



Rita Spiegelberg, BSc

Numerische Untersuchung zum Kaltbiegen von Dünnglas

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Enghardt

Mitbetreuer

Dipl.-Ing. Vlad Alexandru Silvestru, BSc

Institut für Hochbau

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank gegenüber all jenen Menschen zum Ausdruck bringen, die mich während meines gesamten Studiums und im Speziellen bei der Verfassung dieser Arbeit unterstützt haben.

Auf universitärer Seite bedanke ich mich für die fachliche Betreuung und Unterstützung bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Englhardt, der mich bei der Richtungsfindung der wissenschaftlichen Fragestellung und der Definition der Zielsetzung dieser Arbeit mit seiner technischen und wissenschaftlichen Erfahrung unterstützte. Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing Vlad Alexandru Silvestru sowie Herrn Dipl.-Ing Georg Kolany die mir jederzeit tatkräftig mit ihrem umfangreichen fachlichen Wissen zur Seite standen. Zudem möchte ich mich auch bei den übrigen MitarbeiterInnen des Institutes für Hochbau der Technischen Universität Graz für das angenehme Arbeitsklima bedanken.

Meinen Eltern und meiner Schwester gilt neben dem Dank für die tolle Unterstützung bei der Erstellung dieser Masterarbeit, mein tiefer Dank für den fortwährenden Rückhalt während meiner gesamten Ausbildungszeit und für die unentwegte Unterstützung bei all meinen Träumen.

Mein besonderer Dank gilt auch meinem Freund und meinen Mitbewohnerinnen. Dafür, dass sie täglich da waren, um die Höhen und Tiefen des Verfassens dieser Masterarbeit und des gesamten Studiums mit mir zu teilen und den Alltag durch ihre Persönlichkeiten zu etwas ganz Besonderem gemacht haben.

Außerdem danke ich meinen Freunden. Im universitären Alltag danke ich ihnen für die zahlreichen gemeinsam verbrachten Lernstunden, für den Zusammenhalt bei der Bewältigung der fachlichen Herausforderungen und für den Rückhalt bei der Verarbeitung der einen oder anderen Niederlage. Außerhalb des gemeinsamen Studienalltags möchte ich mich für die unvergessliche gemeinsame Zeit und für die Zerstreung vor, während und nach den universitären Pflichten bedanken.

Bei all jenen die sich durch die Worte dieser Danksagung angesprochen fühlen, jedoch nicht explizit erwähnt sind, möchte ich mich herzlich für die aufrichtige und beharrliche Unterstützung bedanken.

Kurzfassung

Bis dato wird der Großteil der produzierten Dünngläser in der Displayindustrie verbaut. Angesichts des hohen Potentials, das diese Technologie mit sich bringt, entwickelt sich derzeit jedoch ein steigendes Interesse seitens der Bauindustrie und Architektur die Einsatzmöglichkeiten dieses Produktes in der Gebäudehülle umfangreich zu erforschen.

In Anbetracht der steigenden Energieeffizienzanforderungen von Gebäuden gibt es Bestrebungen Dünnglas in Isolierverglasungen einzusetzen. Das Ziel dabei ist, das Gewicht der Verglasungseinheiten zu reduzieren, die Vorteile von Glas gegenüber kunststoffbasierter Werkstoffe jedoch zu erhalten. Die Reduktion des Gewichts bringt zudem substantielle Vorteile beim Handling, sowie bei der Ausführung der statisch wirksamen Unterkonstruktion.

Seitens der modernen Fassadenarchitektur gibt es aktuell einen hohen Anspruch möglichst große fugenlose Ganzglaselemente einzusetzen, sowie einen Trend Gebäude in komplexe Freiformflächen zu hüllen. Kaltbiegen bietet im Vergleich zu anderen Biegeprozessen eine energieeffiziente und kostengünstige Lösung gekrümmte Glaselemente zu erzeugen. In Anbetracht der architektonischen Tendenzen, sowie der optischen, wirtschaftlichen und energetischen Vorteile, erfährt das Kaltbiegen von Glas derzeit einen rasanten technischen Fortschritt.

Angesichts dieser Entwicklungen befasst sich die vorliegende Arbeit mit dem Kaltbiegeverhalten von sehr dünnen, einfach und doppelt gekrümmten Glasscheiben, mit dem Ziel den Einfluss verschiedener Parameter auf die, während dem Kaltbiegen entstehenden Spannungen, zu erforschen.

Um den Stand der Technik sowie den internationalen Stand der Forschung zu erfassen, wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt. Basierend auf den gewonnenen Informationen, wurden in Finite Elemente Analysen verschiedene Parameter variiert.

Ziel dabei war es, den Einfluss von Krümmung, Scheibengröße, Glasdicke und Schubmodul der Verbundfolie auf die Spannungen in der Glasscheibe im Endzustand der Biegung dazustellen. Darüber hinaus wurden die für den Prozess des Kaltverformens erforderlichen Anpresskräfte ermittelt und das Last-Verschiebungs-Verhalten ausgewertet.

Anschließend wurden die erhaltenen Ergebnisse zusammengefasst und deren Einfluss auf die Spannungen und Verformungen verglichen.

Schlagwörter: Dünnglas, Freiformarchitektur, Fassadenbau

Abstract

The majority of the manufactured thin glass panels are currently used for displays and small-sized covers. Due to the advantages this technology comes along with, there is a growing interest in thin glass applications for building envelopes from architecture and industry.

Considering the rising energy efficiency requirements of building skins there are efforts to use thin glass in insulating glazing units. The goal is to reduce the weight of glazing units, while preserving the advantages of glass in contrast with plastic films. Besides, the reduction of weight brings essential benefits for the substructure, as well as easier handling.

Furthermore, there is a noticeable trend in modern facade architecture to use extra-large glazing panels and to wrap buildings with complex free-form surfaces. For this purpose, cold bending is an energy efficient and convenient technique to form the glass panels into the desired shapes. Consequently, the technique of cold bending undergoes a rapid technological development.

To comply with these demands, this thesis deals with the cold bending behaviour of single- and double-curved glass panels, with the aim to show the influence of various parameters on the stresses in cold-bent glass.

The basis of this thesis is a literature review to show the state of the art. Based on the obtained information a finite element analysis was performed including parameter studies to show how the variation of curvature, size, glass thickness and shear modulus of the interlayer affect the stresses in the bent glass. In addition, the necessary pressure for the cold bending process and the load-displacement behavior will be analyzed.

Finally, the influence of the results will be summarized and interpreted in the conclusion.

Keywords: thin glass, freeform architecture, facade construction

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	2
1.2	Aufbau und Inhalt der Masterarbeit	3
2	Stand der Technik	4
2.1	Glas im Bauwesen	4
2.2	Dünnglas im Bauwesen	6
2.3	Herstellungsverfahren	7
2.3.1	Floatverfahren	7
2.3.2	Down-Draw Verfahren	8
2.3.3	Overflow-Fusion Verfahren	8
2.4	Vorspannverfahren	9
2.4.1	Thermisches Vorspannen	10
2.4.2	Chemisches Vorspannen	11
2.5	Verbundsicherheitsglas	12
2.5.1	Verbundfolien	12
2.5.1.1	Normativ ansetzbarer Schubverbund der Folie	13
2.5.1.2	Polyvinylbutyral (PVB)	14
2.5.1.3	SentryGlas® Plus (SGP)	14
2.6	Verformung von Glasscheiben	16
2.6.1	Warmverformung	16
2.6.2	Kaltverformung/Montagebiegen	18
2.6.3	Laminationsbiegen	19
2.7	Anwendungsbeispiele	22
3	Stand der Forschung	26
3.1	Referenzuntersuchungen zur einachsigen Biegung	26
3.1.1	Kaltbiegen von laminierten Glasplatten	26
3.1.2	Studie zur Festigkeit von Dünnglas	27
3.1.3	Kalt gebogenes einfach gekrümmtes Glas	32
3.2	Referenzuntersuchungen zur zweiachsigen Biegung	34
3.2.1	Verhalten von kalt gebogenen Glasplatten während des Verformungsprozesses	35
3.2.2	Stabilitätsverhalten von doppelt gekrümmten kalt gebogenen Glasscheiben	39
4	Parameterstudien	43
4.1	Einachsige Biegung	44
4.1.1	Formgebung	44
4.1.2	Eingabeparameter	47
4.1.3	Referenzmodell	48
4.1.4	Ergebnisse	57

4.1.4.1 Variation des Radius - Serie 01	57
4.1.4.2 Variation der Scheibenlänge - Serie 02.....	61
4.1.4.3 Variation der Scheibendicke - Serie 03	68
4.1.4.4 Variation des Schubmoduls der Verbundfolie - Serie 04.....	75
4.1.4.5 Einfluss der Querverformung.....	78
4.2 Zweiachsige Biegung	80
4.2.1 Formgebung.....	80
4.2.2 Eingabeparameter	81
4.2.3 Referenzmodell.....	82
4.2.4 Ergebnisse	84
4.2.4.1 Variation der Vertikalverschiebung - Serie 05.....	84
4.2.4.2 Variation der Scheibenlänge - Serie 06.....	90
4.2.4.3 Variation der Scheibendicke - Serie 07	95
4.2.4.4 Variation des Schubmoduls der Verbundfolie - Serie 08.....	103
5 Zusammenfassung und Ausblick	109
5.1 Zusammenfassung	109
5.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse des einachsigen Biegens.....	109
5.1.2 Zusammenfassung der Ergebnisse des zweiachsigen Biegens	111
5.2 Ausblick	113

1 Einleitung

Durch die fortwährende technische Weiterentwicklung und die gute Zusammenarbeit zwischen Forschung, Planung, Industrie und ausführenden Gewerken, hat sich die Freiformarchitektur in den letzten 30 Jahren von theoretischen forschungsbasierten Kleinversuchen hin zu einer sich permanent verändernden und rasant wachsenden Sparte der Architektur manifestiert. In allen Metropolen der Welt wachsen geschwungene und folglich planerisch sehr komplexe Gebäude aus dem Boden. Die bis dato gelebte Technik verwundene Geometrien im Fassadenbau durch computerunterstützte Programme in ebene Segmente zu unterteilen, gehört heute, dank der Softwareinnovation in der Bautechnik, der Vergangenheit an. Diese Methode hatte den entscheidenden Vorteil, die Berechnung, Produktion und Montage zu vereinfachen und dadurch erst möglich zu machen. Meist ist jedoch das Ziel der Freiformarchitektur, neben der offensichtlichen Krümmung, eine möglichst glatte Oberfläche, ohne optische Irritationen durch Fugen, zu schaffen. Diese klare Formsprache ist im Zuge einer Segmentierung der gekrümmten Fläche zu ebenen Teilelementen nicht ohne Einschränkung möglich. Die Vereinfachung der Oberfläche führt häufig zur Veränderung der gesamten Form, welche das Erscheinungsbild eines Gebäudes oftmals stark beeinflusst.

Aus dieser Problematik heraus entwickelte sich das aktuelle Interesse bezüglich der Entwicklung neuartiger Softwarelösungen zur Modellierung und Berechnung von Freiformkörpern. Die computertechnischen Schnittstellen und vor allem aber das gegenseitige Verständnis zwischen Architekt und Tragwerksplaner spielt bei diesem Prozess eine wesentliche Rolle und beeinflusst maßgeblich den Erfolg des Endergebnisses.



Abbildung 1: Glasvorbau des Bahnhofs in Straßburg [1]

Häufig geht die Umhüllung von Gebäuden mit gekrümmten Fassaden mit der Verwendung von Glas-Stahlkonstruktionen einher. Das in Abbildung 1 dargestellte Beispiel zeigt die 2006 fertiggestellte Vorplatzüberdachung des Bahnhofs in Straßburg [1].

Den gestalterischen Anforderungen an Transparenz, Formflexibilität und Ebenheit könnten neben Glas auch die thermoplastischen Kunststoffe Polycarbonate (Kurzzeichen PC) und Acrylglas (Kurzzeichen PMMA oder auch Polymethylmethacrylat) gerecht werden. Diese weisen allerdings neben einem geringeren E-modul als Glas auch eine wesentlich geringere Langlebigkeit, sowie eine geringere Beständigkeit gegen Hitze, chemische Belastung und UV-Strahlen auf. Durch die industrielle Weiterentwicklung der Glasproduktion und Glasveredelung ist es nun möglich, gekrümmte Scheiben in großen Formaten und in großer Zahl im Fassadenbau einzusetzen. Neue Herausforderungen ergeben sich angesichts des Scheibengewichtes für die Unterkonstruktion, das Handling, den Transport und die Montage. Eine mögliche Lösung dieses Problems könnte der Einsatz von Dünnglas bei flächigen Fassadenelementen sein. Durch die Reduktion der Scheibendicke und die daraus resultierenden Vorteile, kann neben dem Gewicht auch der Ressourcenverbrauch gesenkt werden.

Ein weiterer Vorteil ist, dass durch die geringere Eigensteifigkeit der Scheiben wesentlich kleinere Radien als bei konventionellen Glasfassaden generiert werden können, was der Formsprache der Fassadearchitektur ganz neue Möglichkeiten eröffnet.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

In Hinblick auf die aktuellen Trends der Architektur und die mangelnden Kenntnisse über das Kaltbiegeverhalten von einfach und doppelt gekrümmten sehr dünnen Glasscheiben ist die Aufgabe dieser Masterarbeit den Einfluss einiger, für die spätere Anwendung essenzieller Parameter auf die Spannungen in der Glasscheibe nach dem Biegeprozess zu erforschen.

Als Grundlage der Arbeit, wird zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt, mit dem Ziel den aktuellen Stand der Technik sowie der Wissenschaft zu erfassen.

Das dabei gewonnene Wissen wird dazu genutzt, ein einachsig und ein zweiachsig gekrümmtes Modell mit Hilfe der Software Abaqus zu generieren und es anschließend mit einer Finite Elemente Analyse zu untersuchen.

Zielsetzung ist es eine Parameterstudie zu erstellen, um den Einfluss der Krümmung, Scheibengröße, Glasdicke und des Schubmoduls der Verbundfolie auf die Spannungen in der Glasscheibe dazustellen. In weiterer Folge werden die gewonnenen Erkenntnisse in Diagrammen dargestellt und analysiert. Die Ergebnisse werden für weitere Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet als Referenz, bzw. zur Verifizierung von Versuchsergebnissen dienen.

1.2 Aufbau und Inhalt der Masterarbeit

Da ein vertiefendes Wissen über Glas, Dünnglas sowie Biegen und Herstellung von Glasscheiben unerlässlich für die Erstellung einer aussagekräftigen Parameterstudie ist, wird im ersten Abschnitt der derzeitige Stand der Technik, sowie in weiterer Folge der internationale Stand der Forschung in Zusammenhang mit diesem Thema aufgezeigt. Dabei wird das Grundmaterial der in der Bautechnik eingesetzten Gläser charakterisiert, die verschiedenen Produktionsverfahren erklärt und die Möglichkeiten der Weiterverarbeitung beschrieben.

Diese ausgiebige Recherche bildet die Grundlage für die in weiterer Folge durchgeführte Parameterstudie. Das numerische Modell der Parameterstudie wird mit der Software Abaqus/CAE 6.14-3 erstellt. In der Parameterstudie werden verschiedene Randbedingungen, wie Radius, Scheibengröße, Scheibendicke und der Schubmodul der Verbundfolie variiert. Anschließend werden deren Einflüsse auf die Spannungen im Endzustand der Biegung untersucht. Daraufhin werden die Spannungsverläufe und Maximalspannungen grafisch aufbereitet, beschrieben und analysiert.

2 Stand der Technik

2.1 Glas im Bauwesen

Seit einigen Jahren gewinnt Glas neben Stahl, Beton und Holz als konstruktiver Baustoff immer mehr an Bedeutung. Für die meisten Anwendungen im Bauwesen wird neben Borosilicatglas hauptsächlich Kalk-Natron-Silicatglas verwendet. Borosilicatglas bezeichnet Silicatglas welches 7- 15% Boroxid enthält. Es zeichnet sich durch seine hohe chemische Beständigkeit, sowie seine hohe Beständigkeit gegen Temperaturwechsel aus [2].

Aus Kostengründen nimmt Borosilicatglas am Markt jedoch einen nicht so hohen Stellenwert wie Kalk-Natron-Silicatglas ein, dessen Hauptbestandteil neben Siliciumdioxid (SiO_2 69% -74%) Natriumoxid (Na_2O 10% - 16%) ist [3]. Infolgedessen beruhen die in der vorliegenden Arbeit analysierten Untersuchungen auf der Verwendung von Kalk-Natron-Silicatglas.

	Symbol	Einheit	Kalk-Natron-Silicatglas	Borosilicatglas
Dichte	ρ	kg/m^3	2.500	2.200-2.500
Elastizitätsmodul	E	N/mm^2	70.000	60.000-70.000
Poisson-Zahl	μ	-	0,23	0,20
spezifische Wärmekapazität	c_p	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$0,72 \cdot 10^3$	$0,80 \cdot 10^3$
mittlerer Längenausdehnungskoeffizient zwischen 20-300°C	$\alpha_{T,20/300}$	K^{-1}	$\sim 9,00 \cdot 10^{-6}$	Klasse 1: $3,1-4,0 \cdot 10^{-6}$ Klasse 2: $4,1-5,0 \cdot 10^{-6}$ Klasse 3: $5,1-6,0 \cdot 10^{-6}$
Wärmeleitfähigkeit	λ	$\text{W}/(\text{m K})$	1,00	1,00
Mittlerer Brechungsindex im sichtbaren Bereich (589,3nm)	n	-	1,50	1,50
Knoopsche Härte	$\text{H}/\text{K}_{0,1/20}$	GPa	6	450-600

Tabelle 1: Materialkennwerte von Kalk-Natron-Silicatglas [3] und Borosilicatglas [2]

Im Bauingenieurwesen wird Glas grundsätzlich als homogener isotroper Werkstoff behandelt. Es ist davon auszugehen, dass Glas in der üblichen bautechnischen Anwendung ein linear-elastisches Materialverhalten aufweist (Abbildung 2). Bei geringer Überschreitung der elastischen Verformbarkeit von Glas, kommt es ohne ersichtliche Vorzeichen zu einem spontanen Sprödbbruch. Glas besitzt im Vergleich zu zahlreichen anderen Werkstoffen, nicht die Fähigkeit durch die Lagerung oder durch die Belastung implizierte lokale Spannungsspitzen in die angrenzenden Materialbereiche umzulagern [4].

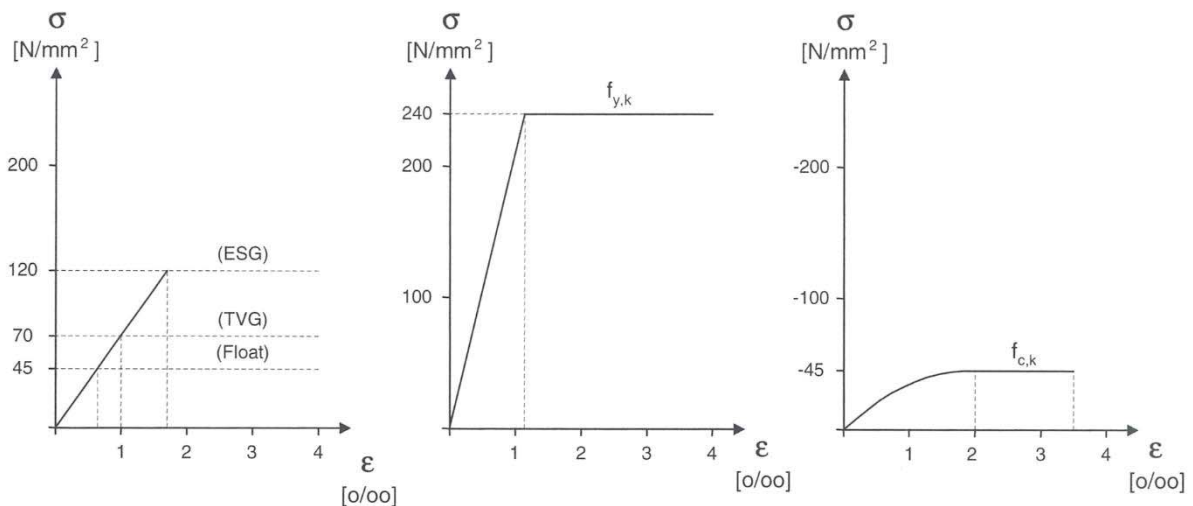


Abbildung 2: Spannungs-Dehnungs-Kurven von Glas , Stahl St37 und Beton C45/55 [5]

Aufgrund der Molekularstruktur ergeben sich für die nicht vorgespannten Basiserzeugnisse der im Bauwesen relevanten Gläser theoretische Festigkeiten von bis zu 5000-10000 N/mm².

Im Zuge der Herstellung, der Lagerung, dem Transport und der Weiterverarbeitung der Glasscheibe, sowie durch den Witterungseinfluss und Alterungsprozess entstehen Mikrorisse an der Glasoberfläche. Kommt es in weiterer Folge zu einer Zugbeanspruchung der Scheibe (z.B. durch Biegung) entstehen an der Rissspitze lokal sehr hohe Spannungen, die zu einem Risswachstum führen und einen Sprödbbruch der Glasscheiben verursachen können. Diese minimalen, mit dem freien Auge nicht erkennbaren Risse sind der Grund für die in den bautechnischen Normen reduzierten Zugfestigkeiten von Gläsern.

Die Druckfestigkeit von Gläsern ist erheblich höher als die Zugfestigkeit und verursacht kein Anwachsen der Mikrorisse. Die Zugspannungen sind durch die Lagerung, das Stabilitätsverhalten oder die Querkzugbeanspruchung immer maßgebend gegenüber den Druckspannungen. Demzufolge spielt die Druckfestigkeit bei tragenden Bauteilen aus Glas keine Rolle [6].

	Einheit	Floatglas	TVG	ESG
Charakteristische Festigkeit	[N/mm ²]	45	70	120

Tabelle 2: Charakteristische Festigkeitswerte von Floatglas, TVG und ESG [7]

2.2 Dünnglas im Bauwesen

Der Begriff Dünnglas wird in der Architektur in der Regel für Gläser mit einer Dicke kleiner als 3 mm verwendet [8]. Aktuell wird Dünnglas hauptsächlich kleinformig in der Displayindustrie sowie mit steigenden Absätzen in der Solarindustrie verwendet. In der Solarindustrie bietet sich bei der Anwendung von Dünnglas der entscheidende Vorteil der Gewichtsreduktion. Auch bezüglich der langen Lebensdauer gibt es mittlerweile vermehrt positive Resonanz.

Bei der Anwendung von Dünngläsern in Isolierverglasungen spielt die Gewichtsreduktion und die daraus resultierenden Vorteile in Bezug auf die Dimensionierung der Unterkonstruktion eine wesentliche Rolle. Direkt im Zusammenhang mit der Dicke steht der ökologische Aspekt des geringeren Ressourcenverbrauchs. Die mechanische und chemische Beanspruchbarkeit bleibt im Vergleich zu normalen Glasscheiben gleich, bietet jedoch gegenüber anderen transparenten Werkstoffen Vorteile bezüglich der Beständigkeit gegen chemische Angriffe, Hitze und UV-Strahlen.

Neben den offensichtlichen Vorteilen, die durch die Gewichtsreduktion bezüglich Transporte und Handling entsteht, darf nicht außer Acht gelassen werden, dass sich einhergehend mit der Dickenreduktion auch die Steifigkeit der Scheibe verringert. Folglich muss berücksichtigt werden, dass sich extrem dünnen Scheiben hinsichtlich ihrer Eigensteifigkeit folienähnlich Verhalten.

Produktionsformate:

Von der Firma SCHOTT AG mit Sitz in Mainz, werden Spezialgläser für Biotechnologie, Medizin, Optik und Industrie hergestellt. Das Glasprodukt B 270®i Ultra White Glass mit einer Dicke von 0,9 - 10 mm ist derzeit regulär bis zu einer Größe von 1680 mm x 920 mm erhältlich. Größere Formate können angefragt werden [9].

Die Firma LiSEC mit Sitz in Niederösterreich ist ein Experte im Bereich der Verarbeitung und Veredelung von Glas. Die weltweit tätige Firma bietet Gesamtlösungen im Bereich des Anlagenbaus für die Glasindustrie. Laut Informationen von LiSEC wird TVG standardmäßig ab einer Glasdicke von 2 mm produziert. ESG kann ab einer Dicke von 3 mm produziert werden. In absehbarer Zeit werden auch Scheiben mit einer Dicke von 2,3 mm produzierbar sein. Die derzeit maximalen Abmessungen, in der eigenen Produktion von LiSEC, betragen sowohl für ESG als auch für TVG 1,20 m Breite und 3,50 m Länge (theoretisch bis 5 m Länge möglich). Die Festigkeitswerte liegen bei monolithischem ESG bei etwa 120 N/mm².

Normative Regeln für dünne Gläser:

Aktuell mangelt es in Europa noch an normativen Richtlinien und allgemein gültigen Bemessungsgrundsätzen für die Berechnung von Gläsern unter 3 mm Dicke. Auch in Bezug auf gekrümmte Gläser sind die Bemessungsvorschriften noch lückenhaft. Folgend werden die gültigen Normen und die darin vermerkten Bestimmungen bezüglich der Glasdicke angeführt.

Normativ geregelt sind Dicken von Kalk-Natron-Silicatglas als Floatglas [10] beziehungsweise als gezogenes Glas [11] bis zu einer Dicke von 2 mm. Dicken unter 2 mm werden demzufolge als

Dünnglas bezeichnet. Die chemische Zusammensetzung und die Wahl des Herstellungsverfahrens der Dünngläser variiert je nach Hersteller [12].

- DIN 18008-1 Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen;
„Diese Norm gilt nicht für Nennglasdicken der Einzelglasscheiben unter 3 mm und über 19 mm.“ [[13], Seite 5]
- ÖNORM EN 572-1 Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natron-Silicatglas Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften; Regelt Nenndicken bis 2 mm [3]
- ÖNORM EN 12150-1 Thermisch vorgespanntes Kalk-Natron-Einscheibensicherheitsglas;
„Gebogenes thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas ist zwar im Anhang B erwähnt, aber nicht Bestandteil dieser Norm.“ [[14], Seite 5]
„Unabhängig davon können die Informationen dieser Norm bezüglich der Dicken, Kantenbearbeitung und Bruchstruktur auch auf gebogenes thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas angewandt werden.“ [[14], Seite 23]

Diese Norm bezieht sich grundsätzlich auf die Teile der EN 572, schreibt jedoch:
„Andere Nenndicken als diejenigen in den erwähnten Normen sind möglich“
[[14], Seite 5]
- ÖNORM EN 12337-1 Glas im Bauwesen - Chemisch vorgespanntes Kalknatronglas, Teil 1: Definition und Beschreibung;
„Gebogenem (früher gekrümmt genannt) oder profiliertem chemisch vorgespanntem Glas wurde bewußt eine spezielle Formung vor der Herstellung gegeben. Dieses ist nicht in der Norm enthalten, da es noch nicht genügend Daten gibt, diese Produkte zu normen. Die Informationen in dieser Norm zur Dicke, Kantenbearbeitung und Bruch sind jedoch ebenfalls für gebogenes oder profiliertes chemisch vorgespanntes Kalknatronglas anwendbar.“
[[15], Seite 17]

2.3 Herstellungsverfahren

2.3.1 Floatverfahren

Das bedeutendste Herstellungsverfahren für die Produktion von Glasscheiben ist das Floatverfahren. Bei diesem Produktionsprozess, fließt eine Glasschmelze kontinuierlich bei einer Temperatur von 1100°C über ein Zinnbad. Da das spezifische Gewicht von Glas wesentlich leichter ist als das von Zinn, schwimmt die Schmelze auf und bildet an der Auflage-seite eine sehr glatte Oberfläche. Die Dicke der Scheiben wird über die Produktionsgeschwindigkeit gesteuert. Nach dem kontrollierten

Abkühlen auf etwa 100°C werden die Glasscheiben meist automatisch noch in der Produktionslinie auf Fehler kontrolliert [5].

Bei der Weiterverarbeitung von Floatglas ist auf die Zinn- bzw. Luftseite zu achten. Auf der Unterseite kommt es durch den Oberflächenkontakt mit dem Zinnbad zu Einlagerungen von Zn - Atomen, welche bei Beschichtungen zu störenden Flecken oder Verfärbungen führen können. Bei der Herstellung von Verbundsicherheitsglas, mit einer Zwischenschicht aus SentryGlas® Plus, konnten auf der Zinnseite bessere Haftungseigenschaften festgestellt werden [16].

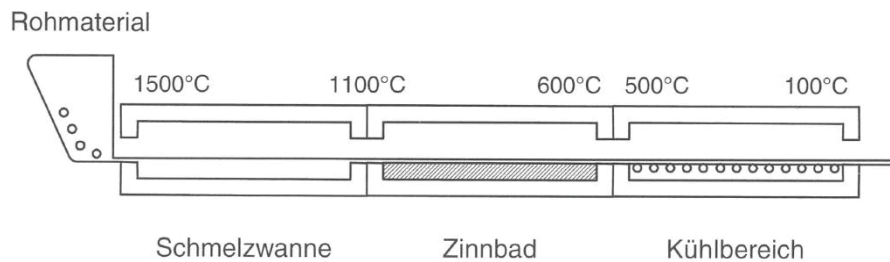


Abbildung 3: Herstellungsprozess von Floatglas [5]

Durch das Führen der horizontal gelagerten Glasscheiben über Rollenlager, kann es besonders bei dünnen Scheiben zu wellenförmigen Verwerfungen im Glas kommen. Diese minimalen Wellen sind später durch die Reflexion von Lichtstrahlen sichtbar. Bei Down-Draw und Overflow-Fusion Verfahren kann dies durch die Führung der Scheiben in vertikale Richtung verhindert werden [17], [12].

2.3.2 Down-Draw Verfahren

An der Oberseite der vertikal laufenden Produktion befindet sich, wie in Abbildung 4 links dargestellt, ein Behälter. In dieses Gefäß wird zu Beginn die zähflüssige Glasschmelze eingefüllt. Um ein qualitativ zufriedenstellendes Endprodukt zu erzeugen, sollte die Glasschmelze extrem homogen sein und die Temperatur exakt eingestellt werden. Durch eine Auslaufdüse wird die zähe Masse nach unten gezogen. Mit diesem Verfahren sind Glasdicken von 0,03-3,5mm herstellbar [17], [12].

2.3.3 Overflow-Fusion Verfahren

Das Overflow-Fusion Verfahren ist in Abbildung 4 rechts dargestellt und unterscheidet sich vom Down-Draw Verfahren dahingehend, dass die flüssige Glasschmelze nicht über eine Auslaufdüse nach unten gezogen wird sondern über seitliche Überlaufrinnen selbstständig nach unten fließt. Unterhalb der Schmelzwanne verbindet sich die Masse zu einem homogenen Band [17], [12].

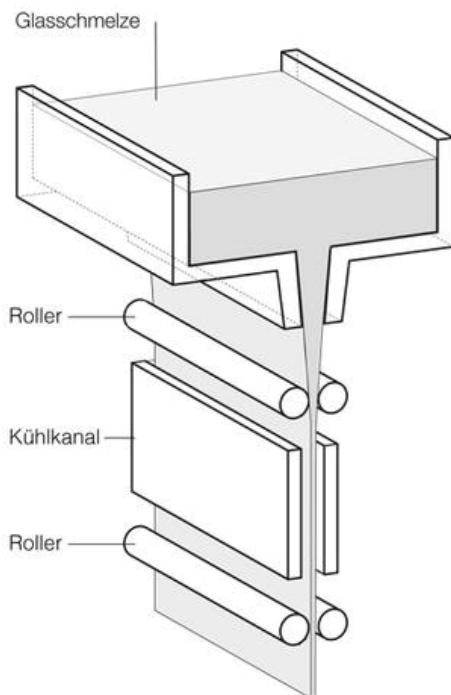
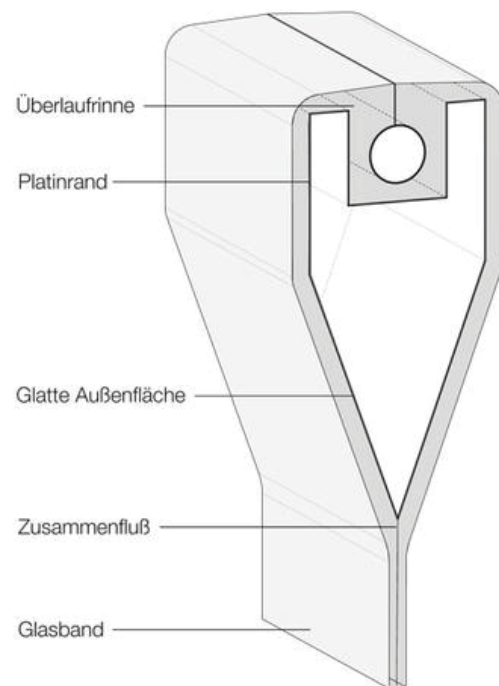
DOWN-DRAW PROCESS**OVERFLOW-FUSION PROCESS**

Abbildung 4: Glasherstellung im Down-Draw Verfahren (links) und im Overflow-Fusion Verfahren (rechts) [18]

Die fortlaufende Verbesserung und Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren ermöglicht es mittlerweile Dünngläser von 0,5 mm mit Abmessungen von 2 x 3 Meter herzustellen. Die Maßgenauigkeit beträgt dabei 50 μm [12].

Scheiben mit dermaßen geringen Stärken, verhalten sich beim Handling jedoch eher wie Folien, denn wie starre Scheiben. Diese Eigenschaft muss bei der Planung der Transport-, Einbau- und Verarbeitungsprozesse unbedingt berücksichtigt werden.

2.4 Vorspannverfahren

Wie bereits im Kapitel „Glas im Bauwesen“ erwähnt, bilden Zugspannungen die maßgebende Beanspruchung von Glas. Um den durch Zugkräfte entstehenden Spannungsspitzen und dem daraus resultierenden Risswachstum entgegenzuwirken, wurde das Vorspannen von Glasscheiben entwickelt.

Es gibt verschiedene Techniken, welche jedoch alle daraufhin zielen, im oberflächennahen Bereich der Scheiben Druckspannungen und im Inneren der Scheiben Zugspannungen zu erzeugen. Diesen Zustand, bei dem die Spannungen global in einem ausgewogenen Verhältnis zueinanderstehen, bezeichnet man als Eigenspannungszustand. Die möglichen Risse an der Oberfläche werden durch die Zugspannungen im Kern überdrückt. Kommt es anschließend im Gebrauch zu einer

Zugbeanspruchung auf der Oberfläche, müssen die Druckspannungen erst „aufgebraucht“ werden. Erst nachdem diese „aufgebraucht“ wurden, kommt es tatsächlich zu Zugspannungen auf der Glasoberfläche, welche ein Risswachstum verursachen können.

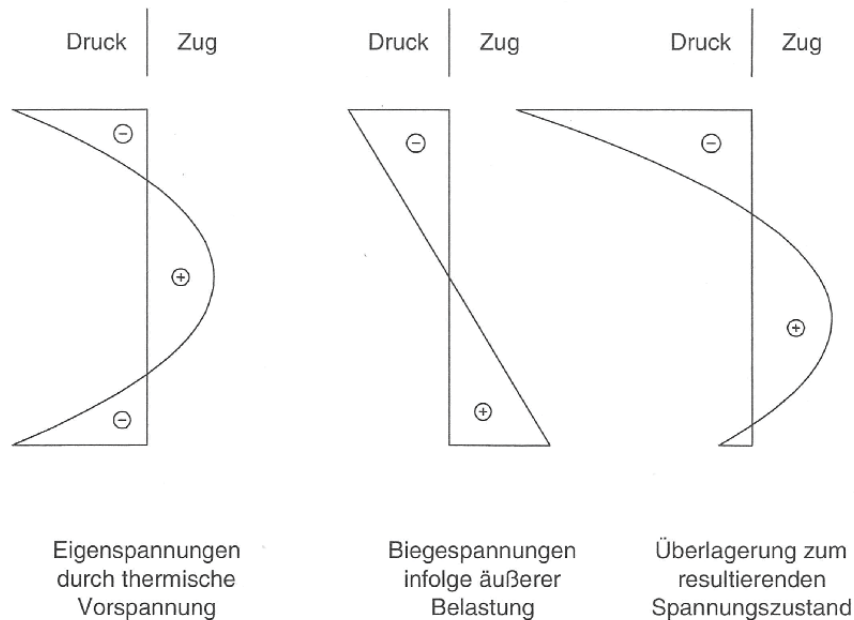


Abbildung 5: Spannungsüberlagerung von biegebeanspruchtem ESG [5]

2.4.1 Thermisches Vorspannen

Aufgrund der geringeren Kosten wird in der Baubranche und in der Automobilindustrie derzeit noch der Großteil der Scheiben thermisch vorgespannt. Die marktüblichen Mindestdicken von thermisch vorgespanntem Glas liegen bei etwa 4 mm.

Beim thermischen Vorspannen wird der gesamte Glasquerschnitt kontinuierlich auf einen Temperaturbereich von etwa 620°C bis 670°C erwärmt. Die Transformationstemperatur von Glas liegt bei etwa 550°C und wird somit überschritten. Nach der konstanten Erwärmung wird der Querschnitt von außen her, durch Eintauchen in eine Flüssigkeit, durch Anblasen oder durch Kühlung über Kontakt, zügig heruntergekühlt. Im Zuge des schnellen Abkühlens entsteht eine Temperaturdifferenz zwischen dem Scheibenkern und der Oberfläche. Hat die Temperatur der Oberfläche den Transformationsbereich bereits unterschritten, muss der Kern immer noch abkühlen, um den visko-elastischen Temperaturbereich zu unterschreiten. Durch das Zusammenziehen des Kerns im Zuge des Abkühlens, werden nun in der bereits wiedererhärteten Oberfläche Druckspannungen verursacht [5].

Abhängig von der Abkühlgeschwindigkeit unterscheidet man Einscheibensicherheitsglas (ESG) und teilvorgespanntem Glas (TVG). Im Unterschied zu ESG wird TVG langsamer Abgekühlt und erhält somit eine geringere Vorspannung. Folglich ist die Biegezugfestigkeit von TVG geringer als die von ESG (Tabelle 2) [5].

Da sich die Glasscheiben beim thermischen Vorspannen in der Regel in einer horizontalen Produktionslinie auf Rollen bewegen, besteht die Gefahr, optische Irritationen (Rollerwaves) zu erzeugen. Diese Verwerfungen der Glasoberfläche entstehen, wenn die Temperatur im Ofen den idealen Temperaturbereich überschreitet und die Glasscheibe zwischen den Rollen absackt. Oftmals sind die optischen Fehler mit freiem Auge nur bei Lichtspiegelung ersichtlich. Die Grenzwerte für Rollerwaves werden normativ geregelt (ÖNORM EN 12150-1 Thermisch vorgespanntes Kalknatron – Einscheibensicherheitsglas) [14].

Um optisch qualitativ hochwertigere Gläser thermisch vorzuspannen, wurden Anlagen entwickelt, welche die Glasscheiben auf einem Hochkonvektions-Luftkissensystem lagern. Da die Scheiben durch die Führung auf Luftkissen mechanisch unberührt bleiben, können Rollerwaves sowie andere mechanisch hervorgerufene Fehlstellen vermieden werden. Diese Technik ermöglicht es, Dünnglasscheiben bis zu einer Dicke von 1,8 mm mit sehr guter Qualität vorzuspannen [19].

2.4.2 Chemisches Vorspannen

Chemisches Vorspannen ist aufgrund der langen Verfahrensdauer sehr kostenintensiv. Es ermöglicht jedoch das Vorspannen sehr komplexer Geometrien und sehr dünner Scheiben. Bei dieser Art des Vorspannens wird die Glasscheibe in eine etwa 400°C heiße Salzschnmelze getaucht. Dabei werden die Natriumionen im oberflächennahen Bereich der Glasscheibe durch Kaliumionen, welche ein größeres Volumen aufweisen, ersetzt. Durch die größere Oberfläche werden die Kaliumionen nach dem Auskühlen zusammen gepresst. Dadurch entsteht eine Druckspannung im oberflächennahen Bereich der Scheibe und im Inneren eine Zugspannung. Die Tiefe, bis zu welcher der Ionenaustausch in der Glasscheibe stattfindet, ist von der Zeit des Tauchvorganges abhängig, welcher meist mehrere Stunden dauert. Die Tiefe der Vorspannung entscheidet maßgeblich über die Biegefestigkeit des Endproduktes. Derzeit wird dieses Verfahren hauptsächlich für Spezialanwendungen in der Raumfahrt, dem Schiffsbau, dem Eisenbahnbau oder für Displaygläser verwendet. Die Produktionsgröße ist durch die Abmessungen des Beckens mit der Salzschnmelze begrenzt [20], [12]. Geregelt werden die Grenzwerte für chemisch vorgespanntes Glas (ChVG) in der ÖNORM EN 12337 [15].

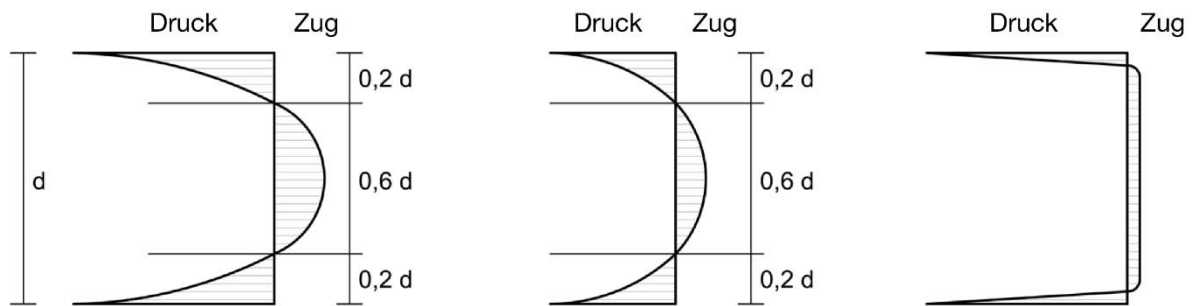


Abbildung 6: Darstellung des Spannungsverlaufs über den Glasquerschnitt von ESG (links), TVG (mittig) und ChVG (rechts) [4]

Abbildung 6 zeigt den Unterschied des Spannungsverlaufes über den Querschnitt je nach Vorspannung.

2.5 Verbundsicherheitsglas

Mit der wachsenden Verwendung von Glasscheiben in großen Formaten, sowie mit der vermehrten Anwendung von Glasscheiben für Überkopfverglasung, Glasbrücken, Glastreppen oder großformatige Fassadenelemente steigen auch die Sicherheitsanforderungen. Nach ÖNORM ISO 12543-1 [21] dürfen wegen der großen Gefahr, die vom Spröbruchverhalten von Glas, sowie von herabstürzenden Glasteilen oder Splitter hervorgeht, für begehbbare Verglasungen, absturzsichernde Verglasungen und andere Verglasungen mit erhöhter Gefahrenquelle ausschließlich Verbundsicherheitsgläser verwendet werden [21].

In der ÖNORM B 3716-3 [22] wird geregelt, welche Gläser je nach Anwendung zulässig sind.

Bei Verbundsicherheitsglas werden zwei oder mehrere Glasscheiben über eine Zwischenschicht dauerhaft verbunden. Die Zwischenschicht verhindert nach dem Bruch einer Scheibe das Herunterfallen von Glasstücken und gewährleistet über einen definierten Zeitraum eine gewisse Resttragfähigkeit. Durch die Formstabilität nach dem Bruch einer Scheibe bleibt das Scheibenpaket in Position, löst sich trotz Versagensankündigung eine gewisse Zeitspanne lang nicht von ihrer Befestigung und kann im Idealfall auch bei großen Verformungen nicht von den Auflagern rutschen.

2.5.1 Verbundfolien

Bei den derzeit verbauten Verbundsicherheitsgläsern handelt es sich in der Regel um Aufbauten, welche mit einer oder mehreren Polyvinylbutyral (PVB) Zwischenschichten laminiert werden. Aus der aktuellen Forschung heraus gibt es jedoch Bestrebungen, vor allem für tragende Bauteile aus Glas, vermehrt Verbundgläser mit einer SentryGlas® Plus Zwischenschicht einzusetzen.

2.5.1.1 Normativ ansetzbarer Schubverbund der Folie

Der normativ ansetzbare Schubverbund der Verbundfolie für laminierte Verglasungen wird in der ÖNORM B3716-1 [7] geregelt.

Grundsätzlich darf bei vertikalen VSG Scheiben (weniger als 15° gegen die Vertikale geneigt) für Lasten mit einer kurzzeitigen Lasteinwirkungsdauer sowohl bei der Berechnung der Verformung als auch bei der Berechnung der Spannungen ein Schubmodul der Verbundfolie mit eingerechnet werden. Wobei die Folie hinsichtlich dieser Regelung die Eigenschaften einer 0,76 mm starken PVB aufzuweisen hat [7]. Um die Folienmindestdicke von 0,76 mm zu erreichen, wird meist eine zweilagige PVB-Folie mit jeweils 0,38 mm verwendet, wobei in der Praxis hauptsächlich Verbundfolien in der Stärke von 1,52 mm zu Anwendung kommen.

In weiterer Folge wird der ansetzbare Schubverbund der Folie je nach Belastung in mehrere Fälle unterschieden:

- *„Bei der Ermittlung der Verformung und Spannung von schneeberührendem Verbund-Sicherheitsglas mit einer Neigung $> 15^\circ$ gegen die Vertikale darf für die Lastfallkombination mit Schneeeinwirkung ein Schubmodul für die Folienzwischenlage (wie z.B. PVB) angesetzt werden.“ [[7], Seite 9]*
- *„Für den Lastfall Eigengewicht darf der Schubverbund nicht angesetzt werden.“ [[7], Seite 9]*

Diese normative Regelung erfordert das Aufbringen der Last in mehreren Lastschritten. Der Lastfall Eigengewicht ist vorerst ohne Schubübertragung zwischen den Scheiben zu berechnen.

Bei der weiteren Berechnung des Schneelastfalls darf, unter Beachtung der Lastgeschichte (Vorbelastung durch Eigengewicht ohne Schubverbund), ein Schubverbund von $0,4 \text{ N/mm}^2$, abhängig von den Eigenschaften der Folie, angesetzt werden.

Der Schubmodul von $0,4 \text{ N/mm}^2$ darf laut ÖNORM 3716-1 angesetzt werden, wenn bei 23°C die Reißfestigkeit der Folie $\geq 20 \text{ N/mm}^2$ und die Bruchdehnzahl $> 250 \%$ ist [7]. Ein ansetzen des Schubverbunds zwischen den Scheiben ist laut DIN 18008-1 hingegen nicht zulässig [13].

Die Materialprüfung der Folie hat entsprechend ÖNORM EN ISO 527-3 zu erfolgen [23].

