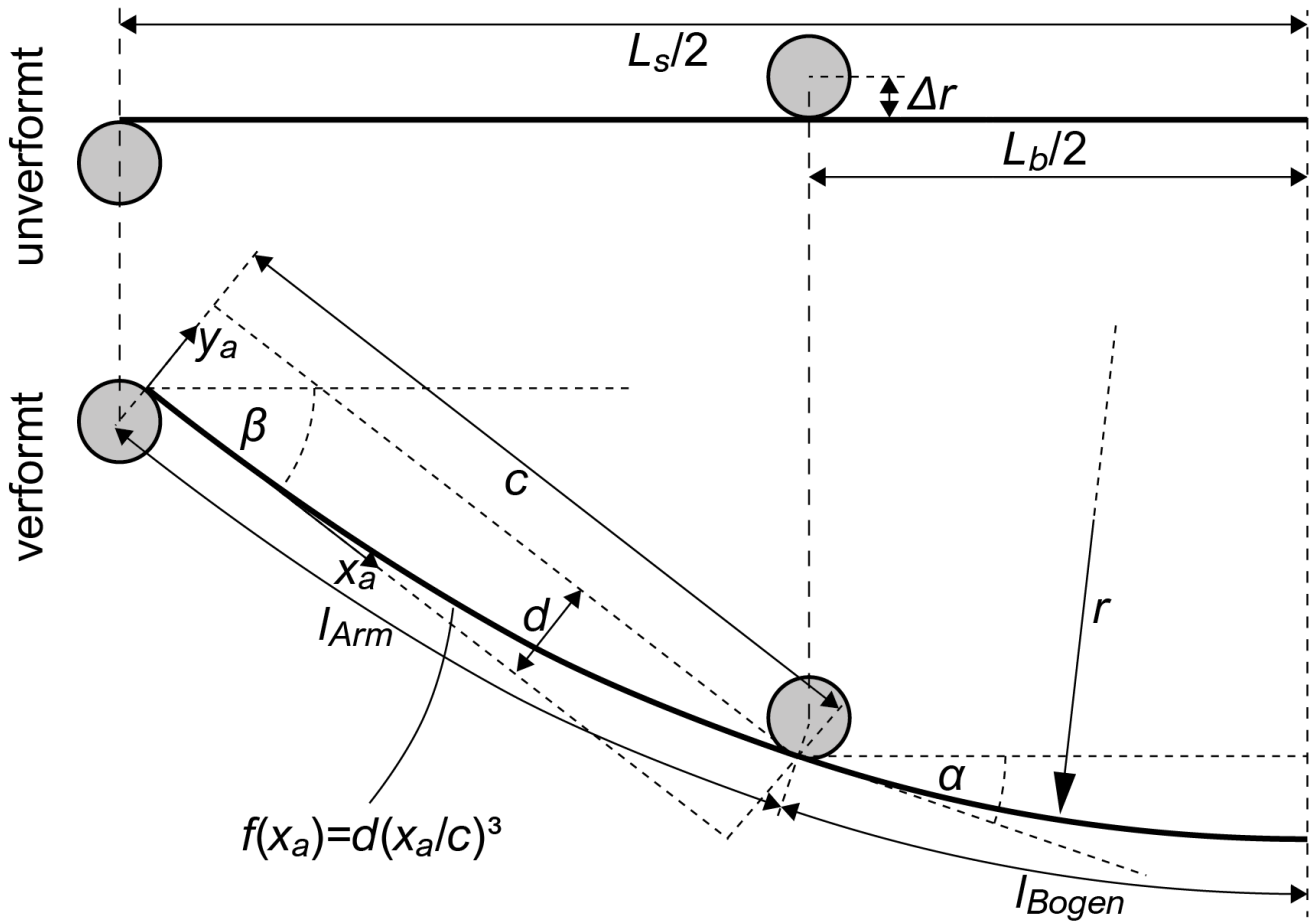


Abbildung 167: vereinfachtes mathematisches Modell

Tabelle 15: Formeln für das vereinfachte mathematische Modell

σ	$\frac{\sigma}{t} = \frac{E}{2r}$
α	$\alpha = \arcsin\left(\frac{L_B}{2(r - \Delta r)}\right)$
l_{Bogen}	$l_{Bogen} = \alpha r$
β	$\beta = \alpha + \arcsin\left(\frac{c}{2r}\right) \text{ mit } d = \frac{c^2}{6r} \text{ aus } \frac{1}{r} = f''(c) = 6 \frac{d}{c^2} \text{ (Krümmung wie Bogen)}$

l_{Arm}	$l_{Arm} = \int_0^c \sqrt{1 + f'(x_a)^2} dx = \int_0^c \sqrt{1 + \frac{x_a^2}{2rc}} dx = \frac{c \sqrt{\left(\frac{c}{r} + 2\right)} + 2\sqrt{c}\sqrt{r} \sinh^{-1}\left(\frac{\sqrt{c}}{\sqrt{2}\sqrt{r}}\right)}{2\sqrt{2}}$
$\frac{L_S - L_B}{2}$	$\frac{L_S - L_B}{2} = \Delta r (\sin(\alpha) + \sin(\beta)) + d \sin(\beta) + c \cos(\beta)$

Zur Verifizierung wurden einzelne zufällige Datenpunkte mit dem für Tabelle 8 im selben Kapitel genutzten FE-Modell [103] und einer Glasdicke von 2 mm ohne Eigengewicht berechnet. Die Abweichungen der nötigen Probenlänge bezogen auf die Spannung werden für die vorgesehene Deutlichmachung der Begrenztheit des Versuchs als ausreichend klein eingeschätzt (siehe Abbildung 168).

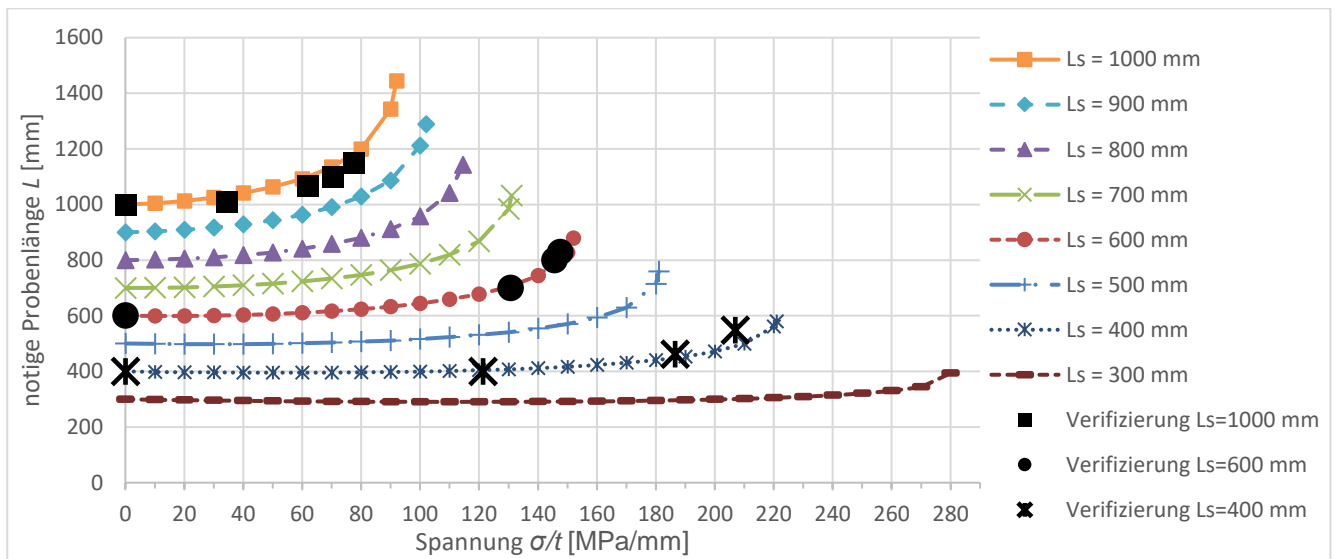


Abbildung 168: Ergebniskurven aus dem vereinfachten Modell mit Ergebnissen aus FE-Verifizierung

7.6. Quellcode der Biegeprüfmaschine

Nachfolgend sind einige relevante Teile des Quellcodes der Biegeprüfmaschine, Stand Oktober 2023, gegeben. Unwichtige oder triviale Teile wurden weggelassen.

Einige Voreinstellungen:

```
//-----Kalibrierdaten
//Höhe von Drehachse bis zu Klemmbacken
double set_kb_h = 67.0;
//Horizontaler Abstand von Achse zu Klemmbacke
double set_kb_b = 21.67;
//Horizontaler Abstand der Klemmbacken in Nullstellung
double set_l_0 = 66.45;
//Länge des Hebelarms
double set_l_arm = 310.0; //Rand: 348.0 Weiter: 315.6
//Vertikaler Abstand Hebelarm unten
double set_h_o = 3.0; //94.25; //ursprünglich 94.4
//Vertikaler Abstand Hebelarm oben
double set_h_u = 82.7;
//Vertikale Position Hebelarm links in Nullstellung
//double set_h_nl = 85.7;
//Vertikale Position Hebelarm rechts in Nullstellung
//double set_h_nr = 85.7;
//Faktor für eine Motorbewegung Vertikal
double set_wegvf = 0.00625/2;
//Faktor für eine Motorbewegung Horizontal
double set_weghf = 0.005;

//Daraus errechnete feste Werte
double kb_b = set_kb_b;
double l_0 = set_h_u + set_h_o;
double l_arm = set_l_arm;
double d_1 = sqrt(set_h_u * set_h_u + l_arm * l_arm);
double d_2 = sqrt(set_h_o * set_h_o + l_arm * l_arm);
double phi_0 = acos((-l_0 * l_0 + d_1 * d_1 + d_2 * d_2) / (2 * d_1 * d_2));

//Veränderliche Werte (Abhängig der Scheibengeometrie)
double kb_h = set_kb_h + 0.5 * t_scheibe; //Kleine Klemme: 60,5 Große Klemme: 67,1 //Minus
ein halber mm für klemmen (evtl)!!!

//Variablen für den Weg
double wegv = 0.0;
double wegh = 0.0;
long posh = 0;
long posv = 0;

//Variablen für Bewegung
const int messwertzahl = 500; //Maximale Spannungsschritte der Maschine;
const double schrittspannung = 1.0; //Spannung je Schritt
int maxmess = messwertzahl;
int bewegung_h[messwertzahl];
int bewegung_v[messwertzahl];
int messwert[messwertzahl];
long lastzeit;

//Startwerte nach reset
double wegv0 = set_h_u + set_h_o;
```

```

double wegh0 = set_l_0;

//Faktor für Motorbewegung
double wegvf = set_wegvf;
double weghf = set_weghf;

//-----Maximaldaten
double wegvmax = 510.0;
double alphamax = PI / 2;
double weghmax = 350.0;

```

Berechnung der Motorenschritte:

```

void calc_steps() {
    //Funktion zum Vorberechnen der Motorbewegung, dauert sonst ca. 1ms je Bewegung was
    eindeutig zu viel ist.
    double cr = 0;
    double calpha = 0;
    long last_h = testl / weghf;
    long last_v = wegv0 / wegvf;
    long c_h = testl / weghf;
    long c_v = wegv0 / wegvf;
    maxmess = e_modul * t_scheibe * alphamax / testl;
    if (maxmess > messwertzahl) maxmess = messwertzahl;
    for (int i = 1; i <= maxmess; i++) {
        cr = e_modul * t_scheibe * 0.5 / i / schrittspannung;
        calpha = testl * 0.5 / cr;
        c_h = (2.0 * (sin(calpha) * (cr + kb_h) + kb_b * (cos(calpha) - 1))) / weghf;
        c_v = (sqrt(d_1 * d_1 + d_2 * d_2 - 2.0 * d_1 * d_2 * cos(calpha + phi_0))) / wegvf;
        bewegung_h[i - 1] = c_h - last_h;
        bewegung_v[i - 1] = c_v - last_v;
        messwert[i - 1] = 0;
        last_h = c_h;
        last_v = c_v;
    }
}

```

Die direkte Motorensteuerung erfolgt mit folgender Routine:

```

void xy(int dh, int dv, unsigned long endzeit) {
    //Variablen für Richtung
    short h_move;
    short v_move;
    long hziel;
    long vziel;
    int hmicros;
    int vmicros;
    bool hend = false;
    bool vend = false;
    //Motorrichtung einstellen
    if (dh > 0) {
        digitalWrite(mhd, HIGH);
        h_move = 1;
    } else {
        digitalWrite(mhd, LOW);
        h_move = -1;
    }
    if (dv > 0) {

```

```

    digitalWrite(mrd, HIGH);
    digitalWrite(mld, HIGH);
    v_move = 1;
} else {
    digitalWrite(mrd, LOW);
    digitalWrite(mld, LOW);
    v_move = -1;
}
//Jetzt die Motoren bewegen. dazu jeweils die Schrittzeiten errechnen und dann warten
dass dieser Zeitpunkt erreicht wird.
long geszeit = endzeit - lastzeit;
if (dh != 0) {
    //digitalWrite(mhs, HIGH);
    hmicros = round(geszeit / abs(dh));
    hziel = lastzeit + hmicros;
} else {
    hend = true;
}
if (dv != 0) {
vmicros = round(geszeit / abs(dv));
    vziel = lastzeit + vmicros;
} else {
    vend = true;
}

while (!hend || !vend) {

    //...wenn Schritt h
    if (micros() > hziel && !hend) {
        digitalWrite(mhs, HIGH);
        delayMicroseconds(8);
        digitalWrite(mhs, LOW);
        dh -= h_move;
        if (dh != 0) {
            hziel += hmicros;
        } else {
            hend = true;
        }
    } //...wenn Schritt v
    if (micros() > vziel && !vend) {
        digitalWrite(mls, HIGH);
        digitalWrite(mrs, HIGH);
        delayMicroseconds(8);
        digitalWrite(mls, LOW);
        digitalWrite(mrs, LOW);
        dv -= v_move;
        if (dv != 0) {
            vziel += vmicros;
        } else {
            vend = true;
        }
    }
}
lastzeit = max(hziel, vziel);
}

```

Auslesen der Kraftsensoren wird über direkten Registerzugriff ermöglicht, damit reduziert sich die nötige Zeit gegenüber vorhandenen Standardbibliotheken von über 500 μ s auf 30 μ s. Der HX711-Analog-Digital-Wandler ist in diesem Fall an Pin 2 und 3 des Arduino angeschlossen, was auf dem ATMEGA 2560-Chip den Pins 5 und 6 des Registers E entspricht.

```
short sensor() {
  // Variablen für Wert und Vorzeichen:
  short wert = 0;
  bool vz;
  // Prüfen ob Daten Verfügbar. Dazu muss der Ausgabebit 0 sein:
  if ((PINE & 32) != 32) {
    // Daten jetzt verfügbar. Deshalb abfragen, jeder Bitflip liefert ein Bit des 24-Bit-
Registers des HX711
    // Der erste Bitflip liefert das Vorzeichen
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    vz = (PINE & B00100000) == B00100000;
    // Die weitere Bits liefern die Werte.
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 14;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 13;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 12;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 11;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 10;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 9;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 8;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 7;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 6;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 5;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 4;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 3;
    PORTE |= B00010000;
    PORTE &= B11101111;
    wert |= (((PINE & B00100000) == B00100000) ^ vz) << 2;
    PORTE |= B00010000;
```



```

    } else {
        arc_r = 1.0*test_t*test_e/2/sigma;
        arc_alpha = 1.0*test_l/arc_r;
        arc_h = 1.0*arc_r*(1-Math.cos(arc_alpha/2));
        arc_b=2.0*arc_r*Math.sin(arc_alpha/2);
        con.beginPath();
        con.arc(w/2,0.4*h-(1.0*arc_h/2-arc_r)*pxcm/10,(1.0*arc_r-
1.0*test_t/2.0)*pxcm/10,Math.PI*1.5-1.0*arc_alpha/2,Math.PI*1.5+1.0*arc_alpha/2);
        con.stroke();
        con.beginPath();
        con.arc(w/2,0.4*h-(1.0*arc_h/2-
arc_r)*pxcm/10,(1.0*arc_r+1.0*test_t/2.0)*pxcm/10,Math.PI*1.5-
1.0*arc_alpha/2,Math.PI*1.5+1.0*arc_alpha/2);
        con.stroke();
    }
}