- *„Bei Stoßbelastungen kann ein voller Schubverbund vorausgesetzt werden.“ [[7], Seite 9]*
- *„Bei ungünstig wirkendem Schubverbund (z.B. bei thermischer Belastungen) muss ein voller Schubverbund angesetzt werden.“ [[7], Seite 9]*
- *„Bei der Spannungs- und Verformungsermittlung von Verbundgläsern und Verbund-Sicherheitsgläsern darf ein günstig wirkender Schubverbund zwischen den Einzelscheiben nicht angesetzt werden. Gleiches gilt auch für den Randverbund von Mehrscheiben-Isolierglas“ [[13], Seite 10]*

2.5.1.2 Polyvinylbutyral (PVB)

Ursprünglich kommt die Verwendung von PVB im Glasbau von der langjährigen Anwendung in der Automobilindustrie. Das primäre Ziel des Verbundsicherheitsglases in der Automobilindustrie war, die Durchschlagfestigkeit der Scheibe zu erhöhen, um die Insassen zu schützen. In der Bauindustrie beruht die Verwendung von Verbundfolien auf der Gewährleistung einer gewissen Resttragfähigkeit nach dem Bruch der Scheibe. Durch das Anhaften der Bruchstücke an der Folie bleibt die Scheibe eine gewisse Zeit formstabil an ihrer Position. Dieser Effekt ermöglicht es, einen plötzlichen totalausfall zu verhindern und gefährdete Personen in Sicherheit zu bringen [5].

Zusätzlich wurden im Zuge zahlreicher Forschungen weitere Möglichkeiten der Nutzung der PVB-Folien erforscht. Es eröffneten sich die Möglichkeiten Solar- und Sicherheitssysteme sowie Anchlusselemente für Verbindungsstöße in die PVB-Folie einzulaminieren [12].

Das Materialverhalten von PVB wird in der Mechanik als visko-elastisch beschrieben. Der Schubmodul des Materials ändert sich unter Langzeitbelastung und Erhöhung der Temperatur. Diese Eigenschaft beeinflusst maßgeblich die Tragfähigkeit von Verbundsicherheitsgläsern und ist auch verantwortlich für die laut Norm nur relativ gering anzusetzende Schubfestigkeit von Folienzwischen-schichten. Wie Abbildung 7 zeigt, erreicht der Schubmodul der Folie nach etwa einer Million Sekunden ein konstantes Plateau ohne weitere signifikante Änderungen [24].

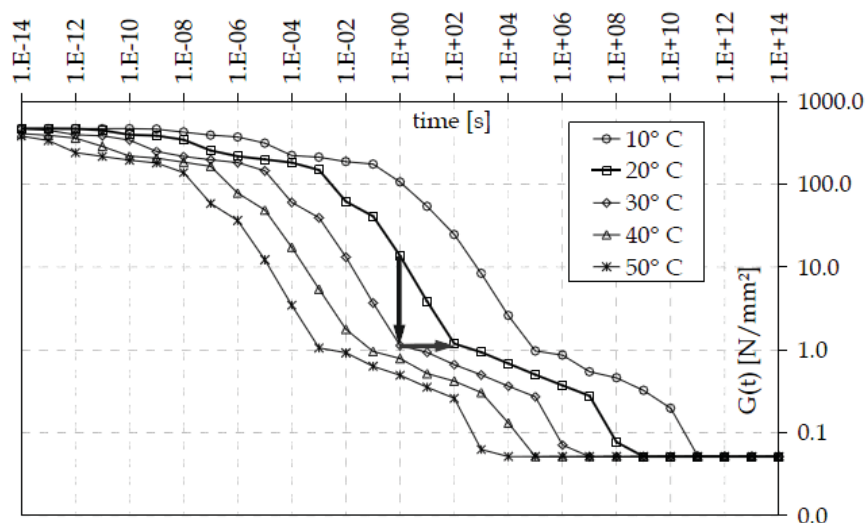


Abbildung 7: Zeit- und temperaturabhängige Veränderung des Schubmoduls von PVB [24]

2.5.1.3 SentryGlas® Plus (SGP)

Zwischenschichten aus SentryGlas® sind im Vergleich zu herkömmlichen PVB-Folien wesentlich steifer und haben eine etwa 100-mal höhere Schubsteifigkeit. Diese Eigenschaft bietet besonders bei der Resttragfähigkeit Vorteile, da die Formstabilität des gesamten Paketes durch den hohen Schubverbund der Einzelscheiben etwa um das 30-fache höher ist als bei gewöhnlichen Laminaten.

Die gewonnene Tragfähigkeit führt zu verminderten Verformungen und reduziert dadurch die Gefahr des Herausrutschens der Scheibe aus der Halterung. Auch die Kantenstabilität, Witterungsbeständigkeit sowie Beanspruchbarkeit bei thermischer Belastung werden erhöht [12], [25].

	Symbol	Einheit	SentryGlas® Plus	PVB-Folie
Dichte	ρ	Kg/m ³	950	1070
Zugfestigkeit	f_t	N/mm ²	34,5	> 20
Schubmodul	G	N/mm ²	~200	~0 bis 4
Theoretischer E-modul	E	N/mm ²	~600	~0 bis 12
Reißfestigkeit	-	N/mm	50	-
Bruchdehnung	ϵ_t	%	>400	>250
Poissonzahl	ν	-	~0,5	~0,5

Tabelle 3: Materialkennwerte von SentryGlas® Plus und PVB-Folie [7], [26], [25]

Das in Abbildung 8 ersichtliche Diagramm stellt einen Vergleich des Verhaltens von einem Laminat mit einer PVB bzw. einer SGP Zwischenschicht nach dem Bruch dar. Es ist ersichtlich, dass das Laminat mit der PVB-Folie wesentlich schneller versagt als das Laminat aus SGP [25].

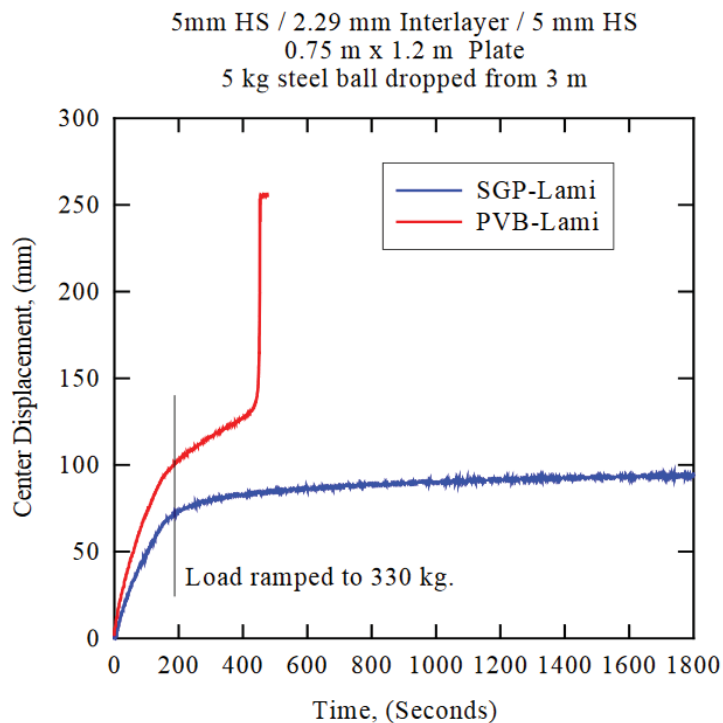


Abbildung 8: Kriechverhalten der Verbundfolie nach dem Glasbruch [25]

VSG aus Dünnglas:

Durch das Laminieren von mehrschichtigen Dünnglas mit einer Folienzwichenschicht wäre es möglich sehr geringe Paketstärken bei VSG zu ermöglichen. Mit der geringeren Glasdicke geht eine signifikante Reduktion des Eigengewichts bei gleichbleibenden Sicherheitsstandards einher.

Zu diesem Thema gibt es bis dato sehr wenig bis gar keine allgemein gültigen Richtlinien und Anwendungsregeln. Lediglich einige Hersteller, wie zum Beispiel die Firma LiSEC, haben bereits einige Erfahrungswerte bezüglich des Laminierens von sehr dünnen Gläsern.

2.6 Verformung von Glasscheiben

Basierend auf dem aktuellen Trend in der Fassadenarchitektur, Gebäude mit komplexen Freiformflächen zu umhüllen oder Ganzglaskonstruktionen zu planen, unterliegt die technische Weiterentwicklung des Glasbiegens momentan einem ständigen Wandel. Zahlreiche Hersteller arbeiten an neuen Techniken, Glas in immer aufwendigere Geometrien zu formen.

	Warmverformung		Kaltverformung	
Methode	Biegen durch Gravitation	Biegen durch Pressen	in-situ Verformung	Laminations-biegen
Temp.	600-650°C		Umgebungs-temperatur	max. 140°C
Krümmungsradien	2 m	1 m (4-6 mm Scheibendicke)	10 m	~1500 fache der Scheibendicke [27], [28]
	-	3 m (10mm Scheibendicke)	-	-
	-	3 m (in Kombination mit thermisch Vorspannen)	-	-

Tabelle 4: Mögliche Krümmungsradien in Abhängigkeit vom Herstellungsprozess

2.6.1 Warmverformung

Bei der Verformung durch Warmbiegen wird die Glasscheibe im Werk über eine vorgefertigte Form gelegt und anschließend konstant auf 600-650°C erwärmt. In diesem Temperaturbereich kommt es zu einem visko-plastischen Materialverhalten des Glases und es passt sich, infolge des vertikal wirkenden Eigengewichts der Scheibe, der vorgefertigten Form an. Dieses statische Verfahren des Schwerkraftbiegens wird in Abbildung 9 als „gravity bending“ bezeichnet und eignet sich für Radien größer zwei Meter. Bei einfach gekrümmten oder zylindrischen Formen ist neben der statischen Verformung auch ein kontinuierlicher Vortrieb über ein mit Rollen ausgestattetes Band möglich. Anstatt in einer planen Fläche wird die Glasscheibe bei diesem Prozess über der Rolle erhitzt und

gleichzeitig gebogen. Dieser über Rollen geführte Prozess ist in Abbildung 9 unter „inline bending and tempering“ veranschaulicht.

Beträgt der gewünschte Biegeradius weniger als zwei Meter, so reicht die alleinige Wirkung der Schwerkraft nicht mehr aus und die Scheiben müssen mit Pressen, während sie sich im viskosen Temperaturbereich befinden, in Form gepresst werden. Dieses Verfahren ist in Abbildung 9 unter der Bezeichnung „press bending“ schematisch dargestellt. Die Scheibendicke ist hierbei das ausschlaggebende Kriterium für den minimalen Biegeradius. Bei Gläsern mit 4-6 mm Dicke beträgt der kleinstmögliche Biegeradius einen Meter, bei Scheibenstärken von 10 mm beträgt das Minimum hingegen drei Meter. In diesem Verfahren können zylindrische, konische und sphärische Geometrien hergestellt werden. Mit der Komplexität einer Form, also je weiter sie sich von der einachsigen Krümmung entfernt, steigt auch die Gefahr von fehlerhaften Endprodukten. Ideal für maximale Fehlerfreiheit sind gleichmäßige Krümmungsradien. Bei mehrfach gekrümmten Elementen bilden sehr komplexe, meist handgefertigte Schalen, beispielsweise aus aufgeschnittenen Stahlrohren mit variierenden Krümmungen die Pressform. Das Geschick der Handwerker und deren ausgeprägte Stärke dreidimensional zu denken, prägen maßgebend den Erfolg der Formgebung. Der hohe Aufwand bei der Herstellung der Negativformen rechtfertigt diese Art des Biegens nur bei einer sehr hohen Stückzahl an identen Scheiben. Um den personellen Aufwand der Schalenherstellung zu verringern, besteht die Möglichkeit die Scheiben bis zu einer Materialdicke von 8 mm und einem Krümmungsradius von 0,4 Meter über ein mit Luft gefülltes Kissen zu biegen. Die dabei entstehende Kreisbogenform darf einen Stich bis maximal 0,2 m aufweisen [29].

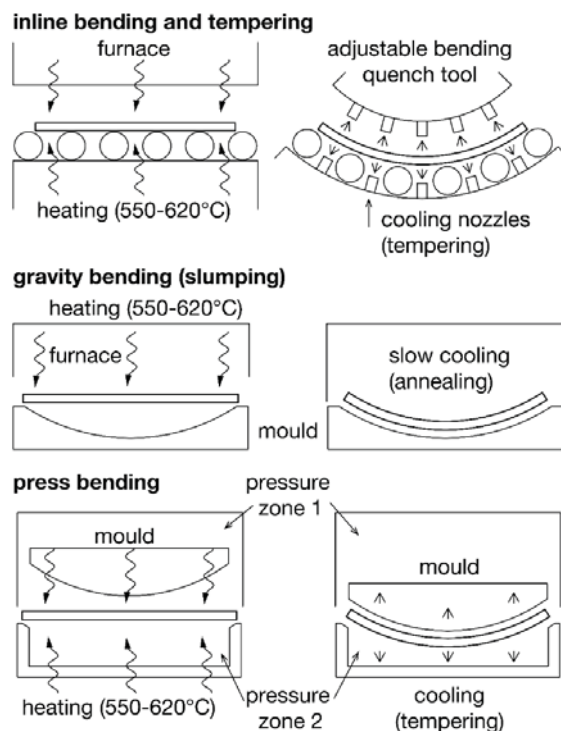


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Warmbiegeprozesses [30]

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Einsetzbarkeit des Warmverformens ist die optische Qualität. Durch das Pressen der Scheiben im verformungswilligen Zustand, kann es zu dauerhaften Abdrücken in der Scheibe kommen, welche später durch Reflexion von Licht wahrnehmbar sind. Diese optischen Fehler beeinflussen jedoch nicht die Tragfähigkeit und sind somit in statischer Hinsicht nicht problematisch [29].

Problematisch können hingegen, durch zu kleine Radien verursachte, kleine Risse in der Oberfläche werden, welche die Festigkeit herabsetzen. Um dies zu vermeiden, sollten zwischen zwei gegensinnig gekrümmten Radien immer ebene Zwischenstücke vorgesehen werden, die lokale Knicke in der Biegelinie vermeiden. Nachfolgend an die Warmverformung können die Scheiben im Abkühlungsprozess thermisch vorgespannt werden. Dieser kombinierte Produktionsablauf ist nur für Scheiben bis zu einem Radius von drei Metern möglich. In weiterer Folge können die Scheiben zu Verbundsicherheitsgläser oder Isolierverglasungen weiter verarbeitet werden [29].

Problematisch wird die Weiterverarbeitung bezüglich Oberflächenbeschichtungen. Meist werden die Beschichtungen auf flache Scheiben aufgebracht. Die hohen Temperaturen im anschließenden Warmverformungsprozess bereiten den Beschichtungen jedoch Probleme [28].

Auch nach dem Laminieren von Verbundscheiben eignet sich das Warmbiegen nicht zum Verformen der Scheiben, da die Zwischenfolie nicht ausreichend temperaturbeständig ist und sich der laminierte Verbund wieder lösen würde. Scheiben müssen daher erst warmverformt werden, um sie anschließend zu Verbundscheiben zu laminieren. Diese Vorgehensweise gestaltet sich jedoch wegen der erforderlichen Maßgenauigkeit der Scheiben sehr komplex. Eine zusätzliche Einschränkung ergibt sich durch die beschränkten Abmessungen des Autoklaven, der die Größen der zu laminierenden gebogenen Scheiben begrenzt [31].

2.6.2 Kaltverformung/Montagebiegen

Mit dem derzeitigen Stand der Technik des Kaltverformens (auch als in-situ-Verformung oder Montagebiegen bezeichnet) sind nur Formen mit konstanter Krümmung und Radien von maximal zehn Meter herstellbar. Bei dieser Methode werden ebene Glasscheiben, meist vor Ort, auf eine vorgefertigte Konstruktion gedrückt und anschließend mittels Anpressleisten dauerhaft in ihrer Geometrie fixiert. Die Fixierung der Scheiben mittels Anpressleisten beeinträchtigt, wegen der guten Sichtbarkeit, maßgebend das Erscheinungsbild der Konstruktion [29].

Einfach gekrümmte Scheiben stellen die einfachste Biegeform dar. Aus diesem Grund bieten neue Entwicklungen Algorithmen, welche doppelt-gekrümmte Formen zu lauter einfach gekrümmten Teilelementen zerlegen. Diese Technik hat jedoch ihre Grenzen, wenn eine Abweichung von der ursprünglichen Form nicht gewünscht ist.

Synklastische Doppelkrümmungen sind bei geringen Krümmungsradien produktionstechnisch möglich. Antiklastische Formen hingegen können durch das Verdrehen ebener Scheiben erzeugt

werden. Sie können das Schlüsselement sein, um die gewünschte Glättung in der Fassadenoberfläche aufrecht zu erhalten [31].

Das Kaltverformen ist neben gewöhnlichen Scheiben grundsätzlich auch für Isolierverglasungen geeignet, es kann jedoch zu Problemen bezüglich der Dichtigkeit des Randverbundes kommen. Zusätzlich besteht bei jedem Biegeprozess, aufgrund des spröden Materialverhaltens von Glas, die Gefahr des Glasbruches. Da es sich beim Ausgangsmaterial von in-situ-Biegen meist um ebene Elemente handelt, können die nach der Verformung im Glas dauerhaft eingeprägte Spannungen im Vorhinein sehr gut statisch abgeschätzt werden.

Der maximale Biegeradius kann mit folgender Formel ermittelt werden [29]:

$$r_{zul} = E * \frac{z}{\sigma_{zul}}$$

r_{zul} = zulässiger Biegeradius [mm]

E = Elastizitätsmodul des Glases [N/mm²]

z = maximaler Schwerpunktsabstand der gezogenen Faser [mm]

σ_{zul} = Spannung, die als permanente Spannung zugelassen ist [N/mm²]

Formel 1: Maximaler Biegeradius beim Montagebiegen [29]

Kaltbiegen hat den produktionstechnischen Vorteil, dass alle Verarbeitungsprozesse wie Emaillieren oder das Aufbringen diverser Beschichtungen vor dem Biegevorgang auf der ebenen Scheibe stattfinden können [31].

2.6.3 Laminationsbiegen

Beim Prozess des Laminationsbiegens werden Scheiben mit den Zwischenschichten unter einer sterilen Atmosphäre zu einem Paket aufeinander geschichtet. Im Anschluss wird der ganze Stapel mit einem Foliensack umhüllt und einem Vakuum ausgesetzt. Darauffolgend wird der gesamte Stapel auf einem speziellen Rahmen befestigt. Bei einer konstanten Temperatur von maximal 140°C und einem Druck von ca. 14 bar wird die Verbundfolie aufgeschmolzen und dauerhaft mit den Glasscheiben verbunden. Eine gewisse Rückstellverformung, welche sich nach dem kontrollierten Abkühlen der Scheibe beim Lösen vom Rahmen ergibt, muss von vornherein berücksichtigt werden. Die Formstabilität des Scheibenpaketes wird durch die Verbundfolie gewährleistet. Es sind somit von Anfang an Biegezugspannungen in der Scheibe eingefroren, welche in der Bemessung berücksichtigt werden müssen. Die Schwachstelle des laminierten Verbundes bildet die Folie (bei PVB), welche bei der Modellierung gesondert betrachtet werden muss und durch die verhältnismäßig geringe Steifigkeit zu einer starken Reduktion des Gesamttragverhaltens führt. Abhilfe schafft die Verwendung von SentryGlas® Folien, die eine etwa hundertmal höhere Steifigkeit als Polyvinylbutyral haben. (Näheres dazu wird im Kapitel Verbundfolien erläutert) [29].

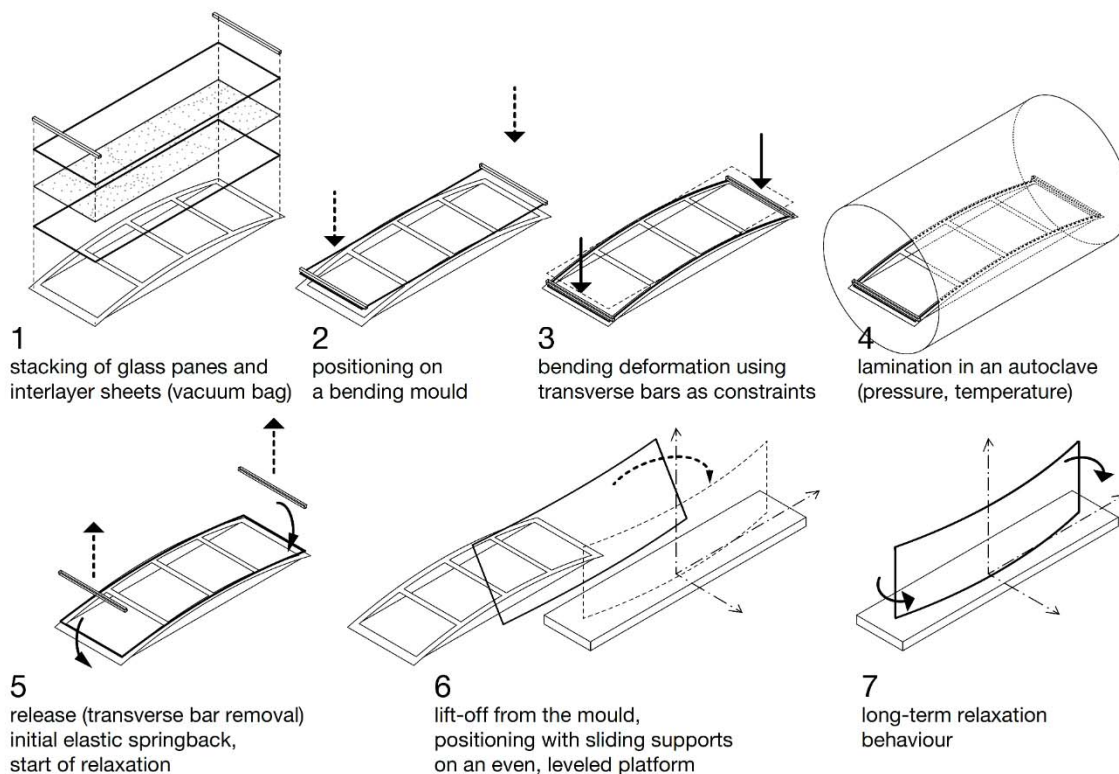


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Workflows beim Laminationsbiegen [30]

Beim Prozess des Laminationsbiegens werden die Glasscheiben nicht über die Transformationstemperatur (Kalk-Natron-Silicatglas 530°C [5]) hinaus erwärmt. Die geringe Temperatur ermöglicht, dass Oberflächenirritationen, die durch das Handling mit der „weichen“ Scheibe entstehen, vermieden werden können. Infolgedessen können Scheiben mit einer sehr hohen optischen Qualität hergestellt werden. Zudem überstehen die meisten Beschichtungen die geringen Temperaturen des Laminationsbiegens vollkommen schadenfrei, wodurch sich ein ganz neues Spektrum an Möglichkeiten für gebogene Glasscheiben eröffnet. Derzeit werden mit dieser Technik hauptsächlich einfach gekrümmte Geometrien hergestellt. Technisch sind jedoch weitaus anspruchsvollere Geometrie möglich [29].

Für die Abschätzung, ob eine Scheibe geeignet ist laminationsgebogen zu werden, kann das lineare Verhalten von Spannung zu Biegeradius herangezogen werden. Überschlägig kann der minimale Biegeradius mit folgender trivialer Gleichung ermittelt werden:

$$r_{min} = t_{max.Scheibe} \cdot 1500$$

r_{min} = minimale Biegeradius [mm]

$t_{max.Scheibe}$ = Scheibendicke der Dicksten Einzelscheibe [mm]

Formel 2: Faustformel für den minimalen Biegeradius [28]

Die Abschätzung des minimalen Biegeradius von mehrfach gekrümmten Scheiben gestaltet sich, wegen des Auftretens von signifikanten Rückverformungskräften, sowie dem Entstehen von Membranspannungen, wesentlich komplexer. Abhängig ist der Radius in diesem Fall nicht primär

von der maximalen Dicke einer Einzelscheibe, sondern vielmehr von der Geometrie und den Abmessungen des gesamten Paketes. Der minimale Biegeradius von einer runden synklastisch gekrümmten Scheibe mit einem Durchmesser von 1,5 Meter ist in etwa 15 Meter. Eine doppelt so große synklastisch gekrümmte Scheibe hingegen ist mit einem Biegeradius von etwa 40 Meter begrenzt. Bei einer etwa 1,5 mal 1,5 Meter großen quadratischen antiklastisch gekrümmten Scheibe ist der Radius mit ca. 10 Meter begrenzt. In diesem Fall verhält sich die Scheibengröße proportional zum Krümmungsradius. Bei der Ermittlung der maximalen Bemessungslast ist neben den Spannungen, die im während des Laminationsbiegens entstehen, auch die durch den Einbau bedingte Spannung einzuberechnen [28].

Um die Biegezugspannungen zu kompensieren, werden für das Laminationsbiegen nur vorgespannte Scheiben verwendet. Da kontinuierliches thermisches Vorspannen von warmverformten Scheiben über den gesamten Glaskörper technisch noch nicht möglich ist, werden die gebogenen Scheiben chemisch vorgespannt.

2.7 Anwendungsbeispiele

Standseilbahnstation Innsbruck

Bei der Standseilbahnstation der Nordkettenbahn Innsbruck von der Architektin Zaha Hadid, wurde für den Biegevorgang eine 8 mm dicke Glasscheibe auf einen Stahlrahmen befestigt. Diese Glasscheibe erfüllte in diesem Fall nur den Zweck einer formgebenden Zwischenschicht während des Warmbiegevorgangs, um die einwandfreie Qualität der Glasoberfläche zu gewährleisten. Zur Sicherstellung der Resttragfähigkeit wurden die Gläser mit 1,5 mm dickem Polyurethan beschichtet. Diese Variante stellt eine kostengünstige Alternative zu Verbundsicherheitsglas dar [29].



Abbildung 11: Nordkettenbahn Innsbruck [32]

Bahnhof Straßburg

Das Reflexionsverhalten sowie die Transparenz und Fehlerfreiheit der Scheiben waren die ausschlaggebenden Kriterien für die Verwendung von laminationsgebogenen Scheiben bei der Erweiterung des Straßburger Bahnhofs. Die Konstruktion wurde von dem Architekten Jean Marie Duthilleul geplant und bildet sich aus rechteckigen, einfach gekrümmten Scheiben, die sich über eine Stahlkonstruktion spannen [12].



Abbildung 12: Glasvorbau des Bahnhofs in Straßburg [33]

Atrium Aria Hotel

Die bisher größte laminationsgebogene Isolierglasscheibe, mit einer Breite von 3,20 m und einer Spannweite von 8,13 m, befindet sich über dem Atrium des Aria Hotels in Budapest. Die gesamte Überdachung bildet sich aus fünf dieser Elemente, welche an den Rändern von laminierten Glasträgern gehalten werden [12].



Abbildung 13: Atriumüberdachung des Aria Hotels in Budapest [34]

Städel Museum in Frankfurt

Ein wegweisendes Beispiel für zweisinnig gekrümmte, laminationsgebogene Scheiben ist der Erweiterungsbau des Städelmuseums in Frankfurt. Die runden Scheiben (sedak spherical), mit einem Durchmesser von 1,5 bis 2,5 Meter, sind begehbar ausgeführt und in eine öffentliche Rasenfläche integriert. Die Wahl des Biegeprozesses viel unter anderem auf das Laminationsbiegen, weil eine rutschhemmende Beschichtung auf der Glasoberfläche gefordert wurde. Die in diesem Projekt involvierte Firma Sedak GmbH & Co. KG ist produktionstechnisch in der Lage sowohl einsinnig als auch synklastisch gekrümmte oder antiklastisch gekrümmte laminationsgebogene Formen herzustellen [28].



Abbildung 14: Erweiterung des Städel Museums [35]

Ganzglasbrücke 7

Ein weiteres herausragendes Beispiel des konstruktiven Glasbaus ist die Ganzglasbrücke der Firma seele, welche auf der glasstec Düsseldorf 2008 erstmals präsentiert wurde.

Die seitlichen 1,2 m hohen und 7,0 m langen (Bogenmaß) Wangen der Brücke bestehen aus zwei Brüstungsscheiben, die aus 6 x 4 mm laminierten Verbundsicherheitsglas mit SG-Verbundfolien gebildet werden. Die Gehfläche mit einer Breite von 2,0 m besteht aus demselben Aufbau, mit 8 Scheiben. Durch die dünnen Scheiben und dazu verhältnismäßig dicken Folien, ergibt sich ein außergewöhnliches Verhältnis von Glas zu Folie im Ausmaß von 3:1. Die dünnen Scheiben wurden gewählt, weil sie bei kleinen Radien entsprechend geringere Biegespannungen aufweisen als dickere Scheiben. Der Biegeradius beträgt in diesem Fall 16 m. Die Form des Bogens entspricht, aufgrund der guten Lastabtragungseigenschaften, annähernd der einer Parabel [36].



Abbildung 15: Präsentation einer Ganzglasbrücke auf der glasstec 2008 [37]

Bombay Sapphire Headquarters

Ein hohes Maß an technischem Know-how zeigten die Planer der öffentlich zugänglichen Gewächshäuser des Bombay Sapphire Headquarters in Whitchurch. Die in zwei Schritten gebogenen Scheiben sind zwar nicht Teil der Primärtragstruktur, bilden jedoch einen wichtigen Teil der Aussteifung. Um die zweisinnige Krümmung zu erreichen, wurden die Scheiben erst einsinnig zylindrisch im Werk durch Laminationsbiegen und anschließend auf der Baustelle durch in-situ-Biegen und Pressleisten in die endgültige Form gebracht. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, den

minimalen Radius der Endform von 2,03 Meter zu realisieren. Der Scheibenaufbau setzt sich aus zwei mal 6 mm ESG, sowie einer SentryGlas® Verbundfolie zusammen [12].



Abbildung 16: Bombay Sapphire Headquarter in Whitchurch [38]

Faltwerk aus Dünnglas

Die gute Verformbarkeit, sowie die physikalische und optische Leichtigkeit des Materials Dünnglas, waren wichtige Entscheidungskriterien bei der Gestaltung des Experimentalbaues einer faltbaren Dachkonstruktion der Firma SFL. Die Konstruktion besteht aus Bögen mit einem Außenradius von 2,80 Meter und hat bei einer Scheibengröße von 0,70 mal 1,20 Meter einen VSG-Scheibenaufbau mit 2 mal 0,7 Millimeter Corning Gorillia-Glas [12], [18].



Abbildung 17: Faltwerk aus Dünnglasbögen, SFL Technologies, [18]

3 Stand der Forschung

3.1 Referenzuntersuchungen zur einachsigen Biegung

Um einen kurzen Einblick in die internationale Forschungstätigkeit zum Thema Kaltbiegen von Dünnglas und Glas im Allgemeinen zu geben werden im Folgenden einige essenzielle Forschungsprojekte kurz vorgestellt.

Tabelle 5 zeigt eine Zusammenfassung der geometrischen Rahmenbedingungen der ausgewählten Forschungsprojekte zu Thema einachsige Biegen von Glasscheiben.

	Einheit	Studie über die Festigkeit von Dünnglas [8]	Kaltbiegen von laminierten Glasplatten [24]	Kalt gebogenes einfach gekrümmtes Glas [39]
Länge	[mm]	1100	2000	3500
Breite	[mm]	360	940	3500, 1500
Glasdicke	[mm]	2,0	4,0	6,0
Foliendicke	[mm]	-	0,76 1,52	-

Tabelle 5: Geometrische Rahmenbedingungen der Forschungsprojekte zum Thema einachsige Biegung

3.1.1 Kaltbiegen von laminierten Glasplatten

Im Labor zur Erforschung von Strukturmodelle an der Universität Gent (Belgien) wurden Untersuchungen zum Kaltbiegen von laminierten Glasscheiben durchgeführt [24].

Das nachfolgend dargestellte Modell bildete die Grundlage für die Biegeuntersuchungen.

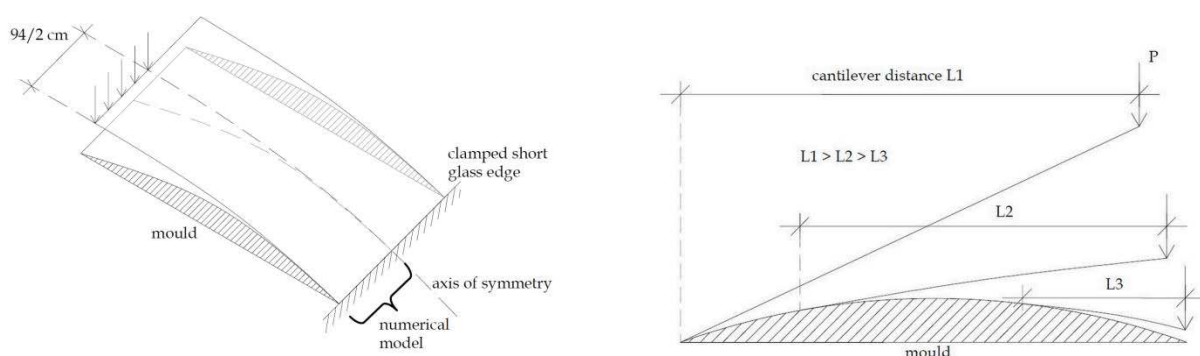


Abbildung 18: Grundprinzip der Biegegeometrie [24]

Die Abmessungen der geprüften Scheiben waren 2 m Länge und 0,94 m Breite. Untersucht wurden drei Scheibenpakete mit je zwei 4 mm dicken Scheiben aus Kalknatron-Silikat-Glas mit verschiedenen Zwischenschichten in den Dicken 0,76 mm und 1,52 mm. Da für PVB-Foliendicken

0,76 mm ein Mangel an experimentellen Referenzen besteht, wurden im numerischen Modell Folienstärken von 1,52 mm untersucht. Das visko-elastische Materialverhalten der PVB-Folie wurde nach der Theorie von Van Duser, Jagota und Bennison [40] modelliert. Die Referenztemperatur während der gesamten Versuchszeit, betrug in etwa 20°C und wurde dementsprechend in der Finite Element Software modelliert [24].

Folgende Ergebnisse die für diese Arbeit von Interesse sind, gingen aus der Studie hervor [24]:

- Als maßgebliche Einflussparameter in dieser Studie, stellten sich die Art der Zwischenschicht, die Verformungsgeschwindigkeit sowie die Temperatur heraus.
- Eine Reduktion der Zwischenschichtdicke führt zu einer deutlichen Erhöhung der Spannung im Glas.
- Eine 0,76 mm dicke PVB-Folie ist nicht ausreichend, um die Schubspannungen zwischen zwei Scheiben zu verteilen und nicht zu viel Spannung direkt zu übertragen.
- Die im Versuch ersichtlichen Regionen, bei denen die PVB-Folie zu versagen beginnt, stimmen mit den Bereichen, an denen bei der numerischen Simulation die maßgebende Versagensspannung auftritt, überein.
- Eine für die praktische Durchführung von Versuchen relevante Erkenntnis ist, dass die Versuchskörper mit der 0,76 mm PVB- Folie von einem Mann per Hand in Form gebogen werden konnten und die Versuchskörper mit einer 1,52 mm dicken Folie nicht.
- Alle Lamine zeigen ein visko-elastisches Spannungs-Dehnungsverhalten, bei dem die Verformung auch bei konstanter Last zunimmt.
- Die numerischen Ergebnisse stehen qualitativ in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchung. Allgemein wird die Verformung im numerischen Modell jedoch überschätzt.
- Je mehr von der Glasfläche auf der Biegeform aufliegt, desto größer muss die Biegelast sein, da die Länge des Hebelsarms abnimmt.
- Für die numerische Spannungsanalyse war die Randbedingung, bei der nur für die untere Glasplatte die Symmetrieffläche starr gehalten wurde, zuverlässiger.
- Lokale Erwärmung beeinflusst signifikant die Gesamtbiegesteifigkeit.

3.1.2 Studie zur Festigkeit von Dünnglas

Ziel der Untersuchung „Studie über die Festigkeit von Dünnglas“ [8] war es die Biegespannung in Dünnglas mittels eines vier Punkt-Biegeversuchs laut EN 1288-3 [41] zu ermitteln. Der in dieser Norm geregelte Biegeversuch beruht auf der linearen Balkentheorie. Bei großen Verformungen, wie sie bei Dünnglas auftreten, ist die lineare Balkentheorie jedoch nicht geeignet. Im Zuge dieser

Forschung wurden zwei Theorien zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Dünnglas untersucht [8].

Modifizierter Vier-Punkt-Biegeversuch

Bei dieser Methode wurde der normativ geregelte Versuchsaufbau eines Vier-Punkt-Biegeversuches verwendet. Durch die geringe Dicke der Probe kommt es zu großen Verformungen, die wiederum Zugkräfte an den Auflagern verursachen. Diese Zugkräfte können durch die Rollenlager nicht aufgenommen werden und können zum Herunterfallen der Glasscheibe von den Auflagern führen. Aus diesem Grund ist zu empfehlen den Abstand L_s für Proben von 2,0 mm bis 2,3 mm auf etwa 800 mm zu reduzieren [8].

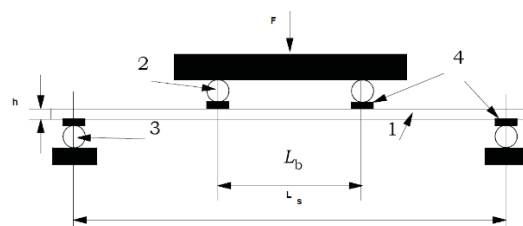


Abbildung 19: Normativ geregelte Anordnung der Probe [41]

Die wichtigsten Ergebnisse des Biegeversuchs sind die Biegespannung σ_{bB} und die Durchbiegung w . Aufgrund der signifikanten großen Verformungen wird die Theorie dritter Ordnung berücksichtigt [8].

Um die bei Dünnglas auftretenden nicht-linearen Effekte, sowie die Theorie dritter Ordnung zu berücksichtigen, wurde basierend auf der in EN 1288-3 Abschnitt 8 [41] angeführten Formel zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Proben mit rechteckigen Querschnitt, eine modifizierte Formel entwickelt. Es wurde die Annahme getroffen, dass sich die Scheibe parabolisch verformt [8].

Der in der Formel enthaltene Faktor k ist in EN 1288-3 [41] beschrieben und berücksichtigt den bei breiten Balken auftretenden Einfluss des Poisson-Effekts. Dieser verursacht, senkrecht zur Längsachse, ein zusätzliches Spannungsfeld. Infolgedessen entsteht über die Breite des Balkens eine Gegenbiegung und die Längsspannungen können nicht mehr konstant über die Länge angenommen werden [41].

$$\sigma_{bB} = k \cdot \left[F_{max} \frac{3 \cdot (L_s - L_b)}{2 \cdot B \cdot h^2} + \sigma_{bG} \right]$$

k = Dimensionsloser Faktor (zur Erläuterung siehe 6.2 von EN 1288-1 [42])

F_{max} = Höchstkraft

L_s = Stützweite zwischen den Mittellinien der Auflagerrollen

L_b = Stützweite zwischen den Mittellinien der Biegerollen

B = Probenbreite

h = Probendicke

σ_{bG} = hervorgerufen durch das Eigengewicht der Probe

Formel 3: Berechnung der Biegefestigkeit laut ÖNORM EN 1288-3 [41]

$$\sigma_{bG} = \frac{3 \cdot \rho \cdot g \cdot L_s^2}{4 \cdot h}$$

g = Fallbeschleunigung

ρ = Dichte der Probe

Formel 4: Berechnung der Biegespannung hervorgerufen durch das Eigengewicht [41]

Die originale Formel wurde, zur Berücksichtigung der im Dünnglas auftretenden nicht-linearen Effekte, wie folgt erweitert:

$$\sigma_{bB} = k \cdot \left[\left(F_{max} \cdot \frac{3 \cdot (L_s - L_b)}{2 \cdot B \cdot h^2} \right) + \left(\frac{3 \cdot \rho \cdot g \cdot L_s^2}{4 \cdot h} \right) + \frac{F_{max}}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot L_s \cdot (6 \cdot w_{max}^2 - d \cdot w_{max})}{B \cdot d^2 \cdot (L_s^2 - L_b^2)} \right) \right]$$

Formel 5: Modifizierte Formel zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas [8]

In Abbildung 20 ist das Verhältnis von aufgebrachtener Kraft zur Spannung in der Scheibe ersichtlich. Die Bruchlasten der TVG Proben lagen im Bereich von 185 N bis 210 N. Die Bruchlast der ESG Dünnglasproben lag bei etwa 260 N bis 290 N [8].

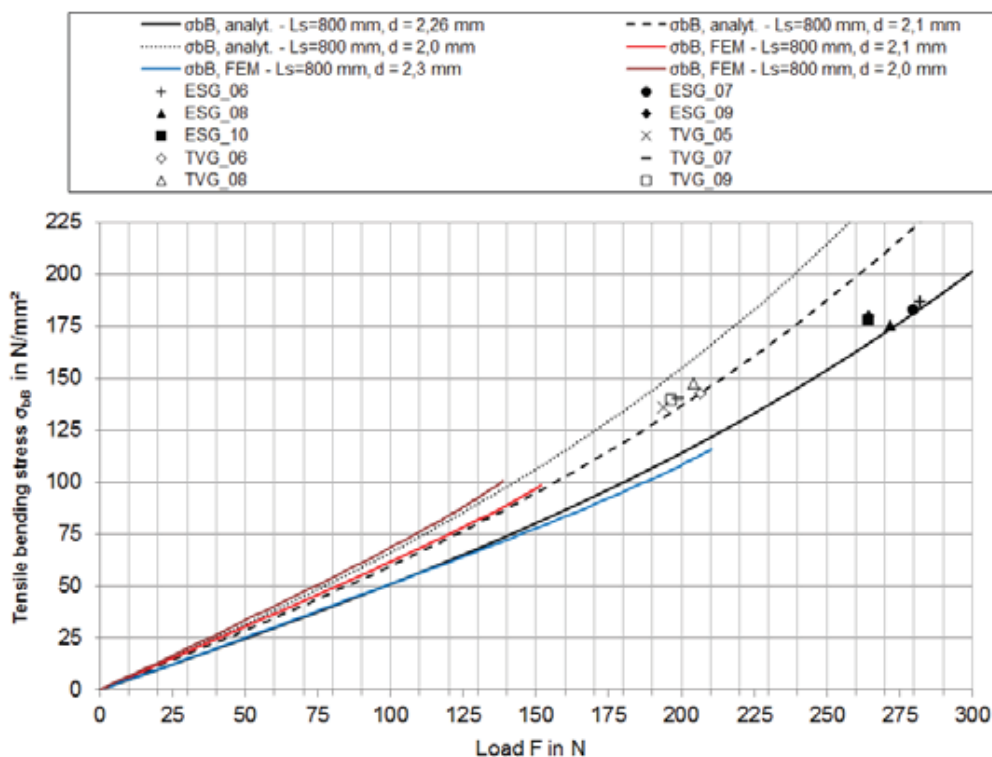


Abbildung 20: Kraft/Spannungs-Diagramm beim Biegen von Dünnglas [8]

Knickversuch

Bei dieser Methode wird die Biegefestigkeit des Dünnglases mittels einem Knickversuch ermittelt. Die Halterung der Scheibe erfolgt über um die y-Achse drehbare Rollen [8].

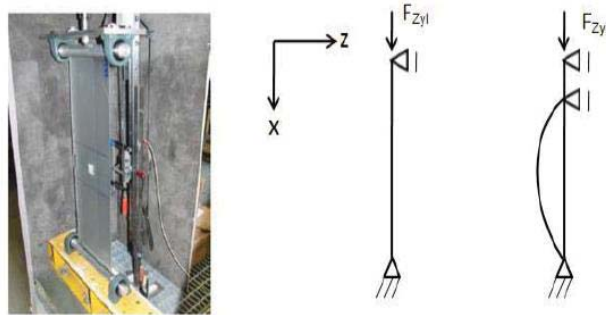


Abbildung 21: Versuchsaufbau [8]

Die vertikale Verschiebung wird schrittweise über einen Zylinder gesteuert, bis die Scheibe ausfällt. Bei Erreichen der kritischen Knicklast F_{Ki} kommt es zum Knicken der Scheibe, nach Eulerfall 2 [8].

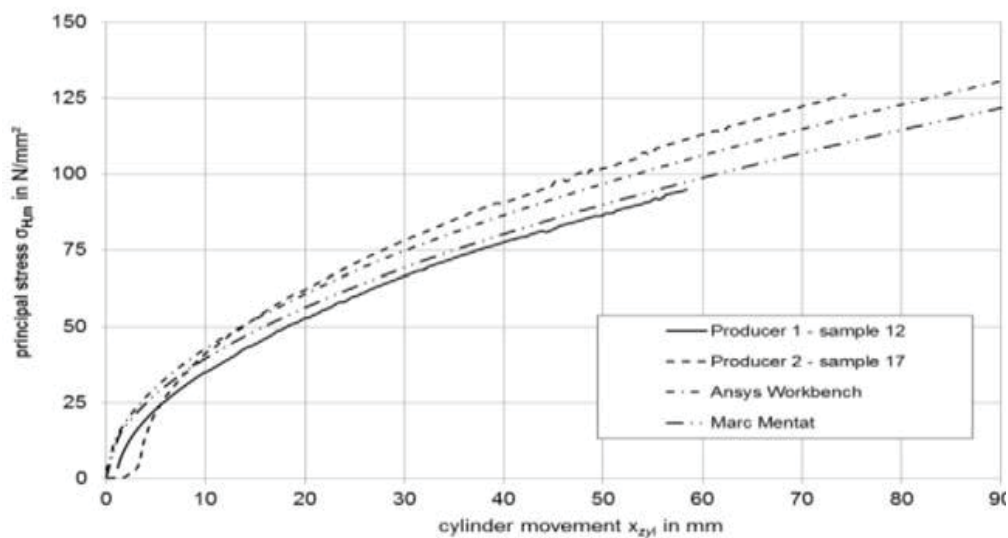


Abbildung 22: Maximale Spannung in Scheibenmitte als Funktion der Verformung [8]

Abbildung 23 zeigt die Hauptzugspannungen, als Funktion der Zylinderbewegung. Es wird der Vergleich zwischen dem BT (buckling test) und MFPBT (modified four point bending test) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Streuung der Spannungs-Verformungskurve beim Kickversuch höher ist als beim modifizierten Vier-Punkt-Biegeversuch. Die Bruchlast ist beim Kickversuch hingegen niedriger als beim modifizierten Vier-Punkt-Biegeversuch [8].

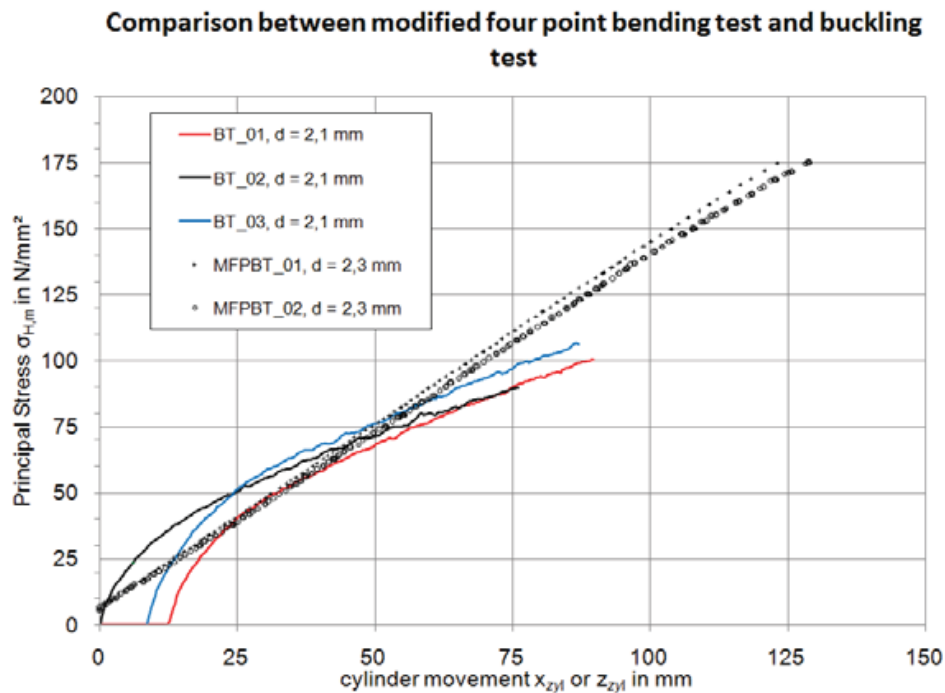


Abbildung 23: Vergleich zwischen den Spannungen aus dem modifizierten Vier-Punkt-Biegeversuch und dem Knickversuch [8]

Die Testergebnisse der beiden Methoden lassen sich wegen der verschiedenen Belastungen nicht einwandfrei vergleichen. Beim modifizierten Vier-Punkt-Biegeversuch wirkt über den Bereich L_B ein konstantes Moment, wohingegen das Moment beim Knickversuch nicht linear wirkt [8].

Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Versuchsmethoden ist, dass die Belastungsgeschwindigkeit beim modifizierten Vier-Punkt-Biegeversuch konstant linear ist und bei Knickversuch nicht linear [8].

Zu Schwankungen zwischen den experimentellen und den numerischen Ergebnissen kam es aufgrund der leicht variierenden Materialeigenschaften der Proben. Produktionsparameter wie Vorspannung, Glasdicke und E-modul spielten eine nicht unerhebliche Rolle. Die Scheiben für den Versuch stammten von zwei verschiedenen Herstellern und weisen dadurch zum Beispiel bei Probe 12 und 17 eine Dickendifferenz von 0,03 mm auf. Auch Proben vom gleichen Hersteller variierten teilweise bei den Ergebnissen. Zusätzlich beeinflussten Fehlstellen und Beschädigungen an den Scheibenkanten das Ergebnis maßgeblich. Die Ergebnisse der Parameterstudie wurden mit Ansys Workbench und Marc Mentat ausgewertet. Dabei ist zu erwähnen, dass die berechneten Zugspannungen von Ansys immer etwa 10% höher ausgefallen sind als die von Marc Mentat [8].

3.1.3 Kalt gebogenes einfach gekrümmtes Glas

Die Untersuchung [39] befasst sich mit dem Kaltbiegen von einsinnig gekrümmten Glasscheiben. Zur Erforschung des Krümmungsverhaltens wurde eine numerische Simulation mit der Finite Elemente Software Abaqus durchgeführt [39].

Abbildung 24 zeigt das geometrische Modell, bestehend aus einem Viertel einer Glasscheibe (in Blau dargestellt). Auf den beiden in Abbildung 24 mit Symm. gekennzeichneten Seiten, wird das Glas über Symmetrielager gehalten. In die endgültige Form gebracht wird die Scheibe ähnlich wie in [24] mittels Kontaktbiegen über die in grün dargestellte, starre Form. Das rote Randelement ist eine starre Vorrichtung zum Aufbringen der Verformung über den Winkel α . Vereinfacht wurde für die Studie eine monolithische Scheibe verwendet, wobei in späterer Folge die Untersuchung von Verbund- und Isolierglasscheiben geplant ist [39].

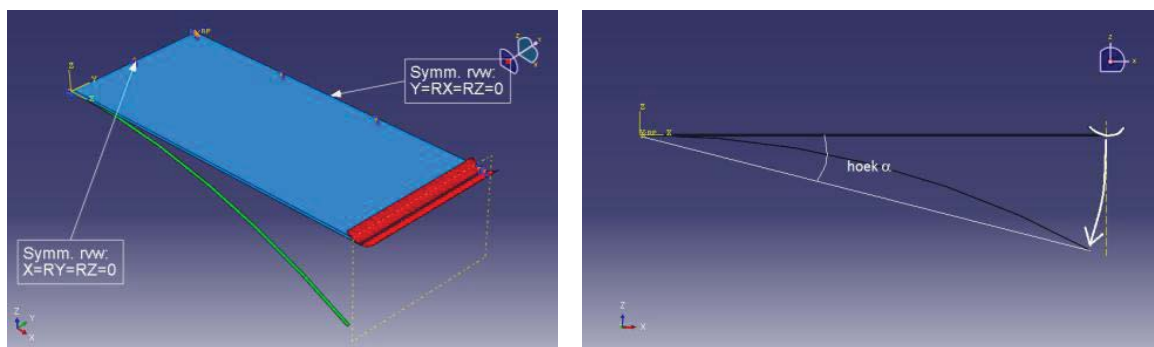


Abbildung 24: Geometrie des Biegemodells [39]

In der Parameterstudie wurden folgende Parameter variiert [39]:

- Biegeradius: 3,5, 6, 9, 12 m
- Scheibendicke: 4, 6, 8, 10 mm
- Plattenbreite: 500 bis 3500 mm in 500 mm Schritten

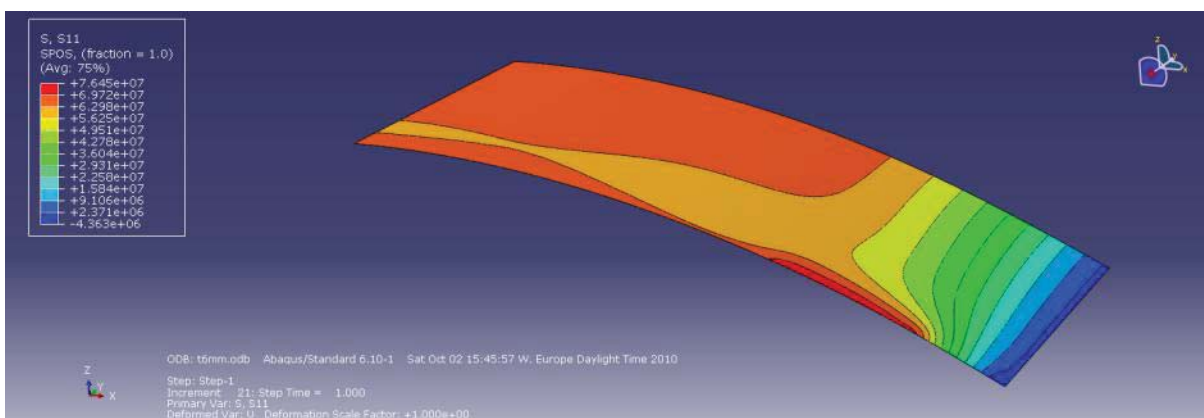


Abbildung 25: Charakteristisches Spannungsbild in tangentialer Richtung [39]

Die Variation des Radius und der Dicke hat eine gute Übereinstimmung mit der Belastungs- / Spannungsbeziehung zwischen Biegeradius und Scheibendicke nach folgender Formel ergeben [39]:

$$\sigma = \frac{E \cdot t}{2 \cdot R}$$

E = Elastizitätsmodul Glas

σ = Biegespannung

R = Biegeradius

t = Scheibendicke

Formel 6: Belastungs-/Spannungsbeziehung zwischen Biegeradius und Scheibendicke [39]

Weniger vorhersagbar waren die Ergebnisse der Variation der Breite. Die Platte wird dabei lediglich entlang der beiden Längsränder gehalten. Über ein bestimmtes Länge zu Breite-Verhältnis beginnt die Scheibe in der Mitte abzuflachen. Deutlich sichtbar wird dieser Effekt, wenn man die Spannungsergebnisse unterschiedlich breiter Platten vergleicht [39].

Der in Abbildung 26 ersichtliche Spannungsverlauf entsteht durch das Biegen einer 3,5 m langen, 0,5 m breiten und 6 mm dicken Gasplatte, mit einem Biegeradius von 3,5 m. Die dunkelrote Linie stellt den Spannungsverlauf an der Symmetrieachse in Plattenmitte dar und die hellrote Linie den Spannungsverlauf entlang des Längsauflegers [39].

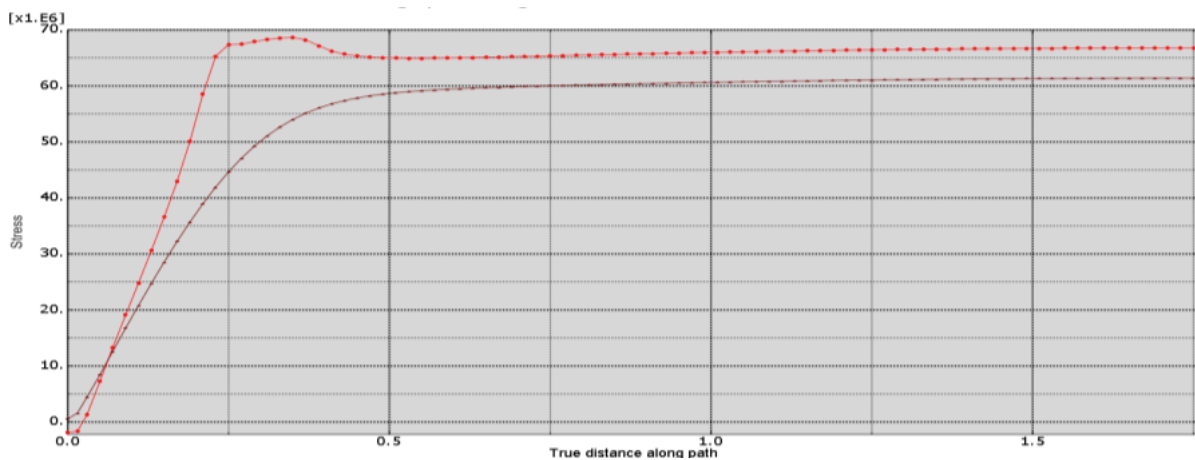


Abbildung 26: Spannung beim Biegen entlang der Längskante (3,5m x 0,5 m, 6mm) [39]

Das in Abbildung 27 ersichtliche Diagramm (grün = Symmetrieachse/Scheibenmitte, rosa = Auflager) zeigt den Spannungsverlauf der gleichen Scheibe jedoch mit einer Breite von 3,5 m [39].

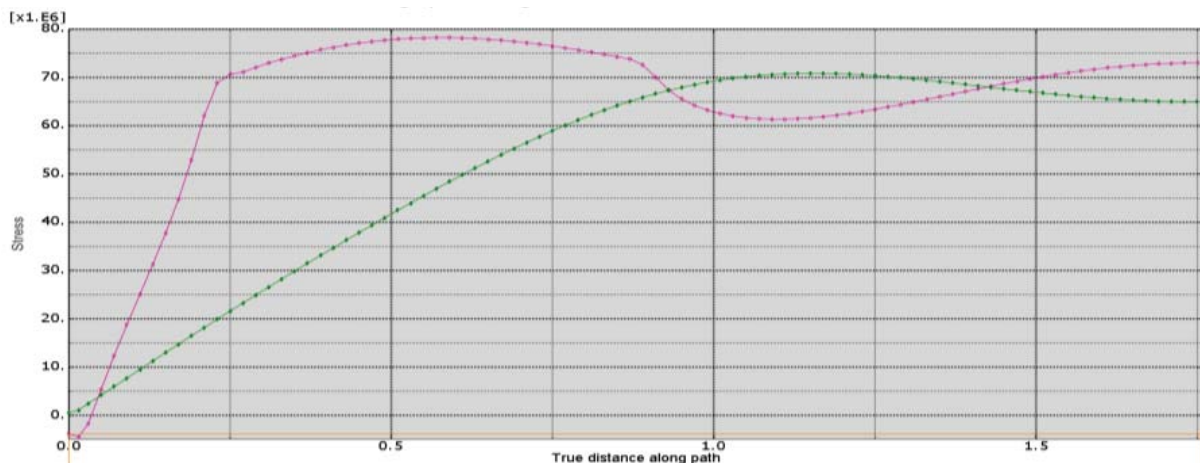


Abbildung 27: Spannung beim Biegen entlang der Längskante (3,5m x 3,5 m, 6mm) [39]

Es kann festgestellt werden, dass es bei einer siebenfachen Verbreiterung der Scheibe zu einem abflachen des Spannungsverlaufs in Scheibenmitte kommt. Das definieren einer Grenzbreite, ab der sich die Spannungen so stark verändern ist schwierig. Als praktischer Hilfwert wird im Forschungsbericht ein Breiten-/Längenverhältnis von $\frac{1}{2}$ empfohlen [39].

Das in Abbildung 28 dargestellte Diagramm soll dazu dienen, die zu erwartenden maximalen Spannungen für eine 3,5 m lange Scheibe, mit variierender Breite und einem Biegeradius von 3,5 m, bestimmen zu können. Zu diesem Zweck wurden die aus der Finite Elemente Analyse gewonnenen Maximalspannungen ausgewertet. Anschließend wurde die Übereinstimmung der Ergebnisse mit der Spannung zufolge Formel 6 (60 N/mm^2) verglichen. Es hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse nach Formel 6 mit den Werten der Ordinate (Diagramm Abbildung 28) multipliziert werden müssen [39].

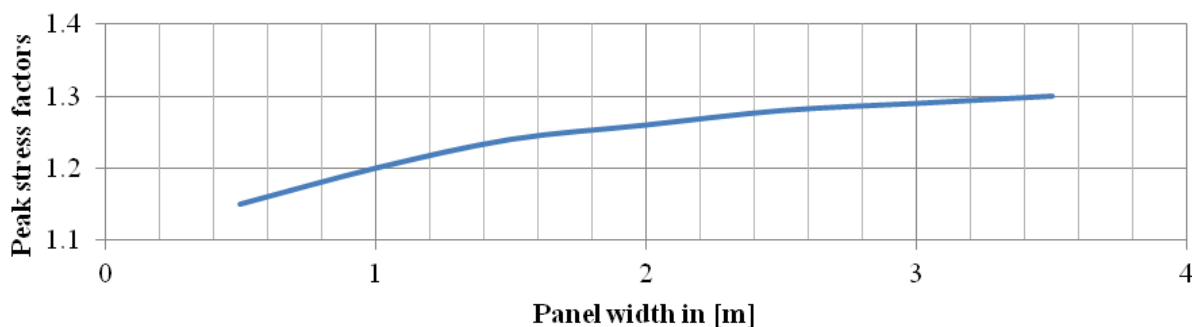


Abbildung 28: Spitzenbelastungsfaktor bezogen auf die Breite der Scheibe [39]

3.2 Referenzuntersuchungen zur zweiachsigen Biegung

Tabelle 6 zeigt die geometrischen Rahmenbedingungen der ausgewählten Forschungsprojekte zum Thema zweiachsigen Biegen von Glasscheiben.

	Einheit	Verhalten von kalt gebogenen Glasplatten während des Verformungsprozesses [43]	Stabilitätsverhalten von doppelt gekrümmten kalt gebogenen Glasscheiben [31]
Länge	[mm]	1000	2000
Breite	[mm]	1000	2000
Glasdicke	[mm]	5	10
Foliendicke	[mm]	-	-

Tabelle 6: Geometrische Rahmenbedingungen der Forschungsprojekte zum Thema zweiachsige Biegung

3.2.1 Verhalten von kalt gebogenen Glasplatten während des Verformungsprozesses

Thema dieser Forschung ist die Verformung einer rechteckigen monolithischen Scheibe (ESG) zu einer hyperbolischen Fläche. Dafür wird eine der Ecken normal zur Scheibenebene ausgelenkt und die anderen drei festgehalten. Anhand dieses Versuches wird das instabile Verhalten der Platte während des Kaltbiegeprozesses untersucht [43].

Bei den Versuchen, welche auf der Universität Cambridge durchgeführt wurden, kam es zu einer gewissen Beul-Instabilität (Knick-Instabilität) im Zuge der Auslenkung des Eckpunktes. Die Geometrie der Ausgangsscheibe ist quadratisch, mit einer Seitenlänge von einem Meter und einer Scheibendicke von 5 mm. Es werden Versuche mit variierenden Auflagerbedingungen durchgeführt. Das numerische Modell der Studie wird zeitunabhängig modelliert, weil die Zeit bei der Untersuchung einer monolithischen Scheibe keinen signifikanten Einfluss hat [43].

Beim Aufbringen der Verschiebung werden, wie auch bei anderen Versuchen dieser Art, zwei Verformungsmodi beobachtet. Vorerst kommt es zu einer Verwindung der Platte, bei der die Kanten ihre Geradlinigkeit behalten. Sobald die Auslenkung jedoch mehr als 16-Mal der Scheibendicke entspricht, kommt es zu einer Änderung im Deformationsverhalten. Eine der beiden Diagonalen wird steifer. Als Konsequenz ist die andere Diagonale in der vertikalen Verformung begrenzt und verbiegt sich stärker. In der sich verbiegenden Gerade entstehen Membranspannungen. In diesem Zustand kann es zu wellenförmigen Verformungen kommen, welche die Limits der normativ gestatteten Rollerwaves überschreiten [43].

Ziel der Untersuchung ist es, eine geometrische Beschränkung festzulegen, um optische Qualitätsfehler zu vermeiden [43].

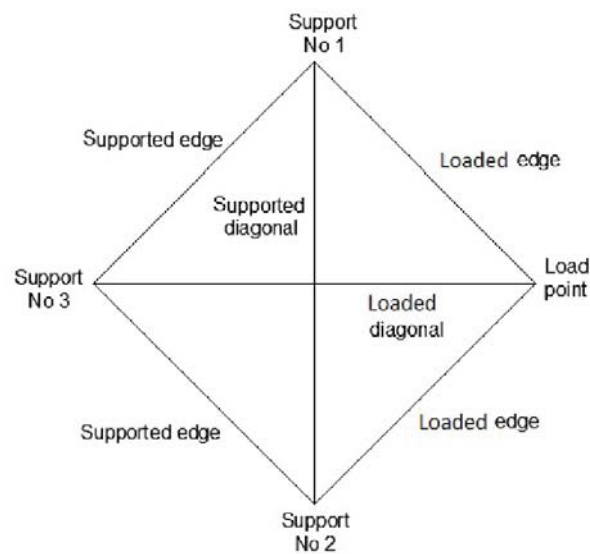


Abbildung 29: Schematische Systemdarstellung der Scheibe im Grundriss [43]

Die Auflager in dieser Studie variieren zwischen verschiedenen Dreh- und Verschiebungsbegrenzungen. Knoten Nummer 1 und 2 verhindert die Verschiebung der gelagerten Diagonale während Knoten Nummer 3 die Verschiebung und Rotation der belasteten Diagonale verhindert. Der Lastangriffspunkt ist weder verschiebungs- noch rotationsbeschränkt [43].

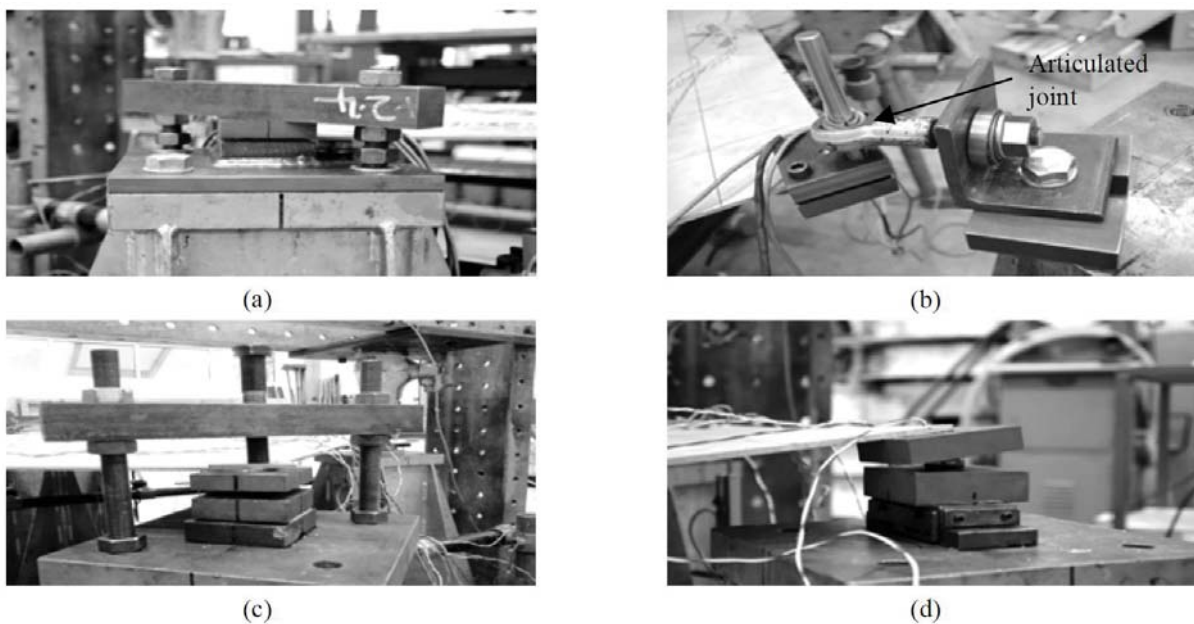


Abbildung 30: Versuchsaufbau mit verschiedenen Auflagerbedingungen [43]

Folgende drei Variationen der Auflagerbedingungen werden untersucht [43]:

- a. Eingespannte Auflager, rotation- und translationsgehalten

Bei Variante a werden die Eckpunkte zwischen zwei Stahlplatten geklemmt. Die untere Stahlplatte ist auf einer größeren Stahlplatte verschweißt, die wiederum auf einem Sockel

verschraubt ist. Um das Verrutschen der oberen Stahlplatte zu verhindern, wird diese mit einem Balken fixiert. Auf diesen Balken wird ein Drehmoment von 80 Nm aufgebracht, um die während des Versuchs entstehenden Horizontalkräfte über Reibung abtragen zu können.

b. Einspannung – translationsgehalten

Bild b zeigt das Auflager an den zurückhaltenden Punkten 1 und 2. Diese Lager sind dafür konzipiert Verschiebungen zu verhindern und Rotationen zuzulassen. Die Glasscheibe wird mit zwei M8 Schrauben und 20 Nm Drehmoment zwischen zwei Stahlplatten geklemmt. Um die freie Drehbewegung zu ermöglichen, sind die beiden Stahlplatten in weiterer Folge gelenkig angeschlossen (articulated joint).

c. Teilweise drehbares Gelenk – translationsgehalten

Im Fall c ruht die Probe auf einer Kugelstütze, die Verdrehungen teilweise über ein Gewinde ermöglicht. Die Verschiebung wird durch die Gleitreibungszahl verhindert. Die Reibung wird über ein Drehmoment von 80 Nm erzeugt.

d. Freier Rollenträger

Bei diesem Fall ist sowohl die Rotation als auch die Translation frei. Die Scheibe ist an einer Kugelstütze auf einem Gleitlager befestigt.

Für die numerische Simulation wurde die Software Abaqus/CAE 6.12-2 verwendet. Das Modell wurde dabei aus Schalenelementen generiert, welches in der Berechnung Nichtlinearitäten berücksichtigt. Zur Definition der Dichte des Finite Elemente Netzes wurden Konvergenzstudien durchgeführt [43].

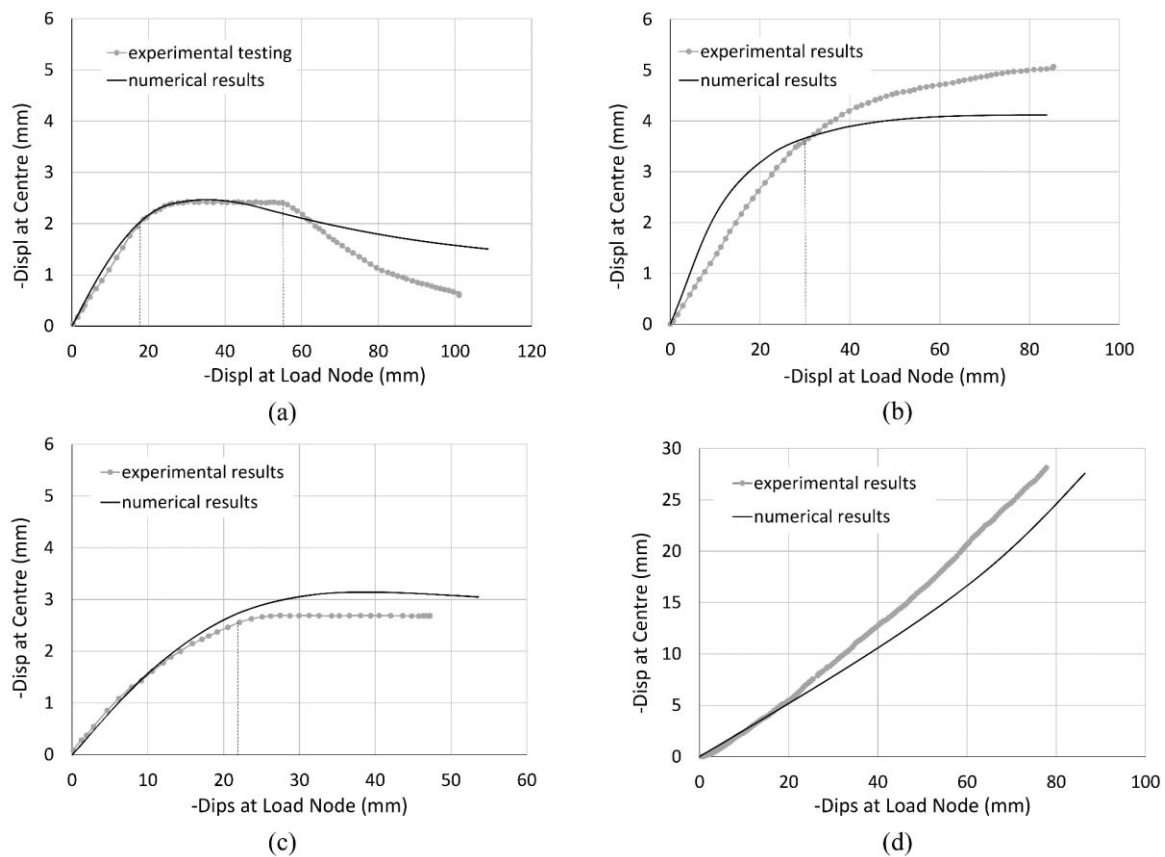


Abbildung 31: Vertikale Verschiebung der Scheibenmittelachse in Relation zur Verschiebung des Lasteinleitungspunktes [43]

Beim Fall a (translations- und rotationsgehalten), beginnt die Zustandsänderung ab einer aufgetragenen vertikalen Verschiebung von 19 mm (Abbildung 31). Im Bereich zwischen 19 mm und 55 mm bleibt die Plattenmitte relativ stationär. Anschließend verschiebt sich die Plattenmitte in die entgegengesetzte Richtung. Bei den Fällen b und c tritt dieses Phänomen bei 30 mm und 21 mm auf. Die größte Verschiebung tritt beim Fall d auf. Die Verschiebung der Plattenmitte verhält sich dabei linear zur aufgetragenen vertikalen Verschiebung der Ecke. Hierbei tritt auch keine Änderung im Verformungsmodus auf [43].

Eine genaue Analyse der Verschiebungen der Diagonalen ist in [43] zu finden. Des Weiteren wird dort auch auf die, besonders in Fall a, auftretenden wellenartigen Verformungen genauer eingegangen [43].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Wahl der Auflagerbedingungen gravierend auf das Verformungsverhalten auswirkt. Wenn die Verschiebung in der Ebene an zwei gegenüberliegenden Punkten möglich ist, kommt es zu keinen Instabilitäten. Wird die Translation von zwei gegenüberliegenden Punkten jedoch gesperrt, kommt es zu eingangs beschriebener Veränderung im Deformationsmodus. Dabei kommt es zu wellenförmigen Irritationen in der gelagerten Diagonale. Zu diesen Deformationsmodi kann es auch kommen, wenn die Drehsteifigkeit an zwei gegenüberliegenden Ecken variiert. Zusätzlich ist noch anzumerken, dass

die Größe der Amplitude der Wellen, welche im veränderten Deformationsmodus entsteht, von der Plattendicke abhängig ist. Dicke Platten weisen eine größere Amplitude auf als dünnere Platten. Genaue Werte hierzu finden sich in [43].

3.2.2 Stabilitätsverhalten von doppelt gekrümmten kalt gebogenen Glasscheiben

Um kleine Radien mittels Montagebiegen erzeugen zu können, müssen geringe Glasdicken verwendet werden. Die geringen Glasdicken haben wiederum zur Folge, dass die Scheibe eine geringere Stabilität gegen Knicken aufweist [31].

In den in [31] beschriebenen Untersuchungen, werden Instabilitätsphänomene von antiklastisch gekrümmten Hyperparaboloiden anhand eines numerischen Modells, sowie anhand eines Versuches erforscht. Dabei wird ein verfeinertes analytisches nicht-lineares Modell entwickelt, das auf der Theorie für dünne flache Platten von Mansfield [44] basiert [31].

Essenziell für die Erforschung der Verformung von Platten ist darüber hinaus die Kirchhoff Love Theorie. Diese sagt aus, dass bei der Verformung einer rechteckigen Scheibe, durch Krafteinleitung an den Ecken, ein hyperbolisches Paraboloid entsteht, bei dem die Geradlinigkeit der Kanten sowie der Fasern erhalten bleibt. Da dies den Verformungsprozess, die Verbindungsstöße und die Montage maßgeblich beeinflusst, ist dieses Verhalten von großer Bedeutung [31].

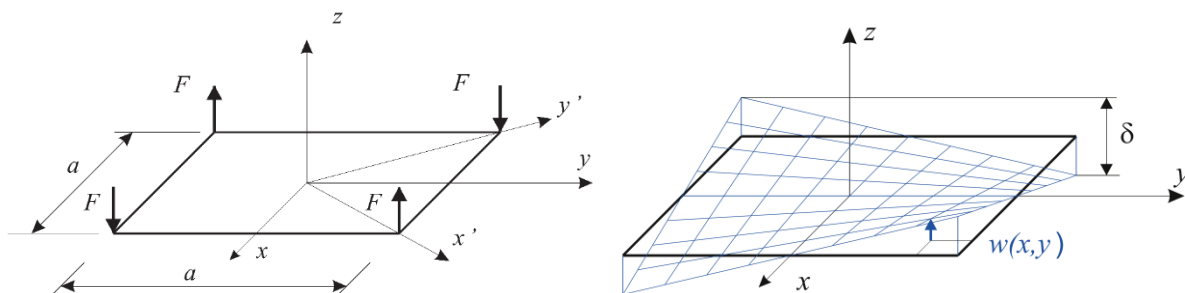


Abbildung 32: Systemdarstellung der Verformung einer ebenen Platte zu einem hyperbolischen Paraboloid [31]

Abbildung 32 zeigt eine quadratische Glasplatte, die durch vier konzentrierte Kräfte an den Ecken zu einem hyperbolischen Paraboloid verformt wird. In der rechten Abbildung ist die Geradlinigkeit der Plattenkanten gut ersichtlich [31].

Es wird jedoch beobachtet, dass bei zunehmender Auslenkung, in den Ecken eine lokale elastische Instabilität auftritt. An einem gewissen Punkt der Lastgeschichte zeigt die Platte zusätzlich eine globale Form der Instabilität. Es treten Membranspannungen auf. Um diese Spannungen zu verkleinern, neigt die Platte dazu, eine Form anzunehmen, bei der sich die Spannungen im mittleren Bereich reduzieren. Zu diesem Zeitpunkt schlägt das hyperbolische Paraboloid in eine asymmetrische Form durch. Im Zuge diese Effekts, wird eine der Diagonalen geradliniger, während sich bei der anderen Diagonale die Krümmung erhöht [31].

Abbildung 33 links zeigt das kritische Limit ab wann die asymmetrische Verformung relevant wird. Die Abszisse δ beschreibt im Diagramm die gesamte Verschiebung $\delta = \delta_1 + \delta_2$. Zunächst verformen sich die freien Ecken δ_2 und die gehaltenen Ecken δ_1 noch relativ zu einander gleich viel (in entgegengesetzte Richtungen). Ab einem gewissen Punkt verformt sich δ_1 jedoch signifikant mehr, wohingegen die Verschiebung von δ_2 leicht abnimmt. Der dabei auftretende Grenzwert kann, anhand des Symmetrieverlustes und der Krümmung, gut identifiziert werden [31].

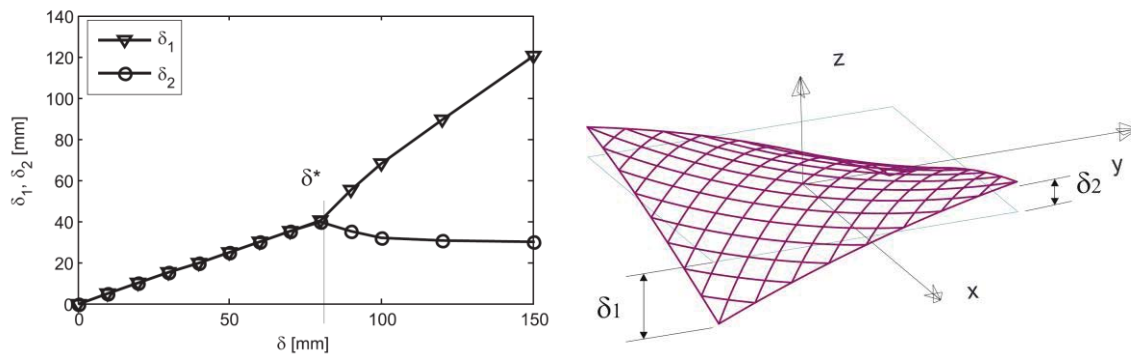


Abbildung 33: Verzweigungspunkt beim Limit der symmetrischen Verformung [31]

Numerisches Modell

Die Konvergenz der numerischen Simulation ist lokal stabil, zeigt jedoch im Verzweigungspunkt global eine numerische Instabilität. Diese Instabilität zeigt sich nachdem die Platte bis zum Verzweigungspunkt belastet wird. Zu diesem Zeitpunkt stellt sich bei der „noch“ symmetrischen Platte ein metastabiler Zustand ein. Um dieses Problem in der numerischen Simulation zu vermeiden, wird ein gleichmäßig verteilter Druck von $p = 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ aufgebracht und die Platte dadurch zum Auslenken angeregt. Anschließend werden die Ecken bis zu ihrem Zielwert verschoben und letztendlich die Last p wieder entfernt. In der Realität könnte das spontane Durchschlagen der Platte wegen eines metastabilen Zustandes den Bruch der Glasscheibe zur Folge haben. Der Effekt von p könnte in der Praxis durch Wind oder Schnee hervorgerufen werden [31].

Abbildung 34 zeigt links eine Auslenkung von 10 mm mit einem Skalierungsfaktor in der Darstellung von 50. Die Platte, nimmt wie in der linearen Plattentheorie beschrieben, die Form eines hyperbolischen Paraboloids ein. Dabei bleiben die Kanten geradlinig. Die rechte Abbildung zeigt eine Auslenkung von 70 mm mit einem Skalierungsfaktor von 19. Die Form ähnelt immer noch der eines hyperbolischen Paraboloids, weist jedoch eine Krümmung in den Kanten auf. Dieses Phänomen kann als lokale Instabilität betrachtet werden, bei der sich die Nichtlinearität auf die Ecken konzentriert [31].

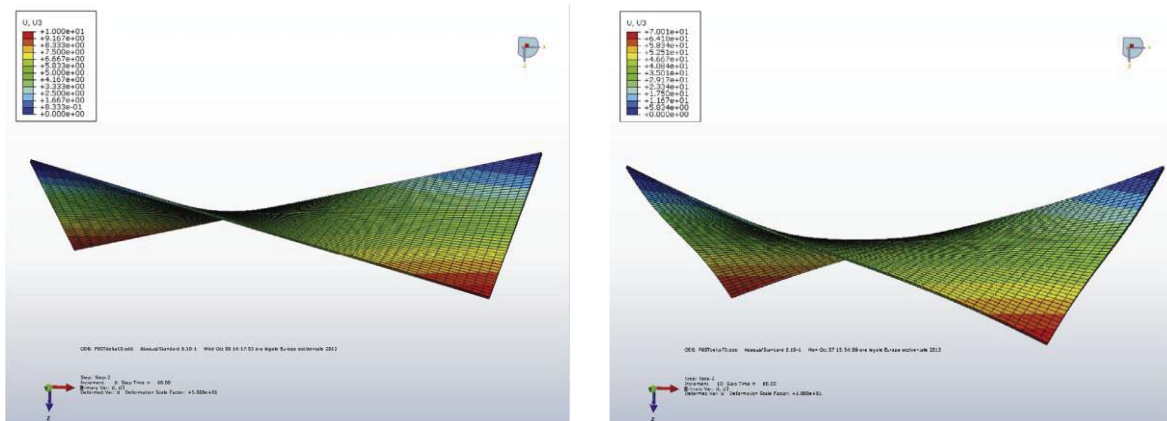


Abbildung 34: Spannungsbilder nach Auslenken der Ecken: 10 mm Auslenkung (links), 70 mm Auslenkung (rechts) [31]

Man kann dieses Phänomen auch beschreiben, indem man sagt, dass sich ab einem gewissen Punkt eine erhebliche Trägheit gegen das Biegen einstellt, so dass es energetisch günstiger ist, eine der Diagonalen geradliniger zu machen, um die andere Diagonale hingegen verformungswilliger. Bei weiterem Auslenken vergrößert sich der Effekt des asymmetrischen Verformungsverhaltens, bis die Kanten über die ganze Länge gekrümmt sind [31].

Diese Theorie wird bei der vorliegenden Forschungsarbeit durch eine genauere Analyse der verformten Kanten bestätigt. Dabei zeigt sich, dass die Kanten in den mittleren Abschnitten geradlinig bleiben, jedoch in den Bereichen nahe den Ecken deutlich gebogen sind [31].

In Abbildung 35 ist ein weiterer wichtiger Aspekt des Verformungsverhaltens ersichtlich. Im Zuge der Forschung wurde festgestellt, dass eine Platte mit einer Poisson-Zahl von 0,22 weniger steif ist und somit bei gleicher Last eine größere Verformung aufweist, als eine Platte mit einer Poisson-Zahl von 0. Im Forschungsbericht wird auch demonstriert, dass die Poisson-Zahl einen Einfluss auf die Krümmung normal zur Hauptkrümmungsachse hat und eine antiklastische Krümmung der Oberfläche in die Querrichtung verursacht [31].

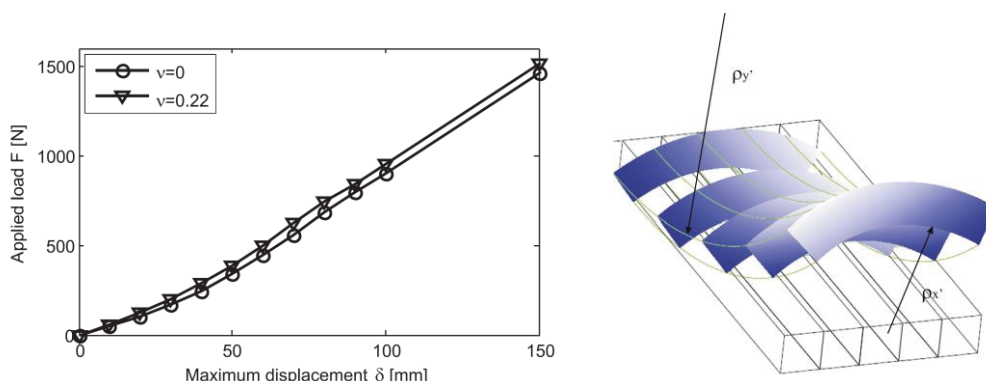


Abbildung 35: Verformung in Abhängigkeit der Poisson-Zahl (links), Einfluss der Poisson-Zahl auf die Krümmung in Querrichtung (rechts) [31]

Eine Möglichkeit die Instabilität zu minimieren besteht darin, die Scheibenränder mit Profilen zu stabilisieren. Auf diese Erkenntnis wird hier nicht genauer eingegangen, es finden sich allerdings

weitere Informationen in [31]. Diese Option ist aus ästhetischen Gründen häufig jedoch nicht gegeben.

4 Parameterstudien

Ziel dieser Parameterstudien ist es, den Einfluss von Krümmung, Scheibenlänge, Scheibendicke und des Schubmodules der Verbundfolie auf das Tragverhalten von gekrümmten Dünnglasscheiben zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden im Zuge dieser Arbeit zwei Modelle untersucht.

Im ersten Schritt wird ein Modell generiert, das den Prozess des einachsigen Biegens einer ebenen Scheibe in eine Kreisform erfasst. Das biaxiale Biegeverhalten wird darauf folgend mittels einer an vier Punkten gelagerten Scheibe, die durch Verschieben einer Ecke aus der Ebene verformt wird, erforscht.

Beide Studien werden mit der Software Abaqus/CAE 6.14-3 durchgeführt. Die Eingabe erfolgt mit Hilfe von Skripten in der Programmiersprache Python. Die berechnungsrelevanten Objekte werden aus Volumenelementen generiert und unter der Berücksichtigung der Theorie dritter Ordnung berechnet. Die programminterne Modellbildung basiert auf einem Finite Elemente Netz, das sich aus quadratischen hexaedrischen Elementen, mit jeweils 20 Knoten und reduzierter Integration bildet.

Zu Beginn werden, aufbauend auf den aus der Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnissen, die für die Studie relevanten Parameter, sowie deren Größen gewählt. Darufhin wird, um die erforderliche Diskretisierung des Finite Elemente Netzes bestimmen zu können, eine Konvergenzanalyse durchgeführt. Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgt anschließend die Wahl der Maschenstruktur des Referenzmodells, auf dessen Basis die Ergebnisse der einzelnen Serien verglichen werden. Die Auswertung erfolgt anhand von Hauptzugspannungen und Verformungen. Ziel dabei ist es, Werte auslesen zu können, anhand derer die tendenzielle Spannungs- und Verformungsentwicklung infolge der Parametervariation bestimmt werden kann.

Tabelle 7 zeigt die gewählten Materialkennwerte der beiden Parameterstudien.

In Anbetracht einer guten Lesbarkeit, erfolgt die Eingabe der Einheiten in Abaqus in SI (mm) Einheiten. Folglich können die Werte aus den Diagrammen und Abbildungen in N/mm^2 abgelesen werden.

Eigenschaft	Symbol	Einheit	Stahl S235	Polyoxymethylen	Glas	Verbundfolie
Dichte	ρ	kg/m^3	7850	0,00142	2500	1070
Elastizitätsmodul	E	N/mm^2	210 000	2800	7000	0,12 - 120
Poisson-Zahl	μ	-	0,3	0,35	0,23	0,49

Tabelle 7: Materialkennwerte der Parameterstudie: Krümmungsform, Glas, Verbundfolie [4]

4.1 Einachsige Biegung

In dieser Studie wird das Krümmungsverhalten einer rechteckigen Scheibe, mit einer Breite von 1,5 Meter, beim Biegen über eine Kreisbogenform untersucht. Die Kreisbogenform eignet sich besonders gut, da sie im Gegensatz zu anderen Formen über die gesamte Länge eine konstante Krümmung aufweist. Dies ermöglicht krümmungsbedingte Spannungsspitzen zu vermeiden.

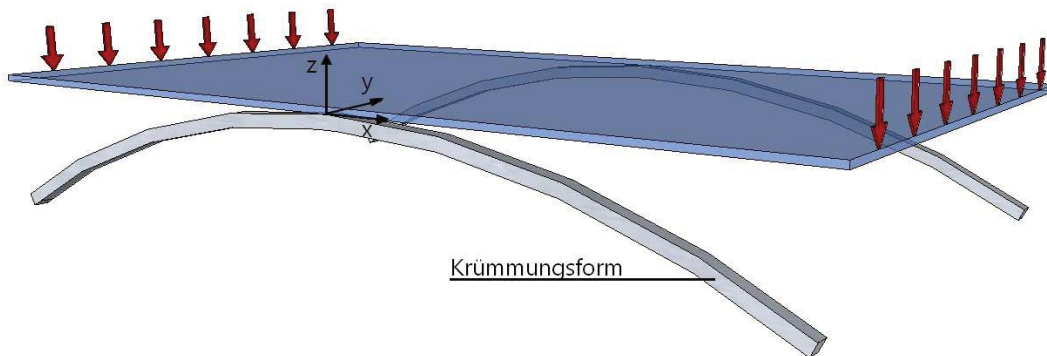


Abbildung 36: Modellskizze der einachsigen Biegung

4.1.1 Formgebung

Die Krümmung wird im numerischen Modell über eine vertikale Verschiebung der vorderen, unteren Glaskante erzeugt. Es ist zu vermuten, dass die Lastaufbringung bei der Realisierung einer Versuchsstudie über die obere Kante gesteuert wird. Im numerischen Modell, kommt es jedoch wegen dem verformungsweichen Materialverhalten der Verbundfolien, im Endzustand der Biegung, zu einer Verschiebung der Scheiben zueinander. Diese minimale Verschiebung macht es schwierig die exakte z - Position der oberen Glaskante im Vorhinein geometrisch zu definieren. In der Realität würden diese geringfügigen Verschiebungen, die sich im Millimeterbereich bewegen, vermutlich zu keinen signifikanten Änderungen der Spannungen führen. Im numerischen Modell kann diese geometrische Ungenauigkeit jedoch zu Kontaktproblemen zwischen Krümmungsform und Scheibe führen. Diese Problematik macht es erforderlich, die untere Glaskante zur Definition der Endposition heranzuziehen.

Die Verschiebung der vorderen Glaskante an die richtige x - Position wird durch die zwanghafte Anpassung der Scheibe an die Krümmungsform, unter Berücksichtigung großer Verformungen, gewährleistet.

Um den Rechenaufwand der Finite Elemente Simulation zu verringern, wird die Symmetrie der Scheibe ausgenutzt. Bei der dazugehörigen Definition der Auflagerbedingungen, wird die hintere Glasfläche (in Abbildung 37 mit Symmetrieebene gekennzeichnet) in y- und z-Richtung rotationssteif und in x-Richtung unverschieblich modelliert.