```

Audioverarbeitung in Javascript:

```

let audioCtx;
const constraints = { audio: true };
function startAudio() {
    hasAudio = false;
    canAudio = false;
    if (navigator.mediaDevices.getUserMedia) {
        canAudio = true;
        console.log('getUserMedia supported. ');
        let onSuccess = function(stream) {
            hasAudio = true;
            clicklist_1[9]=false;
            const mediaRecorder = new MediaRecorder(stream);
            visualize(stream);
        }
        let onError = function(err) {
            console.log('The following error occurred: ' + err);
            clicklist_1[9]=new Array(0.5,0.9,'retry',startAudio,new Array(),new
Array());
            redraw();
        }
        navigator.mediaDevices.getUserMedia(constraints).then(onSuccess, onError);
    } else {
        console.log('getUserMedia not supported on your browser!');
    }
}
function visualize(stream) {
    if(!audioCtx) {
        audioCtx = new AudioContext();
    }
    const source = audioCtx.createMediaStreamSource(stream);
    const analyser = audioCtx.createAnalyser();
    analyser.fftSize = 2048;
    const bufferLength = analyser.frequencyBinCount;
    const dataArray = new Uint8Array(bufferLength);
    source.connect(analyser);
    lastlevel=new Array();
    leveltime=new Array();
    for (i=0;i<arrc;i++) {
        lastlevel[i]=-1;
    }
}

```

```

    leveltime[i]=0;
}
arrpos = 0;
function draw() {
    if (status<4) {
        window.setTimeout(draw,10);
        analyser.getByteTimeDomainData(dataArray);
        con.fillStyle = bgcl;
        con.fillRect(0, h*0.74, w, h);
        con.strokeStyle = txcl;
        con.lineWidth = 2;
        con.strokeStyle = 'rgb(0, 0, 0)';
        con.beginPath();
        volsum = 0.0;
        for(let i = 0; i < bufferLength; i++) {
            let v = dataArray[i] / 128.0;
            volsum += Math.pow(Math.abs(v),2);
        }
        lastlevel[arrpos]=volsum/bufferLength;
        now = new Date().getTime();
        leveltime[arrpos]=now;
        arrpos ++;
        arrpos = arrpos%arrc;
        cmin = Math.min(...lastlevel);
        cmin = 1.0;
        for (i=0; i<lastlevel.length; i++) {
            if (lastlevel[i]!= -1 && lastlevel[i]<cmin) {
                cmin = lastlevel[i];
            }
        }
        cmax = Math.max(...lastlevel);
        var bfa = w>arrc?1:w/arrc;
        var hasSt = false;
        var minlt = now;
        for (i=0; i<arrc; i++) {
            cap = (i+arrpos)%arrc;
            if (leveltime[cap]>0 && lastlevel[cap]!=-1.0) {
                x = w/2-(arrc/2-i)*bfa;
                y= h*0.96-(lastlevel[cap]-cmin)/(cmax-cmin)*(h*0.2) ;
                if(hasSt==false) {
                    con.moveTo(x, y);
                    hasSt=true;
                } else {
                    con.lineTo(x, y);
                }
                if (leveltime[cap]<minlt) {
                    minlt = leveltime[cap];
                }
            }
        }
        con.lineTo(w/2+(arrc/2)*bfa, h*0.96-(lastlevel[(arrpos-1)<0?(arrc-1):(arrpos-1)%arrc]-cmin)/(cmax-cmin)*(h*0.2));
        con.stroke();
    }
}
draw();
}

```

7.8. Quellcode für papierbasiertes Verfahren

Nachfolgend ist der Quellcode für ein einfaches in PHP geschriebenes browserbasiertes Generierungstool für das papierbasierte Prüfverfahren (Kapitel 4.6.1) gegeben:

```
<?php
if (isset($_GET['thickness'])) {
    $breite = array(297, 420, 210, 297, 148, 210);
    $hoehe = array(420, 297, 297, 210, 210, 148);
    $f = 10; //Skalierfaktor
    $b = $breite[$_GET['papersize']]*$f;
    $h = $hoehe[$_GET['papersize']]*$f;
    $im = imagecreatetruecolor($b,$h);
    $weiss = imagecolorallocate($im,255,255,255);
    $schwarz = imagecolorallocate($im,0,0,0);
    $grau = imagecolorallocate($im,192,192,192);
    imagefill($im,0,0,$weiss);
    imagesetthickness($im,$f);
    imagesetinterpolation($im,IMG_GAUSSIAN);
    $l = $_GET['length']*$f;
    $t = $_GET['thickness']*$f;
    $E = $_GET['youngs'];
    $r = $_GET['loadrate'];
    $c = $_GET['curvature']/180*pi();
    $s = $_GET['loadsteps'];
    $z = $_GET['lines'];
    $rand = 0.05*$h;
    $maxr = $l/$c;
    $maxspannung = $E*$t/2/$maxr;
    $maxhoehe = $maxr*(1-cos($c/2));
    $startz = $rand;
    $endz = $h-$rand-$maxhoehe;
    $dauer = $maxspannung/$r; //Dauer in s
    $totalsteps = $dauer/$s; //Anzahl Linien
    $linabstand = ($endz-$startz)/$totalsteps;
    $stepsigma = $maxspannung/$totalsteps;
    $stepzeit = $dauer/$totalsteps;
    $cs = 0;
    for ($i = 0; $i < $totalsteps*$z; $i++) {
        $cz = $startz+$i*$linabstand/$z;
        $cfarbe = $schwarz;
        if ($i%$z==0) {
            $textsize=$f*2.5;

            $boundarr = imagettfbbox($textsize,0,"LiberationSans.ttf",($i/$z*$s)."s
".$cs." MPa");
            imagetfttext($im,$textsize,0,$b/2-$boundarr[4]/2,$cz-$
$f,$schwarz,"LiberationSans.ttf",($i/$z*$s)."s ".$cs." MPa");
            imagesetthickness($im,$f);

        } else {
            imagesetthickness($im,$f/2);
            $cfarbe = $grau;
        }
        if ($cs == 0) {
            imageline($im,$b/2-$l/2,$cz,$b/2+$l/2,$cz,$schwarz);
        } else {
            $cr = $E*$t/2/$cs;

```

```

$ cw = $l/$cr;
$ arct = 50;
for ($j = 0; $j<$arct; $j++) {
    $sw1 = -$cw/2+$cw/$arct*$j;
    $x1 = $b/2+sin($sw1)*$cr;
    $y1 = $cz+$cr-cos($sw1)*$cr;
    $sw2 = -$cw/2+$cw/$arct*($j+1);
    $x2 = $b/2+sin($sw2)*$cr;
    $y2 = $cz+$cr-cos($sw2)*$cr;
    imageline($im,$x1,$y1,$x2,$y2,$cfarbe);
}
}
$cs += $stepsigma/$z;
}
$boundarr = imagetftbbox($f*5,0,"LiberationSans.ttf","t=".$GET['thickness']."mm
".$r."MPa/s");
imagetfttext($im,$f*5,0,$b/2-$boundarr[4]/2,$h-
$rand,$schwarz,"LiberationSans.ttf","t=".$GET['thickness']."mm ".$r."MPa/s");
header("content-type: image/png");
imagepng($im);
} else {
?>
<!DOCTYPE html PUBLIC "-//W3C//DTD XHTML 1.0 Transitional//EN"
"http://www.w3.org/TR/xhtml1/DTD/xhtml1-transitional.dtd">
<html xmlns="http://www.w3.org/1999/xhtml">
<head>
<meta http-equiv="Content-Type" content="text/html; charset=iso-8859-1" />
<title>Manual Glass Testing Paper Template Generator</title>
</head>
<body style="height:100%">
<div style="width:200px; height:200px; position:absolute; margin:auto; top:0; left:0;
right:0; bottom:0;">
<form method="get"><table>
<tr><td>thickness</td><td><input type="number" step=".01" min="0" max="19" name="thickness"
placeholder="thickness [mm]" value="1" /></td><td>mm</td></tr>
<tr><td>length</td><td><input type="number" min="0" max="500" name="length"
placeholder="length [mm]" value="200" /></td><td>mm</td></tr>
<tr><td>load rate</td><td><input type="number" min="0" max="100" step=".1" name="loadrate"
placeholder="load rate [MPa/s]" value="2" /></td><td>MPa/s</td></tr>
<tr><td>E</td><td><input type="number" min="0" max="1000000" name="youngs" placeholder="E
[MPa]" value="70000" /></td><td>MPa</td></tr>
<tr><td>paper</td><td colspan="2"><select name="papersize">
<option value="0">A3 vertical (297x420mm)</option>
<option value="1">A3 horizontal (420x297mm)</option>
<option value="2" selected="selected">A4 vertical (210x297mm)</option>
<option value="3">A4 horizontal (297x210mm)</option>
<option value="4">A5 vertical (148x210mm)</option>
<option value="5">A5 horizontal (210x148mm)</option>
</select></td></tr>
<tr><td>maximum curvature</td><td colspan="2"><select name="curvature">
<option value="45">45&deg;</option>
<option value="90">90&deg;</option>
<option value="180" selected="selected">180&deg;</option>
<option value="270">270&deg;</option>
<option value="360">360&deg;</option>
</select></td></tr>
<tr><td>load steps</td><td colspan="2"><select name="loadsteps">
<option value="1">1s</option>

```



```

<option value="2">2s</option>
<option value="2" selected="selected">5s</option>
<option value="3">10s</option>
</select></td></tr>
<tr><td>intermediate lines</td><td colspan="2"><select name="lines">
<option value="0">none</option>
<option value="1">1</option>
<option value="2">2</option>
<option value="2" selected="selected">5</option>
<option value="3">10</option>
</select></td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2"><input type="submit" value="generate" /></td></tr></table>
</form></div>
</body>
</html>
<?php } ?>

```

7.9. Analytische Lösung des Doppelringbiegeversuchs

Die Analytische Lösung für den Doppelringbiegeversuch wurde mit Hilfe der Musterlösung der 3. Aufgabe des Statik IV-Praktikums des Instituts für Statik und Konstruktion der TU Darmstadt aus dem Jahr 2020 berechnet. Unabhängig davon führt die Kirchhoffsche Plattentheorie immer zum selben Ergebnis, daher wird hier nicht weiter darauf eingegangen, sondern nur die Grundgleichung der Plattentheorie angegeben:

$$\Delta\Delta w = p/K \tag{25}$$

7.10. FE-Modell für den Doppelringbiegeversuch

Das FE-Modell wurde in SOFiSTiK generiert. Als Elemente wurden standardmäßige Flächenelemente mit automatischer Vernetzung verwendet, gelöst wurde entweder linear („SYST PROB LINE“ in ASE) oder nach Theorie 3. Ordnung („SYST PROB TH3“ in ASE). Die Ergebnisse für K nach Theorie 1. Ordnung sind dickenabhängig, was wahrscheinlich an der Elementformulierung liegt, da diese theoretisch dickenunabhängig sein müssten. Die Werte scheinen für große Dicken auf einen Grenzwert zuzulaufen.

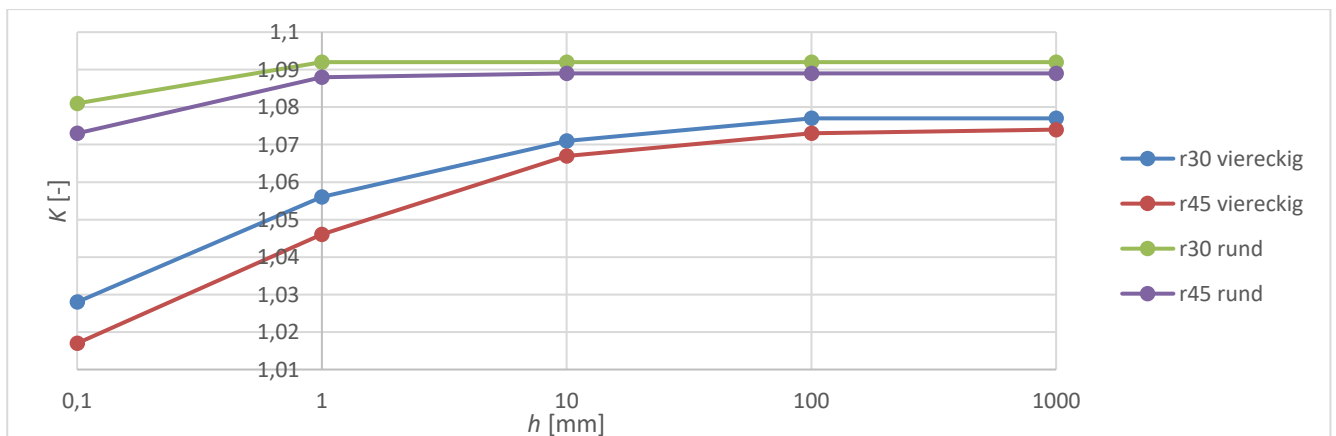


Abbildung 169: dickenabhängige Ergebnisse für K aus der FE-Berechnung

Aufgrund der geringen Komplexität des Modells wird weiterhin nur der unkommentierte Quellcode jeweils für $r_2=45$ mm, $h=1$ mm und gegeben:

Quadratische Platte:

```
+prog aqua urs:1
kopf Definitionen
mat nr 1 e 7e7 mue 0.23
ende

+prog sofimshc urs:2
kopf
syst raum
steu tolg 0.00005
steu mesh 2
steu hmin .003
steu node 1000000
let#ri 0.009
let#ra 0.045
let#kl 0.1
let#t 0.001
sto#schritte 90
let#schrittwinkel 4
sto#schritte2 180
let#schrittwinkel2 2
sto#belastungen 1
sto#last 1

spt nr x y z=0
  101 0 0
  102 #kl 0
  103 #kl #kl
  104 0 #kl
sln nr npa npe
  201 101 102
  202 102 103
  203 103 104
  204 104 101

let#schritt 1
let#phi 0
let#p 0
loop #schritte
let#x 0.5*#kl+cos(#phi*#schrittwinkel)*#ri
let#y 0.5*#kl+sin(#phi*#schrittwinkel)*#ri
spt nr 300+#p x #x y #y z 0
let#phi #phi+#schritt
let#p #p+1
endloop
let#phi 0
let#p 0
loop #schritte2
let#x 0.5*#kl+cos(#phi*#schrittwinkel2)*#ra
let#y 0.5*#kl+sin(#phi*#schrittwinkel2)*#ra
spt nr 700+#p x #x y #y z 0
let#phi #phi+#schritt
let#p #p+1
endloop
```

```

let#p 0
loop #schritte-1
sln nr 900+#p npa 300+#p npe 301+#p
let#p #p+1
endloop
sln nr 900+#p npa 300+#p npe 300

let#p 0
loop #schritte2-1
sln nr 1300+#p npa 700+#p npe 701+#p fix pz
let#p #p+1
endloop
sln nr 1300+#p npa 700+#p npe 700 fix pp

grup 5
sar nr 98 t #t mnr 1
sarb typ aus nl (201 204 1)
sarb typ in nl (1300 1300+#p 1)
grup 6
sar nr 99 t #t mnr 1
sarb typ cons nl (900 900+#schritte-1 1)
sarb typ aus nl (1300 1300+#p 1)
ende

+prog sofiload urs:3
kopf
lf 1 fakg 0 fakt 1
let#p 300
loop #schritte
knot nr #p typ pg pl 1/#schritte
let#p #p+1
endloop
lf 2 fakg 0 fakt 1
area ref sar nr 99 pl 1
ende

+prog ase urs:4
kopf
syst prob line nmat ja
let#l 1
lf 3
lc 1 fakt #last/#belastungen*#l
$lc 3 fakt 0.35
ende