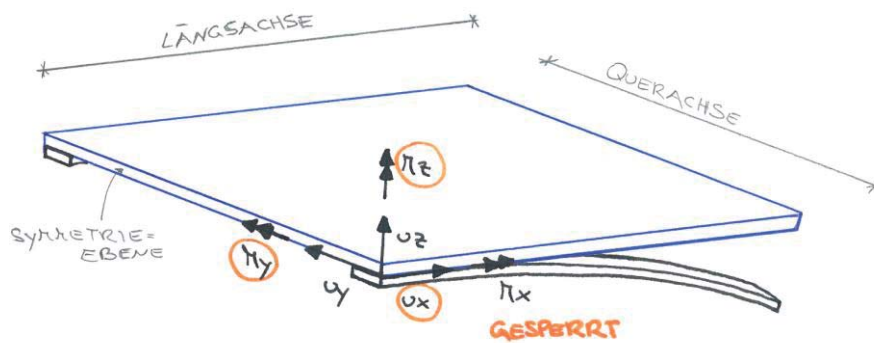


Abbildung 37: Skizze der Auflagerbedingungen des Symmetrielagers

Die beiden seitlich angeordneten Formen beschreiben einen Kreisbogenausschnitt und begrenzen, entlang der Kontaktfläche, die Vertikalverschiebung in negative z -Richtung. Der Koordinatenursprung liegt an der rechten unteren Ecke, der in Abbildung 37 gekennzeichneten Symmetrieebene (in der Kontaktfläche zwischen Glas und Krümmungsform).

Als Werkstoff für die Bogenform wird Stahl S235 verwendet. Um den Einfluss des Materials der Bogenform abschätzen zu können, wird eine Vergleichsuntersuchung durchgeführt, bei der die Krümmungsform aus Polyoxymethylen besteht. Die zugehörigen Materialkennwerte sind in Tabelle 7 definiert. Mit dem Ziel eine Verformung des Bogens und die dadurch möglicherweise auftretenden Auswirkungen auf die Glasscheibe zu vermeiden, wird dieser kontinuierlich über die gesamte Länge, in alle drei Koordinatenrichtungen, in seiner Ausgangslage fixiert. Die Dicke des Stahlbogens beträgt 10 mm und die Breite 50 mm.

Die Kontaktfläche zwischen der Glasscheibe und der Krümmungsform, ist in tangentialer Kraftrichtung als reibungsfrei und in radialer Richtung über einen harten Kontakt charakterisiert. Durch diese Annahme wird verhindert, dass es zur tangentialen Krafteinleitung zwischen Glasscheibe und Krümmungsform kommt. Hinsichtlich des Abhebens der Scheibe nach dem Biegen, wird die Annahme getroffen, dass die Scheibe während des Biegeprozesses nicht geklebt wird. Ein erneutes Abheben nach dem ersten Kontakt mit der Stahlform ist somit möglich.

Zielsetzung bei der Wahl der geometrischen Randbedingungen ist es, ein möglichst praxisnahes Modell zu generieren und zeitgleich die bestmögliche geometrische Anpassung der Scheibe an die Unterkonstruktion zu erreichen. Abbildung 38 zeigt den geometrischen Zusammenhang zwischen der Vertikalverschiebung und der Anpassung an die Krümmungsform.

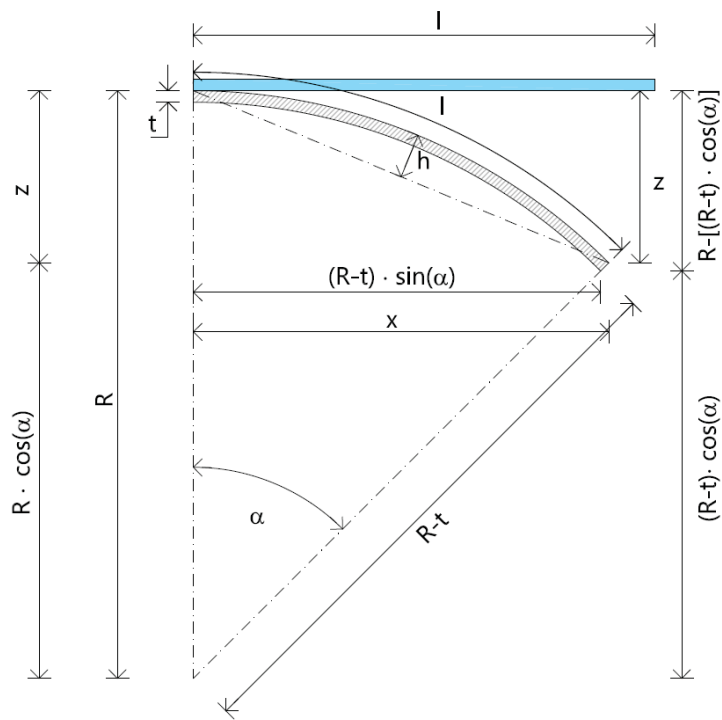
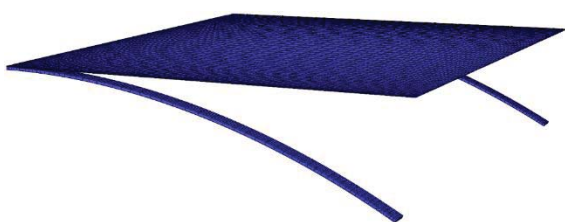
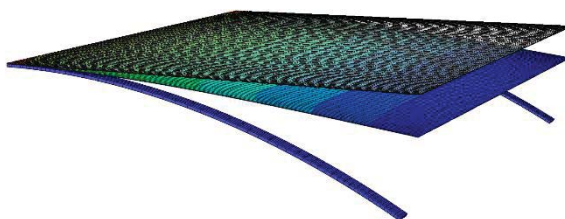


Abbildung 38: Geometrischer Zusammenhang der z-Verschiebung

Zur Veranschaulichung des Biegeprozesses wird in Abbildung 39 die Entwicklung der Spannungen während des Krümmens, mit Hilfe einiger Zwischenschritte, abgebildet.

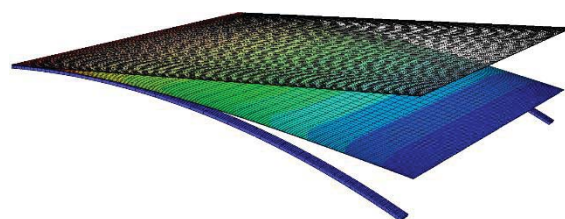


Die Ausgangslage der ebenen Glasscheibe - am hinteren Rand mit einem Symmetrielager befestigt.

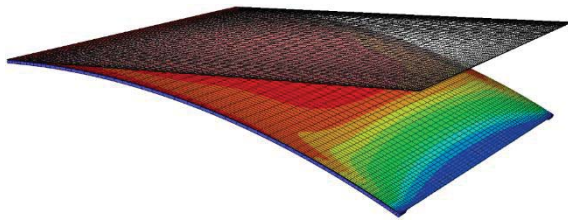


Beginnende Verschiebung der vorderen unteren Kante in z-Richtung.

Anfänglich kommt es sowohl über die Breite als auch über die Länge zu einem nahezu konstanten Spannungszuwachs.



Bei fortschreitender z-Verschiebung entsteht im Bereich der seitlichen Auflager ein schnellerer Spannungszuwachs als in der Scheibenmitte.



Im Endzustand hat sich die Geometrie der Glasscheibe komplett an die Stahlform angepasst. Der Spannungsverlauf über die Breite ist nicht mehr konstant. Die Spannungen erreichen ihr Maximum am Symmetriemittelpunkt.

Abbildung 39: Spannungsbilder während des Verformungsprozesses

Die für die weiterführende Bemessung relevanten Maximalspannungen treten im letzten Biegeschritt auf. Im Zuge der statischen Lastaufstellung und Ermittlung der Einwirkungen müssen diese berücksichtigt werden. Infolgedessen wird bei der Ergebnisauswertung dieser Schritt analysiert.

4.1.2 Eingabeparameter

In Tabelle 8 sind die Parameter der Studie, sowie deren Gruppenteilung, aufgelistet.

		R [m]	L [m]	B [m]	A [mm]	G [N/mm ²]
	REF 01	3.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 01	R_1	1.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	R_2	9.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	R_3	12.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 02	L_1	3.00	0.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	L_2	3.00	1.00	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	L_3	3.00	2.00	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	L_4	3.00	2.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 03	A_1	3.00	1.50	1.50	2.00 0.76 2.00	0.40
	A_2	3.00	1.50	1.50	3.00 0.76 3.00	0.40
	A_3	3.00	1.50	1.50	4.00 0.76 4.00	0.40
Serie 04	G_1	3.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.04
	G_2	3.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	4.00
	G_2	3.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	40.00

Tabelle 8: Parametermatrix der Studie

Radius R:

Die Untersuchung mehrerer Radien ist essenziell, um den krümmungsbedingten Einfluss der Spannungen und Verformungen im Vorhinein abschätzen zu können. In Serie 01 wird der Radius von 1 m bis 12 m gesteigert.

Bogenlänge L:

Die Länge der Scheibe wird mit dem Parameter Bogenlänge beschrieben. Aus dem geometrischen Zusammenhang lässt sich ableiten, dass sich die Krümmung der Scheibe mit zunehmender Bogenlänge nicht ändert.

Scheibenbreite B:

Die Scheibenbreite von 1,5 m ist ein konstanter Faktor der Parameterstudie.

Scheibenaufbau A:

In Serie 03 wird der Einfluss der Scheibendicken auf das Krümmungsverhalten untersucht. Ausgehend vom Referenzaufbau werden die Scheibendicken in 1 mm Schritten gesteigert, bis eine Dicke von 4 mm erreicht wird.

Schubmodul der Verbundfolie G:

Wie bereits im Kapitel 2.5.1 Verbundfolien beschrieben, ist die Festigkeit von PVB temperatur-, zeit- und herstellerabhängig. Neben diesen materialspezifischen Einflussfaktoren, wirkt sich die Belastungsgeschwindigkeit signifikant auf die Verteilung der Spannungen zwischen den Scheiben, durch die Verbundfolie, aus. Um die komplexe Interaktion von VSG genau untersuchen zu können, bedarf es einer aufwendigen Zeit- und Temperatur-gesteuerten Simulation. In dieser Arbeit wird das Materialverhalten der Verbundfolie vereinfacht linear-elastisch modelliert und das in der Realität auftretende visko-plastische Verhalten vernachlässigt. Um auch mit dieser vereinfachten Modellbildung den Einfluss der Schubfestigkeit der Verbundfolie auf das Gesamtpaket untersuchen zu können, wird der Schubmodul der Folie zwischen 0,4 N/mm² und 40 N/mm² variiert. Für die Eingabe in Abaqus, wird der Schubmodul mit folgender Formel in den Elastizitätsmodul umgerechnet:

$$E = 2 * G * (1 + \nu)$$

Formel 7: Berechnung des Elastizitätsmoduls [45]

4.1.3 Referenzmodell

Die Durchführung einer Konvergenzstudie gewährleistet die adäquate Wahl der Feinheit des Finite Elemente Netzes. Nachfolgend werden die Ergebnisse von drei Modellen mit verschiedenen Netzfeinheiten ausgewertet. Als Ausgangsmodell wird eine quadratische Scheibe mit einer Seitenlänge von 1,5 m gewählt. Diese wird über eine Krümmungsform mit einem Radius von 3 m gebogen. Der Aufbau der Scheibe setzt sich aus zwei Scheiben mit jeweils einer Dicke von 1 mm,

sowie einer Zwischenschicht mit einer Dicke von 0,76 mm (Schubmodul von 0,4 N/mm²), zusammen. Die weiteren Materialkennwerte können aus Tabelle 7 entnommen werden.

Abbildung 40 zeigt die in der Konvergenzanalyse durchgeführte Verfeinerung der Netzdichte von quadratischen Elementen mit einer Seitenlänge von 50 mm bis hin zu Elementen mit einer Seitenlänge von 12,5 mm.

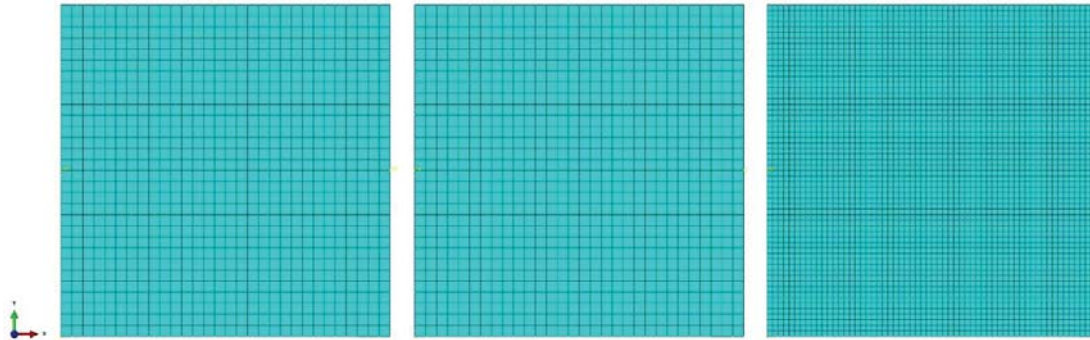


Abbildung 40: Netzfeinheit der Konvergenzstudie: M50 (links), M25 (mittig), M12.5 (rechts)

Die gemäß Abbildung 41 bezeichneten Achsen dienen in weiterer Folge der Vergleichbarkeit zwischen M50, M25 und M12,5. Die roten, alphabetisch bezeichneten Achsen verlaufen in Längsrichtung der Scheibe. Die Bezeichnungen beginnen am Rand mit A und steigern sich im Abstand von 100 mm in alphabetischer Reihenfolge bis zur Scheibenmitte I. Um bei Achse I genau die Mitte zu lokalisieren, wird der Abstand zwischen I und H auf 50 mm reduziert.

Die blau gekennzeichneten Achsen in Querrichtung sind mit Nummern gekennzeichnet. Die Nummerierung beginnt an der Symmetrieebene der Scheibe mit 1 und steigert sich in Längsrichtung. Achse 9 kennzeichnet die Scheibenmitte. Der Abstand der Querachsen ist im Regelfall 100 mm und in der Mitte 50 mm. Alle Achsen verlaufen entlang der äußeren Oberfläche, der obersten Scheibe.

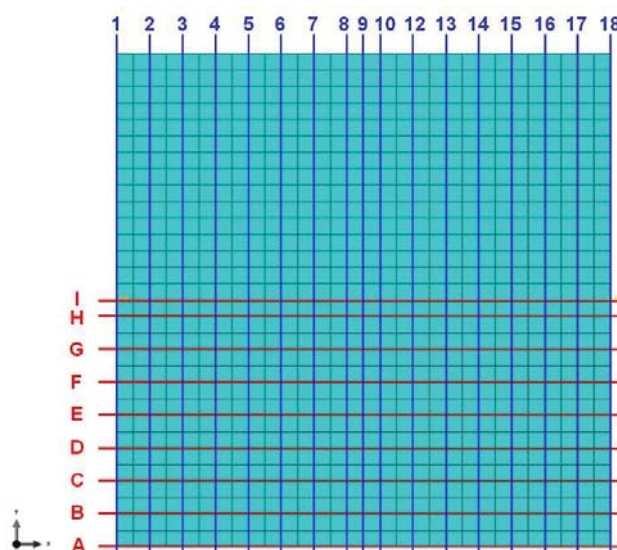


Abbildung 41: Achsenbeschriftungen

Abbildung 42 zeigt den Verlauf der Oberflächenspannungen von einem Viertel des doppelsymmetrischen Querschnittes.

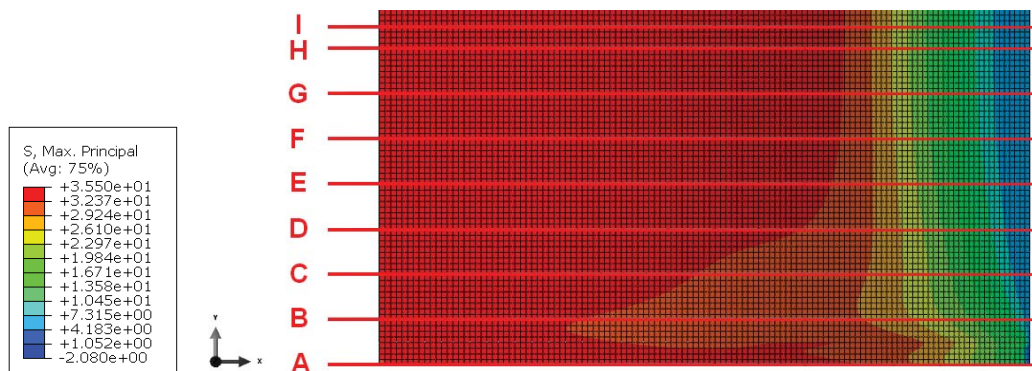


Abbildung 42: Spannungsverlauf über die Glasoberfläche M12,5

Da die maximalen Spannungen bei der stärksten Krümmung auftreten, werden im Zuge der Spannungsanalyse die Spannungsverläufe, über die Länge, im Endzustand des Biegeprozesses betrachtet. Dabei werden die Spannungsverläufe der drei Modelle mit unterschiedlichen Netzfeinheiten, an den jeweiligen Achsen, verglichen.

Abbildung 43 zeigt im Bereich zwischen 0,00 und 0,10 Meter bei M50 und M25 an der Außenkante A einen kurzfristigen Spannungsanstieg. Als Resultat einer Netzverfeinerung, entsteht an dieser Stelle ein gleichmäßigerer Verlauf. Des Weiteren zeigt der Spannungsverlauf in Achse A, im Bereich der Symmetrieeinspannung, einen signifikanten Spannungsabfall.

Bei genauerer Betrachtung kann festgestellt werden, dass es, bedingt durch die antiklastische Querverformung der Scheibe in diesem Bereich, zu einem minimalen Abheben (0,01 mm) der Kante A von der Krümmungsform kommt.

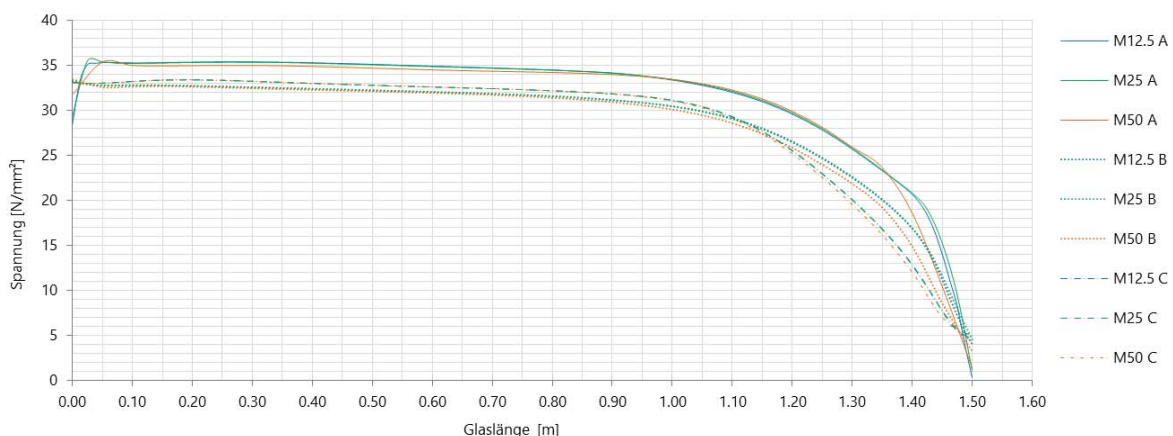


Abbildung 43: Hauptzugspannungen Achse A, B, C über die Länge im Endzustand der Biegung

Wie eingangs erwähnt (Abbildung 37), ist die vertikale Verschiebung der Scheibe an der Symmetrieebene durch die Auflagerbedingungen nicht gesperrt. Da bei dem betrachteten Modell

nicht von einer Befestigung der Scheibe im Symmetriebereich ausgegangen wird (wie z.B. einer Verklebung der Scheibe mit dem Rahmen), darf ein Abheben in diesem Bereich nicht eingeschränkt werden.

Die Abweichungen im Spannungsverlauf zwischen 1,10 und 1,50 m entstehen durch den minimalen Unterschied des ausgewerteten Biegefortschritts. Zu begründen ist diese Vorgehensweise, durch den in Abbildung 44 veranschaulichten Knick an der Ecke der Lasteinleitungskante. Dieser Knick entsteht beim letzten Belastungsschritt und ist mit dem minimalen Eindringen der Scheibe in die Krümmungsform zu begründen. Das geringe Einpressen der Scheibe ist bedingt durch geometrische Ungenauigkeiten in der Endposition der vorderen unteren Scheibenkante (hervorgerufen durch die z-Verschiebung, siehe 4.2.2). Die dabei entstehenden Spannungsspitzen sind extrem hoch und lassen keine aussagekräftige Auswertung der Spannungen über die gesamte Scheibe zu. Aus diesem Grund wird zur Spannungsauswertung immer der jeweilig vorletzte Belastungsschritt herangezogen.

Hinsichtlich der Schrittweite der z-Verschiebung (increment) ist jedoch zu erwähnen, dass dieser programmintern nicht konstant ist und modellabhängig variieren kann. Dementsprechend ist die z-Position der Lasteinleitungskante im vorletzten Belastungsschritt minimal unterschiedlich. Als Resultat entstehen in den Bereich zwischen 1,10 und 1,50 m kleine Unterschiede im Verlauf der Hauptzugspannungen.

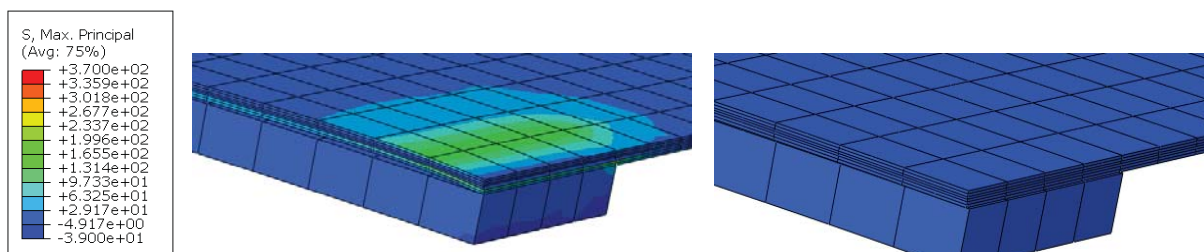


Abbildung 44: Spannungsanstieg zufolge Aufknicken im letzten Lastschritt (links), kein Spannungsanstieg im vorletzten Belastungsschritt (rechts)

Wie Abbildung 45 zeigt, sind die Spannungsverläufe der drei Modelle im Mittelbereich fast ident. Eine Verfeinerung des Finite Elemente Netzes in diesem Bereich ermöglicht somit keine relevanten Verbesserungen.

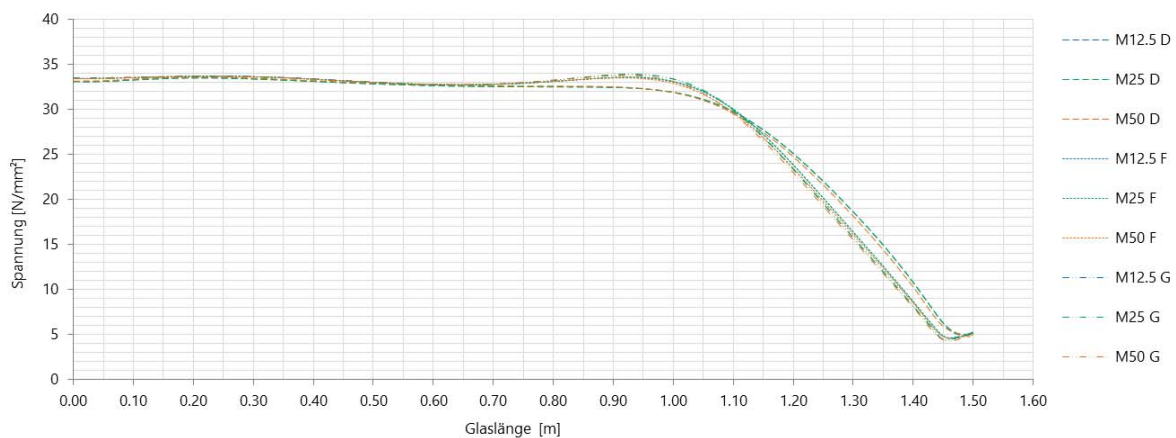


Abbildung 45: Hauptzugspannungen Achse D, E, F über die Länge im Endzustand der Biegung

In der Abbildung 45 ist zu erkennen, dass es bei allen drei Modellen, auf Achse D, E und F, im Endbereich (ab 1,45 m) erneut zu einem leichten Anstieg der Spannungen kommt, welcher sich bei den Achsen G, H und I (siehe Abbildung 46) noch verstärkt. Dieser Spannungsanstieg ist auf die Änderung in der Querverformung zwischen 1,40 und 1,50 m zurückzuführen. Abbildung 47 zeigt die in diesem Bereich auftretenden, verhältnismäßig großen, Differenzen der z-Verformung in Querrichtung. Der Auslöser für den Unterschied in der z-Verformung ist die zu Beginn konstant über die Querrichtung aufgezwungene z-Verschiebung. Daraus resultiert, dass die Querverformung der lagefixierten vorderen Kante Null sein muss.

Allgemein verlaufen die Spannungen im mittleren Bereich fast deckungsgleich zueinander (siehe Abbildung 46).

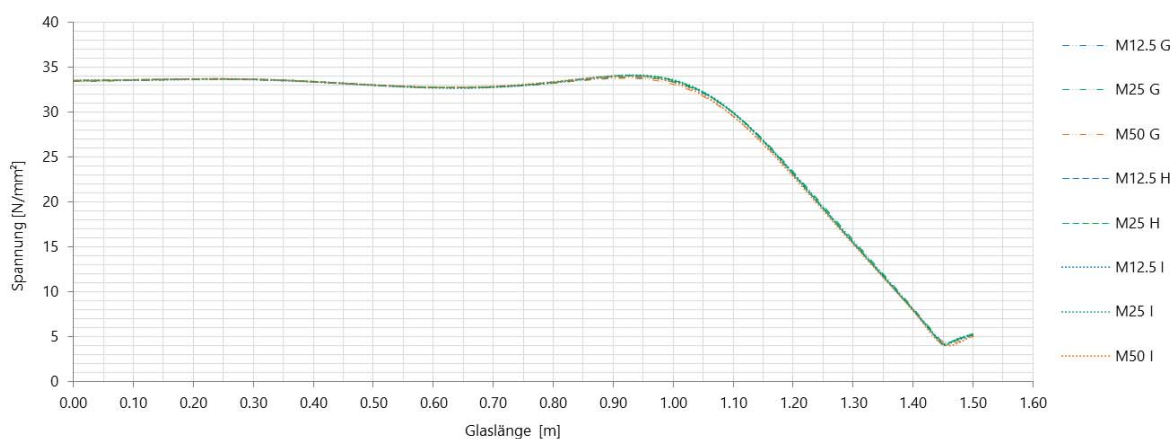


Abbildung 46: Hauptzugspannungen Achse G, H, I über die Länge im Endzustand der Biegung

Die Verformungen in Abbildung 47 beziehen sich jeweils relativ zur jeweiligen z-Position der Bogenform. Dieser Bezug ermöglicht den Vergleich der Querachsen. Die Analyse an den Querachsen erfolgt jeweils im Abstand von 200 mm.

Aus dem in Abbildung 47 dargestellten Diagramm lässt sich ablesen, dass sich an der Symmetrieebene eine antiklastische Verformung einstellt. Diese reduziert sich bis die Querverformung bei etwa 0,55 m den Wert Null annimmt und sich in die andere Richtung hin verformt. Das Maximum der synklastischen Verformung tritt bei 0,86 m mit einer Höhe von 0,63 mm auf. Anschließend nimmt die Querverformung wieder ab und erreicht bei ca. 1,0 m wieder den Nulldurchgang. Die maximale Querbiegung tritt bei 1,32 m mit einem Wert von 3 mm auf. Bei 1,5 m ist die Querverformung, zufolge der in z-Richtung fixierten unteren Glaskante Null.

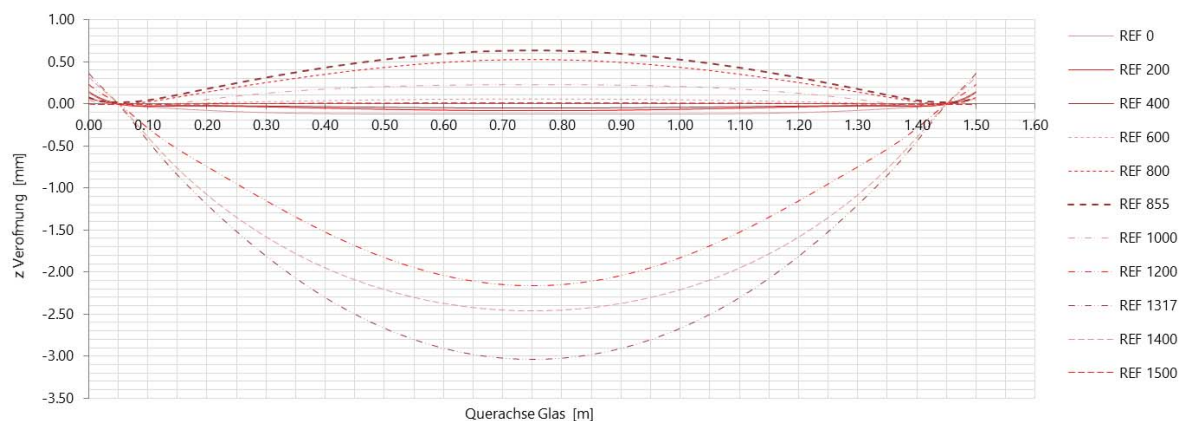


Abbildung 47: z-Verformung in die Querrichtung

Referenzmodell

Anhand der Auswertung der Konvergenzanalyse wird die in Abbildung 48 dargestellte Netzfeinheit für das Referenzmodell (REF01) gewählt. Die Elemente bilden sich aus Rechtecken mit einer maximalen Seitenlänge von 50 mm in der Mitte, bis minimal 10 mm am Rand. Diese Größe reicht aus, um die Spannungen angemessen abbilden zu können und gewährleistet eine optimierte Rechendauer der Finite Elemente Analyse. In Summe werden sowohl die Längsseiten als auch die Breite in jeweils 61 Elemente unterteilt. Bei der Untersuchung der Serie 02 wird die Anzahl der Elemente entsprechend der Scheibengröße angepasst.

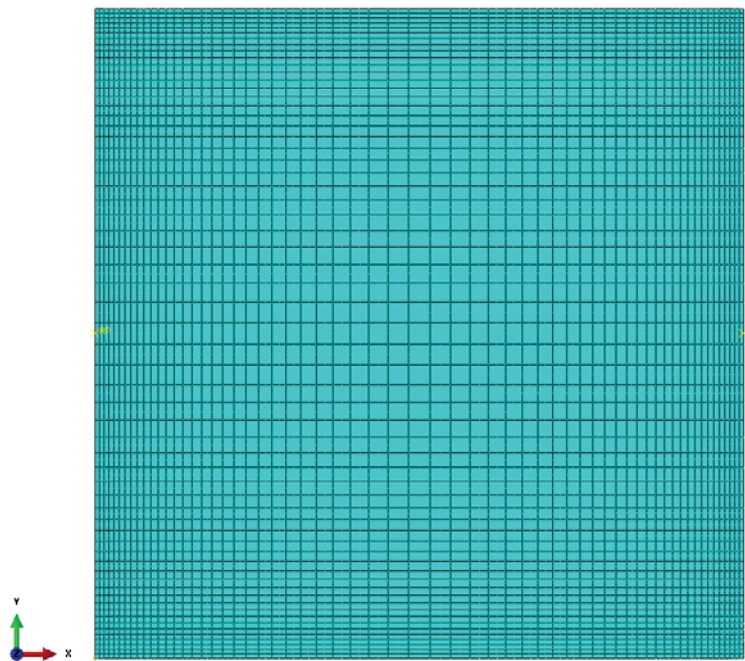


Abbildung 48: Finite Elemente Netz des Referenzmodells

Zur Verifizierung der ausreichenden Genauigkeit der Maschenstruktur des Referenzmodells, wird der in Abbildung 49 gezeigte Spannungsvergleich, durchgeführt. Es sind keine wesentlichen Abweichungen der Verläufe zu erkennen.

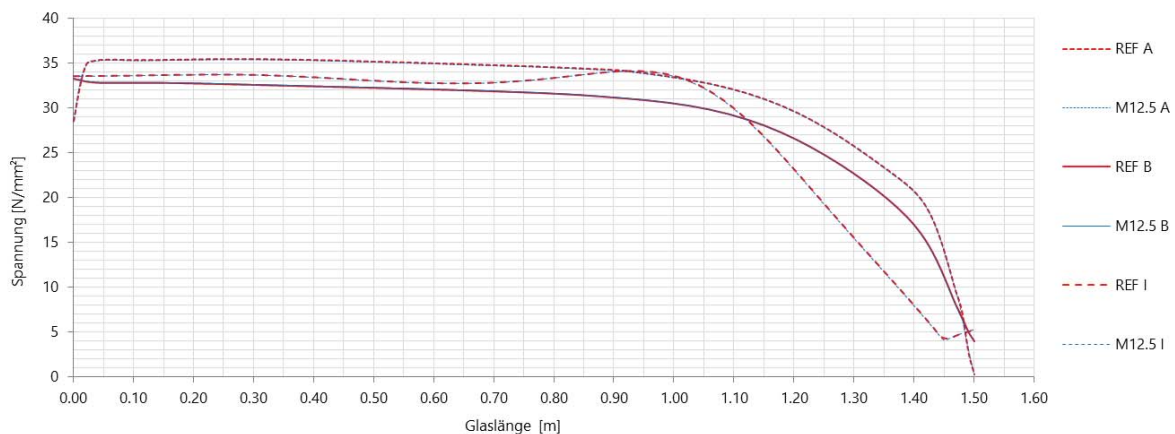


Abbildung 49: Vergleich der Hauptzugspannungen zwischen dem Referenzmodell und M12,5

Um das gewählte Modell zu verifizieren, wird die Simulation einer monolithischen Scheibe mit 6 mm Scheibendicke, einer Breite von 0,5 m, einer Länge von 3,5 m und einem Biegeradius von 3,5 m durchgeführt. Laut der in [39] angeführten Formel 6, ist bei diesen Angaben eine Spannung von etwa 60 N/mm² zu erwarten. In Abbildung 50 kann festgestellt werden, dass die in der Scheibenmitte auftretenden Spannungen mit den Werten der Formel übereinstimmen.

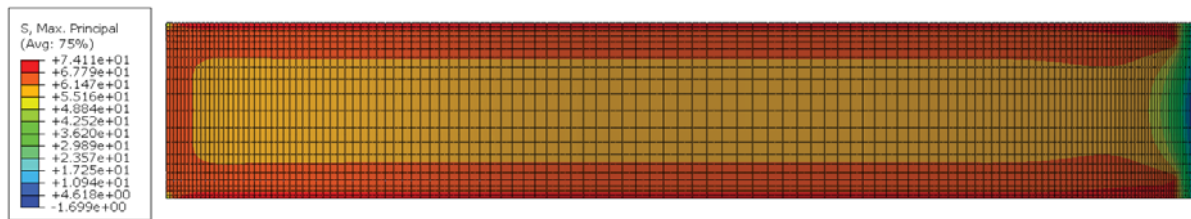


Abbildung 50: Spannungsabbildung an der Oberfläche im Zuge der Verifizierung des Referenzmodells

Durch die Auswertung der Spannungen an der Achse A (Abbildung 51) kann festgestellt werden, dass es an den Auflagern zu Spannungsspitzen kommt. Hinsichtlich des Abgleiches mit dem in Abbildung 26 ersichtlichen Spannungsverlauf, treten an Achse A Abweichungen von ca. 5 N/mm^2 auf. Die Spannungen an der Achse B und in der Mitte der Scheibe stimmen sehr gut mit den zu erwartenden Werten überein.

Die am Auflagerrand (Achse A) auftretenden Spannungen sind, wie in Abbildung 51 ersichtlich, um ca. 5 N/mm^2 höher als die in Achse B. Um den Einfluss der unter der Glasscheibe befindlichen Stahlkrümmungsform abwägen zu können, wird ein Vergleichsmodell generiert, bei dem die Krümmungsform aus POM modelliert wird. Die Spannungen unterscheiden sich, wie in Abbildung 52 ersichtlich ist, nur im Endbereich der Scheibe. Die Maximalspannung bleibt unbeeinflusst.

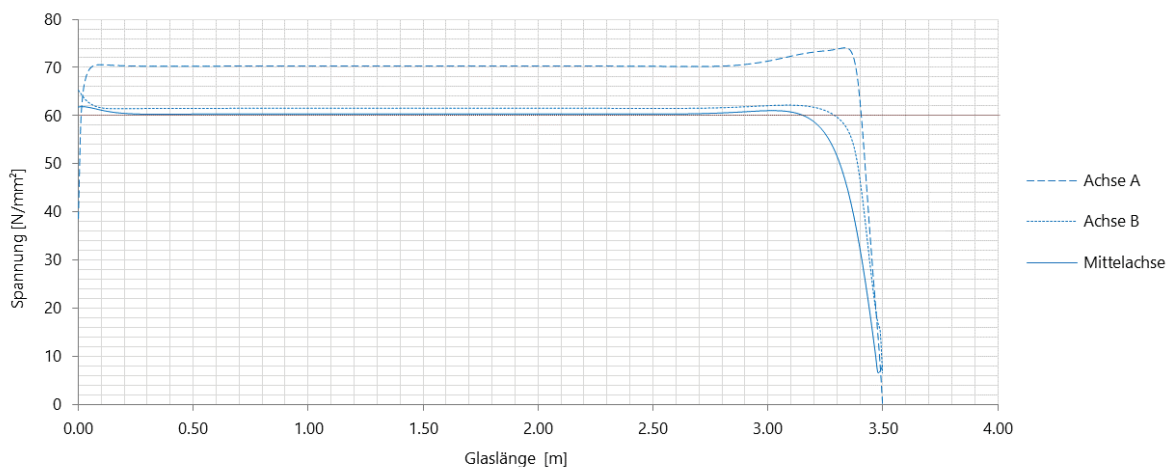


Abbildung 51: Spannungsauswertung im Zuge der Verifizierung des Referenzmodells

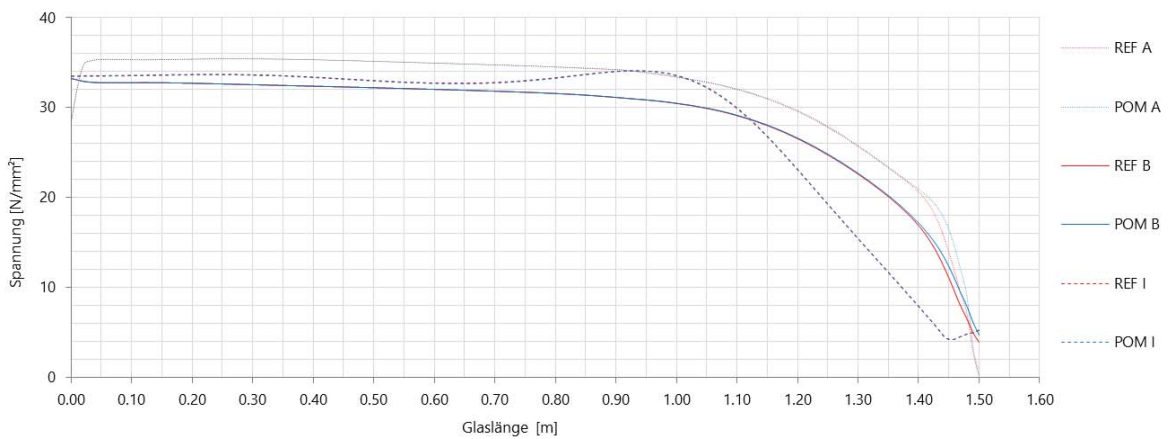


Abbildung 52: Vergleich zwischen dem Referenzmodell und einem Modell mit einer Krümmungsform aus Polyoxymethylen (POM)

Da es sich bei den Spannungen in Achse A um Randwerte des Finite Elemente Netzes handelt, werden in weiterer Folge die Spannungen in der Mittelachse I und in der Achse B ausgewertet.

Die Scheiben- bzw. Foliendicke wird in jeweils zwei Elemente pro Schicht unterteilt. Die Verfeinerung der Maschen auf 4 bzw. 6 Elemente über die Dicke der Verbundfolie bewirkt, wie Abbildung 53 zeigt, keine Änderungen im Spannungsverlauf.

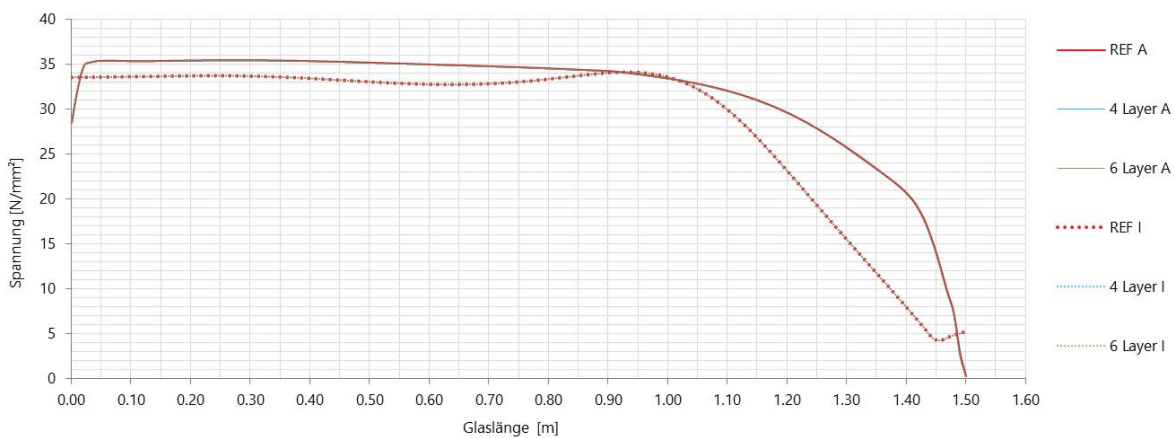


Abbildung 53: Hauptzugspannungen über die Länge der Scheibe mit einer unterschiedlichen Elementanzahl über die Dicke der Zwischenschicht

Neben der Abbildung der Spannungen ist auch die Genauigkeit der Anpassung an die Krümmungsform bei der Wahl des Finite Elemente Netzes von hoher Bedeutung. Das Diagramm in Abbildung 54 zeigt die Genauigkeit mit der sich das Referenzmodell an die Krümmungsform anpasst.

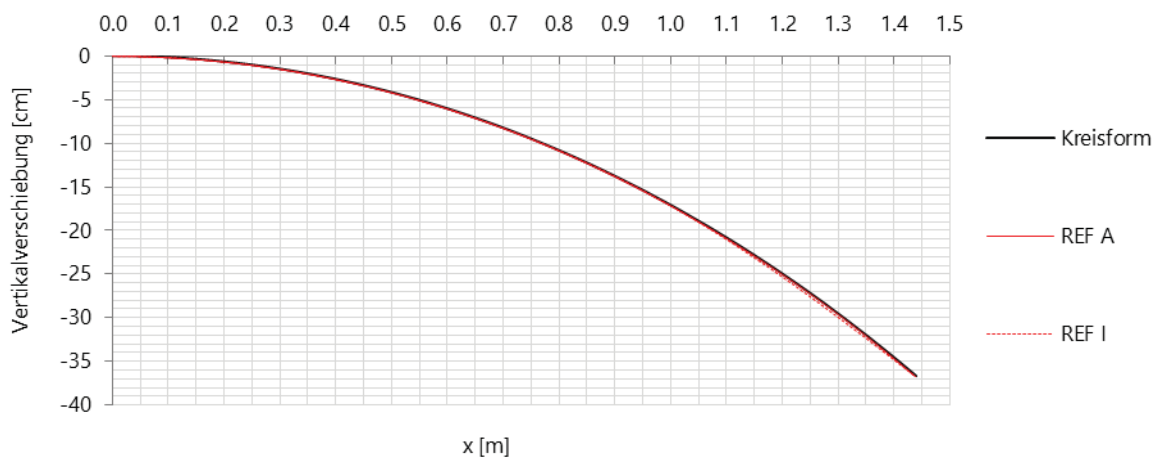


Abbildung 54: Geometrische Anpassung des Referenzmodells an die ideale Kreisbogenform

4.1.4 Ergebnisse

4.1.4.1 Variation des Radius - Serie 01

Ausgehend vom Referenzmodell, werden in der Serie 01 drei verschiedene Radien untersucht.

		R [m]	L [m]	B [m]	A [mm]	G [N/mm ²]
	REF	3.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 01	R_1	1.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	R_2	9.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	R_3	12.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40

Tabelle 9: Eigenschaften der in Serie 01 untersuchten Modelle

Die gleichbleibende Scheibenlänge verursacht unterschiedliche, vom Kreisbogen eingeschlossene, Winkel und folglich abweichende Krümmungen (siehe Abbildung 55).

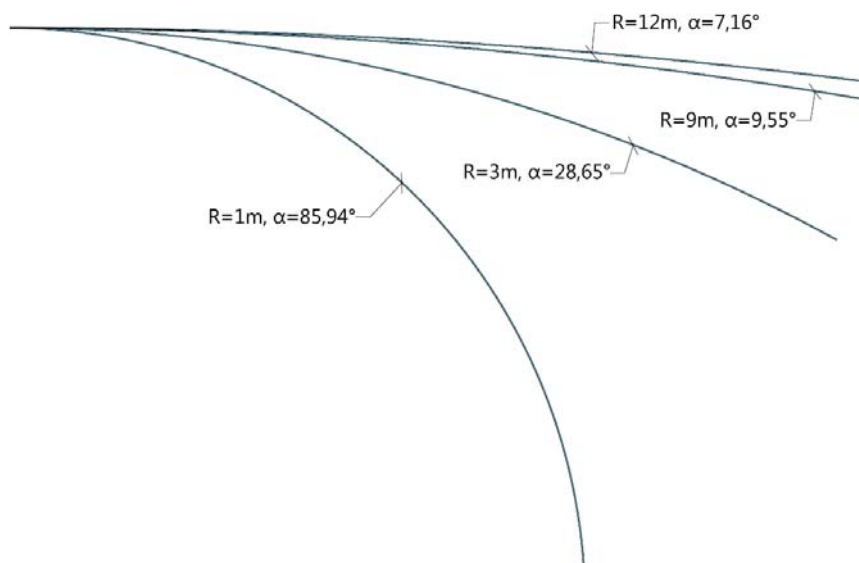


Abbildung 55: Skizze der variierenden Biegeradien - Serie 01

Neben dem geringeren Ressourcenverbrauch hat die Verwendung von Dünnglas den wesentlichen Vorteil, dass die Scheiben mit weniger Anpressdruck in Form gebracht werden können. Um diesen qualitativen Eindruck in Zahlen fassen zu können, werden folgend die durch die Verformung an der vorderen Glaskante entstehenden Reaktionskräfte ausgewertet.