```

Für die runde Platte ändert sich lediglich der Sofimshc-Teil:

```

+prog sofimshc urs:2
kopf
syst raum
steu tolg 0.00005
steu mesh 2
steu hmin .003
steu node 1000000
let#ri 0.009
let#ra 0.045
let#kl 0.1

```

```

let#t 0.001
sto#schritte 90
sto#schritte2 360
let#schrittwinkel 4
let#schrittwinkel2 1
sto#belastungen 1
sto#last 1
let#phi 0
let#r 0.01
let#schritt 1

let#p 0
loop #schritte
let#x 0.5*#kl+cos(#phi*#schrittwinkel)*#ri
let#y 0.5*#kl+sin(#phi*#schrittwinkel)*#ri
spt nr 300+#p x #x y #y z 0
let#phi #phi+#schritt
let#p #p+1
endloop

let#p 0
loop #schritte2
let#x 0.5*#kl+cos(#phi*#schrittwinkel2)*#ra
let#y 0.5*#kl+sin(#phi*#schrittwinkel2)*#ra
spt nr 700+#p x #x y #y z 0
let#x 0.5*#kl+cos(#phi*#schrittwinkel2)*#kl/2
let#y 0.5*#kl+sin(#phi*#schrittwinkel2)*#kl/2
spt nr 1100+#p x #x y #y z 0
let#phi #phi+#schritt
let#p #p+1
endloop

let#p 0
loop #schritte-1
sln nr 1500+#p npa 300+#p npe 301+#p
let#p #p+1
endloop
sln nr 1500+#p npa 300+#p npe 300

let#p 0
loop #schritte2-1
sln nr 1900+#p npa 700+#p npe 701+#p fix pz
sln nr 2300+#p npa 1100+#p npe 1101+#p
let#p #p+1
endloop
sln nr 1900+#p npa 700+#p npe 700 fix pp
sln nr 2300+#p npa 1100+#p npe 1100

grup 5
sar nr 98 t #t mnr 1
sarb typ in n1 (1900 1900+#p 1)
sarb typ aus n1 (2300 2300+#p 1)
grup 6
sar nr 99 t #t mnr 1
sarb typ cons n1 (1500 1500+#schritte-1 1)
sarb typ aus n1 (1900 1900+#p 1)
ende

```

7.11. Spannungskriterium bei der zweiachsigen Festigkeitsprüfung

In den meisten Finite-Element-Berechnungen in dieser Arbeit wurden bei der Spannungsermittlung Von-Mises-Vergleichsspannungen, also Spannungen nach der Gestaltänderungshypothese, ermittelt und ausgewertet. Eine bei der Bemessung von spröden Materialien wie Glas übliche Alternative wäre beispielsweise die Hauptnormalspannungshypothese (Rankine). Für den ebenen Spannungszustand ohne Schubspannungen, wie er beispielsweise beim rotationssymmetrischen Doppelringbiegeversuch und beim einachsigen Biegeversuch an der unter Zug stehenden Glasoberfläche näherungsweise vorliegt, ergibt sich die Vergleichsspannung mit der größten Hauptnormalspannung σ_I und der dazu senkrecht stehenden kleineren Hauptnormalspannung σ_{II} nach von Mises zu Gleichung 26, nach Rankine zu Gleichung 27.

$$\sigma_{v,M} = \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 - \sigma_I \sigma_{II}} \quad (26)$$

$$\sigma_{v,R} = \sigma_I \quad (27)$$

Bei Auswertung der Spannungen an der Kante im einachsigen Biegeversuch wird σ_{II} null, daher liefern von Mises und Rankine dort dasselbe Ergebnis, die Vergleichsspannung wird zu σ_I .

Im zweiachsigen Biegeversuch an dickem Glas sind die beiden Hauptnormalspannungen gleich, da die Radialspannung der Tangentialspannung entspricht. Hier liefern beide Vergleichsspannungshypothesen ebenfalls dasselbe Ergebnis, die Vergleichsspannung wird ebenfalls zu σ_I .

Es macht folglich bei Untersuchungen der Kantenfestigkeit im einachsigen Biegeversuch und bei Untersuchungen der Flächenfestigkeit an dickem Glas im zweiachsigen Biegeversuch keinen Unterschied welches der beiden Vergleichsspannungskriterien angesetzt wird.

Bei der Doppelringbiegeprüfung (oder vergleichbaren rotationssymmetrischen, in dieser Arbeit gezeigten, Biegeprüfungen) an dünnem Glas weichen die beiden Hauptnormalspannungen abseits der Plattenmitte zum Lastring hin aufgrund von Membranspannungen allerdings mit zunehmenden Spannungen deutlich voneinander ab, siehe beispielsweise Abbildung 128. Der Spannungszustand bleibt immer noch eben und schubspannungsfrei, allerdings liefern von Mises und Rankine dort unterschiedliche Ergebnisse. In Abbildung 170 sind unterschiedliche Vergleichsspannungen dargestellt.

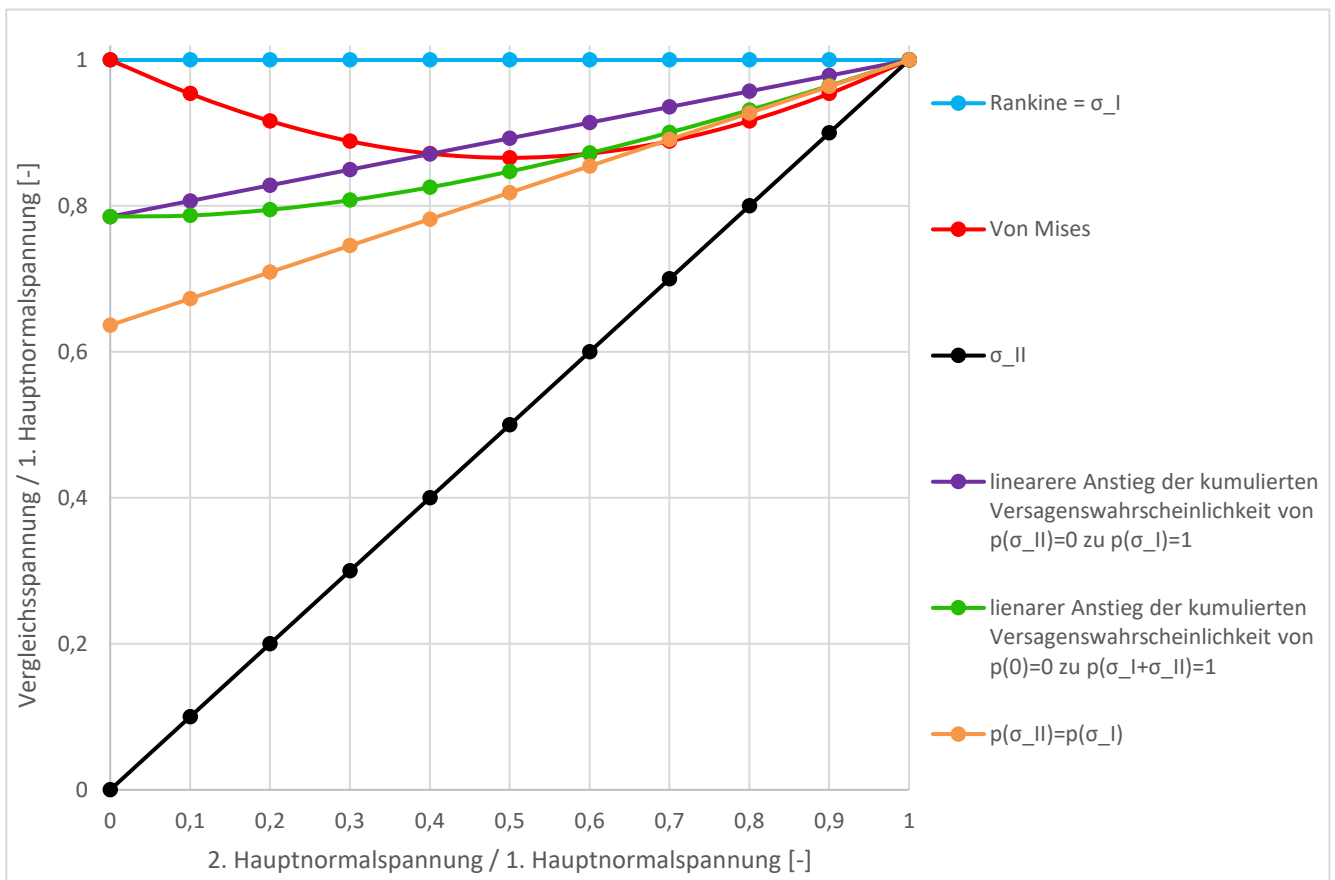


Abbildung 170: Vergleich unterschiedlicher Vergleichsspannungen im ebenen Schubspannungsfreien Spannungszustand

Bei der Bemessung von Glas, also auf der Einwirkungsseite, liegt die Vergleichsspannung nach Rankine insbesondere im zweiachsigen Spannungszustand auf der sicheren Seite, da die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit überschätzt wird, hier ist diese sinnvoll einsetzbar. Bei der Festigkeitsprüfung, also auf der Widerstandsseite, herrscht allerdings der gegenteilige Zustand, hier überschätzt Rankine die Glasfestigkeit auf der unsicheren Seite liegend da eine höhere als tatsächlich vorherrschende Spannung in Richtung der zweiten Hauptnormalspannung σ_{II} angenommen wird. Hier wäre folglich die sicherste Vergleichsspannung die zweite Hauptnormalspannung σ_{II} . Die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit ergibt sich allerdings irgendwo zwischen diesen beiden Annahmen, abhängig des Integrals des Produktes der Spannungen mit der jeweiligen spannungsabhängigen kumulierten Versagenswahrscheinlichkeit p über eine Drehung der Spannungen um $\pi/2$ von der zweiten zur ersten Hauptnormalspannung. Die Formel für die sich daraus ergebende Vergleichsspannung σ_V ist in Gleichung 28 dargestellt, die Formel für die winkelabhängige Spannung $\sigma(\varphi)$ in Gleichung 29.

$$\sigma_V = \frac{\int_0^{\pi/2} p(\sigma(\varphi))\sigma(\varphi)d\varphi}{\int_0^{\pi/2} p(\sigma(\varphi))d\varphi} \tag{28}$$

$$\sigma(\varphi) = \sigma_{II} + \sin(\varphi)(\sigma_I - \sigma_{II}) \tag{29}$$

Die spannungsabhängige kumulierte Versagenswahrscheinlichkeit unterscheidet sich je nach Glascharge, folglich müsste, um ein exaktes Vergleichsspannungskriterium für eine Versuchsreihe zu

bekommen, dieses nach der Versuchsdurchführung als rekursives, nichtlineares mehrparametrisches Versagenskriterium für jede einzelne Prüfung ermittelt werden. Für jede Versuchsserie nach der Versuchsdurchführung rekursiv und unter großem Aufwand ein Vergleichsspannungsmodell zu erstellen wäre in der Praxis nicht sinnvoll, zudem wäre die notwendige Spannungsrate vor dem Versuch nicht bekannt. Für die theoretischen Überlegungen in dieser Arbeit, bei denen die tatsächliche Streuung der hauptnormalspannungsabhängigen Versagenswahrscheinlichkeit nicht bekannt ist, kann somit in keinem Fall ein exaktes Modell gewählt werden. Vergleichsspannungen nach Rankine für die Untersuchungen anzunehmen wäre, wie bereits erwähnt, auf der unsicheren Seite. Die zweite Hauptnormalspannung als Vergleichsspannung anzunehmen wäre die sicherste Annahme, würde allerdings zu deutlich niedrigeren als den tatsächlichen Glasfestigkeiten führen. Daher ist ingenieurmäßig ein sinnvoller Kompromiss beim Vergleichsspannungskriterium anzunehmen. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 171 unterschiedliche kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen schematisch dargestellt.

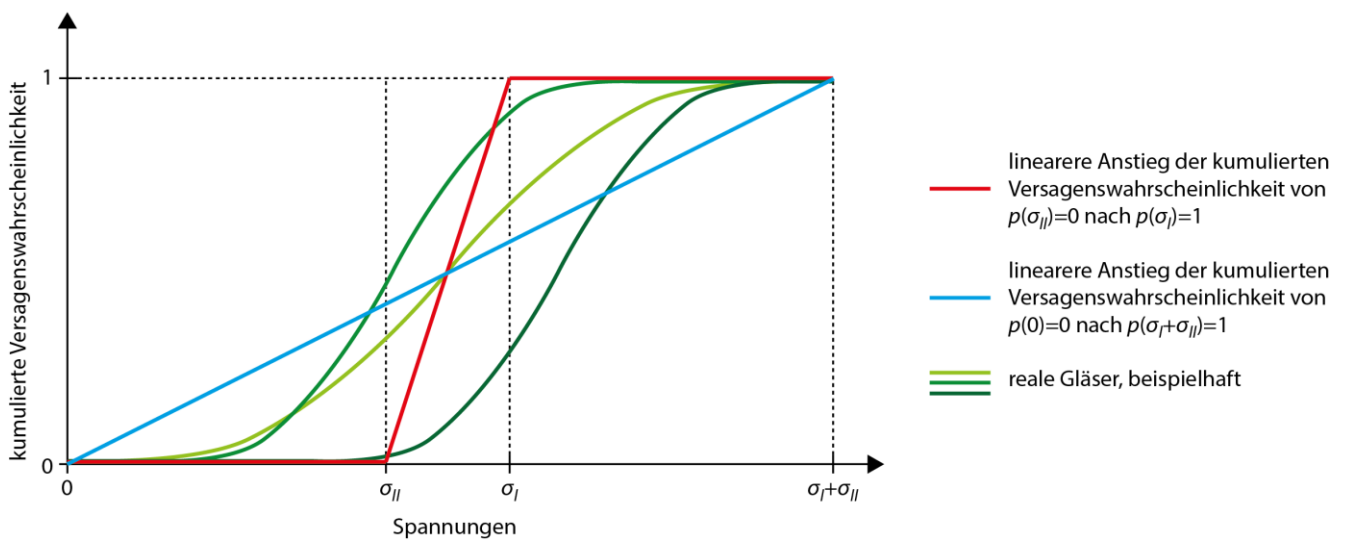


Abbildung 171: Prinzipdarstellung unterschiedlicher kumulierter Versagenswahrscheinlichkeiten in Relation zu zwei gegebenen unterschiedlich großen Hauptnormalspannungen

Es ist zu erkennen, dass für reale unterschiedliche Glaschargen unterschiedliche Vergleichsspannungsmodelle abhängig der jeweils spannungsabhängigen Versagenswahrscheinlichkeit notwendig wären. Die beiden in Abbildung 170 dargestellten, sich aus der Integration des linearen Wahrscheinlichkeitsanstieges bei einer Drehung von σ_{II} zu σ_I (siehe Abbildung 171 sowie Gleichung 28 und 29) ergebenden Vergleichsspannungen werden als sinnvolle Grenzen für Näherungen des tatsächlichen Verhaltens gesehen.