Der Zusammenhang zwischen z-Verschiebung und der erforderlichen Anpresskraft ist in Abbildung 56 dargestellt. Dabei zeigt die Ordinate den Anstieg der Kraft und die Abszisse die zunehmende z- Verschiebung.

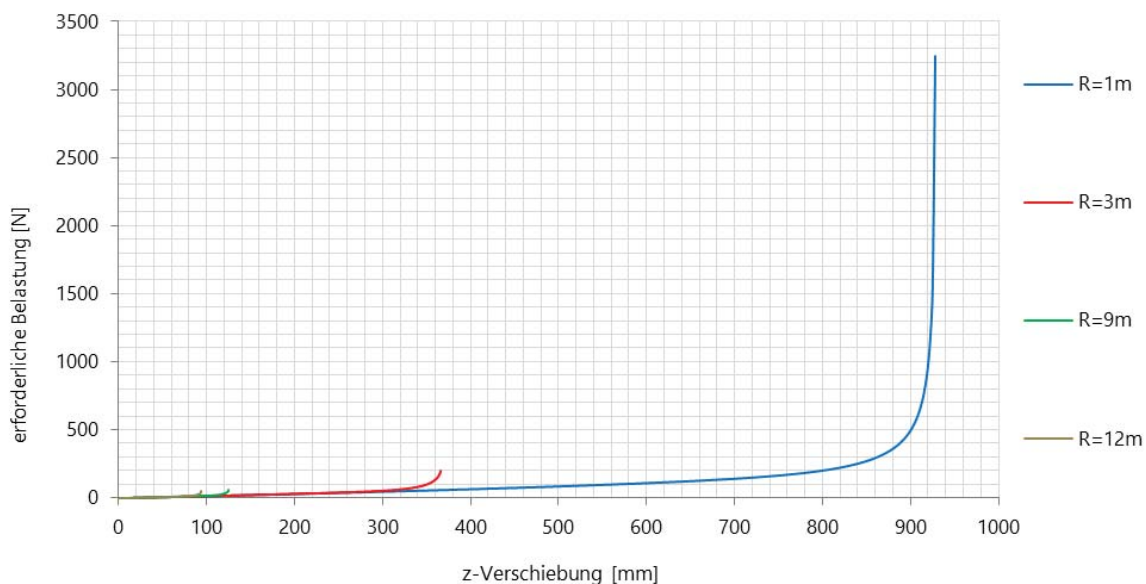


Abbildung 56: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 01

		K [N]	R [m]
Serie 01	REF	196.36	3
	R_1	3242.09	2
	R_2	57.09	9
	R_2	45.14	12

Tabelle 10: Erforderliche Kräfte für die einachsige Kaltverformung der Serie 01

Die tabellarische Auflistung zeigt, dass die Reaktionskraft mit kleiner werdendem Radius, bedingt durch die starke Krümmung, signifikant ansteigt.

Wie bereits eingangs erwähnt, werden in weiterer Folge die Spannungsverläufe in Längsrichtung im Endzustand der Biegung an den Achsen B und I dargestellt. Abbildung 57 zeigt einen direkten Vergleich der Modelle mit unterschiedliche Radien.

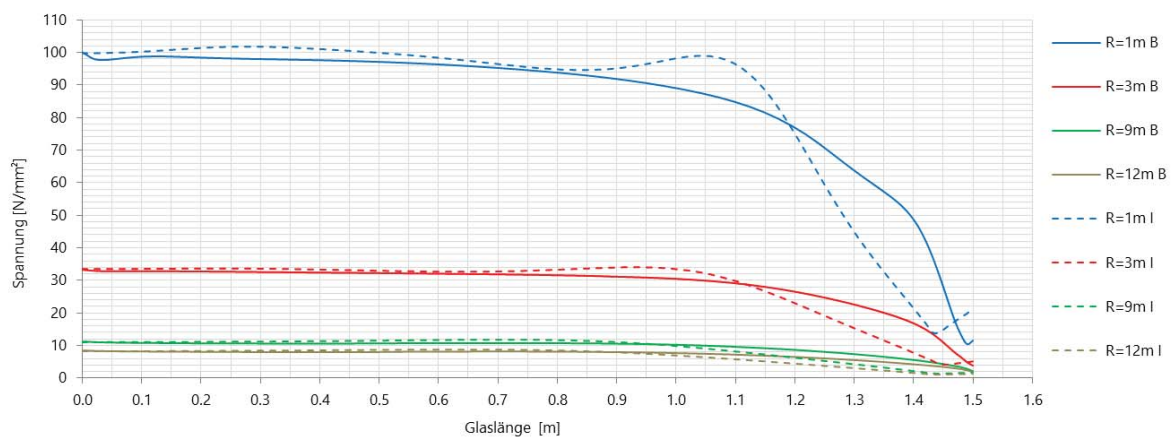


Abbildung 57: Hauptzugspannungen über die Länge im Endzustand der Biegung

Der besonders bei einem Radius von 1 m ersichtliche Spannungsunterschied zwischen Achse B und I im Längenbereich von 1,20 und 1,45 m der Scheibe, entsteht durch die Querbiegung der Scheibe. Die Querbiegung wird mit zunehmendem Radius ausgeprägter. Abbildung 58 zeigt die Differenz zwischen der Verformung der Scheibenmitte und Achse A, bezogen auf die Scheibenlänge. Es ist zu erkennen, dass die maximale Differenz der Querverformung bei $R=1\text{ m}$ mit 6,5 mm auftritt.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass bedingt durch die Krümmungsänderung die Verformung in x- Richtung, mit kleiner werdendem Radius, zu nimmt. Wobei diesbezüglich anzumerken ist, dass sich der Einfluss der Verschiebung in x-Richtung selbst bei einem Radius von 1 m auf einen Wert von 0,2 mm beschränkt und bei den Radien 9 und 12 m fast gänzlich an Bedeutung verliert.

Aus Abbildung 58 kann entnommen werden, dass der bei einem Radius von 9 und 12 m ersichtliche gleichmäßige Anstieg der Querverformung, mit abnehmendem Radius an Kontinuität verliert.

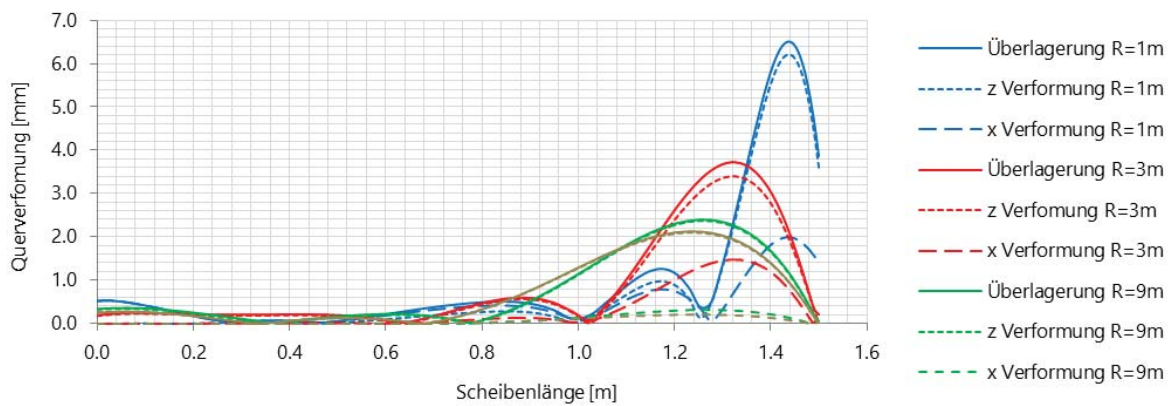


Abbildung 58: Differenz der Querverformung in z und x-Richtung

Abbildung 59 zeigt die Auswertung der maximalen Spannungen in Bezug auf den Radius. Es ist gut zu erkennen, dass sich der Spannungsanstieg nicht linear zur Steigerung des Radius verhält. Speziell bei einem Radius von 1 m überschreitet die vorhandene Spannung die laut Norm zulässige Festigkeit von TVG (70 N/mm²).

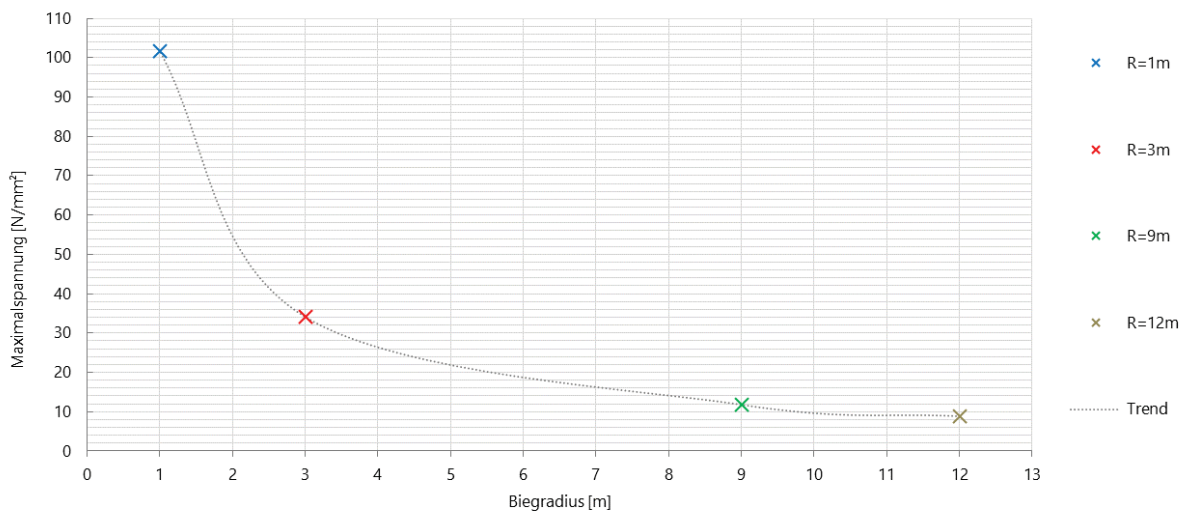


Abbildung 59: Maximale Hauptzugspannung infolge Variation des Radius

Die folgenden Abbildungen der Oberflächenspannungen (Abbildung 60 und Abbildung 61) geben einen Überblick über den Spannungsverlauf auf der Glasoberfläche. Die Farbskalierung unterscheidet sich aufgrund der hohen Spannungsunterschiede zwischen einem Radius von 1 und 12 m.

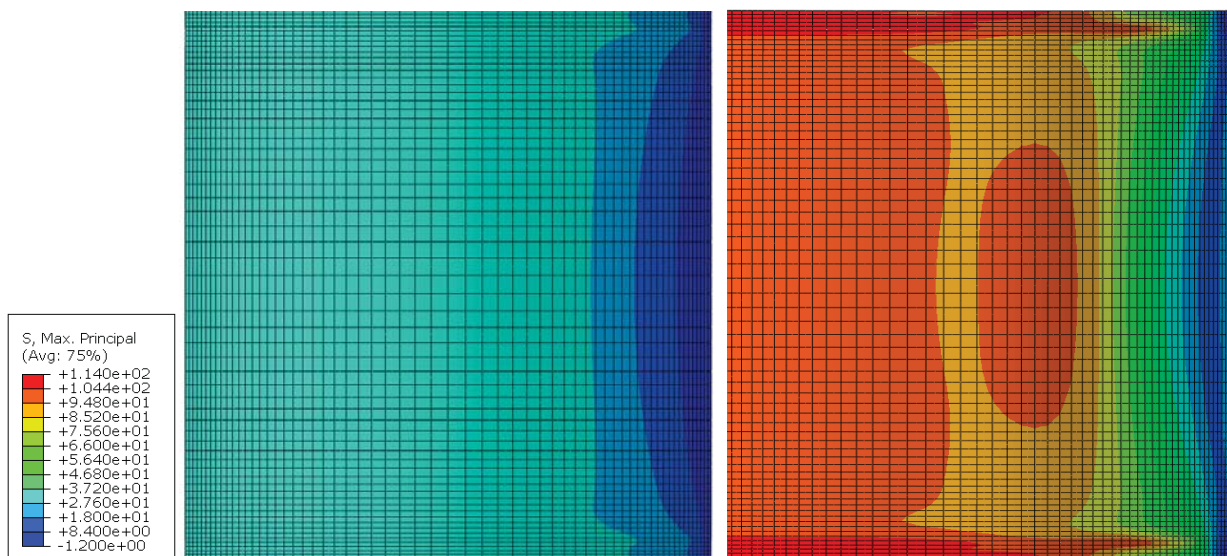


Abbildung 60: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $R=3\text{ m}$ (links) und $R=1\text{ m}$ (rechts)

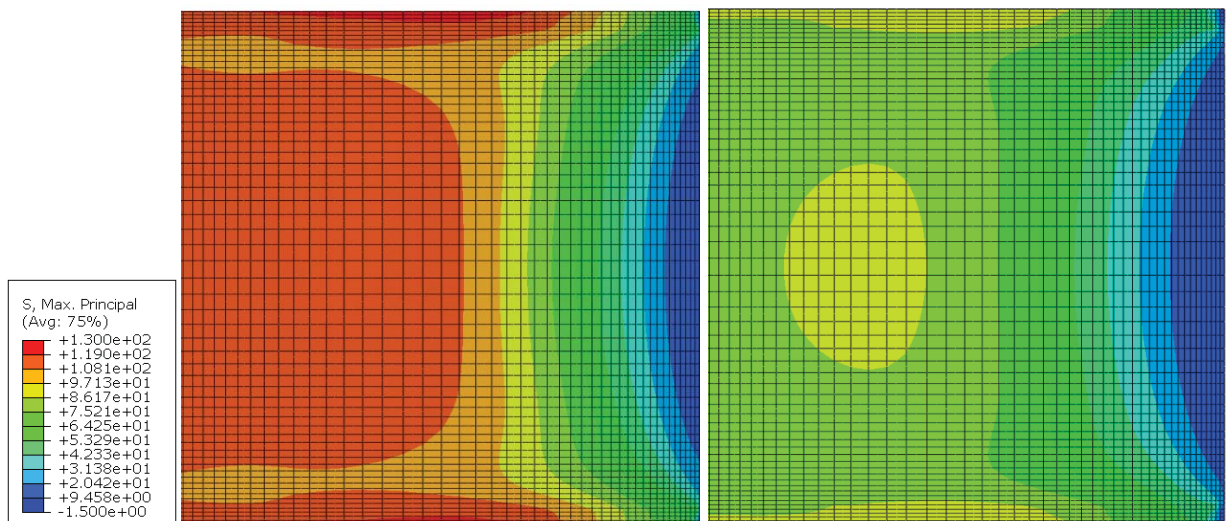


Abbildung 61: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $R=9\text{ m}$ (links) und $R=12\text{ m}$ (rechts)

4.1.4.2 Variation der Scheibenlänge - Serie 02

Basierend auf dem quadratischen Referenzmodell mit einer Seitenlänge von $1,5\text{ m}$, wird die Länge der Scheibe in Serie 02 von $0,5\text{ m}$ bis zu einer Länge von $2,5\text{ m}$ variiert. Diese Analyse ermöglicht es, den Einfluss des Länge-Breite-Verhältnisses zu untersuchen.

		R [m]	L [m]	B [m]	A [mm]	G [N/mm ²]
	REF	3.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 02	L_1	3.00	0.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	L_2	3.00	1.00	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	L_3	3.00	2.00	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	L_4	3.00	2.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Ergänzung	L_6	3.00	0.75	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	L_5	3.00	0.80	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	L_7	3.00	0.90	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	L_8	3.00	1.20	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40

Tabelle 11: Eigenschaften der in Serie 02 untersuchten Modelle

Zur Veranschaulichung der Proportionen in Serie 02 werden in Abbildung 62 die Scheibenabmessungen grafisch dargestellt.

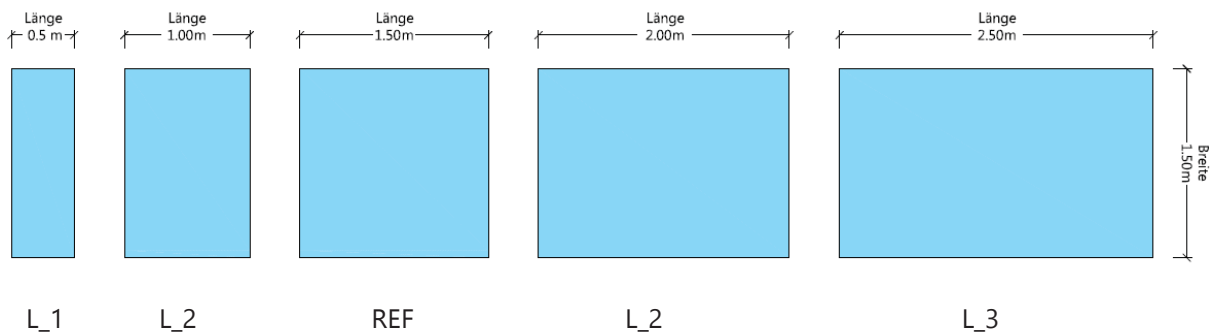


Abbildung 62: Skizzen der unterschiedlichen Scheibenlängen - Serie 02

Wie bereits erwähnt, ändert sich die Krümmung infolge der Längenänderung, bedingt durch den konstant bleibenden Radius, nicht (Abbildung 63).

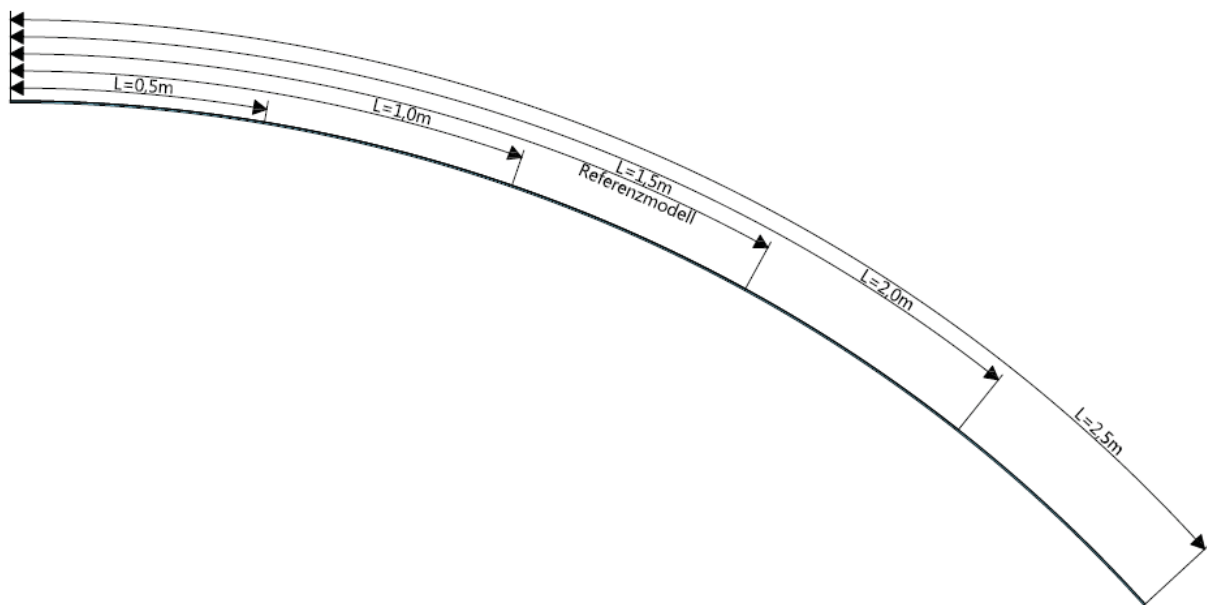


Abbildung 63: Skizzen der unterschiedlichen Scheibenlängen - Serie 02 (Schnitt)

Abbildung 64 zeigt den Zusammenhang zwischen der durch die Belastung hervorgerufenen z- Verschiebung und der erforderlichen Anpresskraft.

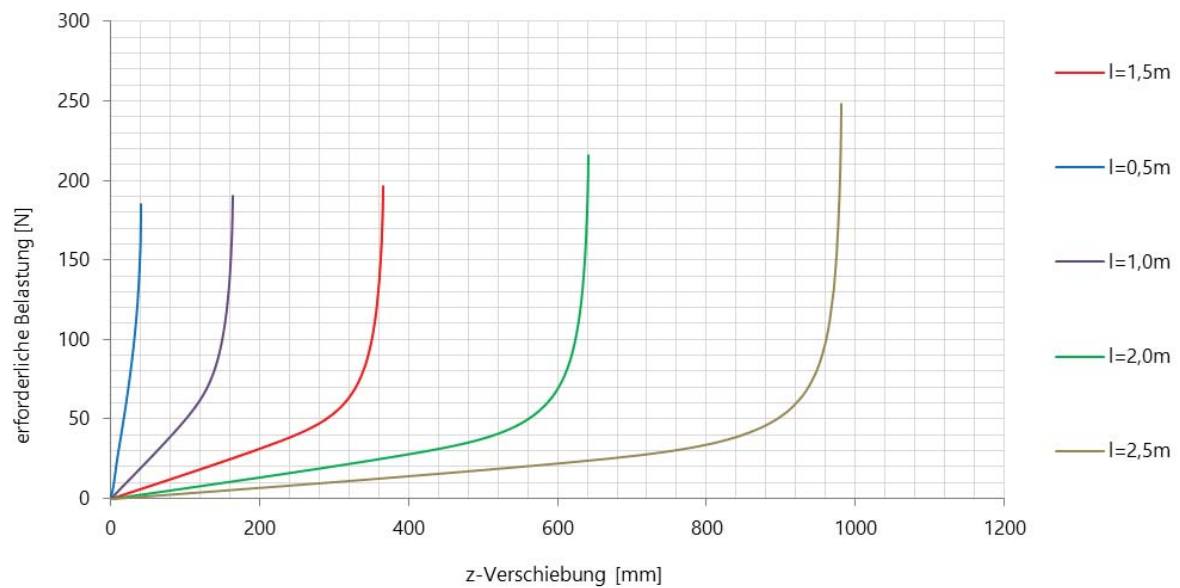


Abbildung 64: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 02

Es ist zu erkennen, dass die für den Kaltbiegeprozess erforderliche Kraft mit zunehmender Scheibenlänge (trotz gleichbleibender Krümmung) kontinuierlich ansteigt.

		K [N]	L [m]
Serie 02	REF	196.36	1.5
	L_1	185.03	0.5
	L_2	190.12	1.0
	L_3	215.79	2.0
	L_4	247.77	2.5

Tabelle 12: Erforderliche Kräfte für die einachsige Kaltverformung der Serie 02

Der in Abbildung 65 dargestellte Spannungsverlauf über die Glaslänge zeigt, dass im Modell mit einer Länge von 0,5 m im Bereich der Einspannung wesentlich geringere Spannungen auftreten als bei den anderen Modelle.

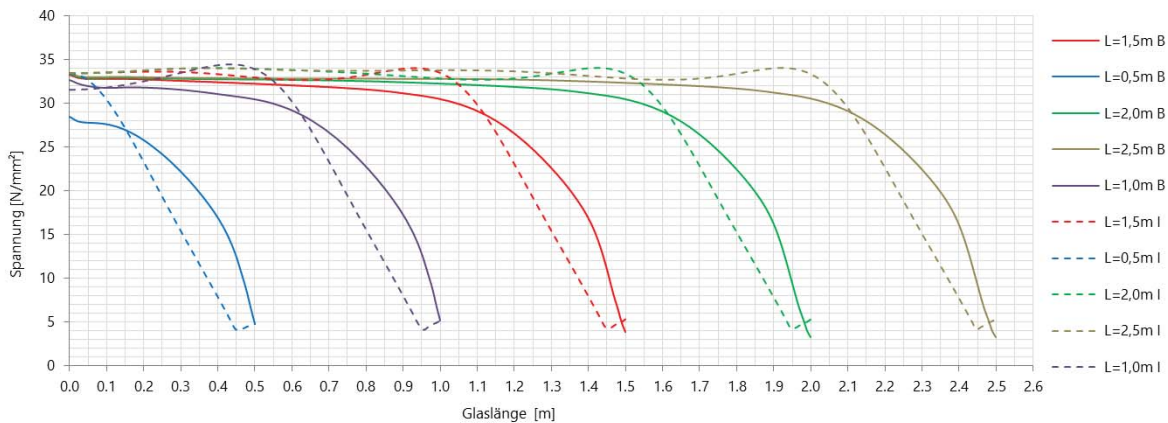


Abbildung 65: Hauptzugspannungen über die Länge im Endzustand der Biegung

Diese geringen Spannungen an der Einspannung im Bereich der Achse B lassen sich durch die in Abbildung 66 dargestellte Querbiegung am Symmetrielager erklären. Es ist zu erkennen, dass es bei einer Scheibenlänge von 0,5 bis 0,8 m zu einer synklastischen Krümmung im Bereich des Symmetrielagers kommt. Achse B befindet sich bei diesen Modellen dadurch genau in einer Zone, in der kein Zug durch die Querverformung auftritt.

Mit zunehmender Scheibenlänge beginnt sich jedoch eine antiklastische Verformung einzustellen, welche bei einer Scheibenlänge von ca. 1,0 m ihr Maximum erreicht. Anschließend reduziert sich diese Verformung wieder. Bis bei einer Länge zwischen 2,0 und 2,5 m, kaum noch ein Unterschied in der Querverformung am Symmetrielager feststellbar ist.

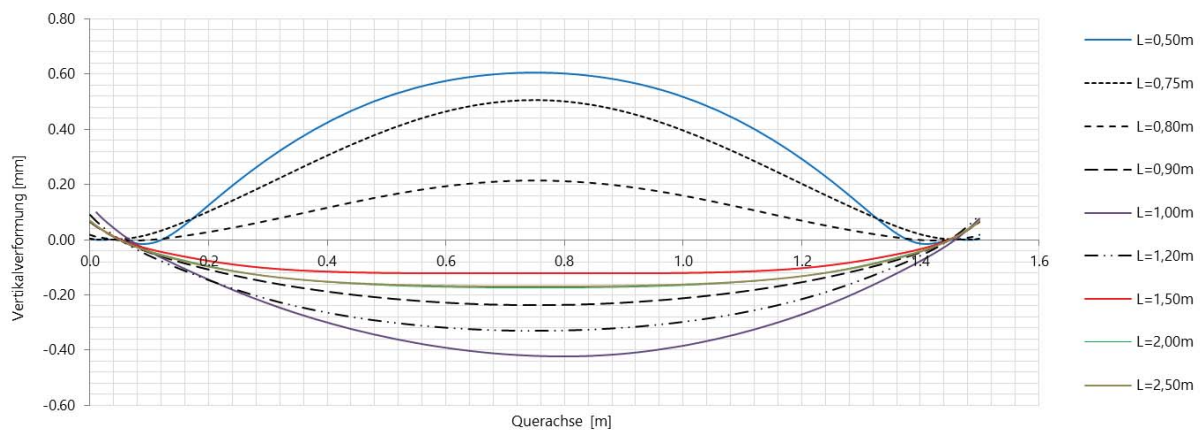


Abbildung 66: Querverbiegung Scheibenbeginn

Bedingt durch die Verlängerung der Scheiben kommt es zur Verschiebung der maximalen Querverformungen in positive x-Richtung. Um diesen Effekt veranschaulichen zu können, ist in Abbildung 67 die relative Verformung zwischen den Auflagern und der Scheibenmitte dargestellt. Es ist ersichtlich, dass es am Symmetrielager zu Unterschieden in der Krümmungsrichtung kommt. Diese Krümmungsunterschied verursachen die in Abbildung 65 ersichtlichen Spannungsabweichungen am Symmetrielager.

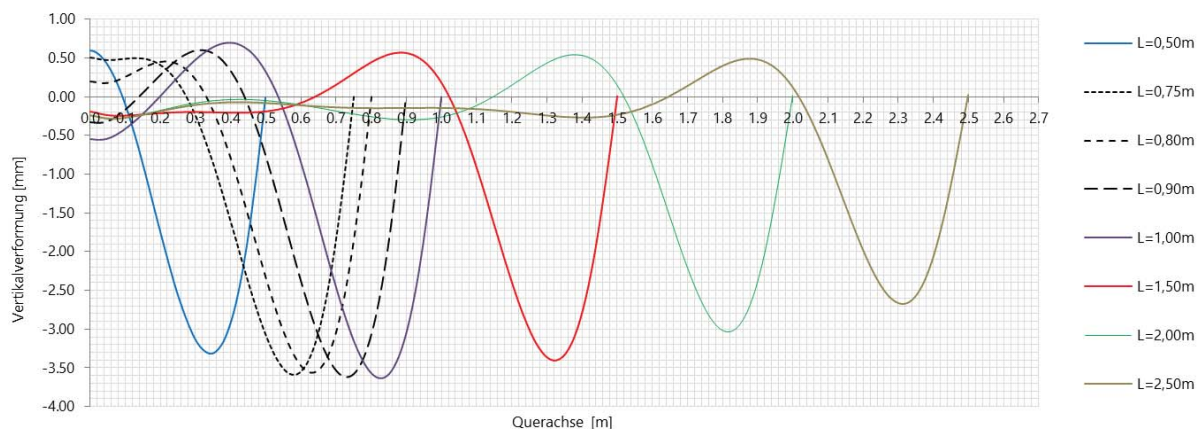


Abbildung 67: Relative Verformung zwischen dem Auflager und der Scheibenmitte

Da die Verlängerung der Scheibe mit gleichbleibendem Radius zu keiner Änderung der Krümmungen führt, kann beim Vergleich der maximalen Spannungen keine wesentliche Veränderung festgestellt werden.

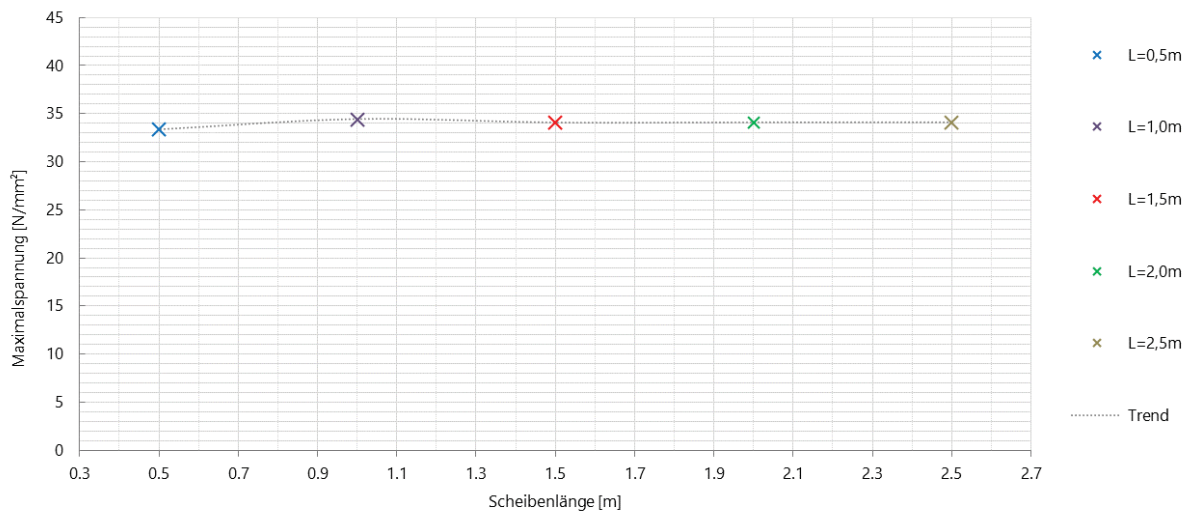


Abbildung 68: Maximale Hauptzugspannung infolge der Variation der Scheibendicke

Bezugnehmend auf das in [39] beschriebene Verhalten, dass es bei einer Verbreiterung der Scheibe zu einem früheren Abflachen des Spannungsverlaufes in der Scheibenmitte kommt, wird nachfolgend eine 3 m breite Scheibe mit dem Referenzmodell verglichen. Gleich wie in Abbildung 27 zeigt das breitere Modell grundsätzlich höhere Spannungen, um anschließend früher abzufachen.

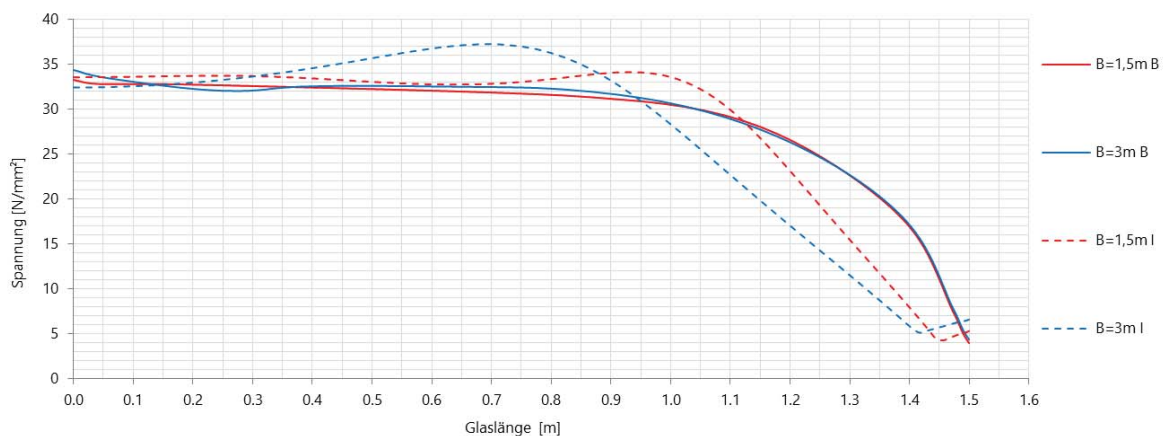


Abbildung 69: Vergleich der Hauptzugspannungen des Referenzmodelles mit einer 3 m breiten Scheibe

Abbildung 70 zeigt den Spannungsverlauf über die Oberfläche der obersten Glasscheibe, von den Modellen mit einer Länge von 0,5 und 1,0, im Vergleich mit dem 1,5 m langen Referenzmodell. Die beiden Modelle mit den Längen 2,0 und 2,5m sind in Abbildung 71 und Abbildung 72 dargestellt. Alle Abbildungen sind in der gleichen Farbskala dargestellt.

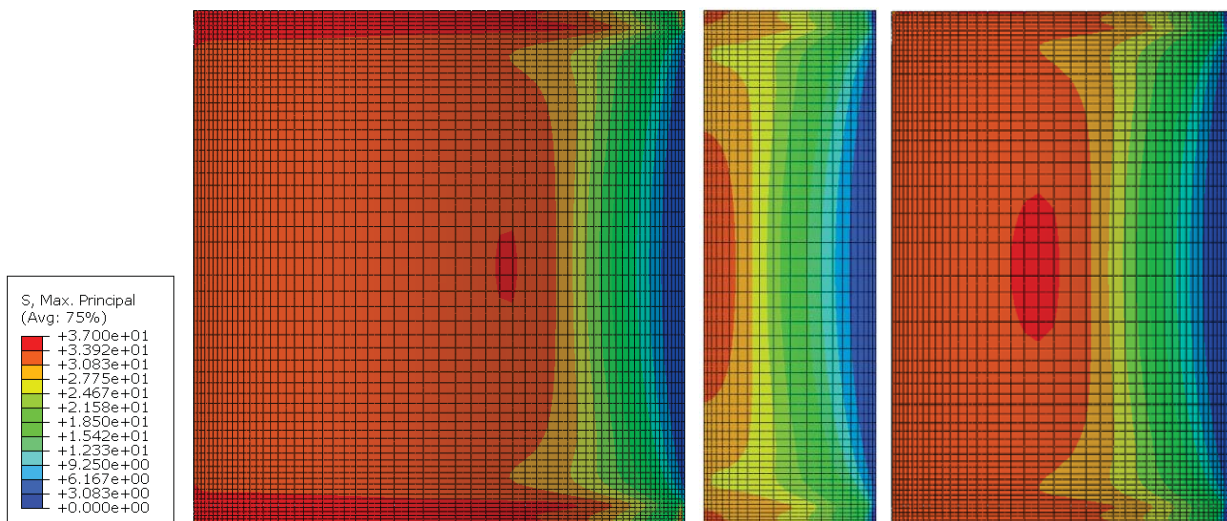


Abbildung 70: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: L=1,5m (links), L=0,5m (mittig) und L=1,0m (rechts)

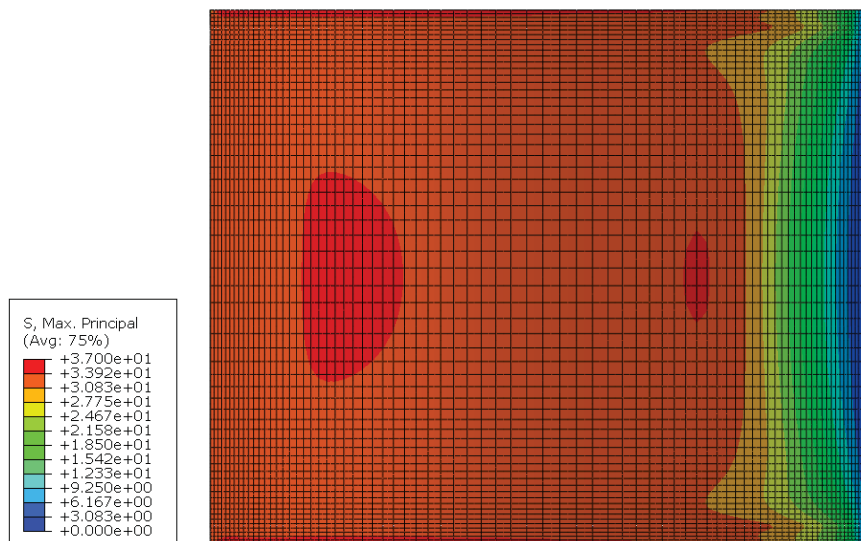


Abbildung 71: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: L=2,0m

Wie auch in den Spannungsverläufen ersichtlich, zeigt das Modell mit einem Radius von 9 m (Abbildung 71) keine signifikanten Unterschiede zum Spannungsverlauf des Modells mit einem Radius von 12 m (Abbildung 72).

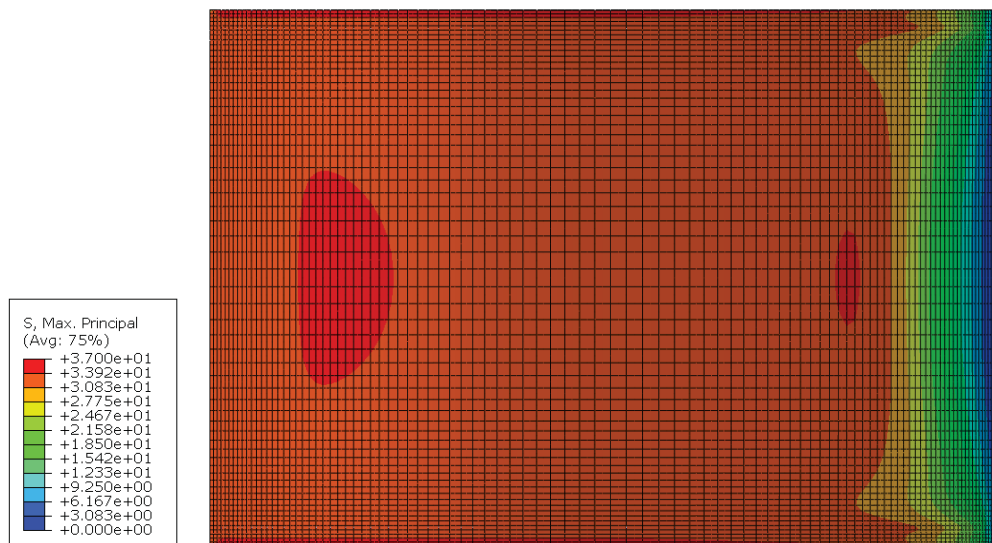


Abbildung 72: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: L=2,5m

4.1.4.3 Variation der Scheibendicke - Serie 03

In Tabelle 13 sind die untersuchten Modelle, mit den variierenden Scheibendicken, aufgelistet. Zur Veranschaulichung des Verhältnisses der Scheibendicke zur Dicke der Verbundfolie, sind die in Serie 03 untersuchten Aufbauten in Abbildung 73 dargestellt.

		R [m]	L [m]	B [m]	A [mm]	G [N/mm ²]
	REF	3.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 03	A_1	3.00	1.50	1.50	2.00 0.76 2.00	0.40
	A_1	3.00	1.50	1.50	3.00 0.76 3.00	0.40
	A_3	3.00	1.50	1.50	4.00 0.76 4.00	0.40

Tabelle 13: Eigenschaften der in Serie 03 untersuchten Modelle

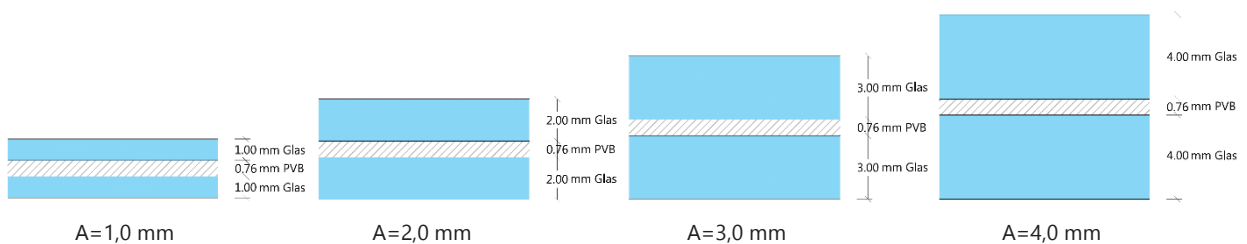
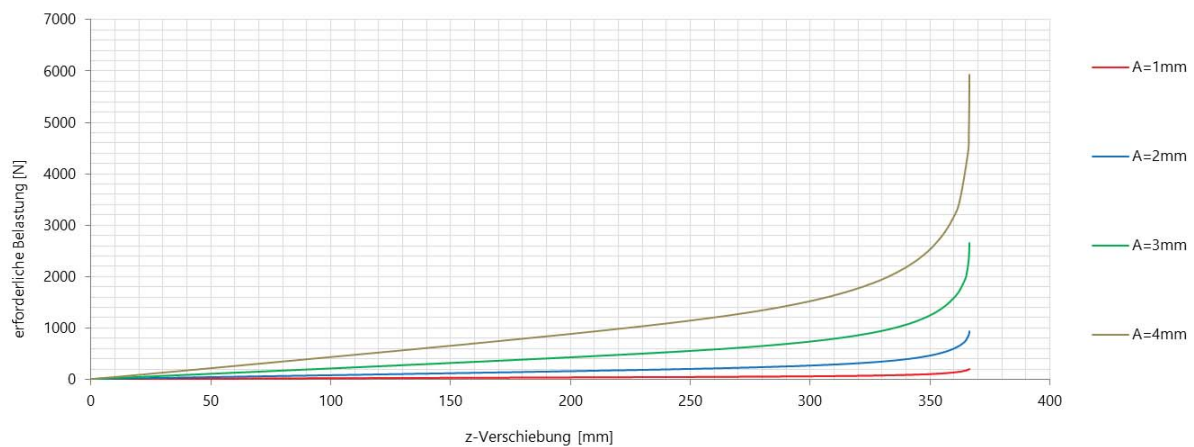


Abbildung 73: Skizzen der unterschiedlichen Glasdicken - Serie 03

Der Zusammenhang zwischen z-Verschiebung und der erforderlichen Anpresskraft ist in Abbildung 74 dargestellt.



r

Abbildung 74: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses

		K [N]	A [mm]
Serie 03	REF	196.36	1.00 0.76 1.00
	A_1	944.76	2.00 0.76 2.00
	A_2	2648.14	3.00 0.76 3.00
	A_2	5932.98	4.00 0.76 4.00

Tabelle 14: Erforderliche Kräfte für die einachsige Kaltverformung der Serie 03

Die tabellarische Auflistung zeigt, dass die Reaktionskraft mit zunehmender Scheibendicke, im Gegensatz zur Spannung, nicht linear ansteigt. Dieses Verhalten ist insbesondere bezüglich der erforderlichen Baustelleneinrichtung beim in-situ Verformen von Bedeutung.

Abbildung 75 zeigt den Spannungsverlauf der Serie 03 mit ansteigender Scheibendicke. Wie auch die Spitzenspannungen (Abbildung 76), zeigen die Verläufe mit zunehmender Scheibendicke einen gleichmäßigen Spannungsanstieg.

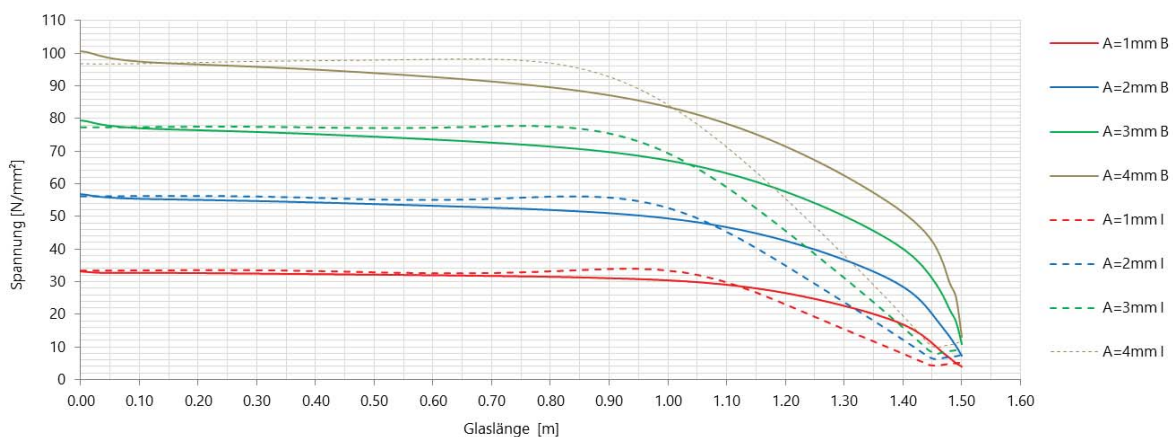


Abbildung 75: Hauptzugspannungen über die Länge im Endzustand der Biegung

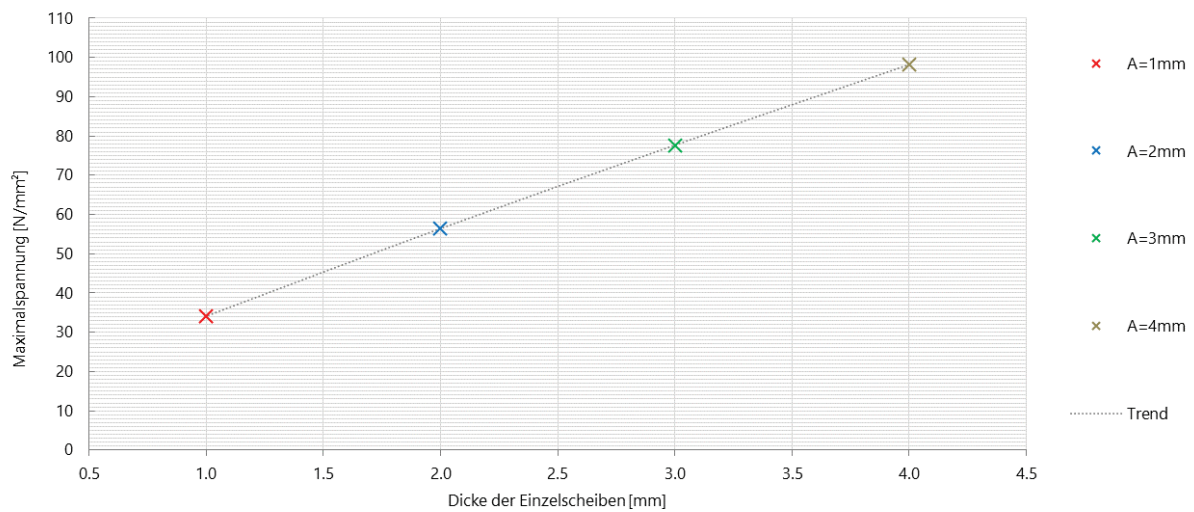


Abbildung 76: Maximale Hauptzugspannung zufolge der Variation der Scheibendicke

Besonders bei einer Glasscheibendicke von 4,0 mm tritt der erneute Spannungsanstieg auf der Mittelachse zwischen 0,40 und 0,70 m zum Vorschein. Dieser ist in den Abbildungen der Oberflächenspannungen aufgrund der einheitlichen Farbskalierung nicht explizit ersichtlich (Abbildung 78).

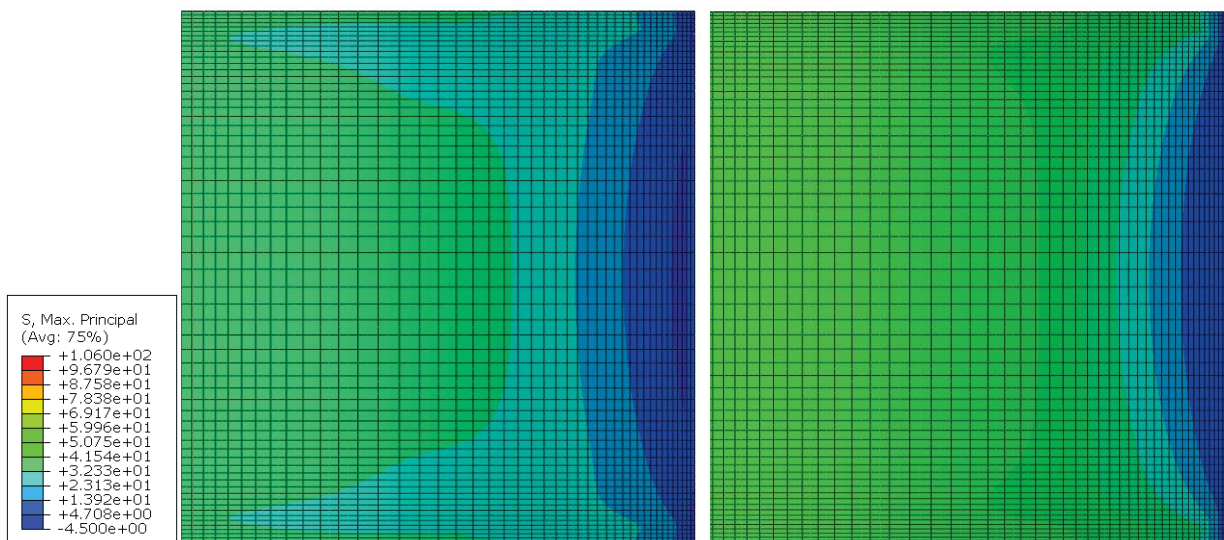


Abbildung 77: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: A=1,0 mm (links) und A=2,0 mm (rechts)

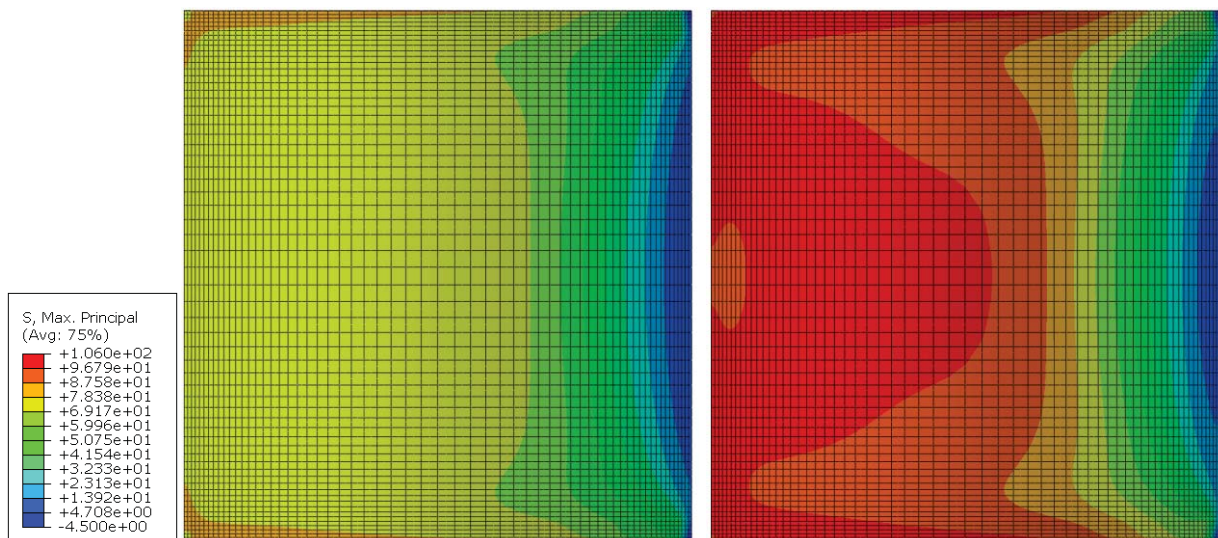


Abbildung 78: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: $A=3,0\text{ mm}$ (links) und $A=4,0\text{ mm}$ (rechts)

Um den Einfluss der Scheibendicke auf die Tragfähigkeit der Scheibe unter Winddruck abschätzen zu können, werden die Spannungen infolge einer Flächenlast analysiert. Um eine Möglichste realistische Annahme zu treffen, wird der Winddruck im Zuge der Finite Elemente Analyse mit dem Befehl „Pressure“ aufgebracht. Die Verwendung dieses Befehls bewirkt, dass die Last während der gesamten Analyse (in allen Lastschritten) im Rechtenwinkel auf die Scheibe wirkt.

Für die Modellbildung dieses Belastungsschrittes wird vereinfacht die Unterkonstruktion vernachlässigt. Stattdessen wird die Scheibe in der verformten Position, durch die in Abbildung 79 skizzierten Auflagerbedingungen, fixiert und anschließend normal zur Oberfläche mit einer Flächenlast von $1,0\text{ kN/m}^2$ belastet. Die symmetriebedingten Auflager aus der Skizze in Abbildung 79 bleiben erhalten.

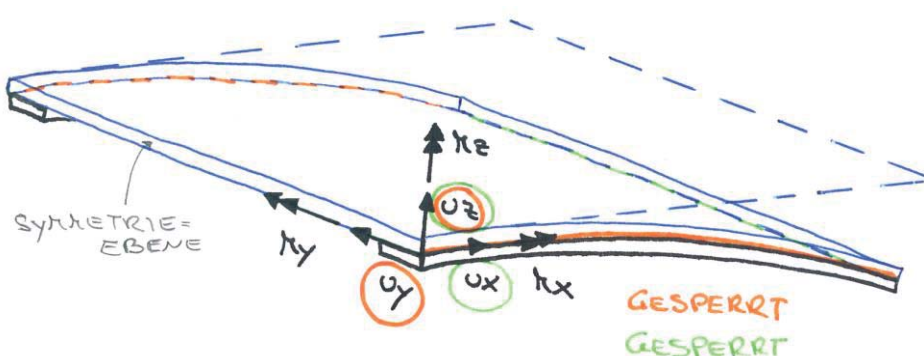


Abbildung 79: Skizze der Auflagerbedingungen der flächig druckbelasteten Scheibe

Die Auswertung in Abbildung 80 dokumentiert den Spannungsanstieg in der Scheibenmitte und in Achse B, zufolge eines Oberflächendruckes von $1,0\text{ kN/m}^2$. Entsprechend der Lage von Achse B, (5 cm neben dem inneren Rand des Auflagers) ist der Einfluss der Druckbelastung an dieser Stelle wesentlich geringer als in Feldmitte. Dennoch kann anhand des Diagrammes gezeigt werden, dass es bereits in diesem Bereich zu einem lastbedingten Spannungsanstieg kommt. Bis zu einem

Belastungswert von $0,5 \text{ kN/m}^2$ kommt es an der Mittelebene zu einem eher gleichmäßigen wachen der Hoch- und Tiefpunkte. Im Endzustand der Belastung treten an der Mittelebene signifikante Spannungsspitzen bei einer Länge von $0,27 \text{ m}$ und $0,9 \text{ m}$ auf.

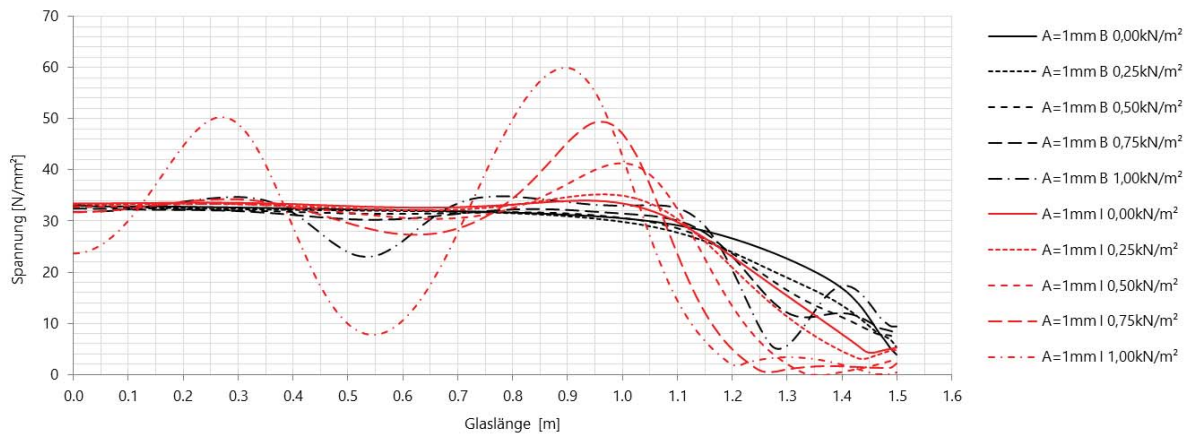


Abbildung 80: Spannungsentwicklung zufolge der steigenden Druckbelastung, A=1mm

In Abbildung 81 ist die relative Querverformung zwischen dem Auflager und der Scheibenmitte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich speziell bei den Längen $0,27 \text{ m}$ und $0,88 \text{ m}$, mit steigender Belastung Hochpunkte ausbilden. In diesen Bereichen treten zufolge der Flächenbelastung auch die Spannungsspitzen auf. Bei einer Länge ca. $0,55 \text{ m}$ tritt ein Tiefpunkt auf, welcher sich im Spannungsverlauf mit einem signifikanten Spannungsabfall widerspiegelt.

Im Zuge der Analyse des hier ersichtlichen Verformungsverhaltens müssen die bereits während des Kaltbiegens im Glas entstandenen Voränderungen als Vorverformung betrachtet werden. Die anschließend, infolge hoher Druckbelastung, entstehenden großen Verformungen lassen sich mit dem Schalenbeulen zylindrischer Querschnitte vergleichen. Bei einem durch einen Oberflächendruck belasteten Zylinder kommt es vor dem Ausbeulen nur zu sehr geringen Verformungen. Wird jedoch die kritische Last erreicht, tritt eine abrupte Verformung auf. Dieser Zeitpunkt wird bei dem Modell mit einer Dicke von $1,0 \text{ mm}$ im Bereich zwischen einer Belastung von $0,25$ und $0,50 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Die stetig rechtwinklig wirkende Flächenlast verstärkt die lastbedingten Verformungen, mit steigendem Druck, zusätzlich.

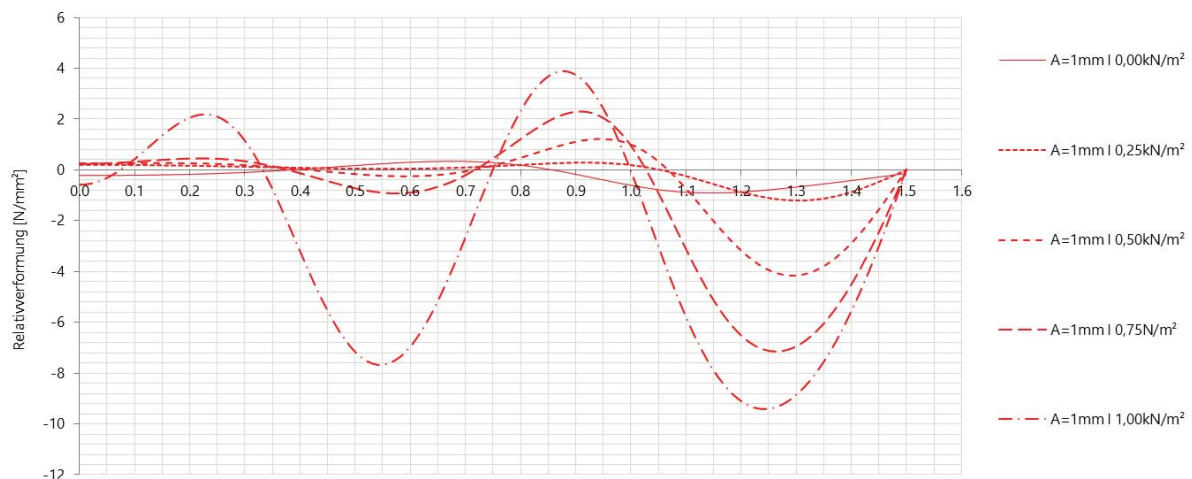


Abbildung 81: Relativverformung zwischen dem Auflager und der Scheibenmitte, A=1mm

Vergleicht man die Modelle mit den unterschiedlichen Glasstärken, so kann festgestellt werden, dass mit abnehmender Scheibendicke die Auswirkungen einer Druckbelastung, stark zunehmen. Abbildung 82 zeigt den Spannungsverlauf des verformten Systems bei 0% Druckbelastung im Vergleich zu 100% Druckbelastung (1,0 kN/m²).

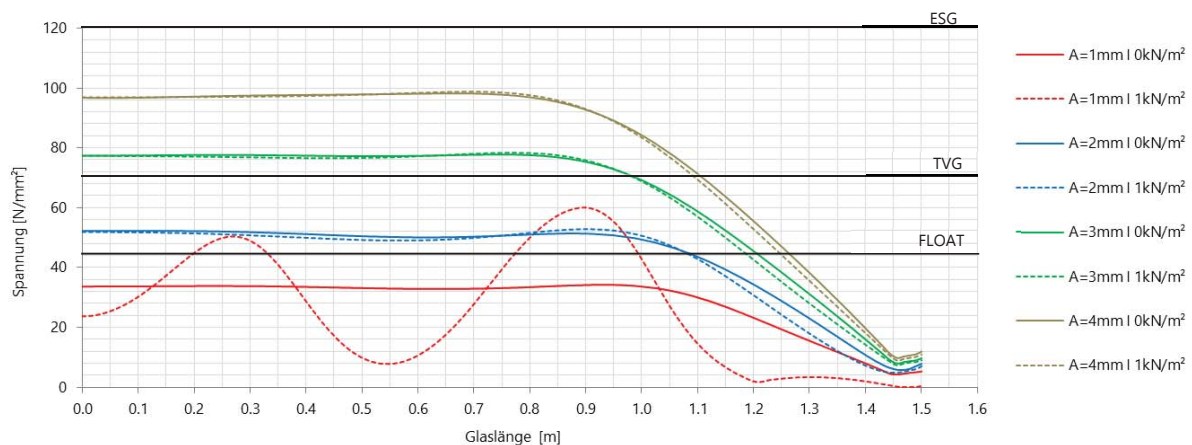


Abbildung 82: Entwicklung der Hauptzugspannungen für die Serie 03, zufolge einer Druckbelastung

Um einen vergleichbaren Effekt bei der Scheibe mit Glasstärken von 2 mm erzeugen zu können, wird bei diesem Modell eine zusätzliche Laststeigerung bis 6,0 kN/m² untersucht.

Es kann gezeigt werden, dass die starken, verformungsbedingten Spannungsschwankungen bei Paketen mit 2 mm dicken Glasscheiben bei einer Belastung von über 2,0 kN/m² auftreten (siehe Abbildung 83).

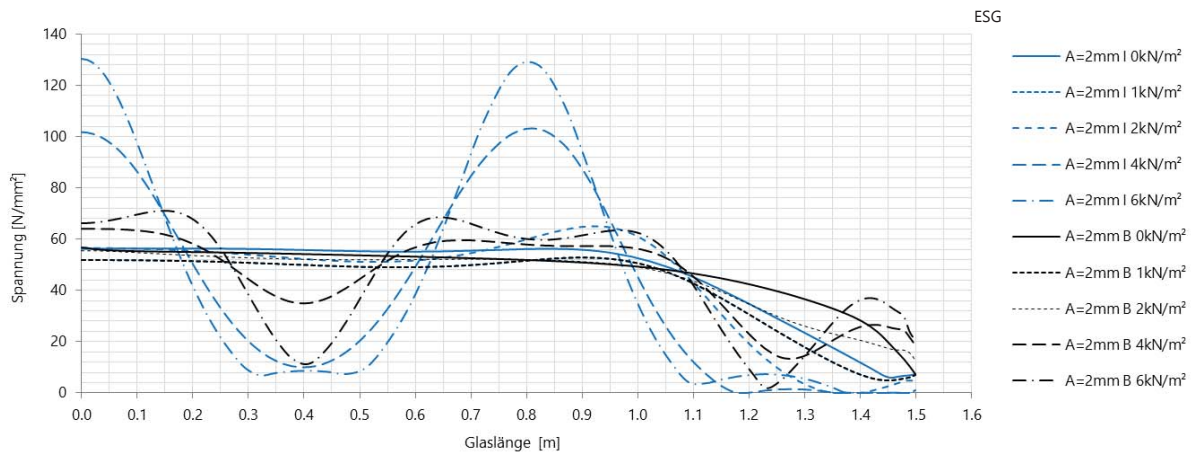


Abbildung 83: Spannungsentwicklung zufolge Druckbelastung, A=2mm

Abbildung 84 zeigt eine Gegenüberstellung der Oberflächenspannungen, infolge der Druckbelastung von $1,0 \text{ kN/m}^2$, zwischen dem Referenzmodell und dem Modell mit Glasstärken von 4 mm. Analog der Auswertung im Diagramm, zeigen die Farbverläufe die starken Spannungsschwankungen beim Modell mit Scheibendicke von 1 mm und einer 0,76 mm dicken Verbundfolie.

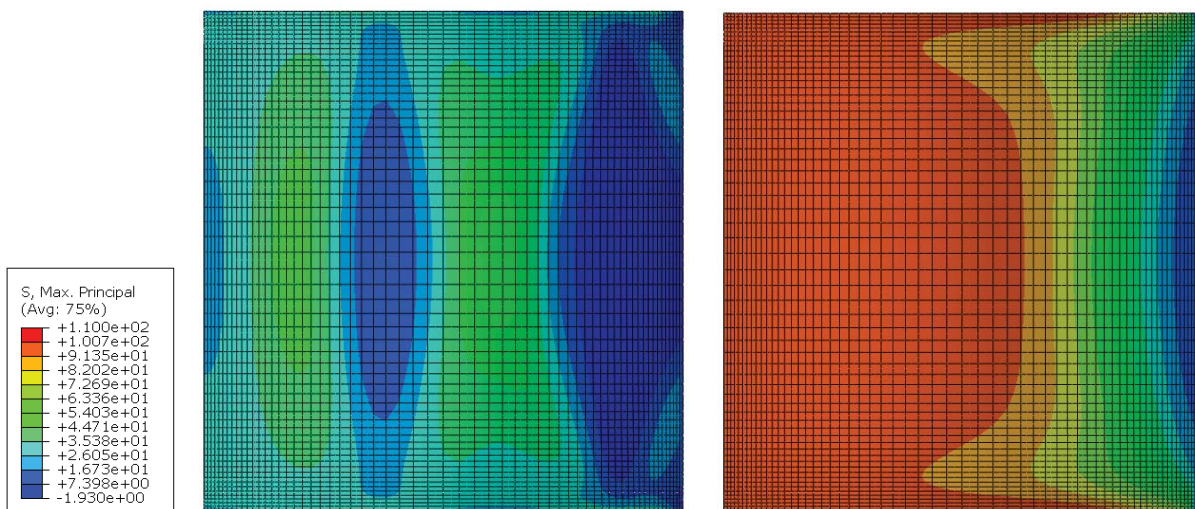


Abbildung 84: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche zufolge Druckbelastung: Referenzmodell (links) und A=3 mm (rechts)

Die in Abbildung 85 dargestellten Graphen zeigen die Durchbiegung der Mittelachse im Vergleich zu den gekrümmten Auflagern. Es ist zu erkennen, dass die Verformungen zufolge der Druckbelastung von $1,0 \text{ kN/m}^2$ bei steigender Scheibendicke sukzessive abnimmt.

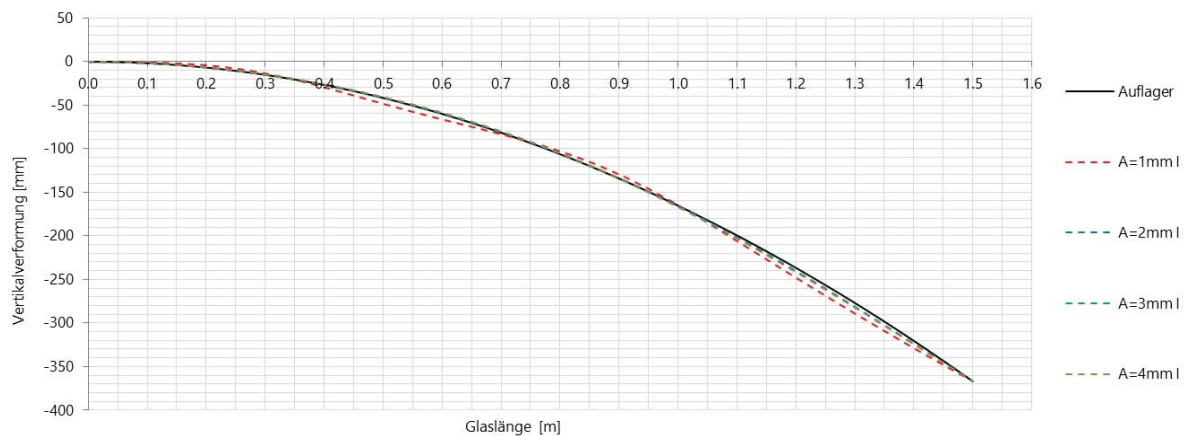


Abbildung 85: Änderung der Vertikalverformung an der Mittelachse zufolge Druckbelastung

4.1.4.4 Variation des Schubmoduls der Verbundfolie - Serie 04

Tabelle 15 zeigt die in Serie 04 untersuchten Modelle mit dem jeweils dazugehörigem Schubmodul. Dieser wird immer um eine Zehnerpotenz gesteigert, bzw. abgemindert.

		R [m]	L [m]	B [m]	A [mm]	G [N/mm ²]
	REF	3.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 04	G_1	3.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.04
	G_2	3.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	4.00
	G_3	3.00	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	40.00

Tabelle 15: Eigenschaften der in Serie 04 untersuchten Modelle

Wie bereits einleitend erwähnt, werden die Belastungsgeschwindigkeit und der Einfluss der Temperatur im numerischen Modell nicht berücksichtigt. Um dennoch den Einfluss der Schubsteifigkeit der Verbundfolie auf das Tragverhalten des gesamten Pakets erfassen zu können, wird der Schubmodul der Folie in der Parameterstudie zwischen 0,04 und 40 N/mm² variiert.

Der mit zunehmender Schubmodul steigende, erforderliche Anpressdruck für den Kaltbiegeprozess ist in Abbildung 86 dargestellt. Durch diese Auswertung kann gezeigt werden, dass sich die beiden Modelle mit den Schubsteifigkeiten der Verbundfolie von 4 und 40 N/mm², bis zu einer z-Verschiebung von ca. 300 mm beinahe ident verhalten. Die anschließend auftretenden minimalen Unterschiede sind in Abbildung 86 schwer erkenntlich, verursacht jedoch die erhebliche Differenz im Maximalwert.

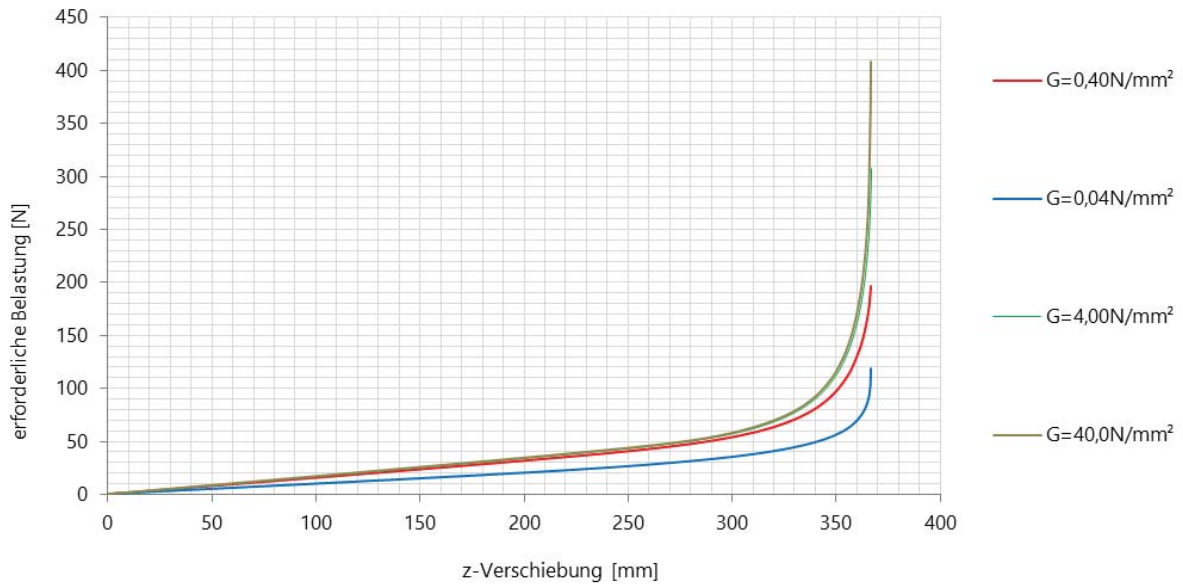


Abbildung 86: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 04

		K [N]	G [N/mm ²]
	REF	196.36	0,40
Serie 43	G_1	944.76	0,04
	G_2	2648.14	4,00
	G_2	5932.98	40,0

Tabelle 16: Erforderliche Kräfte für die einachsige Kaltverformung der Serie 04

In Abbildung 87 ist ersichtlich, dass eine Steigerung des Schubmoduls zur Verschiebung der Spannungsspitze in Längsrichtung führt. Im Nahbereich der freien Kante (~1,30 bis ~1,50 m) kommt es auf der Achse B zu einem steilen Spannungsabfall, wohingegen der Spannungsabfall von G1 zwischen ~0,2 und ~1,30 m nahezu linear ist.

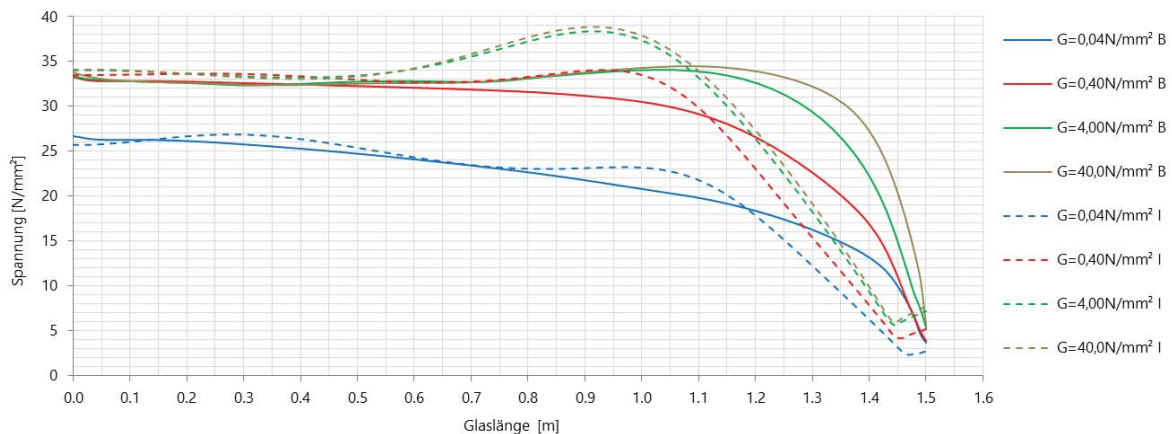


Abbildung 87: Hauptzugspannungen über die Länge im Endzustand der Biegung

In Abbildung 88 ist ersichtlich, dass eine Erhöhung des Schubmoduls von 0,04 auf 4 N/mm² einen erheblich größeren Einfluss auf die maximale Hauptzugspannung hat als die Steigerung von 4 auf 40 N/mm².

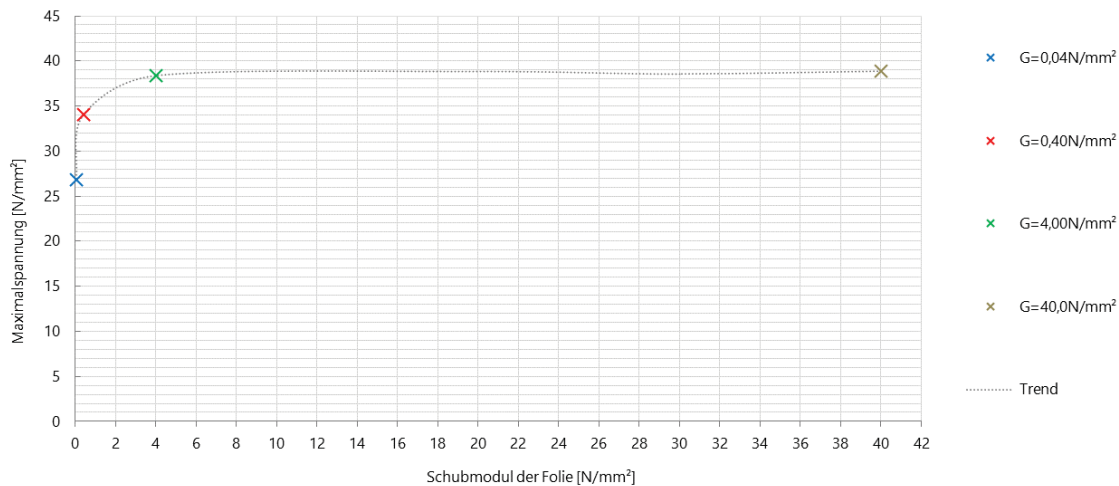


Abbildung 88: Maximale Hauptzugspannung infolge der Variation des Schubmoduls der Verbundfolie

Der in Abbildung 90 bei den Modellen mit einem Schubmodul von 4,0 und 40,0 N/mm² in Scheibenmitte deutlich ersichtliche Spitzenspannungsbereich bei einer Länge von 0,7 bis 1,2 m, konnte bereits im Zuge der Auswertungen der Spannungsverläufe in Abbildung 87 festgestellt werden.

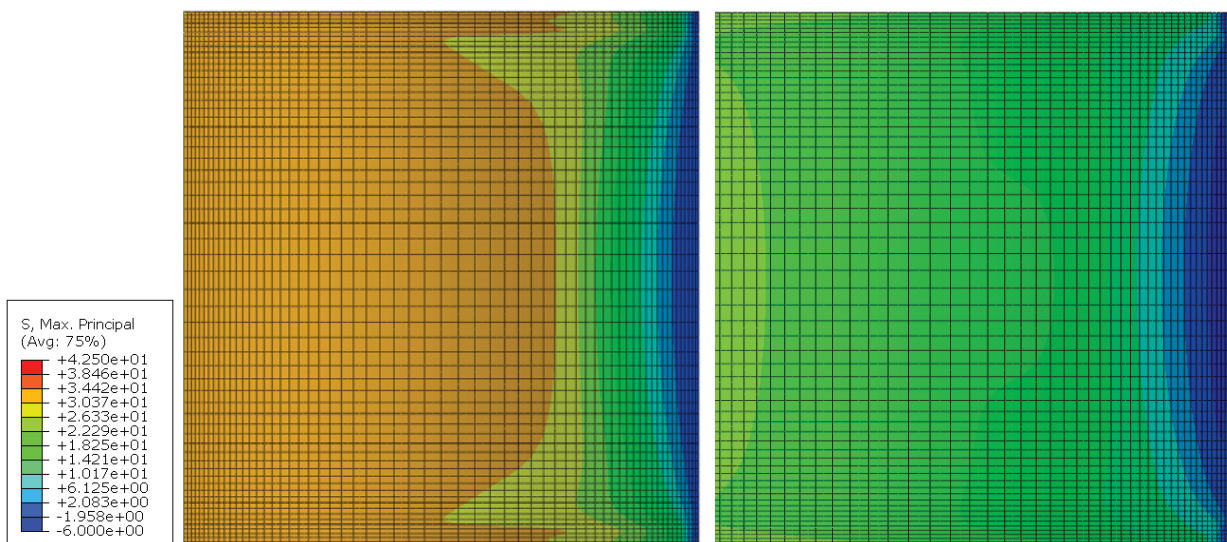


Abbildung 89: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell G=0,40N/mm² (links) und G=0,04N/mm² (rechts)

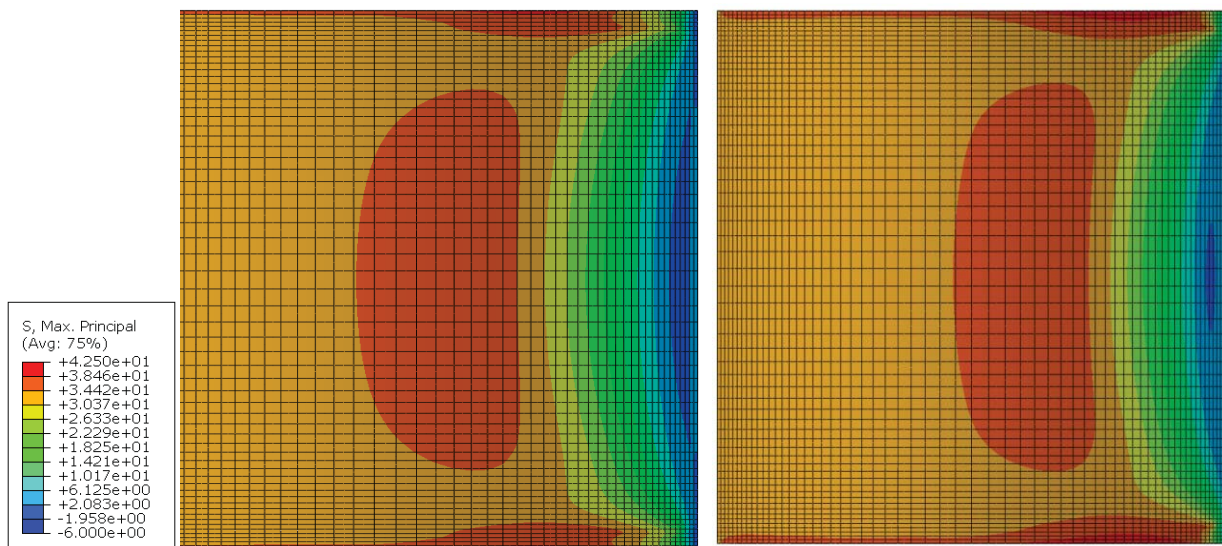


Abbildung 90: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $G=4,00\text{N/mm}^2$ (links) und $G=40,0\text{N/mm}^2$ (rechts)

4.1.4.5 Einfluss der Querverformung

In Abbildung 91 und Abbildung 92 ist eine Gegenüberstellung der maximalen Querverformungen der einzelnen Parameterserien dargestellt. Die Auswirkungen des variierenden Radius werden aufgrund des steigenden Einflusses der x-Verformung, bedingt durch die Krümmungsänderung, gesondert betrachtet.

Die Veränderung der Querverformung, aufgrund der Zunahme der Scheibendicke, zeigt als Konsequenz eine Erhöhung der Durchbiegung in Scheibenmitte (Abbildung 91). Daraus resultiert ein stärkeres Abheben der Scheibe am äußeren Auflagerrand. Dieser Effekt muss hinsichtlich der Anwendung in der Praxis, in Bezug auf Verklebungen und Dichtigkeitsprobleme, berücksichtigt werden.

Bezüglich der Bogenlänge zeigt sich in Abbildung 91, dass das Modell mit einer Länge von 2,0 m und 2,5 m trotz gleichbleibender Krümmung eine geringere Querverformung aufweisen.

Der Bereich der maximalen Querverformung tritt, mit Ausnahme der Serie 02 (Längenvariation), jeweils im Längenbereich zwischen 1,23 und 1,36 m auf.

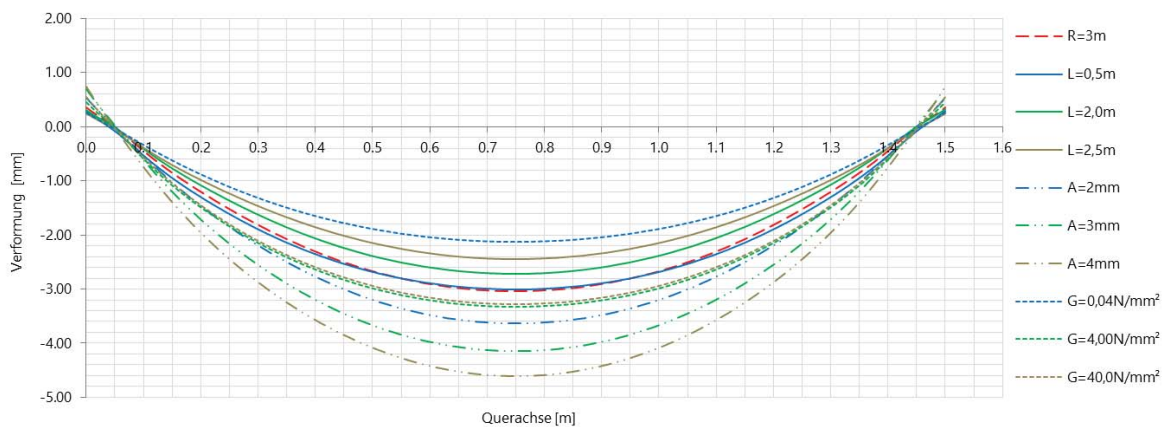


Abbildung 91: Vergleich der maximalen Querverformung von Serie 01 und Serie 02 mit dem Referenzmodell

Bei den in Abbildung 92 dargestellten Verformungen handelt es sich um Überlagerungen aus z- und x-Verformung. Da mit zunehmender Krümmung der Einfluss der x-Verformung steigt, kann dieser bei einem Radius von 1 m nicht mehr vernachlässigt werden. Der Vergleich zwischen der reinen z-Verformung und der überlagerten Querverformung des Referenzmodells zeigt, dass die Unterschiede bei einem Radius von 3 m im Bereich von 0,2 mm liegen und somit einen geringen Einfluss haben.

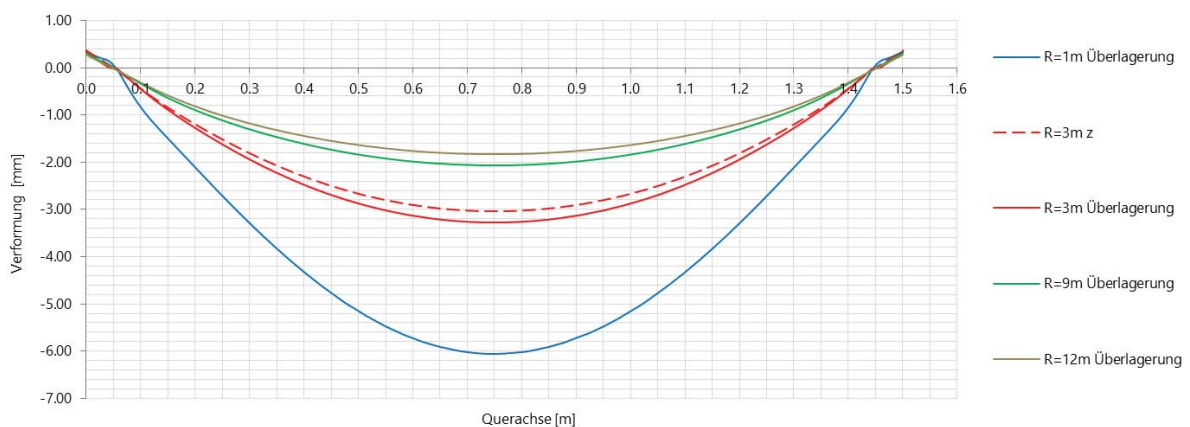


Abbildung 92: Vergleich der maximalen Querverformung von Serie 03 und Serie 04 mit dem Referenzmodell

4.2 Zweiachsige Biegung

Ähnlich wie in [43] werden in dieser Studie die infolge biaxialer Biegung entstehenden Spannungen einer rechteckigen Scheibe untersucht. In der Ausgangslage wird die Scheibe an vier Punkten gehalten. Die Krümmung, wird durch Verschieben eines Punktes, rechtwinklig zur Scheibenebene, erzeugt. Die anderen drei Punkte sind in der Ausgangslage fixiert.

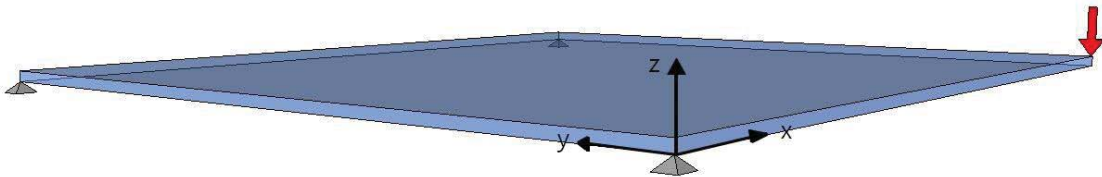


Abbildung 93: Modellskizze der zweiachsigen Biegung

4.2.1 Formgebung

Analog der Last im einachsigen Modell, wird die Verformung über eine weggesteuerte Veränderung der z-Position generiert. Im Zuge des Verformungsprozesses ergibt sich, unter Berücksichtigung der Theorie 3.Ordnung, die genaue x- und y-Endposition der belasteten Ecke (Abbildung 94, Punkt 3).

Die Lagerung erfolgt lokal an den Eckpunkten 1, 2 und 4. Abbildung 94 zeigt eine Systemskizze der in x-, y- und z-Richtung unverschieblich gelagerten Auflagerpunkte. Die Belastung (z- Verschiebung) wird im Eckpunkt Punkt 3, an der Oberseite der obersten Glasscheibe aufgebracht.

In der Finite Elemente Simulation beschränkt sich der Lasteinleitungsbereich auf einen Knoten des Eckelements. Diese Vereinfachung verursacht lokale Spannungsspitzen, die in der Realität, durch die Lasteinleitung über eine weiche Zwischenschicht, entschärft werden können.

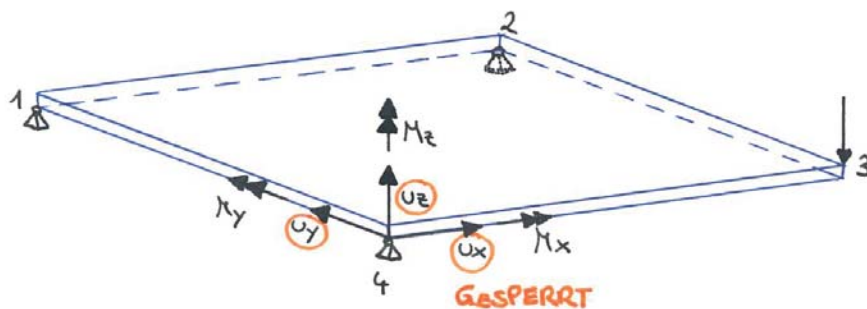
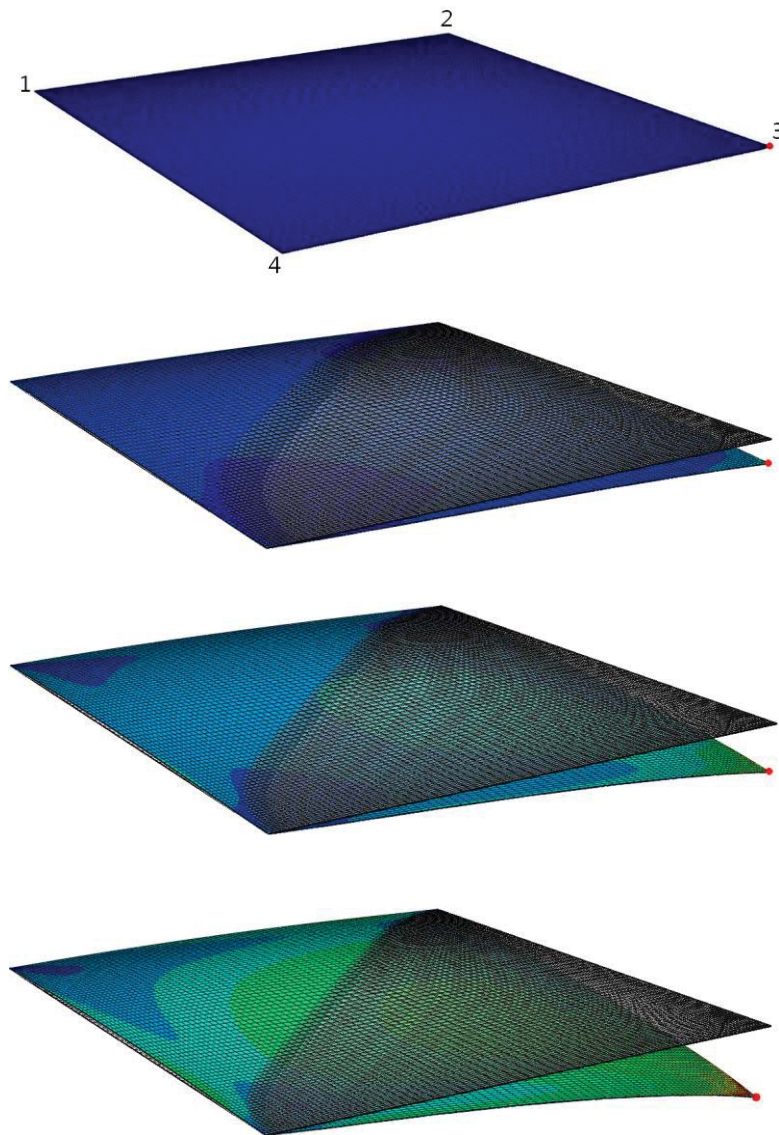


Abbildung 94: Skizze der Auflagerbedingungen der unterstützten und der belasteten Ecken

Gleich wie beim einachsigen Biegen wird von einer quadratischen Scheibe mit einer Seitenlänge von 1,5 m ausgegangen. Die Krümmung der Referenzscheibe wird durch eine z-Verschiebung, des Eckpunktes 3, von 200 mm verursacht.