Der lineare Anstieg der kumulierten Versagenswahrscheinlichkeit $p(\sigma)$ von $p(0)=0$ zu $p(\sigma_{II} + \sigma_I)=1$ ist hier sicherer als $p(\sigma)$ von $p(\sigma_{II})=0$ zu $p(\sigma_I)=1$, daher sollte dieser auf der sicheren Seite liegend bevorzugt werden. Wie in Abbildung 170 zu erkennen, liefert dieser im Bereich ab einem Verhältnis der zweiten Hauptnormalspannung zur ersten Hauptnormalspannung von ungefähr 50% einen ähnlichen Wert wie die Vergleichsspannung nach von Mises, ab ungefähr 60% ist von Mises damit verglichen auf der sicheren Seite. Ab ungefähr 70% ist von Mises zudem auf der sicheren Seite relativ zum maximal möglichen Extremfall $p(\sigma_{II})=p(\sigma_I)$. Bei der zweiachsigen Biegeprüfung, auch an sehr dünnem Glas, ist dies im Allgemeinen der relevante Spannungsbereich. Aufgrund der Implementierung der Vergleichsspannung nach von Mises in nahezu sämtlicher FE-Software wird daher als sinnvolle ingenieurmäßige Annahme die Spannung im Rahmen der theoretischen Untersuchungen nach von Mises ausgewertet. Der zu erwartende Fehler kann hier gering, und insbesondere für das Bauwesen ausreichend klein eingeschätzt werden. Von Rankine-Vergleichsspannung wird auf der Widerstandsseite bei Dünnglas abgeraten.

Literaturverzeichnis

1. DIN EN 1288-3:2000 Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Teil 3: Prüfung von Proben bei zweiseitiger Auflagerung.
2. DIN EN 1288-5:2000 Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Teil 5: Doppelring-Biegeversuch an plattenförmigen Proben mit kleinen Prüfflächen.
3. The relations between size matter and glass substrate of different generations (Archiviert). [Online] [Zitat vom: 21. 07 2023.]
<https://web.archive.org/web/20170824103001/http://auo.com/?sn=188&lang=en-US>.
4. Sakai Display Produkts Corporation Company History. [Online] [Zitat vom: 21. 07 2023.]
<https://www.sdp.co.jp/en/corporate/history.html>.
5. D. Neo, K. Liu, R. Huang, H. Wu. Edge Grinding Characteristics of Display Glass Substrate. J. Manuf. Mater. Process. 2021, 5(1), 20; <https://doi.org/10.3390/jmmp5010020> : s.n.
6. H. P. Mahabaduge, W. L. Rancem J.M. Burst, M. O. Reese, D. M. Meysing, C. A. Wolden, J. Li, J. D. Beach, T. A. Gessert, W. K. Metzger, S. Garner, T.M. Barnes. High-efficiency, flexible CdTe solar cells on ultra-thin glass substrates; Appl. Phys. Lett. 106, 133501 (2015)
<https://doi.org/10.1063/1.4916634>.
7. Arcguide.de - Vakuum-Isolierglas und Explosionsschutz-Dünnglas. [Online] [Zitat vom: 21. 07 2023.] <https://www.arcguide.de/produktneuheiten/vakuum-isolierglas-und-explosionsschutz-duennglas/>.
8. Der Fenstersanierer - Datenblatt extra dünnes Spezialglas. [Online] [Zitat vom: 21. 07 2023.]
https://der-fenstersanierer.de/images/datenblatt/datenblatt_8_mm_isolierglas.pdf.
9. Baulinks.de - Leichtere Isoliergläser im Sinne von Energieeffizienz, EnEV, Energiewende und Co. [Online] [Zitat vom: 21. 07 2023.] <https://www.baulinks.de/webplugin/2014/1460.php4>.
10. EE-News.ch - Glasstech: Zukunft von Qualitäts-Isolierglas ist multifunktional. [Online] [Zitat vom: 21. 07 2023.] <https://www.ee-news.ch/de/erneuerbare/article/32803/glasstech-zukunft-von-qualitats-isolierglas-ist-multifunktional>.
11. J. Neugebauer, M. Wallner-Novak, T. Lehner, C. Wrulich, M. Baumgartner. Movable Thin Glass Elements in Façades; Challenging Glass 6 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Delft, 2018.
12. T. Peters, S. Jaschke, J. Schneider. Thin glass in membrane-like structures - applications, modelling and testing; Proceedings of IASS Annual Symposia, IASS 2019 Barcelona Symposium: Glass Structures, pp. 1-8(8).
13. seele - Glasvorbau des Bahnhofes Straßburg. [Online] [Zitat vom: 21. 07 2023.]
<https://seele.com/de/referenzen/bahnhof-strassburg-glasvorbau/>.
14. Octatube - Zuidport Canopy. [Online] [Zitat vom: 21. 07 2023.]
https://www.octatube.nl/en_GB/project-item/projectitem/15-zuidpoort-canopy.html.
15. Eckersley O'Callaghan - Apple Marina Bay Sands. [Online] [Zitat vom: 21. 07 2023.]
<https://www.eocengineers.com/projects/apple-marina-bay-sands-421/>.
16. Eckersley O'Callaghan - Apple Campus. [Online] [Zitat vom: 21. 07 2023.]
<https://www.eocengineers.com/projects/apple-campus/>.
17. Pilkington - The Float Process. [Online] [Zitat vom: 21. 07 2023.]
<https://www.pilkington.com/en/global/knowledge-base/glass-technology/the-float-process/the-float-process#>.
18. Guardian Glass - Floatglas. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://www.guardianglass.com/eu/de/our-glass/glass-types/float-glass>.
19. Schott - Heißformgebung aus der Schmelze. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://www.schott.com/de-de/expertise/glass-melting-and-hot-forming>.
20. AGC Pressemitteilung - AGC Succeeds in rolling SPOOL. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://www.agc.com/en/news/pdf/20140526e.pdf>.
21. Corning - How It Works: Corning's Glass Fusion Process. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://www.corning.com/worldwide/en/innovation/the-glass-age/science-of-glass/how-it-works-corning-fusion-process.html>.

-
22. Nippon Electric Glass - G-Leaf. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://www.neg.co.jp/en/rd/topics/product-g-leaf/>.
 23. Steven Michael Milillo, Randy Lee Rhoads. Overflow down-draw with improved glass melt velocity and thickness distribution. US20120103019A1 Weltweit, 24. 10 2011.
 24. Corning - Datenblatt Willow Glass. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
https://www.corning.com/media/worldwide/Innovation/documents/WillowGlass/Corning%20Willow%20Glass%20Fact%20Sheets_August2019.pdf.
 25. Corning - Datenblatt Gorilla Glass 3. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
https://www.corning.com/microsites/csm/gorillaglass/PI_Sheets/2020/Gorilla_Glass_3_ProdSheet.pdf.
 26. Nippon Electric Glass - G-Leaf Datenblatt. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://www.neg.co.jp/en/assets/file/product/dp/en-g-leaf.pdf>.
 27. Corning - Datenblatt Eagle XG. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
https://www.corning.com/media/worldwide/cdt/documents/EAGLE%20XG_PI%20Sheet_2021.pdf.
 28. Corning - Eagle XG Slim Glass Substrates. [Online] [Zitat vom: 27. 07 2023.]
<https://www.corning.com/emea/de/products/display-glass/products/eagle-xg-slim.html>.
 29. Corning - Datenblatt Astra Glass. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
https://www.corning.com/media/worldwide/cdt/documents/Astra%20Glass_PI%20Sheet_2021.pdf.
 30. Displaydaily - Corning release new display glass Astra. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://displaydaily.com/corning-release-new-display-glass-astra/>.
 31. Corning - Datenblatt Lotus NXT. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
https://www.corning.com/media/worldwide/cdt/documents/Lotus%20NXT_PI%20Sheet_2021.pdf.
 32. Corning - Datenblatt Gorilla Glass Victus 2. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
https://www.corning.com/microsites/csm/gorillaglass/PI_Sheets/Gorilla_Glass_Victus_2_PI_Sheet.pdf.
 33. Corning - Datenblatt Gorilla Glass Victus. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
https://www.corning.com/microsites/csm/gorillaglass/PI_Sheets/Gorilla_Glass_Victus_PI_Sheet.pdf.
 34. Corning - Datenblatt Gorilla Glass 6. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
https://www.corning.com/microsites/csm/gorillaglass/PI_Sheets/2020/Corning%20Gorilla%20Glass%206_PI%20Sheet.pdf.
 35. Corning - Datenblatt Gorilla Glass 5. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
https://www.corning.com/microsites/csm/gorillaglass/PI_Sheets/2020/Corning%20Gorilla%20Glass%205_PI%20Sheet.pdf.
 36. Schott - D263 Produktvarianten. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://www.schott.com/de-de/products/d-263-p1000318/product-variants>.
 37. Schott - D263 Technische Details. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://www.schott.com/de-de/products/d-263-p1000318/technical-details>.
 38. Schott - Datenblatt D263 M. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://media.schott.com/api/public/content/00a5e68886014c5990b06fc25a265559?v=5ebd1bc9&download=true>.
 39. Schott - Datenblatt D263 T Eco. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://media.schott.com/api/public/content/16d90b56050e45558a04bd2cf63640cf?v=2a639f1f&download=true>.
 40. Schott - Produktinformation D263 T eco. [Online]
 41. Schott - Produktinformation D263 LA eco. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://media.schott.com/api/public/content/68a6088302394d16a14780a9e54ca3c4?v=0625fe5a&download=true>.
 42. Schott - Xensation Produktseite. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://www.schott.com/de-de/products/xensation-p1000336>.
 43. Schott - Xensation Technische Details. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://www.schott.com/de-de/products/xensation-p1000336/technical-details>.
 44. Schott - Anwendungen für Xensation Flex. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.]
<https://www.schott.com/de-de/products/xensation-flex-p1000743/applications>.

-
45. Schott - Standort Grünenplan. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://www.schott.com/de-de/ueber-uns/unternehmen/regionen-und-standorte/gruenenplan>.
 46. Schott - Datenblatt AS87eco. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://mss-p-009-delivery.stylelabs.cloud/api/public/content/50598cd1f50c4902941fcc71633e0a85?v=6cb5726f&download=true>.
 47. Schott - AS 87 eco Technische Details. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://www.schott.com/de-de/products/as-87-eco-p1000312/technical-details>.
 48. Schott - Datenblatt AF 32 eco. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://media.schott.com/api/public/content/0f2d401b01a04fb588f3309bd03d5edf?v=6ab78e53&download=true>.
 49. Schott - AF32 eco Technische Details. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://www.schott.com/de-de/products/af-32-eco-p1000308/technical-details>.
 50. Schott - Datenblatt MEMpax. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://mss-p-009-delivery.stylelabs.cloud/api/public/content/d4b09dbc52c548f3b5fd5dfe78af1a2a?v=4b938ea8&download=true>.
 51. Schott - MEMpax Technische Details. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://www.schott.com/de-de/products/mempax-p1000322/technical-details>.
 52. Schott - Datenblatt Borofloat. [Online] [Zitat vom: 27. 07 2026.] <https://media.schott.com/api/public/content/233668732b2143d680351c9941d1e92c?v=685b1880&download=true>.
 53. Schott - Borofloat Informationsblatt. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://media.schott.com/api/public/content/b6b48b8b253b4b068411b84a80fccc59?v=c3e395b1&download=true>.
 54. Schott - Borofloat Anwendungen. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://www.schott.com/de-de/products/borofloat-p1000314/applications>.
 55. Schott - B270 Thin Technische Details. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] <https://www.schott.com/de-de/products/b-270-p1000313/technical-details>.
 56. Schott - Datenblatt B270. [Online] [Zitat vom: 27. 07 2023.] <https://media.schott.com/api/public/content/bd52af0b4b4e4fe7b73817a5c92eb71c?v=2e633f3f&download=true>.
 57. AGC - Datenblatt Falcon. [Online] [Zitat vom: 27. 07 2023.] https://www.agc-yourglass.com/sites/default/files/agc_docs/Falcon_0420_EN.pdf.
 58. AGC - Fact Sheet Dünnglas. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] https://www.agc-yourglass.com/sites/default/files/agc_docs/Factsheet_ThinGlass_1219_EN.pdf.
 59. AGC - Datenblatt Dragontrail (Archiviert). [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] https://web.archive.org/web/20130228040523/http://dragontrail.agc.com/catalog/AGC_Dragontrail_en.pdf.
 60. Nippon Electric Glass - Datenblatt OA-10G/OA-11. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2023.] https://www.neg.co.jp/en/assets/file/product/dp/en-oa-10g_11.pdf.
 61. NSG Pilkington - High Performance Glass Products for Digital Signage, Digital Displays and Touch Screens Produktinformationsblatt. [Online] [Zitat vom: 27. 07 2023.] https://assetmanager-ws.pilkington.com/filesserver.aspx?cmd=get_file&ref=USA105B&cd=cd.
 62. NSG - Datenblatt glanova. [Online] [Zitat vom: 27. 07 2023.] https://assetmanager-ws.pilkington.com/filesserver.aspx?cmd=get_file&ref=GL013&cd=cd.
 63. NSG Pilkington - Datenblatt Microwhite. [Online] [Zitat vom: 27. 07 2023.] https://assetmanager-ws.pilkington.com/filesserver.aspx?cmd=get_file&ref=GL053&cd=cd.
 64. DIN EN 572-1: 2012 Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas – Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften.
 65. Schott - Interaktives Abbe-Diagramm. [Online] [Zitat vom: 31. 07 2023.] <https://www.schott.com/de-de/interaktives-abbe-diagramm>.
 66. Bohle - Informationsblatt Industrielle Schneidtechnik. [Online] [Zitat vom: 31. 07 2023.] <https://www.bohle.com/files/mediacenter/Industrielle%20Schneidtechnik.pdf>.

-
67. S. Nisar, L. Li, M.A. Sheikh - Laser glass cutting techniques - A review; Journal of Laser Applications 25, 2013, <https://doi.org/10.2351/1.4807895>.
 68. C. Thao, H. Zhang, Y. Wangh - Semiconductor laser asymmetry cutting glass with laser induced thermal-crack propagation; Optics and Lasers in Engineering 63, 2014. Seite 43-52, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.06.008>.
 69. K. L. Wlodarczyk, A. Brunton, P. Rumsby, D. P. Hand - Picosecond laser cutting and drilling of thin flex glass; Optics and Lasers in Engineering 78, 2016, Seite 64 - 76, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.10.001>.
 70. H. Shin, D. Kim - Cutting thin glass by femtosecond laser ablation; Optics & Laser Technology 102, 2018, Seite 1 - 11, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.12.020>.
 71. DIN EN 12150-1:2015 Glas im Bauwesen – Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas – Teil 1: Definition und Beschreibung.
 72. Schula, Sebastian. Charakterisierung der Kratzanfälligkeit von Gläsern im Bauwesen. Darmstadt : Springer Vieweg, 2015.
 73. A. Aronen, R. Karvinen - Effect of glass temperature before cooling and cooling rate on residual stresses in tempering; Glass Structures & Engineering 3, 2018.
 74. GESTIS Stoffdatenbank - Kaliumnitrat. [Online] [Zitat vom: 01. 08 2023.] <https://gestis.dguv.de/data?name=003630>.
 75. N. Terakado, R. Sasaki, Y. Takahashi, T. Fujiwara, S. Orihara, Y. Orihara - A novel method for stress evaluation in chemically strengthened glass based on micro-Raman spectroscopy; Communications Physics volume 3, 2020.
 76. S. W. Kim, H.-T. Im, J. E. Lee, H. S. Kim, J. H. Kim, J. Hwang - Physical properties of chemically strengthened thin glass prepared by the spray method using an original KNO₃-Al₂O₃ slurry; Materials Chemistry and Physics 259, 2021.
 77. M. Laurs, B. Schaaf, P. Di Biase, M. Feldmann - Determination of Prestress Profiles in Chemically Toughened Glass by Means of Photoelasticity; Glass Performance Days 2019.
 78. J. Schneider, J. Neugebauer, M. Schuster, T. Peters - Cold-bent thin glass laminates for architectural applications: Computational design and material modeling; Proceedings of IASS Annual Symposia, Hamburg 2017.
 79. T. Peters - Structural design and mechanical behaviour of cold-bent glass in architectural applications; Masterthesis am Institut für Statik und Konstruktion der Technischen Universität Darmstadt, 2017.
 80. DIN EN 1288-1:2000 Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Teil 1: Grundlagen.
 81. DIN EN 1288-2:2000 Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Teil 2: Doppelring-Biegeversuch an plattenförmigen Proben mit großen Prüfflächen.
 82. EN 1836-1:2012-02 Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Kalknatronglas - Teil 1: Definition und Beschreibung.
 83. DIN 52338:2016 Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen - Kugelfallversuch für Verbundglas.
 84. EN 356:1999 Glas im Bauwesen - Sicherheitssonderverglasung - Prüfverfahren und Klasseneinteilung des Widerstandes gegen manuellen Angriff; Deutsche Fassung.
 85. DIN EN 12600:2002 Pendelschlagversuch - Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas.
 86. DIN 18008-1:2020-05 Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen.
 87. DIN 18008-5:2013-07 Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 5: Zusatzanforderungen an begehbbare Verglasungen.
 88. DIN prEN 1063:2019 Glas im Bauwesen - Sicherheitssonderverglasung - Prüfverfahren und Klasseneinteilung für den Widerstand gegen Beschuß.
 89. DIN EN 13541:2012 Glas im Bauwesen - Sicherheitssonderverglasung - Prüfverfahren und Klasseneinteilung des Widerstandes gegen Sprengwirkung; Deutsche Fassung.
 90. DIN prEN 13501-2:2021 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauteilen zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen.

-
91. DIN EN 410:2011 Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen.
 92. DIN EN 12337-1:2000 Glas im Bauwesen - Chemisch vorgespanntes Kalknatronglas - Teil 1: Definition und Beschreibung.
 93. DIN EN 12337-2:2004 Glas im Bauwesen - Chemisch vorgespanntes Kalknatronglas - Teil 2: Konformitätsbewertung/Produktnorm.
 94. M. Zaccaria, T. Peters, J. Ebert, N. Lucca, J. Schneider, C. Louter - The clamp bender: a new testing equipment for thin glass; *Glass Structures & Engineering* 7, 2022, S. 173-186.
 95. D. Pfarr, M. Engelmann - Influence of Poisson's Effect on the determination of the bending tensile stress of thin glass; *Glass Performance Days* 2023.
 96. Schneider Bautabellen für Ingenieure, 20. Auflage, Werner Verlag 2012.
 97. C. Mittelstedt - Rechenmethoden des Leichtbaus; Springer Vieweg 2021.
 98. L. Galuppi, E. Riva - Experimental and numerical characterization of twisting response of thin glass; *Glass Structures & Engineering* 7, 2022.
 99. L. Galuppi, S. Massimiani, G. Royer-Carfagni - Buckling phenomena in double curved cold-bent glass; *International Journal of Non-Linear Mechanics* 64, 2014.
 100. N. Pour-Moghaddam - On the Fracture Behaviour and the Fracture Pattern Morphology of Tempered Soda-Lime Glass; *Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen* 54, Springer Verlag, Darmstadt 2020.
 101. I. Babuška, M. Suri - Locking effects in the finite element approximation of elasticity problems; *Numerische Mathematik* 62, 1992, Seite 439-463.
 102. M. Ainsworth, C. Parker - Unlocking the secrets of locking: Finite element analysis in planar linear elasticity; *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 395, 2022.
 103. T. Peters, P. Hof, M. Schuster, J. Schneider, M. Seel - Determination of the bending strength of glass via four point bending – correction of factor k_e in EN1288-3; *Glass Structures & Engineering*, 2023.
 104. A. Ghosh, S. T. Gulati - Strength/flaw relationship for CRT panel glass (alkali strontium silicate glass); *Journal of the Society for Information Display* 1(4), 1993.
 105. J. D. Helfinstine, S. T. Gulati, T. A. Roe, J. F. Bayne, J. C. Lapp - A Novel Test for Evaluating Surface and Edge Strengths of LCD Panel; *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2006.
 106. S. T. Gulati, J. D. Helfinstine - Edge Strength Testing of Thin Glasses; *International Journal of Applied Glass Science* 2(1):39 - 46, 2011.
 107. P. W. France, M. J. Paradine, M. H. Reeve, G. R. Newns - Liquid nitrogen strengths of coated optical glass fibres; *Journal of Materials Science* 15, 825-830, 1980.
 108. M. J. Matthewson, C. R. Kurkjian, S. T. Gulati - Strength Measurement of Optical Fibers by Bending; *J. Am. Ceramic Soc.*, 69(11) 815-21, 1986.
 109. S. T. Gulati, J. Westbrook, S. Carley, H. Vepakomma, T. Ono - Two Point Bending of Thin Glass Substrate; *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 42: 652-654, 2011.
 110. J. Leutgeb, F. Schallauer - Glasbiegestand; Diplomarbeit an der Höheren Lehranstalt für Maschineningenieurwesen Waidhofen an der Ybbs, 2012.
 111. J. Neugebauer, I. Kasumovic, I. Blazevic - Theoretical development of suitable test scenarios for the determination of the bending tensile strength of thin glass with or without influence of edges and their experimental implementation; *Engin. Transp.* 2018.
 112. H. Spitzhüttl - Biegezugfestigkeitsprüfung an Dünnglas; Masterthesis, Universität der Bundeswehr München, 2013.
 113. I. Maniatis, G. Siebert, G. Nehring - Studies on determining the bending strength of thin glass; *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 2016.
 114. G. Siebert - Thin glass elements—a challenge for new applications; *GPD Conference Proceedings, Tampere (FI)*, pp. 316–319, 2013.
 115. J. Neugebauer - Determination of Bending Tensile Strength of Thin Glass; *Challenging Glass Conference* 5, 2016.
 116. M. Jotz, J. Schneider, E. Rädlein - Introducing the “Cylinder Fit Test”, a simplified edge strength measurement method for ultra thin glass; *Engineered Transparency*, 2018.

-
117. F. O. Santos - Testing the strength of thin glass; Masterthesis, Instituto Superior Técnico, Lissabon, 2016.
 118. L. Galuppi, E. Riva - Experimental and numerical characterization of twisting response of thin glass; *Glass Structures and Engineering* 7, 45-69, 2022.
 119. M. Vandebroek, C. Louter, R. Caspeele, F. Ensslen - Size effect model for the edge strength of glass with cut and ground edge finishing; *Engineering Structures* 79, 2014.
 120. G. Pisano, G. Royer Carfagni - The statistical interpretation of the strength of float glass for structural applications; *Construction and Building Materials* 98, 2015, Seite 741-756.
 121. Tokyo Sokki Kenkyujo, Dehnmessstreifen Typ F. [Online] [Zitat vom: 02. 01 2024.] https://tml.jp/e/product/strain_gauge/f_list.html.
 122. HBM - Die Wheatstonesche Brückenschaltung. [Online] [Zitat vom: 02. 01 2024.] <https://www.hbm.com/de/7163/die-wheatstonesche-brueckenschaltung-kurz-erklaert/>.
 123. Tom Scott - Will YouTube Ever Run Out Of Video IDs?; <https://www.youtube.com/watch?v=gocwRvLhDf8> (Abgerufen am 14.12.2023).
 124. DIN EN ISO 527-2:2012-06 Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen.
 125. S. Dix, L. Efferz, L. Sperger, C. Schuler, S. Feirabend - Analysis of residual stresses at holes near edges in tempered glass; *Proceedings in civil engineering Volume 4 Special Issue: Engineered transparency 2021*.
 126. Fernsehsendung Mythbusters - Episode 31 "Breaking Glass"; Discovery Channel, 2005.
 127. T. Finger - Dünnglasprüfung mit Doppelring und Druckluft; Bachelorthesis, Institut für Statik und Konstruktion der TU Darmstadt, 2019. Betreuer: T. Peters.
 128. R. W. Schmitt - Die Doppelringmethode mit überlagertem Gasdruck als Prüfverfahren zur Bestimmung der Bruchspannungen von großformatigen ebenen Glasplatten kleiner Dicke.; Diplomarbeit RWTH Aachen, 1982.
 129. R. W. Schmitt - Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Glas und Aspekte der statistischen Behandlung der gewonnenen Meßwerte; Dissertation, RWTH Aachen, 1987.
 130. S. T. Gulati, J. D. Helfinstine, T. A. Roe, M.L.Hillman, J. C. Lapp - Biaxial Strength of Ultrathin AMLCD Glass Substrates; *SID Symposium Digest of Technical Papers* 33, p. 49-51, 2002.
 131. R. Gy - Stress corrosion of silicate glass: a review; *Journal of Non-Crystalline Solids* 316, p1-11, 2003.
 132. Skript zur Veranstaltung "Räumliche Stabwerke", Institut für Statik und Konstruktion der TU Darmstadt, 2023.
 133. L. L. Howell, A. Midha - Parametric Deflection Approximations for End-Loaded, Large-Deflection Beams in Compliant Mechanisms; *J. Mech. Des.* 117(1), 1995.
 134. L. L. Howell, A. Midha, T.W. Norton - Evaluation of Equivalent Spring Stiffness for Use in a Pseudo-Rigid-Body Model of Large-Deflection Compliant Mechanisms; *J. Mech. Des.* 118 (1), 1996.
 135. H. Tang, D. Zhang, S. Guo, H. Qu - Pseudo rigid body model for a nonlinear folding compliant mechanism; *Sensors* 18 (4), 2018 .
 136. B. Hargrove, A. Nastevska, M. Frecker, J. Jovanova - Pseudo rigid body model for a nonlinear folding compliant mechanism; *Mechanism and Machine Theory* 176, 2022.

Abbildungsverzeichnis

Bilder, Zeichnungen und Grafiken sind, sofern nicht anders ausgewiesen, eigene Arbeiten.

Abbildung 1: 8,9"-Display eines Asus Eee PC 901 aus dem Jahr 2008; Das Display besteht aus drei Dünnglasscheiben mit 1,14 mm Gesamtdicke, die innere Scheibe hat dabei eine Stärke von ca. 0,44 mm und die beiden Äußeren jeweils ca. 0,35 mm	2
Abbildung 2: Prototyp eines mit Dünnglas eingedeckten Seilnetzdaches, vorgestellt auf der Fachmesse Glasstec 2019	3
Abbildung 3: Kaltgebogene Glasfassade des Bahnhof Straßburg, kaltgebogen laminiertes Verbundglas aus 2 x 6 mm Einscheibensicherheitsglas [13]. Bild: Nils Oberg via Wikimedia Commons, Lizenz: CC-BY-SA 3.0 https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode	4
Abbildung 4: Produktionsverfahren im Vergleich	5
Abbildung 5: Glasprodukte unterschiedlicher Hersteller in Dicken von 0,07 mm bis 12 mm	6
Abbildung 6: Vorspannprozesse im Vergleich	11
Abbildung 7: Versuchsergebnisse zur Vorspannung von 30 mm x 30 mm großen Glasproben aus Kalk-Natronsilicatglas unterschiedlicher Dicke	12
Abbildung 8: Versuchsaufbau nach EN 1288-3 mit Schnittkraftverlauf	13
Abbildung 9: modifizierter (halbe Größe) Versuchsaufbau nach EN 1288-3	14
Abbildung 10: Versuchsaufbau nach EN 1288-2 und EN 1288-5 mit Radialspannungsverlauf an der Plattenunterseite	15
Abbildung 11: Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5	15
Abbildung 12: Dünnglasfenster mit durch im Rahmen verbaute Motoren einachsiger biegsamer Scheibe; Eigenbau, ausgestellt auf der Glasstec 2018	17
Abbildung 13: Der Poisson-Effekt ist in einem stark einachsiger gebogenen Messingstreifen (30 x 2 mm) gut zu erkennen: die Ränder wölben sich im gebogenen Bereich nach außen; es wurde Messing gewählt da dieses eine höhere Querdehnzahl (ca. 0,37) als beispielsweise Stahl (ca. 0,3) oder Glas (ca. 0,22) hat, wodurch der Poisson-Effekt sich stärker ausprägt; in Glas ist er im Allgemeinen, auch aufgrund der deutlich geringeren Möglichkeit der Verformung, nicht mit dem bloßen Auge zu erkennen, siehe auch Abbildung 17	19
Abbildung 14: Prinzipdarstellung des Poisson-Effekts	19
Abbildung 15: Untersicht eines symmetrischen Viertelmodells (Symmetrieachsen links und unten) einer 10 mm dicken Scheibe im Vierschneidenbiegeversuch mit farblich dargestellter Vergleichsspannung (von Mises, siehe Anhang 7.11), von blau (niedrig) bis rot (hoch), die Spannungserhöhung aufgrund des Poisson-Effekts ist deutlich zu sehen	20
Abbildung 16: auf der Außenseite gemessene dauerhaft eingebrachte Verformung durch den Poisson-Effekt im in Längsrichtung in der Mitte der Platte gelegenen Schnitt einer 130 mm breiten, 1,1 mm dicken mit einer Krümmung von ca. 1,3/m heißgebogenen Dünnglasscheibe (entspricht einer Spannung von ca. 50 MPa bei Kaltbiegung); die Messung erfolgte durch Abtasten der Oberfläche mit einer Messuhr in einer Fräseinrichtung linear von einer Kante (horizontale Position 0 mm) zur gegenüberliegenden Kante (130 mm)	20
Abbildung 17: Aufnahme der für die vorherige Abbildung vermessenen Scheibe, der Poisson-Effekt ist selbst bei starker Krümmung in Dünnglas gewöhnlich nicht mit dem bloßen Auge wahrnehmbar, die Scheibe erscheint glatt	21
Abbildung 18: Spannungserhöhung an der Kante, in Längsrichtung gesehen in Plattenmitte, durch den Poisson-Effekt in einer 200 mm langen, 0,7 mm dicken Glasplatte unter einachsiger Biegung aus konstantem Biegemoment bei unterschiedlichen Breiten, aus Finite-Element-Simulation (FE-Simulation) in ANSYS 18.2 mit einem Modell aus tetraedrischen Volumenelementen um unter großen Verformungen das Element-Locking (siehe Kapitel 3.3) zu begrenzen	21
Abbildung 19: Daten aus der vorherigen Abbildung, diesmal in Abhängigkeit der Spannung multipliziert mit dem Quadrat der Breite	22