In den nachfolgenden Abbildungen ist der Verlauf eines Belastungszyklus anhand mehrerer Zwischenschritte dargestellt.



Die Lagerung der Scheibe erfolgt, wie bereits erwähnt, an den unteren Eckpunkten, die Lastaufbringung über eine Verschiebung der oberen, hier rot markierten, Ecke.

Bereits bei sehr geringen Verformungen stellt sich an der Achse zwischen Punkt 2 und 4 eine antiklastische Verformung ein.

Die zunehmende Belastung bewirkt eine stärkere Krümmung der Scheibe in positive z-Richtung zum Auflagerpunkt 1 hin.

In der Endposition der Biegung kommt es, bedingt durch die direkte Lasteinleitung bzw. Lagerung, zu lokalen Spannungsspitzen an den Eckpunkten. Die absoluten Maxima werden in den Auflagerpunkte 2 und 4 erreicht.

Abbildung 95: Spannungsbilder im Laufe des Verformungsprozesses

4.2.2 Eingabeparameter

Die Abmessungen, der Aufbau und die Materialkennwerte der einzelnen Serien werden, wie in Tabelle 17 ersichtlich, ähnlich mit denen der einachsigen Biegung gewählt.

Für die Definition der Krümmung des zweiachsigen Biegens wird jedoch, anstelle des Radius, der Betrag der z-Verschiebung des Lasteinleitungspunktes gewählt. Darüber hinaus verursacht die Modifikation der Scheibenlänge bei gleichbleibender z-Verschiebung, ähnlich wie bei Serie 01 die Änderung des Radius, eine Krümmungsänderung.

		Z [mm]	L [m]	B [m]	A [mm]	G [N/mm ²]
	REF 02	200	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 05	z_1	300	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	z_2	400	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	z_3	500	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 06	l_1	200	0.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	l_2	200	2.00	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	l_3	200	2.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 07	a_1	200	1.50	1.50	2.00 0.76 2.00	0.40
	a_2	200	1.50	1.50	3.00 0.76 3.00	0.40
	a_3	200	1.50	1.50	4.00 0.76 4.00	0.40
Serie 08	g_1	200	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.04
	g_2	200	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	4.00
	g_3	200	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	40.00

Tabelle 17: Parameter und Aufbauten der einzelnen Serien

Krümmung

Die Krümmung wird beim zweiachsigen Biegen durch eine reine z-Verschiebung des Eckpunktes 3 generiert. Von Interesse sind die daraus resultierenden Spannungen und Verformungen über die Diagonalen.

4.2.3 Referenzmodell

Die Netzfeinheit des Modells für die Untersuchung des zweiachsigen Biegens wird ähnlich dem für die Untersuchung des einachsigen Biegens gewählt. Lediglich die maximalen Abmessungen der Maschen werden von 50 mm auf 30 mm herabgesetzt. Diese Verfeinerung verursacht, durch die erhöhte Dichte an Auswertungspunkten, gleichmäßigere Verläufe in den Ergebnisdiagrammen. Zudem wird bei den Modellen mit starker Krümmung oder erhöhter Scheibendicke die Maschenstruktur der Verbundfolie über die Dicke verfeinert. Auf die Erstellung einer separaten Konvergenzstudie wird verzichtet.

In Abbildung 96 ist die Beschriftung der auswertungsrelevanten Achsen dargestellt.

Die Achsbeschriftung des Modells für einachsiges Biegen (Abbildung 96 links) bleibt in Längs- und Querrichtung ident. Diagonal wird diese, um die mit X und Y gekennzeichneten Achsen, erweitert (Abbildung 96 rechts). Der Eckpunkt 3 kennzeichnet die Position der Lastaufbringung.

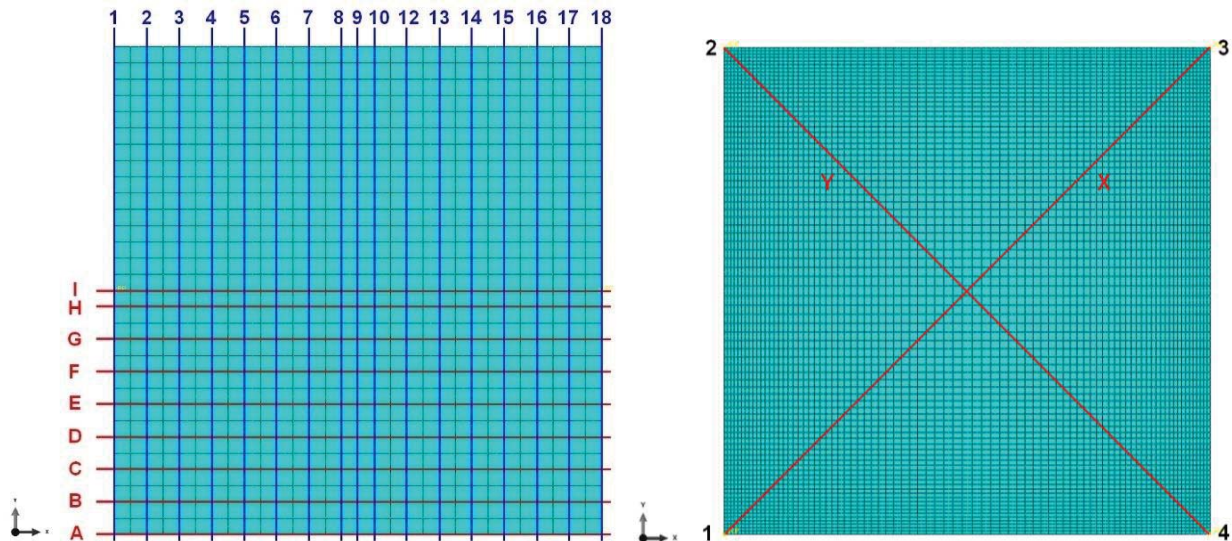


Abbildung 96: Achsenbeschriftungen

Beim Krümmen von Freiformflächen beeinflusst das verformungsweiche Materialverhalten von dünnen Glasscheiben maßgeblich die Endform. Neben der, durch die z-Verschiebung (200 mm) hervorgerufenen Biegung entlang der Achse X (Abbildung 97), kommt es entlang der Achse Y, durch die vertikale Fixierung der Auflagerpunkte 2 und 4, zu einer Querverformung von maximal 8 mm. Im Vergleich zu der 25-mal höheren Hauptkrümmung entlang der Achse X nimmt diese Verformung einen nebensächlichen Stellenwert ein.

Die Auswertung der Diagonalen erfolgt in den nachstehenden Diagrammen anhand der tatsächlichen Länge. Die Achsen A und Q18 sind in Abbildung 97, zugunsten der einheitlichen Abbildung jedoch projiziert auf die halbe Diagonale dargestellt.

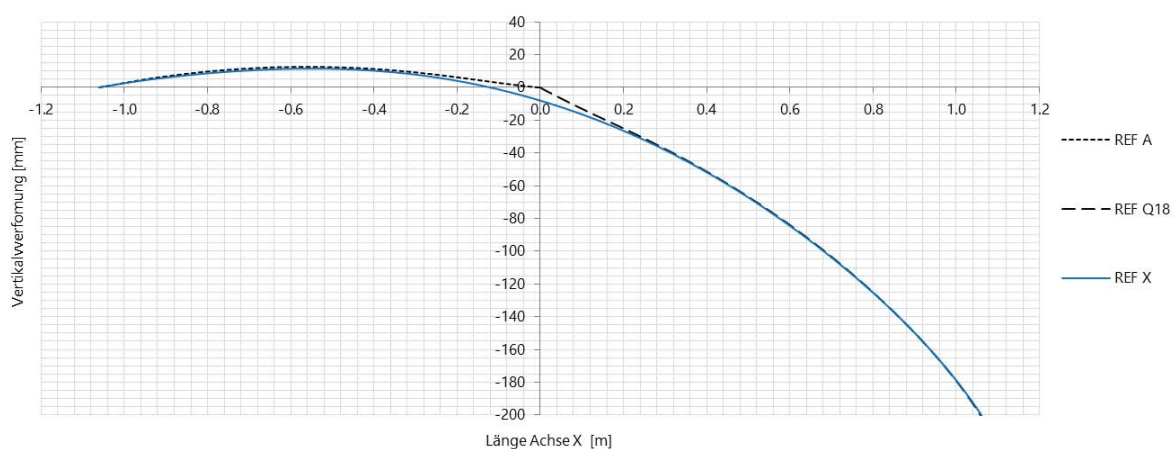


Abbildung 97: Hauptkrümmung entlang der Achse X

Der Maximalwert der Querbiegung mit 8 mm tritt, infolge der in z-Richtung unverschieblich gelagerten Auflagerpunkte, an der Achse Y auf (Abbildung 98).

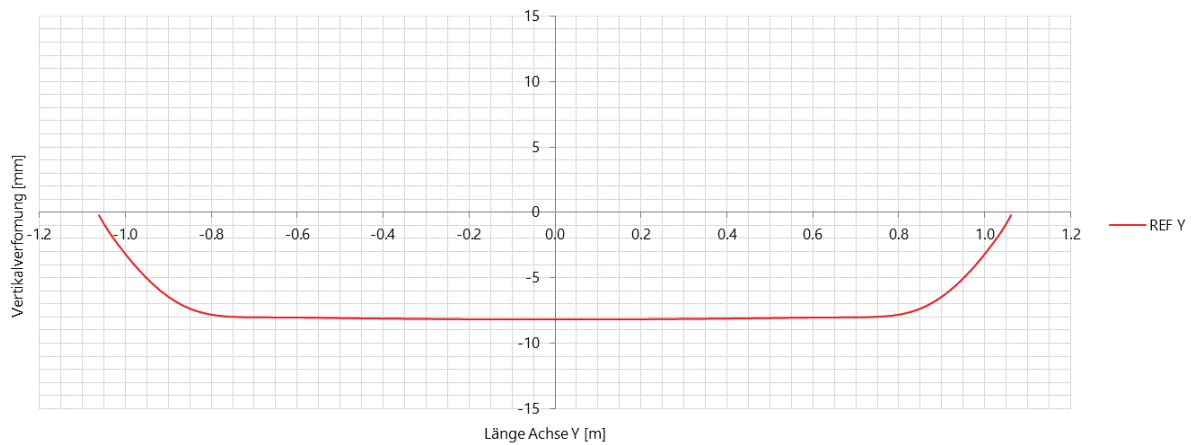


Abbildung 98: Vertikalverformung der Achse Y, Querbiegung

Nachstehend erfolgt die Auswertung der Parameterstudie anhand von Hauptzugspannungen und Verformungen an den Diagonalen.

4.2.4 Ergebnisse

4.2.4.1 Variation der Vertikalverschiebung - Serie 05

In Tabelle 18 sind die Abmessungen, die Aufbauten, der Schubmodul, sowie die jeweiligen vertikalen Verschiebungen der Modelle von der Serie 05 aufgelistet. Die in dieser Serie variierte Vertikalverschiebung wird in 100 mm Schritten, ausgehend vom Referenzmodell, gesteigert.

		Z [mm]	L [m]	B [m]	A [mm]	G [N/mm ²]
	REF 02	200	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 05	z_1	300	0.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	z_2	400	2.00	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	z_3	500	2.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40

Tabelle 18: Eigenschaften der in Serie 05 untersuchten Modelle

Ident mit der Auswertung beim einachsigen Biegen, werden nachfolgend die Reaktionskräfte, die für den Verformungsvorgang erforderlich sind, ausgewertet. Weil das Modell des zweiachsigen Biegens nicht in eine vorbestimmte Geometrie gezwungen wird sondern sich frei verformen kann, liegen die Werte der Reaktionskräfte erheblich unter denen des einachsigen Biegens.

Abbildung 99 zeigt den Anstieg der erforderlichen Anpresskraft zufolge der anwachsenden z- Verschiebung. Es ist zu erkennen, dass sich der Anpressdruck nicht linear zur z-Verschiebung

verhält. Anhand dieser Auswertung kann die erforderliche Anpresskraft bei jeder beliebigen Stelle bis zu einer Verformung von 500 mm bestimmt werden.

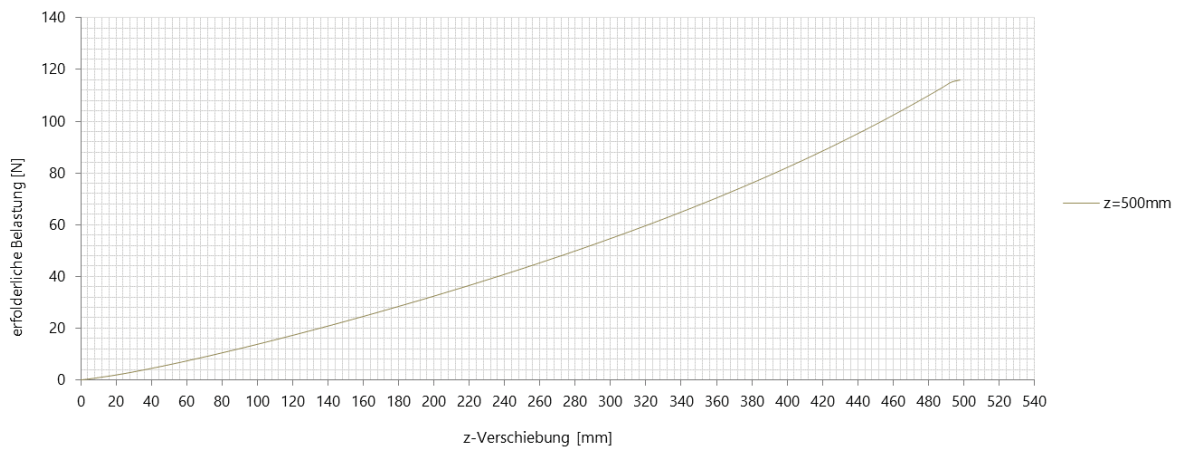


Abbildung 99: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 05

		K [N]	Z [mm]
	REF 02	31.57	200
Serie 05	z_1	54.18	300
	z_2	81.50	400
	z_2	115.92	500

Tabelle 19: Erforderliche Kräfte für die zweiachsige Kaltverformung der Serie 05

Die zufolge der variierenden Verschiebungen entlang der Hauptkrümmungsachse X entstehenden Vertikalverschiebungen sind in Abbildung 100 dargestellt. Anhand der Auswertung kann gezeigt werden, dass die zunehmende Vertikalverschiebung des Lasteinleitungspunktes, zu einer stärkeren Gesamtkrümmung führt.

Auch die Position der maximalen positiven Krümmung ändert sich mit zunehmender Belastung. Bei einer vertikalen Verschiebung von 200 mm befindet sich die Stelle des positiven Maximalwerts noch bei einer Länge von 0,52 m, wohingegen sie bei einer Vertikalverschiebung von 500 mm bereits bei einer Länge von 0,64 m liegt.

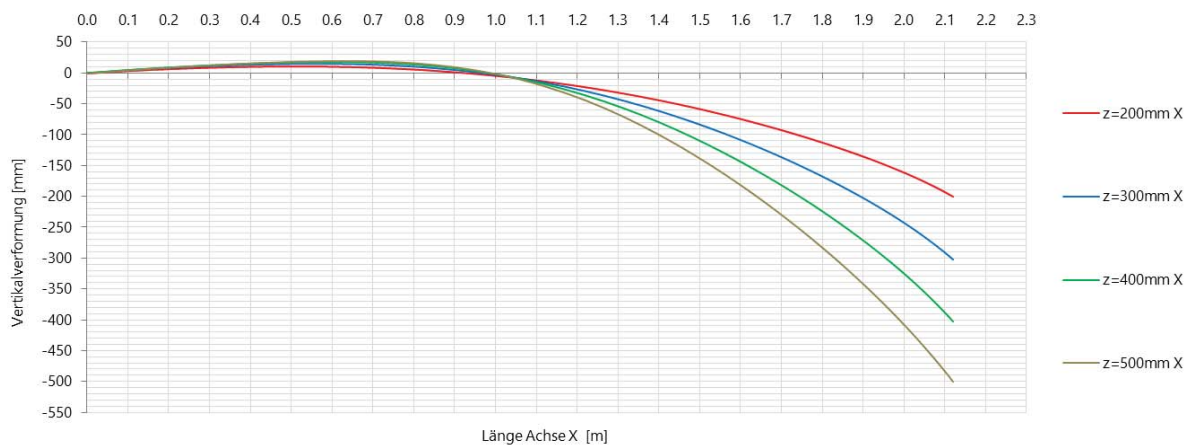


Abbildung 100: Krümmung entlang der Achse X

Wie bereits anhand des Referenzmodells gezeigt, kommt es, infolge der aufgezwungenen Krümmung, zu Verformungen in Querrichtung. Abbildung 101 zeigt den zunehmenden Einfluss der durch die Krümmung verursachten Querverformung. Es hat sich gezeigt, dass mit steigender Krümmung der Einfluss der Verformung in x- und y-Richtung, in Bezug auf die Gesamtverformung der Querachse, zunimmt. Die strichlierten Linien in Abbildung 101 kennzeichnen die Verformungsüberlagerung der x, y und z-Verformung. Die reine Vertikalverformung wird anhand der durchgehende Linie dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender z-Verschiebung der Einfluss der Verschiebung in horizontaler Richtung (x/y-Ebene) zunimmt.

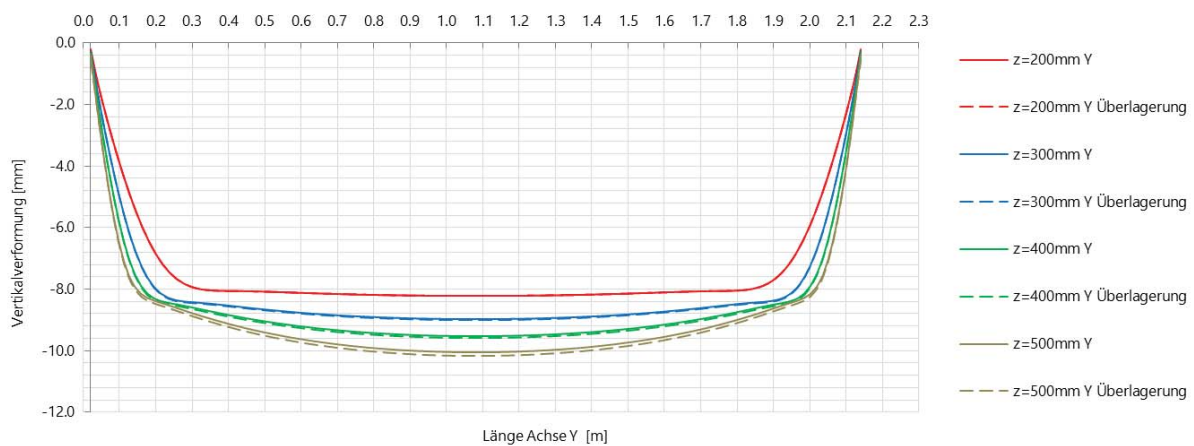


Abbildung 101: Verformung entlang der Achse Y; quer zur Hauptkrümmung

Der in Abbildung 102 dargestellte Verlauf der Hauptzugspannungen entlang der Y Achse zeigt, analog zur Darstellung der Oberflächenspannungen in Abbildung 108 und Abbildung 109, Unregelmäßigkeiten im Spannungsverlauf zu den Auflagern hin.

Von der Mitte ausgehend, kommt es zwischen 0,1 und 0,3 m bzw. zwischen 1,9 und 2,1 m zu einem signifikanten Spannungsabfall. Vergleicht man diesen Spannungsabfall mit der Querverformung in Abbildung 101, so kann festgestellt werden, dass der Verformungsverlauf in diesem Bereich einen Kick aufweist und dadurch einen Teil der Spannungen lokal reduziert.

Nach diesem Spannungsabfall kommt es, besonders bei dem Modell mit der maximalen Vertikalverschiebung von 500 mm, zu einem steilen Wiederanstieg der Spannungen und anschließend zu einem zweiten Spannungsabfall. Betrachtet man ausschließlich die Verformung in x-Richtung (u_1 siehe Abbildung 103) so stellt man fest, dass es dort, wo der auflagernahe Spannungsanstieg in Abbildung 102 auftritt zu keiner Verschiebung in x-Richtung kommt. Analog nur spiegelverkehrt verhält sich die Verformung in y-Richtung.

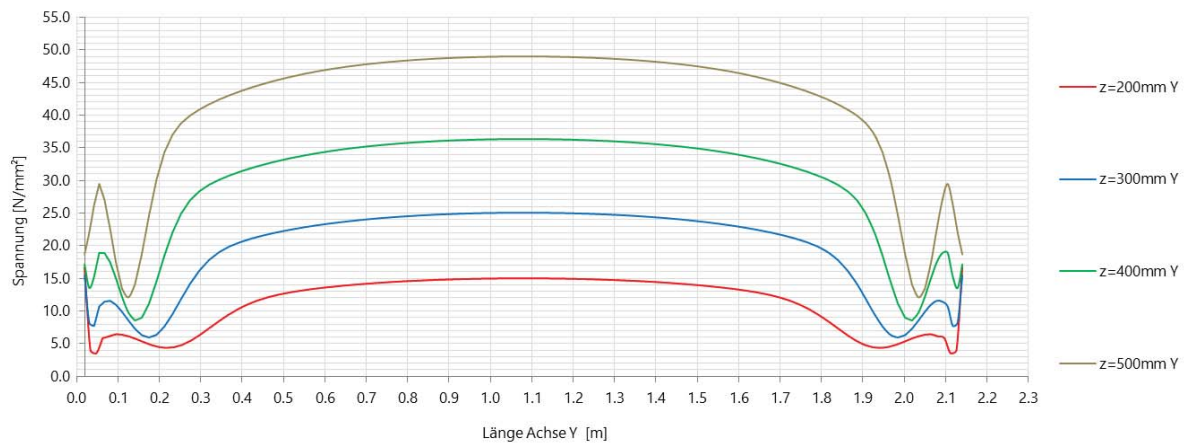


Abbildung 102: Hauptzugspannungen entlang der Achse Y

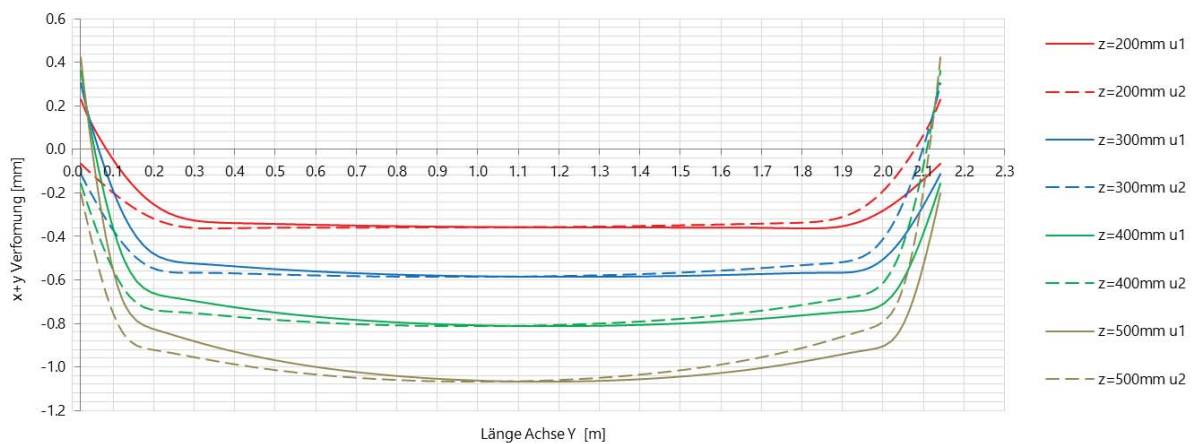


Abbildung 103: Verformungsüberlagerung in x- und y-Richtung

Abbildung 104 zeigt den Vergleich der Hauptspannungen mit den Verläufen der Spannungen S_{11} (x-Richtung), S_{22} (y-Richtung) und S_{33} (z-Richtung). Anhand dieses Vergleichs kann festgestellt werden, dass der Einfluss der Spannungen in x- und y-Richtung, im Vergleich zu den Spannungen in z-Richtung, mit zunehmender Krümmung größer wird.

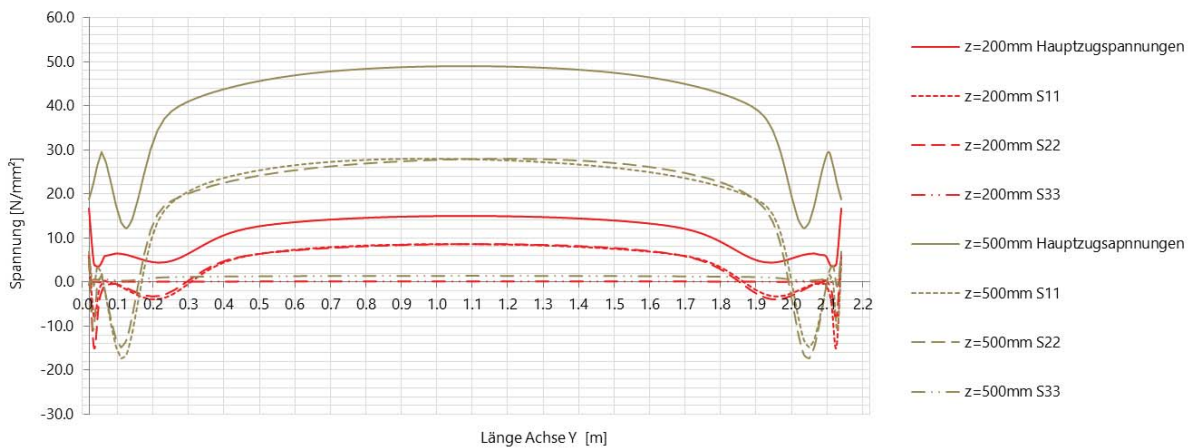


Abbildung 104: Spannungsvergleich anhand von S11, S22, S33 und Hauptzugspannung

Abbildung 105 zeigt den Verlauf der Hauptzugspannungen entlang der Achse X. Der im Endbereich, bei einer Länge von 2,12 m, auftretende Extremwert, ist auf die lokale Lasteinleitung zurückzuführen. Da dieser Spitzenspannungswert in der Realität durch die lastverteilende Wirkung einer weichen Zwischenschicht vermieden werden kann, wird dieser Extremwert nicht als maximaler Referenzwert herangezogen. Stattdessen wird für die Auswertung der Wert ca. 10 mm vor Punkt 3 herangezogen.

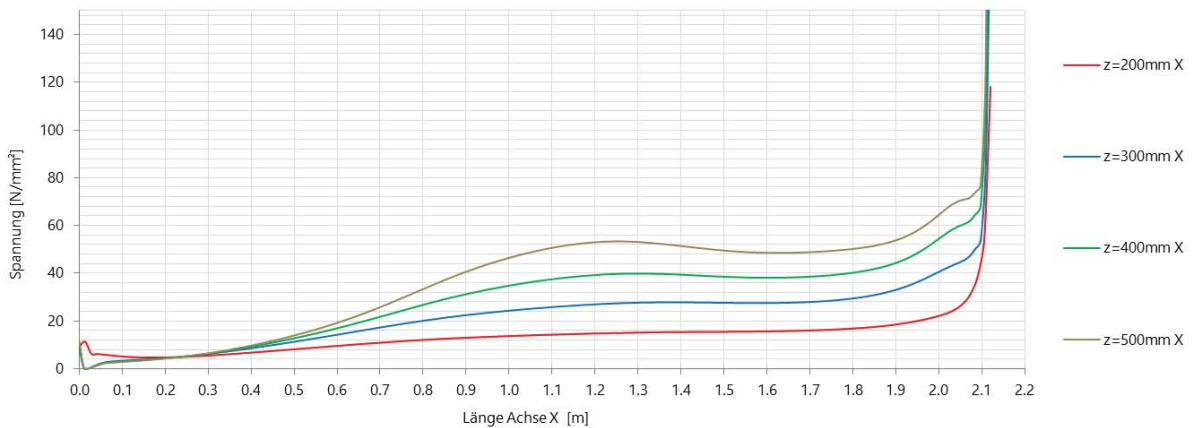


Abbildung 105: Hauptzugspannungen entlang der Achse X

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 106 den vernachlässigten lokalen Spannungsanstieg an der Lasteinleitungsstelle. Ident verhalten sich die Auflagerpunkte 1, 2 und 4.

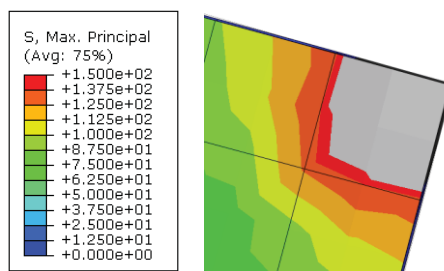


Abbildung 106: Nicht berücksichtigte Spannungspitze zufolge Lasteinleitung

Abbildung 107 zeigt die Entwicklung des maximalen Spannungswertes entlang der X Achse, aufgrund der zunehmenden Vertikalverschiebung. Anhand dieser Tendenz kann abgeschätzt werden, wie sich die Hauptzugspannungen, infolge einer weiter ansteigenden vertikalen Verschiebung, verhalten werden.

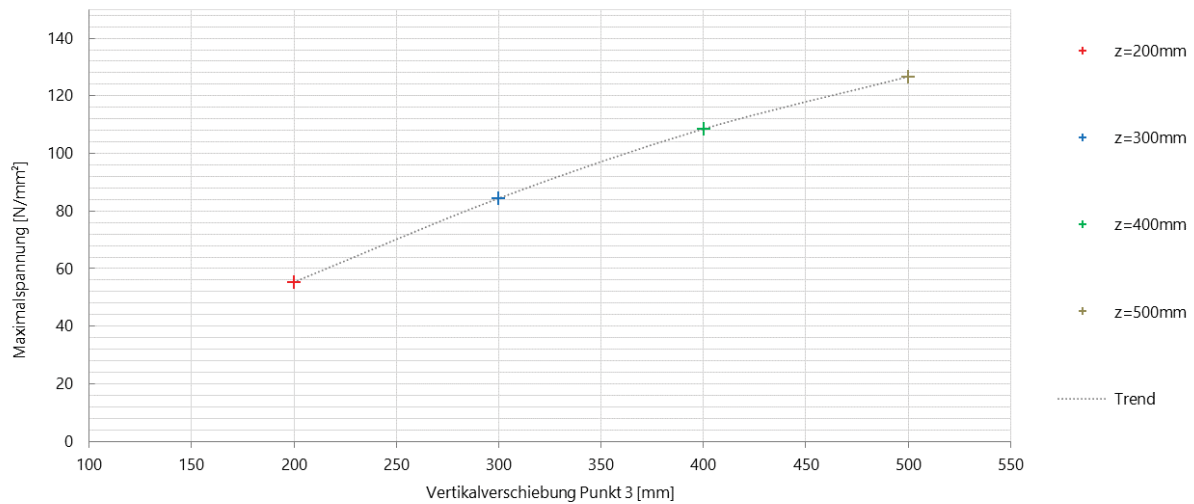


Abbildung 107: Maximale Hauptzugspannung infolge der zunehmenden Krümmung

Abbildung 108 und Abbildung 109 zeigen die Oberflächenspannungen der vier Modelle mit einheitlicher Farbskalierung. Der Spitzenspannungsbereich liegt bei Punkt 3 und ist aufgrund der Perspektive (von oben) nicht ersichtlich.

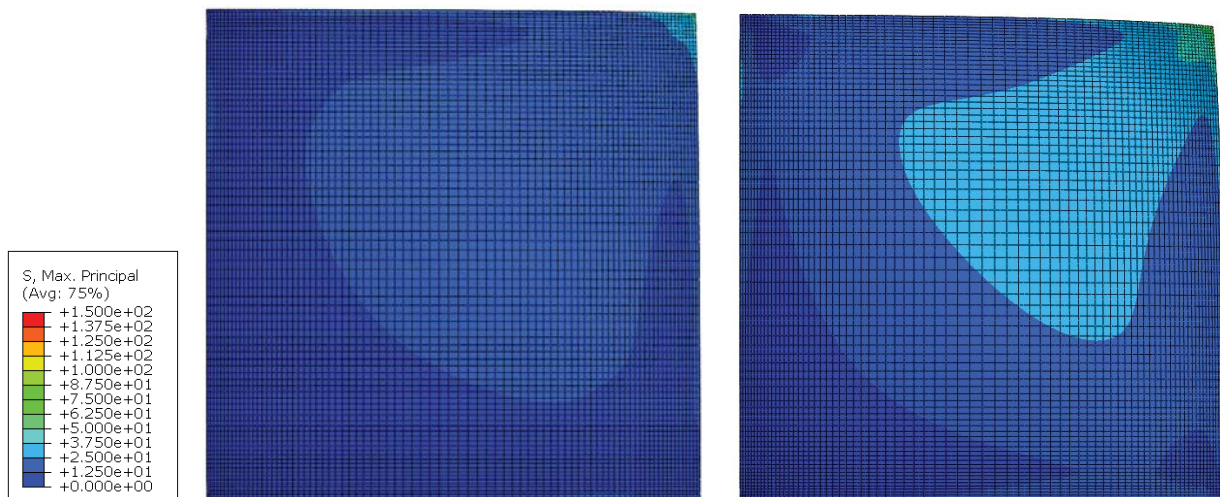


Abbildung 108: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell z=200mm (links) und z=300mm (rechts)

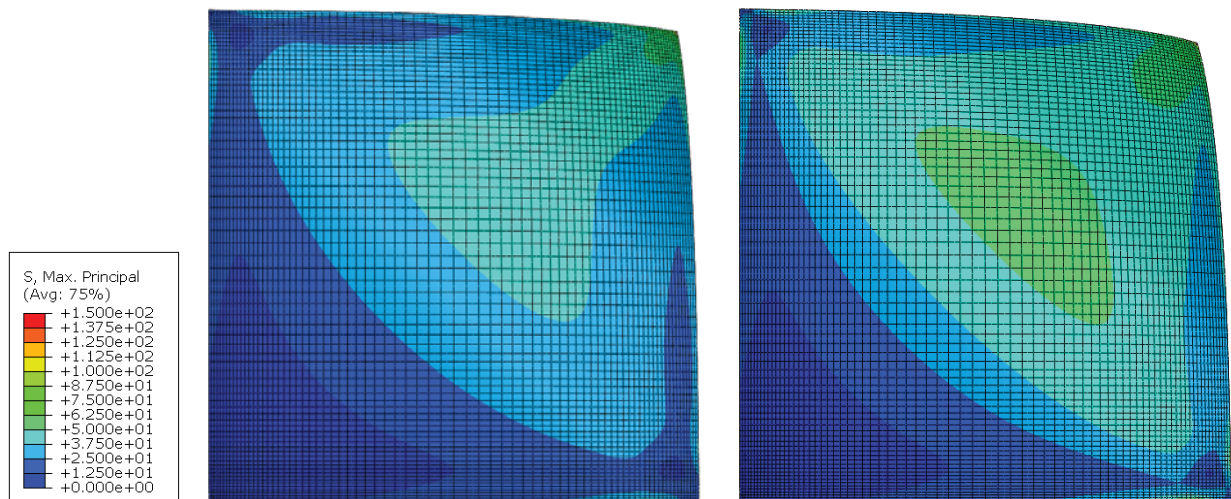


Abbildung 109: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell z=400mm (links) und z=500mm (rechts)

4.2.4.2 Variation der Scheibenlänge - Serie 06

Wie auch in 4.1.4.2, werden nachstehend die Längsabmessungen der Scheibe verändert. Die zugehörigen Skizzen sind in der Parameterstudie zum einachsigen Biegen (Abbildung 62) zu finden.

	Z [mm]	L [m]	B [m]	A [mm]	G [N/mm ²]	
REF 02	200	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40	
Serie 06	I_1	200	0.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	I_2	200	2.00	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
	I_3	200	2.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40

Tabelle 20: Eigenschaften der in Serie 06 untersuchten Modelle

Anhand der in Abbildung 110 ersichtlichen Kraft-Verschiebungsverläufen, wird festgestellt, dass die erforderliche Anpresskraft mit zunehmender Scheibenlänge (bei gleichbleibender z-Verschiebung von Punkt 3) abnimmt. Dieser Effekt entsteht, weil durch die Verlängerung der Scheibe die Krümmung reduziert wird.

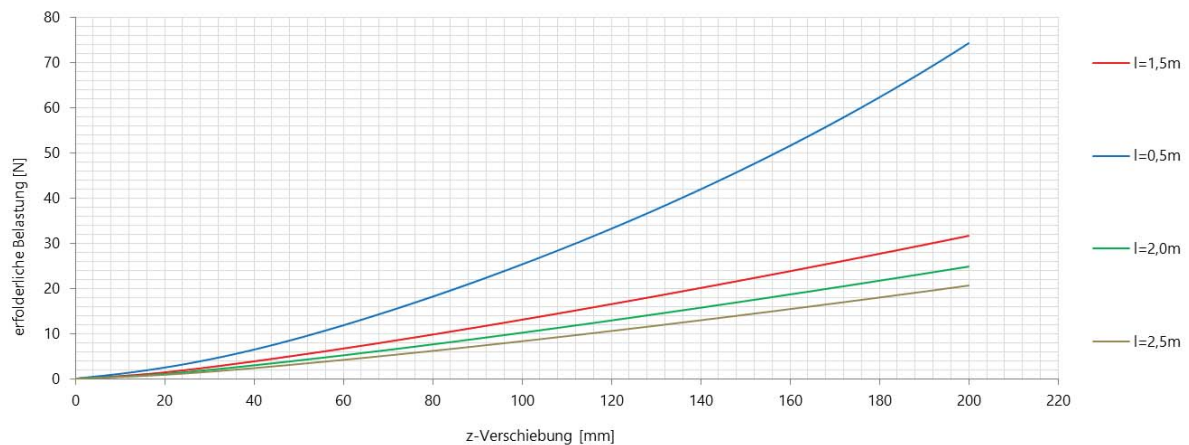


Abbildung 110: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 06

		K [N]	L [m]
Serie 06	REF 02	31.57	1.5
	I_1	74.22	0.5
	I_2	24.86	2.0
	I_2	20.06	2.5

Tabelle 21: Erforderliche Kräfte für die zweiachsige Kaltverformung der Serie 06

Im Gegensatz zum einachsigen Biegen entsteht, anhand der Längenänderung, bei freiem Biegen (bei gleichbleibender z-Position von Punkt 3) eine Krümmungsänderung. Diese Krümmungsänderung wird in Abbildung 111, anhand der Verformung der Achse X, dargestellt und zeigt mit abnehmender Scheibenlänge einen Anstieg der Verdrehung im Auflagerpunkt 1.

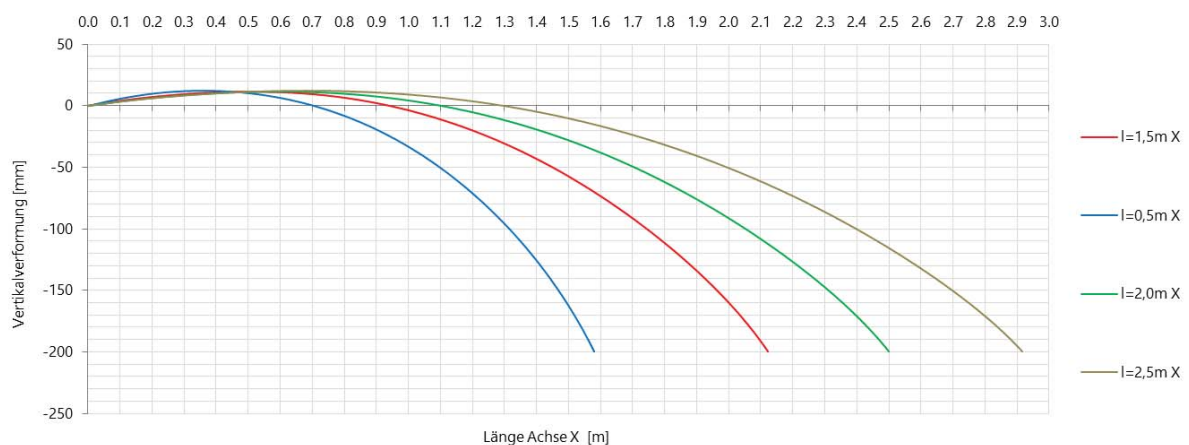


Abbildung 111: Krümmung entlang der Achse X

Das in Serie 06 untersuchte variierende Länge-Bereite-Verhältnis verursachte eine asymmetrische Verformung der Scheiben. Die infolge der asymmetrischen Belastung entstehenden

Auswirkungen auf die Vertikalverformung der Achse Y sind beim Modell $l=0,5$ m am stärksten ausgeprägt (siehe Abbildung 112). Mit zunehmender Scheibenlänge kommt es zu einer leicht synklastischen Krümmung im mittleren Bereich der Achse Y. Allgemein kann jedoch festgestellt werden, dass sich die Querverformungsfigur mit steigender Länge (mit Ausnahme von $l=0,5$ m), kaum ändert.

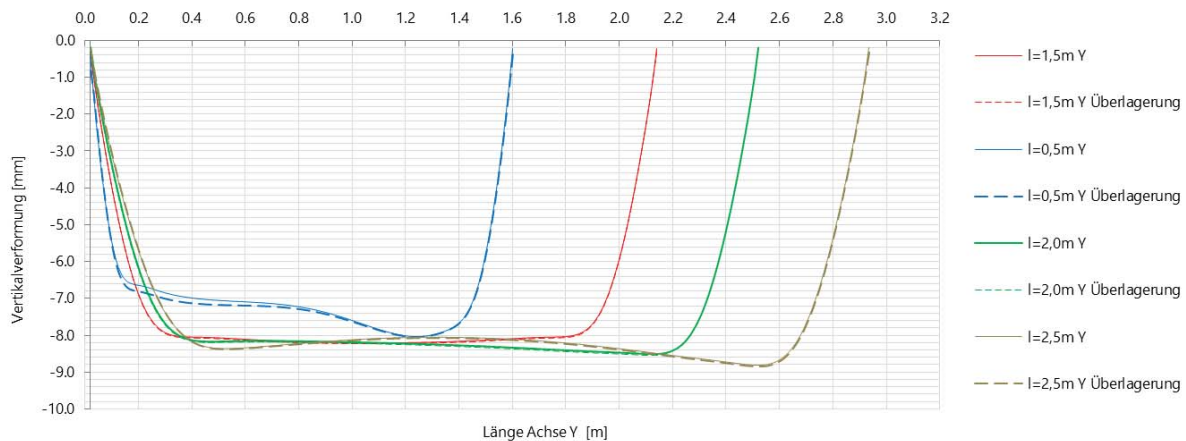


Abbildung 112: Krümmung entlang der Achse Y

Abbildung 113 zeigt die aus der Verformung entstehenden Spannungen entlang der Achse Y. Es ist ersichtlich, dass der Einfluss der Asymmetrie, analog zu den Verformungen, beim Modell $l=0,5$ m am markantesten auftritt. Der bei Modell $l=0,5$ m auftretende Spannungsanstieg, bei einer Länge von $0,05$ m auf der Achse Y, lässt sich anhand des in Abbildung 114 dargestellten Einflusses der Verformungen in x- und y-Richtung erklären.

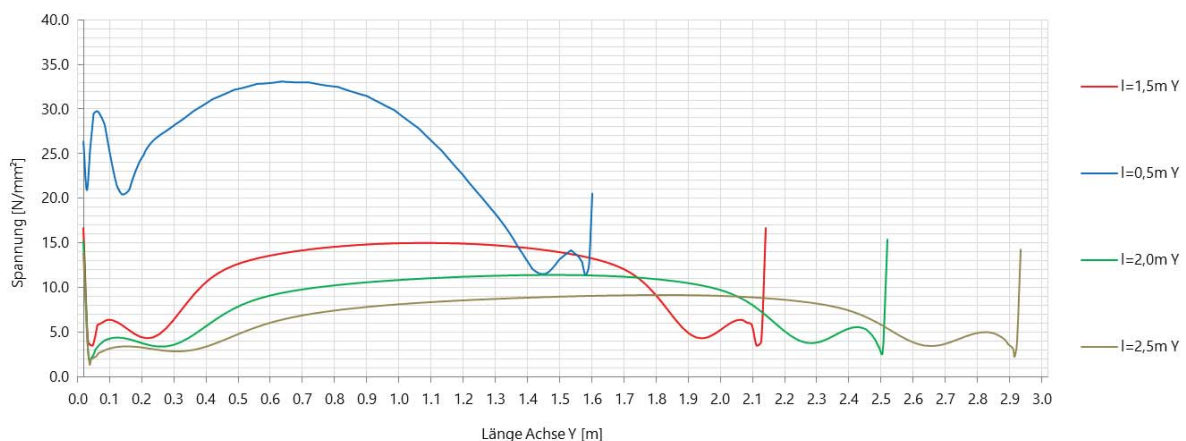


Abbildung 113: Hauptzugspannungen entlang der Achse Y

Wie bereits bei Serie 05 dargestellt, hat die Verformung in x- und y-Richtung im auflagnahen Bereich einen erheblichen Einfluss auf die Hauptzugspannungen auf der Achse Y.

Durch den geringen Abstand zwischen dem Lasteinleitungspunkt und dem Beginn der Achse Y, treten die Verformungen in x-Richtung (u_1) beim Modell $l=0,5$ m im Anfangsbereich des Diagrammes in Abbildung 114 besonders stark hervor.

Bei den Modellen mit einer Länge von 2,0 und 2,5 m tritt der Effekt, wenn auch in reduziertem Ausmaß im Endbereich der Achse Y auf.