Abbildung 20: Spannungserhöhung aufgrund des Poisson-Effekts in einer 200 mm langen, 50 mm breiten Glasplatte mit variierender Dicke unter einachsiger Biegung aus konstantem Biegemoment, aus FE-Simulation	22
Abbildung 21: Daten aus der vorherigen Abbildung, diesmal in Abhängigkeit der Spannung geteilt durch das Quadrat der Glasdicke	23
Abbildung 22: Spannungserhöhung aus Poissoneffekt in Abhängigkeit der Querdehnzahl μ für eine 200 mm lange, 1 mm dicke und 50 mm breite Glasscheibe unter einachsiger Krümmung aus konstantem Biegemoment, aus FE-Simulation	23
Abbildung 23: Daten aus vorheriger Abbildung, diesmal geteilt durch die Querdehnzahl μ	24
Abbildung 24: Spannung in einer am rechten Rand eingespannten, unter konstantem Biegemoment einachsig gekrümmten doppelt symmetrischen (Symmetrieachsen links und unten) Scheibe mit einer Länge von 200 mm, Dicke von 1 mm, Breite von 50 mm und Maximalspannung von 184 MPa aus FE-Simulation, in rot ist der Bereich maximaler Spannung dargestellt	24
Abbildung 25: Vergleich der Näherungen mit dem Ergebnis aus FE aus dem die Modellgenauigkeiten durch Konvergenzuntersuchungen (näherungsweise) herausgerechnet wurden	25
Abbildung 26: Die sechs Freiheitsgrade für Imperfektionen, die Veränderung ist in orange gegenüber der blauen Ausgangsgeometrie dargestellt. T=Translation, R=Rotation, Index=Achse	27
Abbildung 27: Verdrillter Probekörper beim Übergang von der gleichmäßigen zweiachsig gekrümmten Torsionsform zur stärker einachsig gekrümmten "Knickform" bei stärkerer Verdrillung. Zur Veranschaulichung wurde statt Glas ein weniger steifes Polycarbonat gewählt welches den Zustandswechsel erst bei größerer Verdrillung und ohne das oft übliche Versagen des Probekörpers zeigt.	28
Abbildung 28: Reduktion der Imperfektionen auf Verdrillung um lokal X (Längsrichtung der Platte) (a), Verdrehung um Lokal Z (Querrichtung der Platte) (b) und konstante Krümmungsänderung (c)	29
Abbildung 29: Darstellung einer Auflagerverschiebung (a) durch eine Kombination aus konstanter Krümmungsänderung und Auflagerverdrehung um lokal Z (b)	30
Abbildung 30: beispielhafte Biegeformen für einseitige Verdrehungsimperfektionen von -1 rad bis 1 rad bei frei einstellbarer Horizontalverschiebung der Lager, ausgehend von einer symmetrischen Lagerverdrehung von 1 rad. In gelb ist die imperfektionsfreie Kreisbogenform gegeben.	31
Abbildung 31: Zusammenhang zwischen Verdrehung an beiden Auflagern und maximaler Krümmung für einen 200 mm langen Probekörper mit frei einstellbarer Horizontalverschiebung der Auflager, der diagonal verlaufende „Knick“ zeigt die Krümmung bei symmetrischer Biegung, beidseitig davon steigt die Spannung bei einseitiger Krümmungsänderung	31
Abbildung 32: maximale Krümmungserhöhung für eine Auflagerverdrehung von 0,1 rad in einer 200 mm langen Scheibe mit symmetrisch gebogener Ausgangsform und frei einstellbarer Auflagerverschiebung	32
Abbildung 33: beispielhafte Biegeformen für einseitige Verdrehungsimperfektion von +0,5 rad (blau) und -0,5 rad (rot) bei fester Horizontalverschiebung der Lager, ausgehend von symmetrischen Biegeformen mit einer Verdrehung von 1 rad (grün)	33
Abbildung 34: maximale Krümmung bei einseitiger Verdrehungsimperfektion in einer 200 mm langen Probe mit in symmetrischer Ausgangsform gehaltener horizontaler Verformung der Lager, der Knick zeigt den imperfektionsfreien symmetrischen Zustand	33
Abbildung 35: maximale Krümmungserhöhung für eine Auflagerverdrehung von 0,1 rad in einer 200 mm langen Scheibe mit symmetrisch gebogener Ausgangsform und behinderter Auflagerverschiebung	34
Abbildung 36: Verdrillung um die lokale X-Achse während einachsiger Biegung; Die Symmetrieachse ist rechts, das Spannungsmaximum an der Kante in Elementmitte	34
Abbildung 37: Spannungserhöhung durch zusätzliche Verdrillung bei einachsiger Biegung in einer 200 mm langen, 40 mm breiten und 1 mm dicken Glasplatte aus FE-Simulation.	35
Abbildung 38: Minimal- und Maximalwerte für die Daten der vorherigen Abbildung	35

Abbildung 39: auf die Glasdicke normierte Spannungserhöhung (abzüglich Poissoneffekt) durch Verdrillung in einer 40 mm breiten und 200 mm langen Platte unterschiedlicher Dicke unter einer Verdrillung von 0,05 rad	36
Abbildung 40: Spannungserhöhung (abzüglich Poissoneffekt) für eine 200 mm lange, 1 mm dicke Glasplatte unterschiedlicher Breite	36
Abbildung 41: Relative Spannungserhöhung (ohne Poissoneffekt) für eine 1 mm dicke, 40 mm breite und 200 mm lange Dünnglasplatte mit symmetrischer Verdrillung um die globale X-Achse	37
Abbildung 42: Relative Spannungszunahme für die Daten aus der vorherigen Abbildung im Plateaubereich	37
Abbildung 43: Punkt des Spannungsmaximums bei symmetrischer Verdrillung; Das Modell hat eine Symmetrieachse an der linken Kante, die Verdrillung dreht in der gezeigten Draufsicht die untere rechte Ecke „hoch“ und die obere rechte Ecke „runter“	38
Abbildung 44: eine antimetrische Verdrillung mit Drillwinkel φ_x (oben) kann für eine gekrümmte Platte auch als Scherung mit Scherwinkel S (unten, hier perspektivisch in der lokalen Glasebene am Auflager gezeigt) unter Beibehaltung der Sehnenlänge durch Korrektur der Auflagerverschiebung in X-Richtung dargestellt werden	39
Abbildung 45: beispielhafter Bruch im einachsigen Biegeversuch von nicht vorgespanntem 0,7 mm dicken Glas unter einer Bruchspannung von ca. 37 MPa; 1 = Bruchursprung mit davon ausgehendem roten Primärbruch, 2 = Krümmungsänderung der Bruchlinien weg vom Primärbruch in blauen Sekundärbrüchen, 3 = Sekundärbruch trifft auf Primärbruch und endet dort	40
Abbildung 46: Trichterförmiger Bruch einer unter einer Spannung von ca. 264 MPa gebrochenen chemisch vorgespannten 1,1 mm dicken Dünnglasscheibe mit großem Winkel des Bruchtrichters	40
Abbildung 47: Darstellung der Spannung und Krümmung während der Rissöffnung; a) schematische Darstellung, b) FE-Simulation mit farbiger Darstellung der Vergleichsspannung (von Mises) von niedrig (blau) nach hoch (rot)	41
Abbildung 48: Bruchtrichterwinkel im Verhältnis zur Bruchspannung für 230 Proben aus 8 Versuchsreihen in 1,1 mm dickem Glas; CS = chemisch vorgespannt; RGP = lineare Regression über den jeweiligen Datensatz	41
Abbildung 49: Bruchtrichterwinkel in Abhängigkeit der Bruchspannung für 1,1 mm, 0,7 mm, 0,5 mm und 0,4 mm Flachglas mit Approximation des Zusammenhangs zwischen Spannung und Winkel	42
Abbildung 50: chemisch vorgespanntes heiß vorgekrümmtes 1,1 mm dickes unter einer außergewöhnlich geringen Spannung von ca. 90 MPa bei einachsiger Biegung gebrochenes Glas ohne Bruchtrichter (Bruchkrümmung = 1,03 /m)	42
Abbildung 51: Bruchbild in 1,1 mm dickem chemisch vorgespanntem Glas mit Flächenbruch und nur innerhalb der Bruchtrichter erzeugter zusätzlicher Bruchfläche; Bruchspannung ca. 131 MPa	43
Abbildung 52: Vom Primärbruch ausgehender Sekundärbruch in einer unter einer Spannung von ca. 147 MPa gebrochenen 1,1 mm dicken chemisch vorgespannten Scheibe	44
Abbildung 53: links: symmetrischer Primärbruch mit asymmetrischen Sekundärbrüchen, davon einer an der Einspannung, in 0,5 mm Floatglas; Mitte: Trichterförmiger Primärbruch mit horizontal und vertikal verlaufenden Sekundärbrüchen in 1,1 mm chemisch vorgespanntem Glas; rechts: Primärbruch an der unteren Grenze für das Entstehen von Bruchtrichtern in 1,1 mm Floatglas mit einer Bruchspannung von ca. 57 MPa, es läuft zuerst eine gerade Linie durch das Glas bevor sich der Bruchtrichter (wahrscheinlich aufgrund von Krümmungsänderung durch Lastumlagerung) öffnet	44
Abbildung 54: drei Bruchspiegel unterschiedlicher Größe in 1,1 mm dickem Glas	45
Abbildung 55: Dünnglasroboter mit einachsig gebogenen "Beinen" und zweiachsig gebogenem "Körper", Eigenbau, ausgestellt auf der Messe Glasstec 2018	46
Abbildung 56: Spannungen und maximale Verformung in unter einem Druck von 5 mBar stehendem 1 mm dickem Glas mit einer Fläche von jeweils 1 m ² und umlaufender Navierlagerung	46
Abbildung 57: Versteifung der Geometrie durch Membrankräfte gezeigt durch die druckabhängige Verformung für die in der vorherigen Grafik gezeigte kreisrunde Geometrie	47

Abbildung 58: Vergleichsspannung (von Mises), dargestellt von blau (niedrig) zu rot (hoch), in Folienkissen aus Dünnglas einer Dicke von 1 mm und einer Fläche von 1 m ² ; a) auf maximales Verhältnis von Verformung zu Spannung optimiertes dreieckiges Folienkissen; b) Folienkissen mit zu geringem Eckradius bei zu spitzem Eckwinkel, es bilden sich Spannungsspitzen durch einachsige Krümmung; c) zu steife Geometrie, die Spannungen werden entlang der Kanten in die Ecken gedrückt	47
Abbildung 59: Seitenansicht für a) aus vorheriger Abbildung. Die maximale Spannung beträgt 50 MPa.	47
Abbildung 60: Membranspannungen im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 unter einer Last von 0,1 kN (maximale Spannung unter Lastring ca. 88,9 MPa, Spannungsabfall zur Mitte ca. 2%) mit einer Glasdicke von 1 mm aus nichtlinearer FE-Berechnung; links: Mittelwert der Membrankräfte, von Druck (Blau) bis Zug (Rot), mit eingezeichnetem Stütz- und Lastring; rechts: Hauptvektoren der Membrankräfte, farbig in Zug (blau) und Druck (rot) unterschieden und in absoluter Höhe über die Länge dargestellt	48
Abbildung 61: Darstellung der drei maßgebenden Imperfektionen im Doppelringbiegeversuch	49
Abbildung 62: Vergleichsspannung (von Mises, siehe Anhang 7.11) an Plattenunterseite von Blau (niedrig) zu Rot (hoch), aus FE-Simulationen der Imperfektionen aus der vorherigen Abbildung im Versuchsaufbau R45 mit 1 mm dickem Glas und 1 cm ² Querschnittsfläche des Lastrings (Stahl) nach Theorie 1. Ordnung (ohne Membraneffekt); links: Verschiebung des Lastrings um 15 mm (resultiert in Spannungsabfall); Mitte: Verschiebung der Scheibe um 4,2 mm (0,3 mm vor dem Abrutschen vom Lastring, Spannung bleibt nahezu konstant); rechts: Asymmetrie der Belastung, die Kraft am linken Rand des Lastrings ist um 50% geringer und am rechten Rand um 50% höher als in der Mitte (resultiert in deutlicher Spannungszunahme)	49
Abbildung 63: Spannungserhöhung im Doppelringbiegeversuch R45 nach EN 1288-5 infolge Verschiebung des Lastrings in Richtung der Kantenmitte aus FE mit drei unterschiedlich steifen Lastringen (oberhalb von 1 cm ² Stahl scheint es keine signifikanten Änderungen für steifer Lastringe zu geben) nach Theorie 1. Ordnung (ohne Membraneffekt) und mit 1 mm Glasdicke, die angegebenen Querschnittsfläche beschreibt die Schnittfläche des auf das Glas gedrückten Rings	50
Abbildung 64: Verhältnis von Asymmetrie der Lasteinleitung (Lastabfall an einem Rand des Lastrings im Verhältnis zur durchschnittlichen Last) zum Spannungsanstieg an der maximal belasteten Stelle im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 in 1 mm dickem Glas mit einem Lastringquerschnitt von 1 cm ² nach Theorie 1. Ordnung (ohne Membraneffekt) aus FE-Simulation	51
Abbildung 65: FE-Modell in der FE-Software ANSYS mit "Vibrationen"; links: kurz vor eintreten der Vibrationen; rechts: mit Vibrationen. Die Farben zeigen die Verformung von der Ausgangsgeometrie.	53
Abbildung 66: "explodiertes" Modell eines Doppelringbiegeversuchs R45 mit 0,5 mm dickem Glas und Belastung durch Vakuum unter dem Stützring statt einem Lastring nach EN 1288-5 mit weiter als üblich über den Stützring überstehendem Glas in der FE-Software SOFiSTiK, eine stabile Lösung ist für Modelle mit überstehenden freien Kanten schwer zu finden	54
Abbildung 67: Modell aus vorheriger Abbildung wird vor dem "Explodieren" durch leichte dreiaxiale Federbettung am Rand bewahrt, das Modell liefert trotzdem keine stabile Lösung da sich der Rand „aufrollt“	55
Abbildung 68: nötige Probenlänge L zur Erreichung der angegebenen dickenabhängigen Spannung σ/h bei unterschiedlichen Stützlängen L_s	57
Abbildung 69: Schematische Darstellung einiger Versuchsaufbauten für die einachsige Prüfung von Dünnglas aus der Literatur; a) Helfinstine 2006 b) Gulati 2011 c) Gulati 2012 d) Leutgeb + Schallauer 2012 e) Spitzhüttl 2013 f) Siebert 2013/Neugebauer 2016 g) Jotz 2018	58
Abbildung 70: Biegeprüfmaschine im Jahr 2022	63
Abbildung 71: Bezeichnung der Variablen der Prüfmaschine an unverformter (oben) und verformter (unten) Geometrie	64
Abbildung 72: Erster Entwurf der Prüfmaschine aus dem Jahr 2017	65
Abbildung 73: Prüfrichtungen; a) liegend, b) auf der belasteten Kante stehend, c) vertikal stehend	66

Abbildung 74: schematische Darstellung der zur Auswahl stehenden Antriebsmethoden mit a) Getriebemotoren und b) Hebelarmen _____	66
Abbildung 75: Erster Aufbau der Prüfmaschine mit Biegerollen aus dem Jahr 2018; links: gebauter Prototyp, die Enden des Glases liegen (mit einer auf diesem Bild nicht vorhandenen Auflagerrolle) auf Kraftsensoren auf welche das Biegemoment direkt messen; rechts: Prinzipdarstellung _____	67
Abbildung 76: Aufnahme während der Prüfung der ersten Prüfserie _____	68
Abbildung 77: Schnittdarstellung der Klemmen der zweiten Generation (2019) im a) Längsschnitt und b) Querschnitt _____	68
Abbildung 78: Aktuelle Version der Prüfmaschine aus dem Jahr 2023 von der „Bedienerseite“ gesehen _____	70
Abbildung 79: Rückansicht der Vertikalachse und Seitenansicht des Klemmbereichs mit geschlossenem Probenhalter und eingespanntem Glas _____	71
Abbildung 80: Unterseiten der Probenhalter mit seitlich weggeklappten Klemmschrauben _____	72
Abbildung 81: Aufbau der Steuerung; links: Übersicht der Anschlüsse; rechts: Hardware der Hauptsteuerung _____	73
Abbildung 82: Darstellung und Auswahl der Biegemomentänderung auf dem Display der Prüfmaschine nach Ende des Versuchs _____	75
Abbildung 83: Beispielbild zur manuellen Prüfung, eine Scheibe wird über eine auf einem Display dargestellte Linie mit definierter Krümmung gehalten _____	77
Abbildung 84: drei unterschiedliche Glashalter für die Prüfung; links: gefrästes Aluminium mit Klemmbacken aus Polyethylen und Fuß aus PMMA sowie gerändelten Klemmschrauben aus Messing; Mitte: in einem Stück ohne Nachbearbeitung 3D-gedruckter Halter mit eingesteckten Muttern (M6 flach) und Sechskanschrauben (M6) zum Klemmen des Glases; rechts: Lasergeschnittener Halter aus Sperrholz mit direkt ins Holz eingedrehten Schrauben zur Klemmung _____	78
Abbildung 85: optionaler Ständer für den Versuchsaufbau, das Smartphone oder Tablet befindet sich in einer "Schublade" unterhalb einer Glasplatte, dadurch sind auch größere oder dickere Geräte verwendbar; an der Rückseite hat der Ständer zudem einen speziellen Kasten aus PMMA welcher Splitter durch die Neigung der Rückwand nach unten in einen Sammelbehälter abprallen lässt _____	78
Abbildung 86: links: Menu für Einstellungen der Prüfserie; rechts: Liste der einzelnen Proben _____	79
Abbildung 87: links: Menu für die Einstellungen einer einzelnen Probe, in Grün sind die Einstellungen der gesamten Serie übernommen, können jedoch überschrieben werden; rechts: Prüfoberfläche vor dem Start der Tests, oben ist die Skaleneinstellung, unten das Mikrofonsignal gezeigt _____	80
Abbildung 88: links: Prüfoberfläche vor Beginn mit Countdown; rechts: Prüfoberfläche während der Prüfung mit gekrümmter Linie _____	81
Abbildung 89: gefiltertes Audiosignal nach der Prüfung, der hohe Peak ist ein leises Klirren von Glas, die anderen Peaks stellen gesprochene Sprache mit höherer Schallenergie dar, werden aber geringer bewertet. _____	81
Abbildung 90: beispielhafter Weibullplot mit Weibullparametern (weitere statistische Daten sind in der Software unterhalb des gezeigten Ausschnitts, gegebenenfalls durch Scrollen, sichtbar) _____	82
Abbildung 91: Scheibe aus PMMA mit an der Kante befestigten Photowiderständen _____	83
Abbildung 92: 10 mm dicke Glasprobe mit vier Dehnmessstreifen als Wheatstonebrücke zur Bestimmung des maximalen angenehm aufbringbaren Biegemoments; an beiden Enden sind an die Glasklemmen angelehnte Verdickungen als „Griffbereiche“ aufgeklebt, welche die Geometrie der Klemmen abbilden _____	84
Abbildung 93: Klemmen mit angebrachten Beschleunigungs- und Gyroskopsensoren und Arduino Nano zur Datenweitergabe an den PC auf dem ein Python-Script die serielle Kommunikation übernimmt und die Daten abspeichert _____	85
Abbildung 94: Verdrehungssignale an beiden Enden der Probe ohne Korrektur des Gyroskopdrifts im Vergleich zum vorgegebenen Signal des Smartphones, nach der Messung wurden die Klemmen wieder in Ausgangsposition gebracht. Beide Signale „enden“ nicht bei der Ausgangsverdrehung, Verdrehung 1 zeigt zudem eine starke scheinbare konstante Drehbewegung. _____	85

Abbildung 95: Maximalspannungen im Glas, errechnet aus mit Sensoren ermittelter Imperfektion und Krümmung (korrigierte Daten aus der vorherigen Abbildung), während eines typischen Biegevorgangs im Vergleich zur vorgegebenen Spannung (mit Versuchsdurchführung durch den Autor)	87
Abbildung 96: kombinierter Weibullplot aus einer manuell geprüften und einer maschinell geprüften Serie von je 30 Proben desselben Glases (0,4 mm Glasdicke, 40 mm Breite, 200 mm Prüflänge) mit jeweiligem 95%-Konfidenzintervall der Prüfserien	88
Abbildung 97: Vergleich von maschineller Prüfung und manueller Prüfung durch Probanden	88
Abbildung 98: Vergleich von maschineller Prüfung und freihändiger Prüfung durch den Autor	89
Abbildung 99: Vergleich der vier Prüfserien, mit Weibullgeraden	90
Abbildung 100: links: generiertes Testpapier mit gekrümmten Linien, die dicken Linien markieren je 10 Sekunden Abstand, die dünnen je 2 Sekunden; rechts: Software-Eingabemaske	91
Abbildung 101: Durch den Probekörper aufgenommener Laserreflektor mit Reflektion von drei zu Identifikationszwecken zueinander verdrehten länglichen Lasern auf dem Schirm	92
Abbildung 102: links: Kamerabild mit Raster zur automatisierten Auswertung; rechts: Reflektor von hinten mit eingesteckter USB-Kamera	92
Abbildung 103: Abstand der Beleuchtungspunkte auf der Probe in Ausgangsposition	93
Abbildung 104: Prinzip der Reflektion	93
Abbildung 105: Beispiel für das Steckblockverfahren mit normgerechter Prüflänge von 200 mm und drei Spannungsstufen in einem Ständer (250, 500 und 750 MPa je mm Dicke); die Steckblöcke sind 3D-gedruckt und haben Einschübe für Gewichte (in diesem Fall Wolframstäbe), der Ständer ist mit der Software Grasshopper parametrisch generiert und lasergeschnitten	95
Abbildung 106: händisch konstruierte Vorlage für den Steckblock aus der vorherigen Abbildung mit allen nötigen Berechnungen und Werkzeugen	96
Abbildung 107: schematische Darstellung des Spiralprüfverfahrens mit eingezeichnetem Schrägstellungswinkel	96
Abbildung 108: Das Glas liegt auf einem hängenden (und leicht schmaleren als die Glasbreite) Gurtband auf, die Rolle wird von oben auf das Glas gelegt, die unter Zug stehenden Kanten können einer gleichmäßigen Spannung ohne Kontakt zu anderen Materialien ausgesetzt werden	97
Abbildung 109: schematische Darstellung des Bandprüfverfahrens in der seitlichen Ansicht	98
Abbildung 110: alternativer Aufbau für das Bandprüfverfahren in der seitlichen Ansicht	99
Abbildung 111: beispielhafter Zugstab nach DIN EN ISO 527 Typ 1A für Prüfung von Polymerwerkstoffen	99
Abbildung 112: beispielhafter Versuchsaufbau für die Zugprüfung von Dünnglas, das Glas wird auf 3/4 der Breite und größerer Länge symmetrisch geklemmt	100
Abbildung 113: Beispielhafte Abmessungen der Probe und der Stempelflächen mit einer Prüflänge von 100 mm	100
Abbildung 114: FE-Simulation eines Viertelmodells (Symmetrie links und unten) mit gezeigter Klemmfläche (2 mm Naturkautschuk) und Vergleichsspannungsverlauf (von Mises, siehe Anhang 7.11); Das Spannungsmaximum in der Fläche ist bei einer Klemmbreite von 75% nur 3,6% höher als im Bereich konstanter Spannung an der Kante, ca. 10 mm vom Klemmbereich kann die Spannung als konstant verteilt angesehen werden	101
Abbildung 115: Beispielbild zur Prüfung im Spalt, jede "Stufe" entspricht einer definierten Spannungssteigerung	102
Abbildung 116: Vergleichsspannungsverteilung (siehe Anhang 7.11) der Glasunterseite im Versuchsaufbau R45 bei einer Last von 1,2 kN für 5 mm (links) und 1 mm (rechts) dickes Glas mit Position von Stütz- und Lastring. Bei 5 mm dickem Glas herrscht eine nahezu konstante Spannungsverteilung unter dem Lastring (roter Bereich), bei 1 mm fällt die Spannung vom Lastring zur Probenmitte deutlich sichtbar ab.	106
Abbildung 117: Versuchsaufbau nach EN 1288-5 mit $r_2=45$ mm (R45) und viereckiger Scheibe; Spannungsverläufe aus nichtlinearer FE in Scheibenmitte, unter dem Lastring und nach Th.I.O.	106

Abbildung 118: Versuchsaufbau nach EN 1288-5 mit $r_2=30$ mm (R30) und viereckiger Scheibe; Spanungsverläufe aus nichtlinearer FE in Scheibenmitte, unter dem Lastring und nach Th. I. O.	107
Abbildung 119: Grenzwerte bei erlaubten Abweichungen der Spannungen vom Normwert in Plattenmitte von 10% und 20% im Vergleich zu den Grenzen der EN 1288-5	108
Abbildung 120: Grenzwerte für unterschiedliche erlaubte Arten der Spannungsabweichung im Vergleich zur Grenze der EN 1288-5 für $r_2=30$ mm (R30) und $r_2 = 45$ mm (R45)	108
Abbildung 121: Last-Zeit-Diagramm für Glasdicke $h=1$ mm, aus FE-Simulation	109
Abbildung 122: Korrekturfaktor für Glasdicke $h=1$ mm, aus FE-Simulation	109
Abbildung 123: Vergleichsspannung (von Mises, siehe Anhang 7.11) in einer 1 mm dicken Glasplatte im Versuchsaufbau R30 mit Zugspannungen von ca. 1000 MPa in Plattenmitte, die Druckspannung am Plattenrand beträgt ca. das 1,4-fache.	110
Abbildung 124: Verhältnis der Vergleichsspannungen am Plattenrand zur Vergleichsspannung in Plattenmitte für unterschiedliche Glasdicken mit den Randbedingungen $r_2=45$ mm und $\sigma_{Norm}=100$ MPa, aus FE-Simulation	111
Abbildung 125: im vergrößerten Doppelringbiegeversuch ($r_1=30$ mm, $r_2=60$ mm, Kantenlänge=140 mm) gebrochene 0,36 mm dicke Scheiben; links: ringförmiger Bruch unterhalb des Lastrings; Rechts: Knicken am Rand	112
Abbildung 126: Kraft-Spannungs-Verlauf für gleichmäßige Spannungsverteilung in 3 mm dickem Glas nach den Formeln aus EN1288-2	112
Abbildung 127: Vergleichsspannung an der Plattenunterseite in 3 mm dickem Glas im Querschnitt für die jeweils in der Legende nach EN 1288-2 angegebenen "gleichmäßigen" nach Norm berechneten Spannungen unter dem Lastring, aus FE-Berechnung	113
Abbildung 128: Vergleich von Radial- und Tangentialspannungen für eine 3 mm dicke und unter einer nach EN 1288-2 mit 49,89 MPa angegebenen Spannung stehende Glasplatte, aus FE-Berechnung	113
Abbildung 129: beispielhafter Versuchsaufbau für das Mehrprobenverfahren im Doppelringbiegeversuch, das Gewicht des Mittelteils wird über ein Rollensystem in das Oberteil weitergeleitet, um für eine gleichmäßige Belastung der beiden Scheiben zu sorgen	116
Abbildung 130: links: Versuchsaufbau für den Doppelringbiegeversuch R30 nach EN 1288-5 mit Druckluft; rechts: damit gebrochenes, 1,1 mm dickes Floatglas, oben ohne Druckluftunterstützung, daher Bruch unter dem Lastring, unten mit Druckluftunterstützung und Bruch in der Fläche innerhalb des Lastrings; der Abdruck des Lastrings entstand nach dem Bruch durch das erneute Auftreffen des durch den Pneumatikzylinder der Prüfmaschine beschleunigten Lastrings	117
Abbildung 131: a) Schnittdarstellung des Versuchsaufbau; b) schematische Schnittdarstellung des Kraftverlaufs unter Ringlast, Flächenlast aus Druckluft und einer Kombination beider Lasten	118
Abbildung 132: Doppelringbiegeversuch mit Druckluftunterstützung im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-3, Vergleichsspannung (siehe Anhang 7.11) im Schnittverlauf an Plattenunterseite in 0,5 mm dickem Glas mit optimierter Luftdruckunterstützung (Spannung unter Lastring gleich Spannung in Plattenmitte) für zwei unterschiedliche Drücke	119
Abbildung 133: Vergleichsspannung (von Mises, siehe Anhang 7.11) unter dem Lastring für unterschiedliche Glasdicken für die Versuchsaufbauten R30 und R45 nach EN 1288-5 bei denen die Membranspannung durch einen Druck von 10 bar kompensiert werden kann	119
Abbildung 134: beispielhafter Aufbau der Regelung mit Lastring R45 links, dann Drucksensor, Durchflussregler und Magnetventil mit Druckluftkupplung; das Luftvolumen zwischen Magnetventil und Durchflussregler sollte möglichst klein sein um den Druck kontrolliert ansteigen lassen zu können, ansonsten kommt es zu größeren Drucksprüngen, alternativ wäre ein ansteuerbarer Durchflussregler sinnvoll	120
Abbildung 135: Last-Vergleichsspannungs-Diagramm für den Versuchsaufbau R30 nach EN 1288-5 mit Druckluftunterstützung; die 0,2 mm-Kurve endet da Stabilitätsprobleme bei ungefähr 330 MPa auftreten	121

- Abbildung 136: Laststeigerung zwischen Ring und Scheibenmitte bei Spannungen aus vorheriger Abbildung und unterschiedlichen Glasdicken; ein kleiner Fehler aus dem FE-Modell ist zu erkennen, die Spannungen können nicht kontinuierlich an jedem Punkt ausgelesen werden, nur an den Elementgrenzen sind Daten verfügbar 122
- Abbildung 137: Vergleichsspannung (von Mises, siehe Anhang 7.11) an Plattenunterseite im Schnitt bei Stützringradius von 40 mm und Lastringradius von 80 mm in einer 3 mm dicken Platte mit Kantenlänge von 250 mm und einer Last von 5 kN, aus FE 122
- Abbildung 138: links: zu Testzwecken gebauter Vakuum(stütz)ring für Ultradünnglas mit 22,5 mm Radius, eine Gummidichtung umschließt die Kontaktfläche des Stützrings, im Inneren befindet sich ein Filter aus Metall um Ansaugen von Glassplittern zu verhindern; rechts: damit gebrochene 0,27 mm dicke Floatglasscheiben, nur ein Teil der geprüften Scheiben konnten mit einem vollen Vakuum zum Bruch gebracht werden, es wären bei einigen Probekörpern höhere Drücke notwendig 124
- Abbildung 139: zwei mögliche Versuchsaufbauten für das Unterdruckverfahren, jeweils mit optionalem Lastring; a) am Stützring wird ein Vakuum gezogen; b) über dem Stützring befindet sich eine Druckkammer mit Zugang (die Klappe ist auf der Innenseite angebracht damit sie durch den Überdruck selbstschließend wirkt); F =Vertikalkraft einer optionalen Prüfmaschine, V =Vakuum, P =Druckluft 124
- Abbildung 140: Spannungsverläufe der Vergleichsspannung (siehe Anhang 7.11) an der Plattenunterseite im Schnitt für unterschiedliche Glasdicken (angegeben sind zudem die Maximalspannungen innerhalb des Stützrings) im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 ohne Lastring, stattdessen mit vollem Vakuum (-1 bar) unter dem Stützring; bei 0,5 mm dickem Glas werden die Druckkräfte am Rand größer als die Zugkräfte in der Mitte 125
- Abbildung 141: Vergleichsspannung für eine 0,5 mm dicke Scheibe mit doppelter Kantenlänge (200 mm) mit Vakuum (-1 bar) unter dem Stützring R45 unter einer Spannung von ca. 100 MPa, das Glas wird über den Rand "gezogen" und erhält lokal hohe Biegezugspannungen die größer als die Zugspannungen im Mittelbereich werden 126
- Abbildung 142: vakuumunterstützter Doppelringbiegeversuch bei unterschiedlichen Glasdicken mit 40 mm Lastringradius und 80 mm Stützringradius, gezeigt sind das Verhältnis von nötiger Last aus Vakuum und Stützring um eine konstante Lastverteilung unter dem Lastring zu erhalten, aus FE-Simulation 127
- Abbildung 143: Rendering eines beispielhaften doppelten Lastrings mit einfacher Hebelmechanik zur gleichmäßigen Lastverteilung auf beide Ringe 128
- Abbildung 144: im Mehringverfahren gebrochene Glasscheiben; links: 0,4 mm dickes Glas mit Bruch innerhalb des inneren Lastrings; rechts: 1,1 mm dickes Glas mit Bruch zwischen den beiden Lastringen; der scheinbar doppelte Abdruck der Lastringe entstand durch das erneute Auftreffen des durch den pneumatischen Prüfzylinder beschleunigten Lastrings nach dem Bruch; die Versuche wurde mit dem in Kapitel 5.4.1 gezeigten Versuchsaufbau durchgeführt 128
- Abbildung 145: Spannungsverteilung der Vergleichsspannung (siehe Anhang 7.11) an Plattenunterseite im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 für 0,5 mm dickes Glas, unterschiedliche Lasten F und unterschiedliche Ringkonfigurationen (ein Ring, zwei Ringe mit gleicher Lastaufteilung, zwei Ringe mit Aufteilung im Verhältnis 3:1), aus Finite-Element-Berechnung 129
- Abbildung 146: optimales Verhältnis der Lastverteilung für die beiden Lastringe (innerer Lastring mit halbem Radius) im Versuchsaufbau R45 nach EN 1288-5 für unterschiedliche minimale Spannungen unter den Lastringen aus FE-Simulation; bei Dicken bei denen unter der gegebenen Spannung ein Verhältnis oberhalb von ungefähr 0,5 nötig wird treten Stabilitätsprobleme auf 130
- Abbildung 147: Gesamtprüfkraft für die vorherige Abbildung, der Zusammenhang ist nicht linear von der Dicke abhängig 130
- Abbildung 148: maximale Spannungserhöhung über dem Wert in Plattenmitte und unter dem äußeren Lastring für die Daten aus den vorherigen beiden Abbildungen 130

Abbildung 149: Vergleichsspannungsverläufe im Schnitt für eine 0,5 mm dicke, mit einer Last von 1,5 kN belastete Glasscheibe im Versuchsaufbau R45, einmal ohne und einmal mit einem zweiten Stützring ($r=20$ mm) der 1/3 der Last aufnimmt	131
Abbildung 150: verschiedene Aufbauten für einen kleinen doppelten Lastring, geschnittene Renderdarstellung; links: verstellbare Lastaufteilung durch Rastmechanismus mit Schwalbenschwanzführung; rechts: feste Lastaufteilung mit Kugeln zur Lastübertragung	132
Abbildung 151: Lastringe im Größenvergleich zu einer menschlichen Hand; links: Lastring R30 (mit Druckluftanschluss); Mitte: Lastring R45 (mit Druckluftanschluss); rechts: Lastring R45 mit zwei Ringen, ausgeführt wie in vorheriger Abbildung gezeigt	132
Abbildung 152: schematisch dargestellter Beispielmechanismus für variable Lastverteilung, die Form des Langlochs im Zahnrad und die Federsteifigkeit beeinflussen die lastabhängige Lastverteilung	133
Abbildung 153: Prinzipdarstellung von runder Glasplatte und Lautsprecher mit überhöhten Verformungen im Glas aufgrund von Vibrationen, welche zum Rand hin abnehmen	134
Abbildung 154: beispielhafte Geometrie und Belastung (Auflagerverdrehung 0,01 rad)	135
Abbildung 155: Spannungsverteilung der Vergleichsspannung (von Mises) im Glas für das zuvor gezeigte System	135
Abbildung 156: Weibull-Plots in logarithmischer (links) und linearisierter (rechts, mit 95%-Konfidenzintervall) Darstellung.	1
Abbildung 157: thermischer Vorspannofen; links: Gesamtansicht; rechts: Blick in die Heizkammer mit Kühldüsen im Vordergrund	6
Abbildung 158: Offene Heizkammer mit NiCr-Drähten und angeschlossener Phasenanschnittsteuerung im Bauzustand	7
Abbildung 159: Beispielhafte Ergebnisse für asymmetrische Verformung mit dem Karamba-Modell (Grün, mit markierten Punkten maximaler Krümmung) und dem PRBM (Gelb)	8
Abbildung 160: Screenshot der Implementierung des PRBM in Grasshopper	9
Abbildung 161: unter einer Spannung von ca. 218 MPa nahe der Einspannung (oben rechts) gebrochenes 1,1 mm dickes chemisch vorgespanntes Dünnglas	11
Abbildung 162: unter einer Spannung von ca. 213 MPa gebrochenes 1,1 mm dickes chemisch vorgespanntes Dünnglas	11
Abbildung 163: unter einer Spannung von ca. 163 MPa gebrochenes 1,1 mm dickes chemisch vorgespanntes Dünnglas mit einseitigen Sekundärbrüchen und auf der anderen Seite im Auflager nicht durchlaufendem primären Bruchtrichter	12
Abbildung 164: Flächenbruch in Nahaufnahme, die Bruchkegel heben sich an der Oberseite an, die Bruchflächen sind leicht geneigt	12
Abbildung 165: Flächenbruch (aus vorheriger Abbildung) in Nahaufnahme, Unterseite mit Bruchursprung	13
Abbildung 166: Bruchstücke von chemisch vorgespanntem Dünnglas welches nach dem Bruch nicht am Klebeband haften blieb, Dicke ca. 0,4 mm bis 1,1 mm	13
Abbildung 167: vereinfachtes mathematisches Modell	14
Abbildung 168: Ergebniskurven aus dem vereinfachten Modell mit Ergebnissen aus FE-Verifizierung	15
Abbildung 169: dickenabhängige Ergebnisse für K aus der FE-Berechnung	25
Abbildung 170: Vergleich unterschiedlicher Vergleichsspannungen im ebenen schubspannungsfreien Spannungszustand	30
Abbildung 171: Prinzipdarstellung unterschiedlicher kumulierter Versagenswahrscheinlichkeiten in Relation zu zwei gegebenen unterschiedlich großen Hauptnormalspannungen	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Dünnglasprodukte einiger Hersteller	7
Tabelle 2: Vergleich der Materialeigenschaften unterschiedlicher Dünngläser	9
Tabelle 3: Probenabmessungen in EN 1288-2 und EN 1288-5	15
Tabelle 4: Ausgewählte weitere Prüfverfahren	16

Tabelle 5: Biegespannung σ [MPa] abhängig von Glasdicke h [mm] und Biegeradius r [m] für Glas mit Elastizitätsmodul $E = 70000$ MPa, die Spannungen sind von grün (üblicherweise deutlich unterhalb der charakteristischen Glasfestigkeit, selbst bei Glas ohne Vorspannung) bis rot (auch mit den Festigkeiten der meisten vorgespannten Glasprodukte nicht zu erreichen) farblich unterlegt, um die Anwendungsgrenzen aufzuzeigen	18
Tabelle 6: Grenzwert der Breite oberhalb derer die einachsig gebogene Probe in Bereich II fällt, also ein näherungsweise konstanter Poissoneneffekt angenommen werden kann	26
Tabelle 7: Maximale Spannungserhöhung im Querschnitt aufgrund von (kleinen) Imperfektionen im nicht gebogenen Glas	27
Tabelle 8: Anwendungsgrenzen des Vierschneidenbiegeversuches nach EN 1288-3	56
Tabelle 9: Steuerpins der Prüfmaschine	73
Tabelle 10: Übersicht einiger Prüfergebnisse der Biegeprüfmaschine mit statistischen Daten (Bestimmtheitsmaß R^2 , 5%-Fraktil der Spannung aus Weibullauswertung und Verhältnis der Standardabweichung s zum 5%-Fraktil) mit und ohne eventuelle offensichtliche Ausreißer (nur angegeben falls Ausreißer klar abgrenzbar sind); Prüflänge jeweils 200 mm; CS = chemisch vorgespannt	76
Tabelle 11: Bewertung der vorgestellten Verfahren nach ausgewählten Kriterien, von Vorteil (Grün) bis Nachteil (Rot), in Reihenfolge der Vorstellung in dieser Arbeit, sowie optimale Glasdicken von „dick“ (Dunkelblau) bis „dünn“ (Hellblau) aus Literaturangaben, alternativ eigene Schätzung aus den Ergebnissen der Analysen im Rahmen der Arbeit (markiert mit *)	103
Tabelle 12: Werte für K im Vergleich	105
Tabelle 13: Dickenabhängige maximal zulässige Spannungen je Dicke in EN 1288-5 mit Abweichung der Spannungen bei nichtlinearer FE-Berechnung zu linearer Berechnung nach Th. I. O.	107
Tabelle 14: Vergleich einiger Kriterien für die Vorgestellten Prüfverfahren in chronologischer Reihenfolge der Nennung, von Vorteil (Grün) bis Nachteil (Rot)	136
Tabelle 15: Formeln für das vereinfachte mathematische Modell	14

Abkürzungsverzeichnis

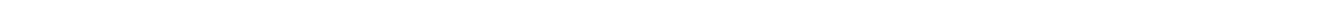
CS	chemische Vorspannung / chemisch vorgespannt
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Euronorm
ESG	Einscheibensicherheitsglas
FE	Finite Elemente
PRBM	Poly-Ridgid-Body-Model
R30	Versuchsaufbau mit Stützringradius von 30 mm nach EN 1288-5
R45	Versuchsaufbau mit Stützringradius von 45 mm nach EN 1288-5
VSG	Verbundsicherheitsglas

Variablenverzeichnis

b	Y-Achsenabschnitt der Weibullkurve
c	Länge des Hebelarms beim Vierschneidenbiegeversuch
d	Vertikalversatz des Hebelarms beim Vierschneidenbiegeversuch
d_1	Hilfsvariable für die Biegeprüfmaschine
d_2	Hilfsvariable für die Biegeprüfmaschine
E	Elastizitätsmodul
F	(Prüf-)Kraft
h	Glasdicke
I	Biegesteifigkeit

I_i	Einzelscheibensteifigkeit
$I_{Laminat}$	Steifigkeit eines Glaslaminats
K	Dimensionsloser Geometriefaktor für den Doppelringbiegeversuch
K	Plattensteifigkeit
k	Weibull-Formparameter
L	(Proben-)Länge
L_{arm}	Länge des Hebelarms bei der Biegeprüfmaschine
l_{arm}	Bogenlänge des Glases zwischen Biege- und Auflagerrollen beim Vierschneidenbiegeversuch
L_b	Prüflänge
l_{Bogen}	Bogenlänge zwischen Biegerollen im Vierschneidenbiegeversuch
L_s	Stützlänge
L_v	Länge der Vertikalachse der Biegeprüfmaschine
$L_{v,0}$	Ausgangslänge der Vertikalachse der Biegeprüfmaschine
M	Moment
m	Weibull-Formparameter
N	Normalkraft
p	Versagenswahrscheinlichkeit
Q	Querkraft
r	(Biege-)Radius
r_1	Radius Lastring
r_2	Radius Stützring
r_3	Radius kreisförmige Platte
R^2	Bestimmtheitsmaß
S	Scherwinkel
s	Standardabweichung
T	Weibullparameter der Lebensdauer
$T_{Umgebung}$	Umgebungstemperatur
w	vertikale Verschiebung
W	Widerstandsmoment
y_{Rolle}	Vertikalverschiebung der Biegerollen im Vierschneidenbiegeversuch
α	thermischer Ausdehnkoeffizient
α	Verdrehung des Glases unter den Biegerollen im Vierschneidenbiegeversuch
α	Verdrehung der Hebelarme bei der Biegeprüfmaschine
β	Verdrehung des Glases über den Auflagerrollen im Vierschneidenbiegeversuch
Δk	Krümmungsunterschied oder -erhöhung
Δk_{arm}	Vertikalversatz der Lager bei der Biegeprüfmaschine
Δk_h	Horizontalversatz der Klemme zum Lager bei der Biegeprüfmaschine
Δk_v	Vertikalversatz der Klemme zum Lager bei der Biegeprüfmaschine
ΔL	Längenunterschied oder -erhöhung
Δr	Radiusunterschied oder -erhöhung
ΔT_{Probe}	Temperaturunterschied in der Probe
ΔX	Verschiebung in X-Richtung
Δx	Horizontalverschiebung des Hebelarms bei der Biegeprüfmaschine
ΔY	Verschiebung in Y-Richtung
ΔZ	Verschiebung in Z-Richtung
$\Delta \sigma$	Spannungsunterschied oder -erhöhung
$\Delta \tau$	Schubspannungsunterschied oder -erhöhung

$\Delta\varphi$	Verdrehungsunterschied oder -erhöhung
$\Delta\varphi_X$	Verdrehung um X-Achse
$\Delta\varphi_Y$	Verdrehung um Y-Achse
$\Delta\varphi_Z$	Verdrehung um Z-Achse
$\Delta\varphi_{Z,I}$	Verdrehung um Z-Achse am linken Auflager
$\Delta\varphi_{Z,K}$	Verdrehung um Z-Achse am rechten Auflager
ε	Dehnung
ϑ_{Bruch}	Bruchwinkel
λ	Weibull-Skalenparameter
μ	Querdehnzahl
ρ	Dichte
σ	Spannung
$\sigma_{5\%-Fraktil}$	5%-Fraktilwert der Glasfestigkeit
σ_{bB}	Spannung unterhalb der Biegerolle im Vierschneidenbiegeversuch
σ_{Bruch}	Bruchspannung
σ_{calc}	berechnete Spannung
σ_I	Erste Hauptnormalspannung
σ_{II}	Zweite Hauptnormalspannung
σ_{Kante}	Kantenspannung
σ_{Norm}	Spannung nach Methode der Prüfnorm
$\sigma_{ohneScherung}$	Kantenspannung einer Probe ohne Scherung
σ_{rad}	Radialspannung
σ_v	Vergleichsspannung
$\sigma_{v,M}$	Vergleichsspannung nach von Mises
$\sigma_{v,R}$	Vergleichsspannung nach Rankine
φ_0	Hilfsvariable für die Biegeprüfmaschine
φ_{symm}	symmetrische Verdrehung



- leere Seite -