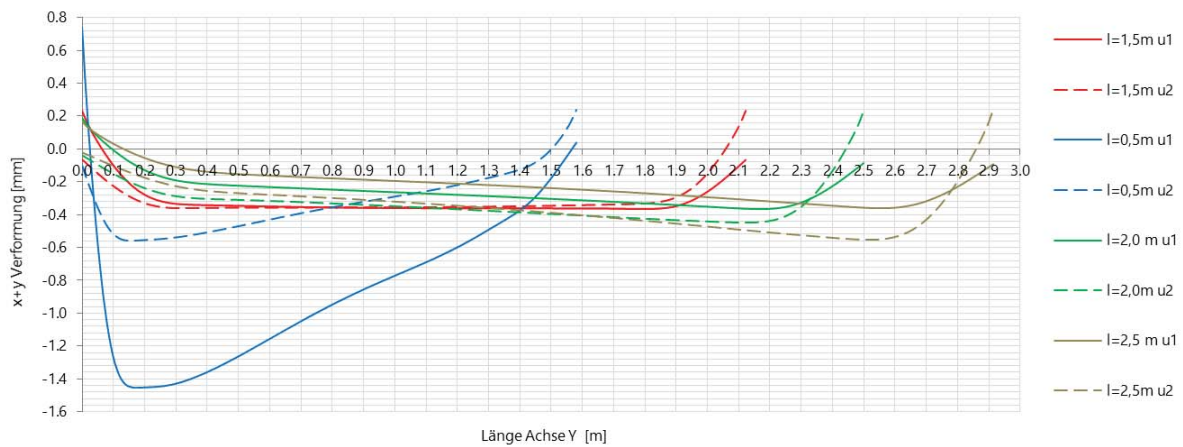


Abbildung 114: Verformungsüberlagerung in x- und y-Richtung

Entlang der Achse X kommt es abgesehen von dem krümmungsbedingten Spannungsanstieg, zu keinen signifikanten Änderungen im Spannungsverlauf. Der Einfluss der Lasteinleitung konzentriert sich bei allen in der Serie 06 untersuchten Modellen auf den Endbereich der Achse X.

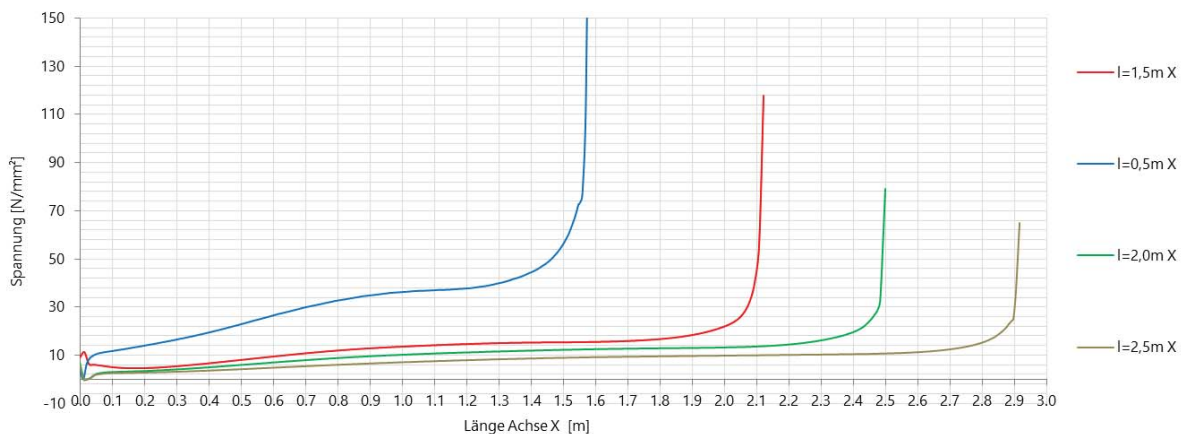


Abbildung 115: Hauptzugspannungen entlang der Achse X

Die Auswertung der maximalen Hauptzugspannungen in Abbildung 116 lässt erkennen, dass die Spannungsreduktion, mit zunehmender Scheibenlänge (bei gleichbleibender z-Verschiebung des Punktes 3), sukzessive abnimmt.

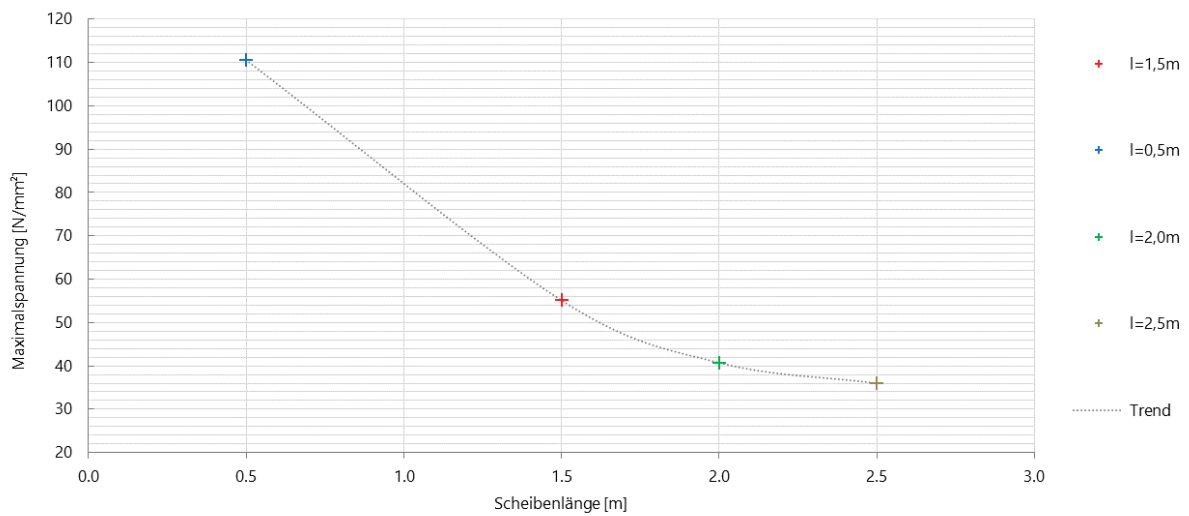


Abbildung 116: Maximale Hauptzugspannung infolge der Veränderung des Schubmoduls

Die Abbildung der Oberflächenspannungen des Modells mit einer Länge von 0,5 m zeigen, dass sich der Spannungsabfall im Bereich von Auflagerpunkt 2 in x-Richtung verschiebt und somit durch die Auswertung von X nur gestreift wird. Analog geschieht dies bei den Modellen mit den Längen 2,0 m und 2,5 m, in Punkt 4. Zur besseren Vergleichbarkeit ist die Farbskala für alle vier Modelle ident gewählt.

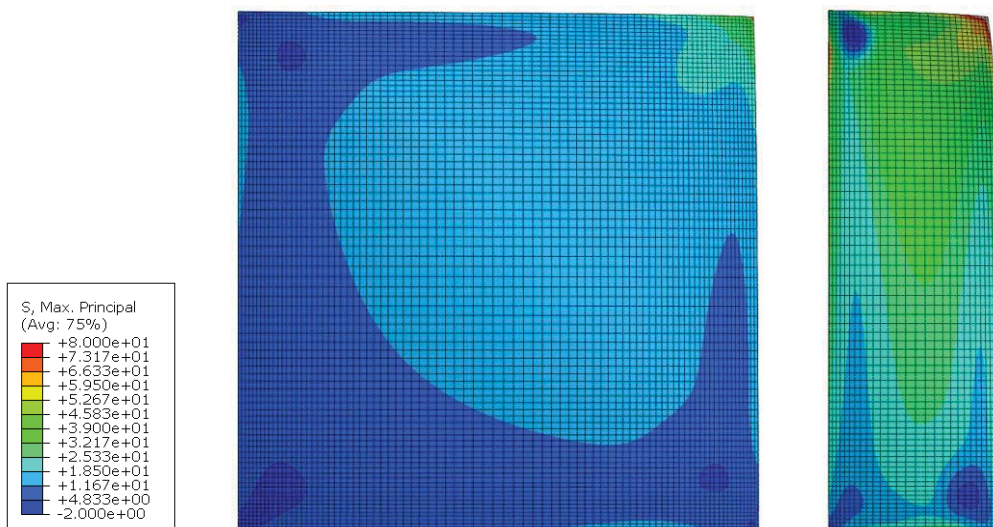


Abbildung 117: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: l=1,5 m (links) und l=0,5 m (rechts)

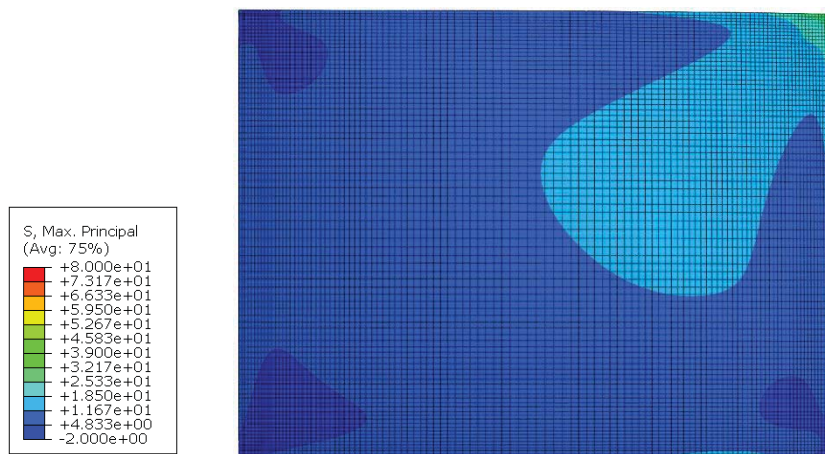


Abbildung 118: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell l=2 m

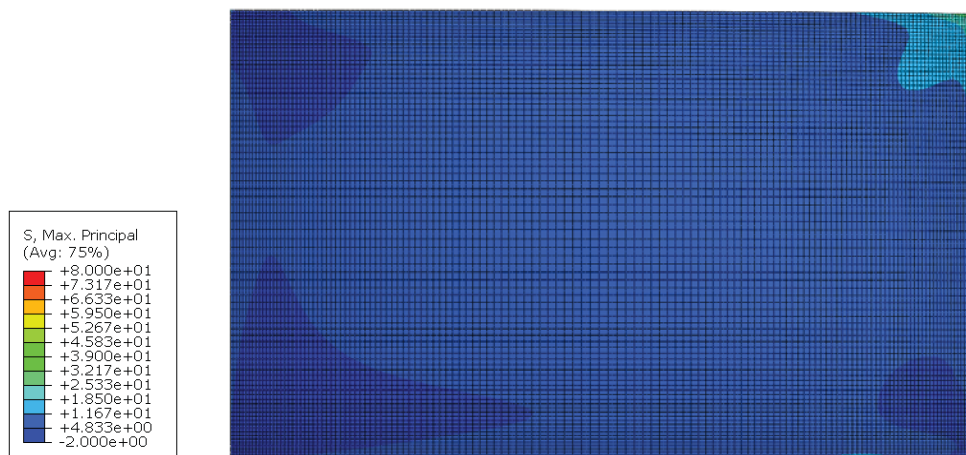


Abbildung 119: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell l=2,5 m

4.2.4.3 Variation der Scheibendicke - Serie 07

Die bei dieser Studie untersuchten Scheibendicken sind ident mit denen der Serie 03 des einachsigen Biegens und sind zur Veranschaulichung des Verhältnisses von Scheibendicke zu Foliendicke bereits in Abbildung 73 dargestellt.

		Z [mm]	L [m]	B [m]	A [mm]	G [N/mm ²]
	REF 02	200	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 07	a_1	200	1.50	1.50	2.00 0.76 2.00	0.40
	a_2	200	1.50	1.50	3.00 0.76 3.00	0.40
	a_3	200	1.50	1.50	4.00 0.76 4.00	0.40

Tabelle 22: Eigenschaften der in Serie 07 untersuchten Modelle

Einheitlich mit den anderen Modellen wird folgend, die Entwicklung des für den Kaltbiegeprozess erforderlichen Anpressdruckes infolge der Steigerung der Scheibendicke untersucht.

Entsprechend der in Abbildung 120 und Tabelle 1 angeführten Werten, kann davon ausgegangen werden, dass der maximal erforderliche Anpressdruck der Serie 07 585 N ist.

Im Zuge einer weiterführenden statischen Bemessung der Unterkonstruktion muss berücksichtigt werden, dass es infolge der Krümmung vom Modell mit einer Scheibendicke von 4 mm, an der Stelle des Auflagerpunktes 2 und 4, zu einer maximalen Reaktionskraft von 580,06 N (entgegen der Belastungsrichtung) kommt. Der der Belastung gegenüberliegende Auflagerpunkt 1, weist Werte bis zu 575,18 N (in Belastungsrichtung) auf.

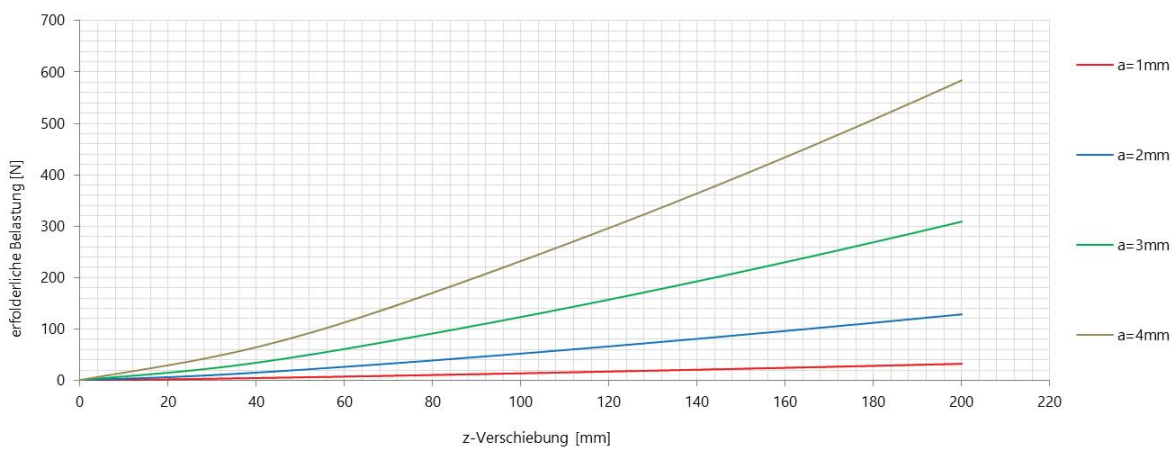


Abbildung 120: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 07

		K [N]	A [mm]
	REF 02	31.57	1.00 0.76 1.00
Serie 07	a_1	128.19	2.00 0.76 2.00
	a_2	308.53	3.00 0.76 3.00
	a_2	584.94	4.00 0.76 4.00

Tabelle 23: Erforderliche Kräfte für die zweiachsige Kaltverformung der Serie 07

Bedingt durch die höhere Steifigkeit (resultierend aus der Zunahme der Scheibenstärke) kommt es an der Achse X zu einer geringeren Krümmung in Längsrichtung (Abbildung 121). Der maximale Differenzwert zwischen der Krümmung des Referenzmodells und dem Modell mit einer Scheibendicke von 4 mm beträgt 13,12 mm und liegt bei einer Länge von 1,38 m auf der Diagonale X.

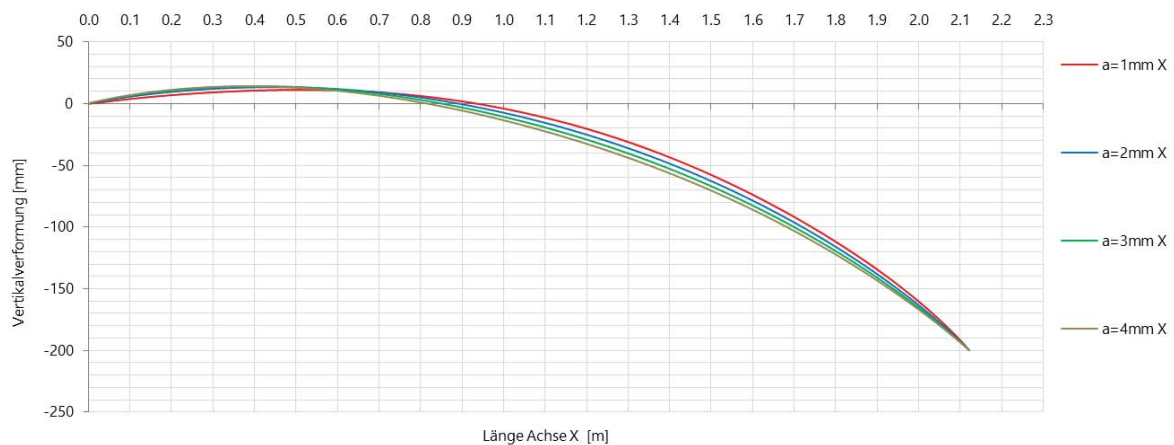


Abbildung 121: Krümmung entlang der Achse X

Infolge der weniger ausgeprägten Längsbiegung der Modelle mit Glasstärken von 2 bis 4 mm, entstehen im Bereich der Achse Y zu den Auflagern hin stärkere Krümmungen in Querrichtung (siehe Abbildung 123). Diese haben wiederum die in Abbildung 122 ersichtlichen erhöhten Spannungen im auflagernahen Bereich zur Folge.

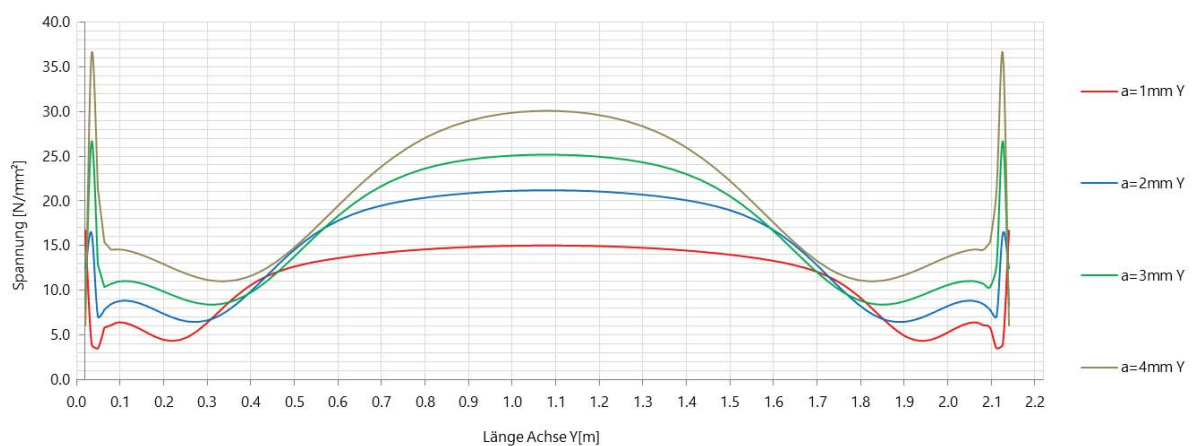


Abbildung 122: Hauptzugspannungen entlang der Achse Y

Die im Mittelbereich der Achse Y auftretenden Zunahme der Hauptzugspannungen, begründe sich durch die leicht synklastische Verformung, die im Mittelbereich zwischen 0,7 und 1,4 m auf der Querachse auftritt (siehe Abbildung 123).

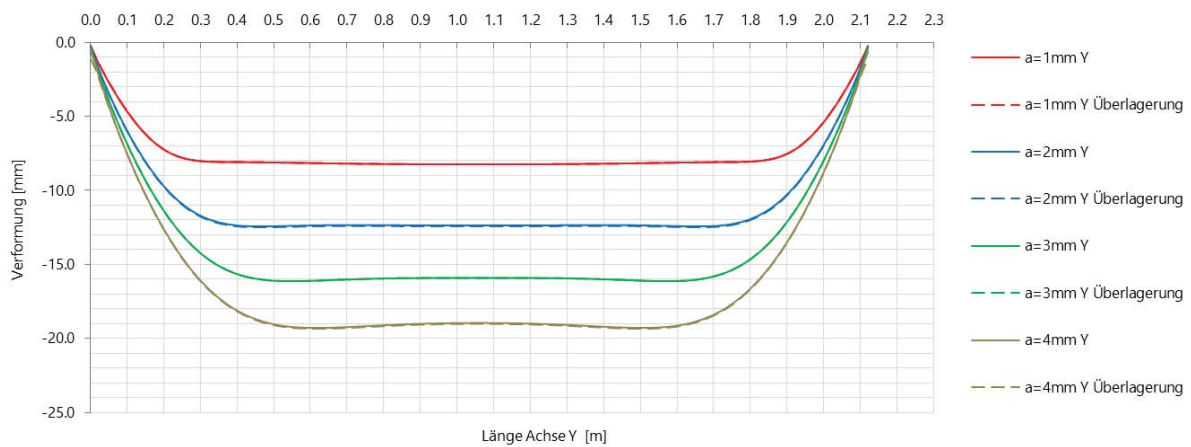


Abbildung 123: Verformung entlang der Achse X; quer zur Hauptkrümmung

Der Spannungsverlauf der Achse X (Abbildung 124) steigt mit zunehmender Scheibendicke zu Beginn wesentlich steiler an, bleibt dann jedoch annähernd konstant und weist im Endbereich einen extremen Anstieg auf.

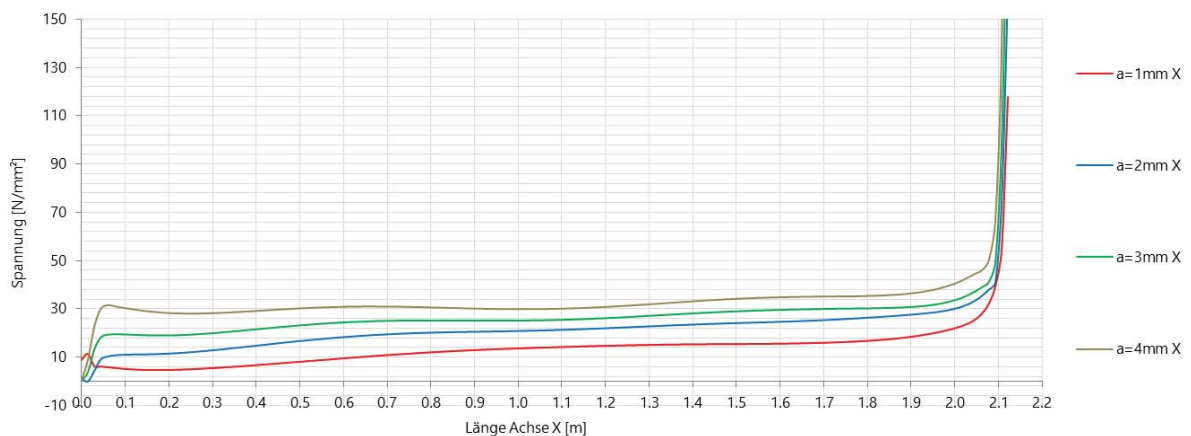


Abbildung 124: Hauptzugspannungen entlang der Achse X

Die im Nahbereich vom Lasteinleitungspunkt entstehenden Spitzenspannungen steigen, im Gegensatz zu der Spannungsentwicklung in Serie 03, nicht linear. Die Hauptzugspannungen des Modells mit einer Scheibendicke von 4 mm überschreiten dabei erheblich die zulässigen Spannungen für die im Bauwesen eingesetzten Gläser.

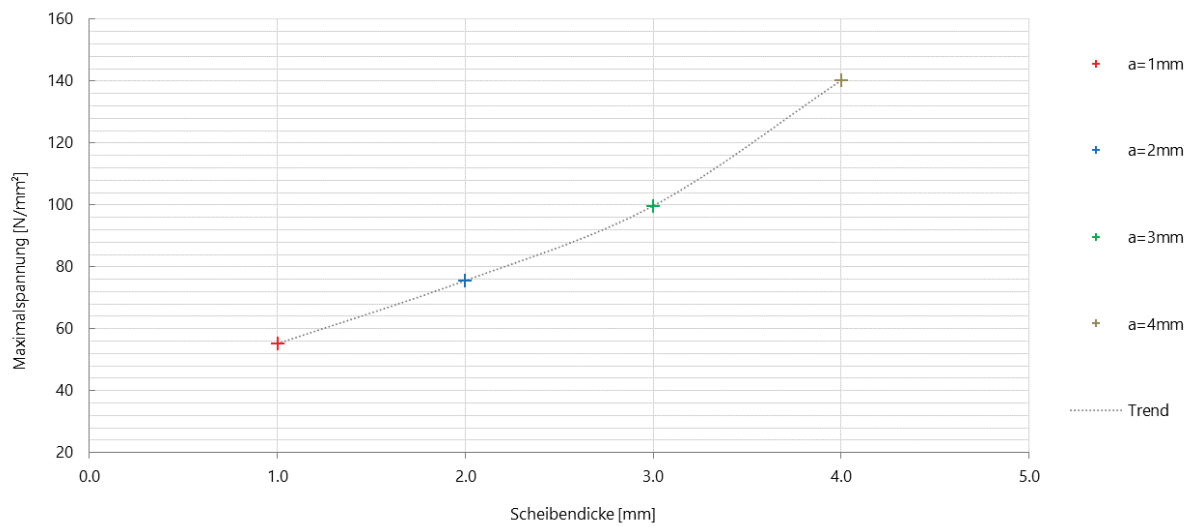


Abbildung 125: Maximale Hauptzugspannung infolge der zunehmenden Scheibendicke

Anhand der Oberflächenspannungen in Abbildung 126 und Abbildung 127 lässt sich der Spannungsanstieg, verursacht durch die Erhöhung der Scheibendicke, im mittleren Bereich der Achse Y gut erkennen (auch ersichtlich in Abbildung 122 zwischen 0,5 und 1,7m).

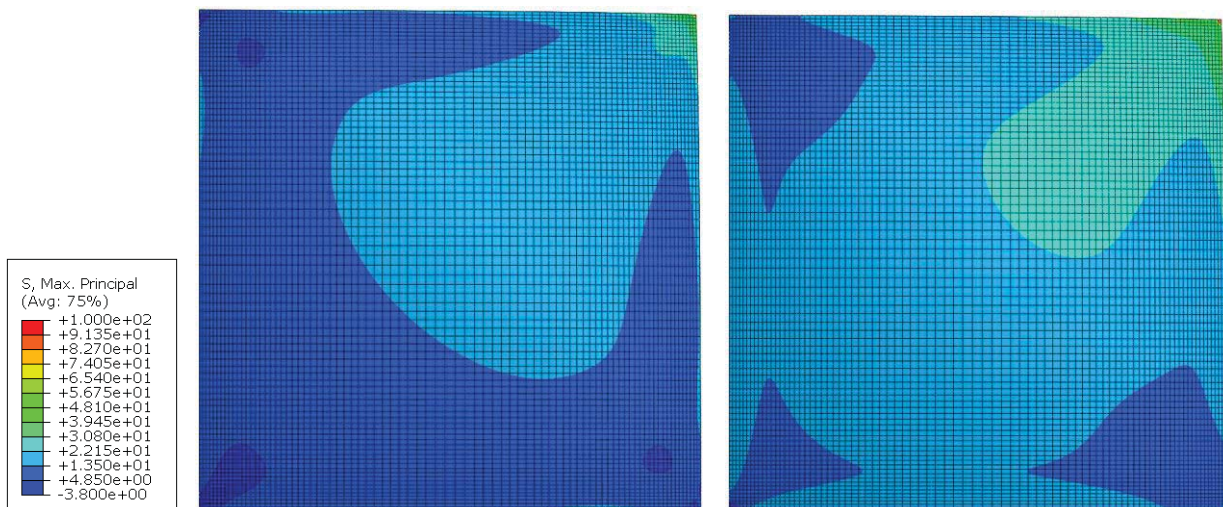


Abbildung 126: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: A=1,0 mm (links) und A=2,0 mm (rechts)

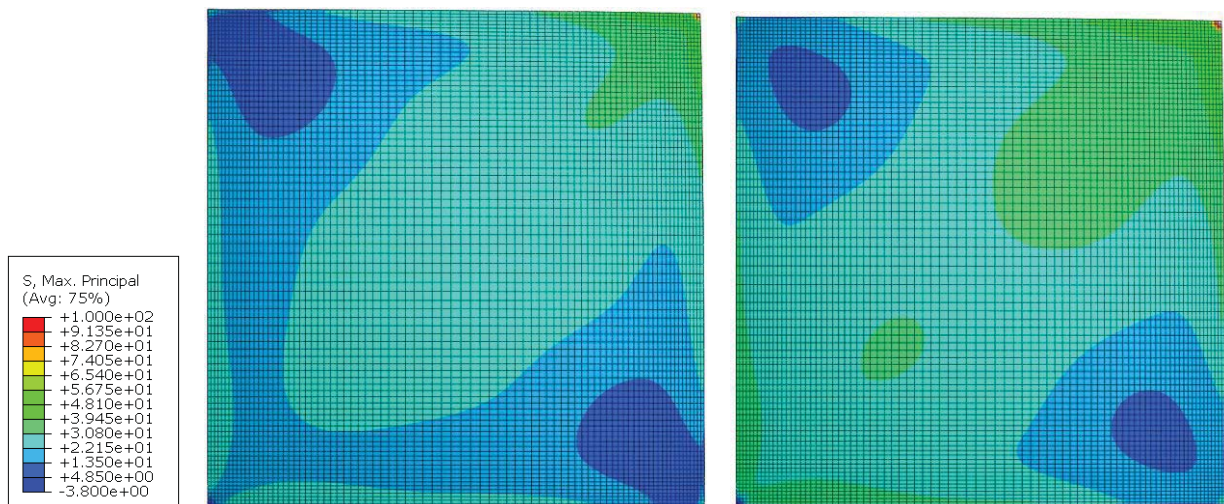


Abbildung 127: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: A= 3,0 mm (links) und A=4,0 mm (rechts)

Analog zum einachsigen Biegen (unter 4.1.4.3) wird beim zweiachsigen Biegen das Verhalten der verformten Scheiben unter einer flächigen Druckbelastung untersucht. Die dafür erforderlichen Randbedingungen sind in Abbildung 128 dargestellt.

Bezugnehmend auf die mögliche Anwendung im Fassadenbau, werden die Scheibenränder in ihrer verformten Position fixiert und anschließend an der obersten Scheibe ein gleichmäßiger Oberflächendruck aufgebracht.

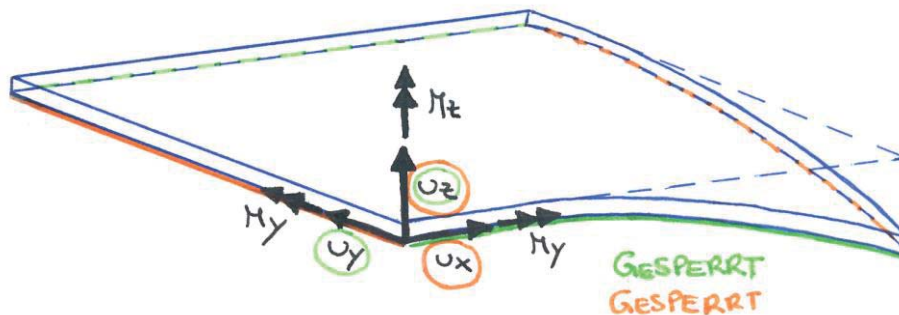


Abbildung 128: Skizze der Auflagerbedingungen der Druck belasteten Scheibe

Die Auswertung der Spannungsentwicklung zufolge der flächigen Druckbelastung zeigt ähnliche Resultaten wie die aus dem einachsigen Biegen, allerdings bereits ab einer Belastung von 0,2 kN/m².

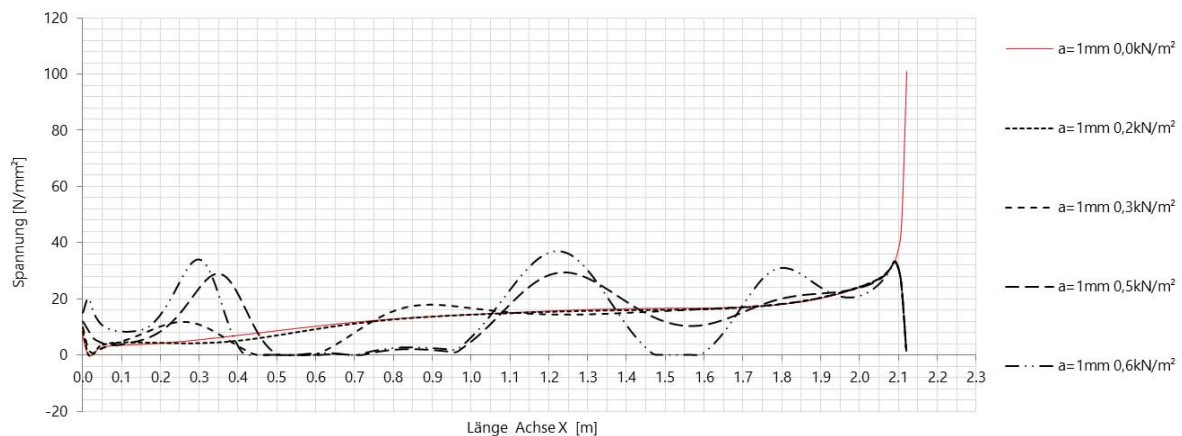


Abbildung 129: Spannungsentwicklung zufolge der steigenden Druckbelastung

Anhand Abbildung 130 kann festgestellt werden, dass es ab einer Belastung von $0,3 \text{ kN/m}^2$ zu einer signifikanten Verformung der Scheibe kommt. Eine Laststeigerung über den Bereich von $0,6 \text{ N/mm}^2$ ist bei dem Modell mit einer Scheibenstärke von 1 mm aufgrund der extrem groß Verformungen nicht möglich.

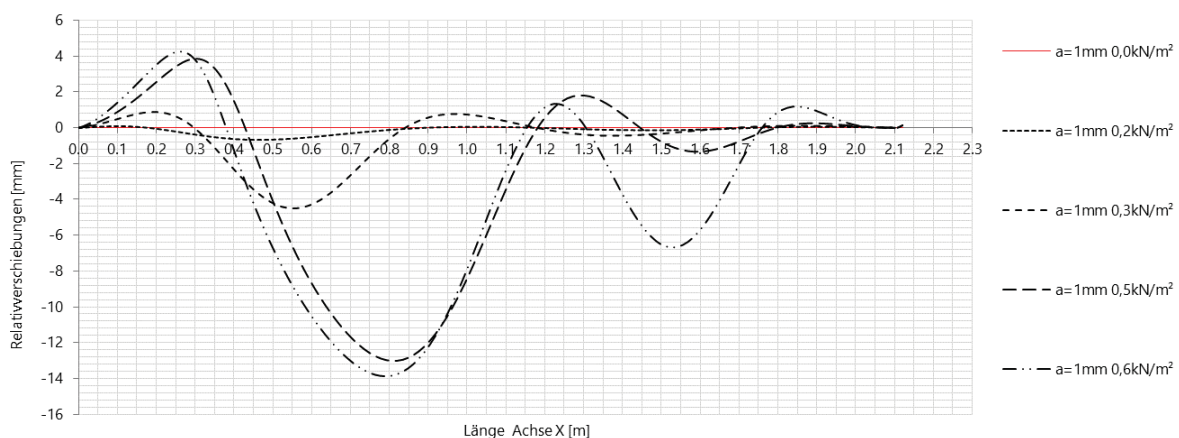


Abbildung 130: Verformungen relative zur gekrümmten Ausgangslage, A=1mm

Zur Abschätzung des dickenabhängigen Tragverhaltens wird in Abbildung 131 ein Vergleich der Modelle der Serie 07 durchgeführt.

Es zeigt sich, dass der Einfluss der Druckbelastung in den Spannungsverläufen der Scheiben mit Dicken von 2 mm und 3 mm bereits ersichtlich sind, allerdings noch keine ausgeprägte Form annehmen.

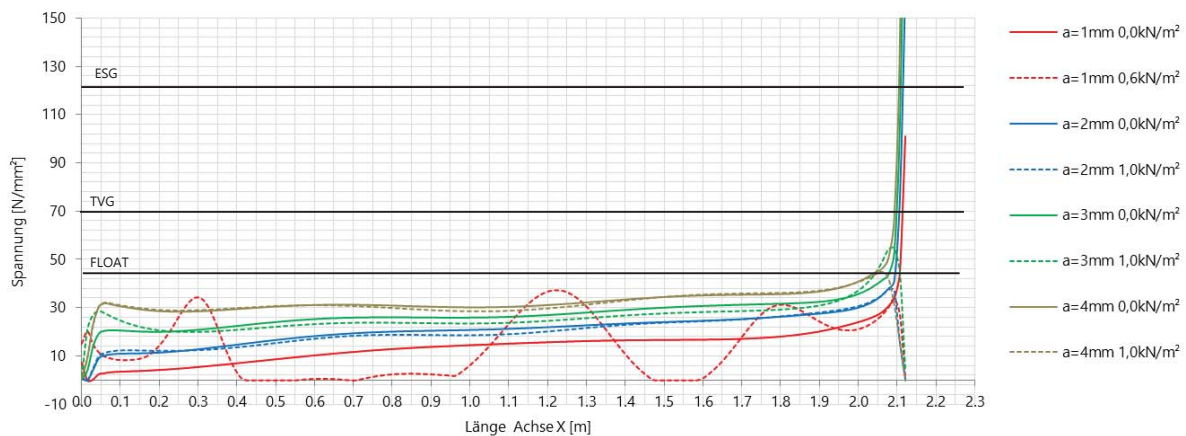


Abbildung 131: Hauptzugspannungen entlang der Achse X, infolge einer Druckbelastung

Steigert man die flächige Druckbelastung der 2 mm dicken Scheibe bis zu 1,36 kN/m², so kommt es zum gleichen instabilen Verhalten wie bei 0,6 kN/mm² bei der Scheibenstärke von 1 mm.

Abbildung 127 zeigt die Verformungen der Biegelinien infolge der Druckbelastung. Trotz der großen Verformung zufolge der z-Verschiebung, können die wellenförmigen Verformungen des Modells a=1 mm gut erkannt werden.

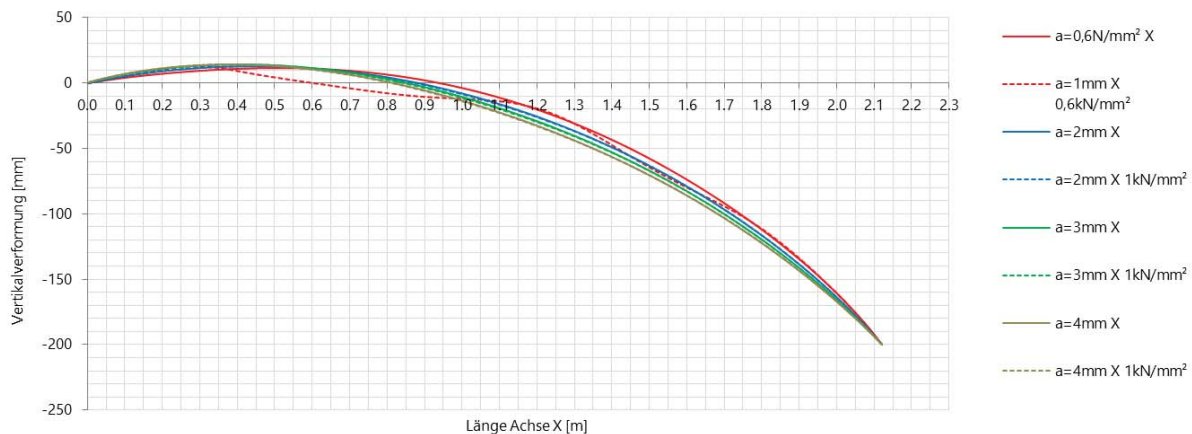


Abbildung 132: Krümmung entlang der Achse X, infolge einer Druckbelastung

Abbildung 133 zeigt den Vergleich der Oberflächenspannungen infolge der flächigen Druckbelastung zwischen den Modellen mit den Glasstärken 1 und 4 mm. Dabei sind die welligen Spannungsanstiege des Referenzmodells gut zu erkennen.

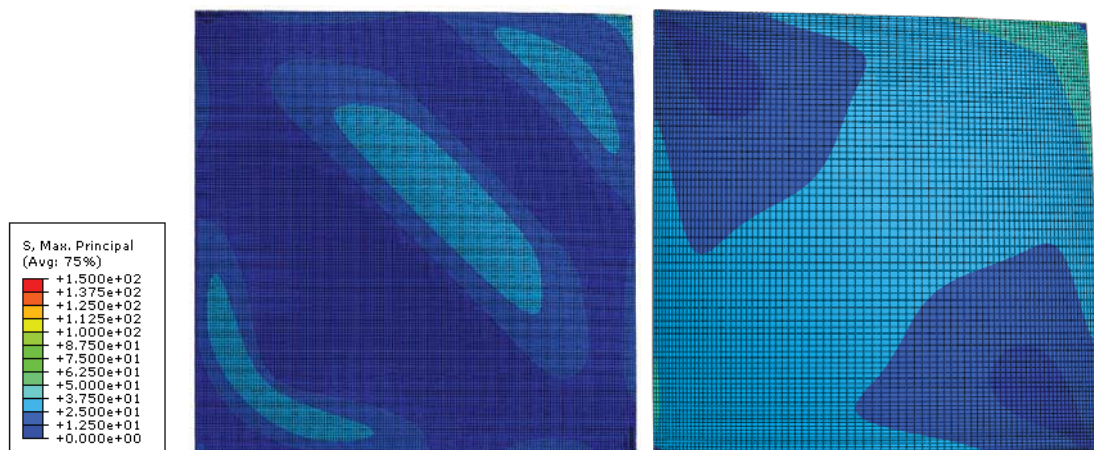


Abbildung 133: Vergleich der Oberflächenspannungen zwischen den Modellen $a=1,0$ mm und $a=4,0$ mm

4.2.4.4 Variation des Schubmoduls der Verbundfolie - Serie 08

Der Einfluss des Schubmoduls der Verbundfolie ist essenziell, um das Tragverhalten der VSG-Scheiben abschätzen zu können. Analog zur Analyse 4.1.4.4 wird in der nachfolgenden Parameterstudie dieser Einfluss durch die Veränderung des Schubmoduls der Verbundfolie (siehe Tabelle 24) untersucht.

		Z [mm]	L [m]	B [m]	A [mm]	G [N/mm ²]
	REF 02	200	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.40
Serie 08	g_1	200	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	0.04
	g_2	200	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	4.00
	g_3	200	1.50	1.50	1.00 0.76 1.00	40.00

Tabelle 24: Eigenschaften der in Serie 08 untersuchten Modelle

Das steifer werden der Scheibe verursacht wie in Abbildung 134 dargestellt einen erheblichen Anstieg der für den Biegeprozess erforderlichen Kraft. Anhand des Vergleiches zwischen den Modellen, mit den unterschiedlich steifen Verbundfolien, kann gezeigt werden, dass die Erhöhung von $4,0$ N/mm² auf 40 N/mm² lediglich eine Steigerung des erforderlichen Anpressdrucks von $3,14$ N mit sich bringt. Wohingegen eine Steigerung von $0,04$ N/mm² auf $0,4$ N/mm² ein Anwachsen des erforderlichen Anpressdrucks von $17,55$ N zur Folge hat.

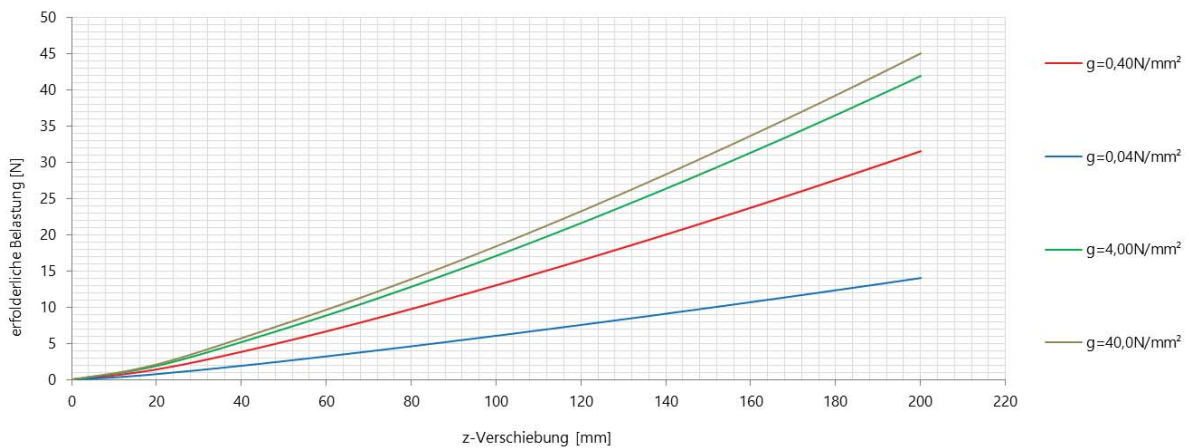


Abbildung 134: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 08

		K [N]	G [N/mm ²]
	REF 02	31.57	0,40
Serie 08	g_1	14.02	0,04
	g_2	41.97	4,00
	g_2	45.11	40,0

Tabelle 25: Erforderliche Kräfte für die zweiachsige Kaltverformung der Serie 08

Wie bereits in Serie 07 festgestellt wurde, führt eine steifer werdende der VSG-Scheibe zu einer geringeren Krümmung entlang der Achse X (siehe Modell $g=40 \text{ N/mm}^2$, Abbildung 135).

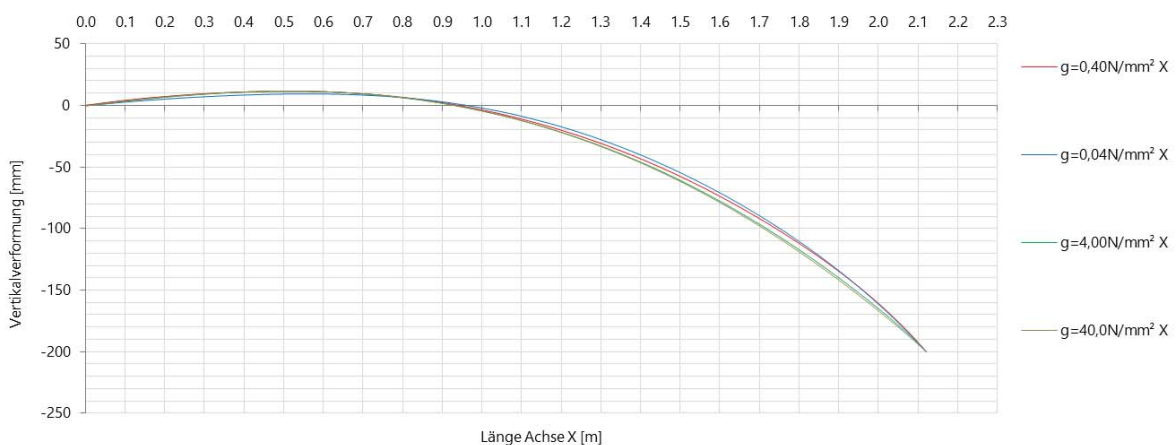


Abbildung 135: Krümmung entlang der Achse X

Die Betrachtung der Verformung über die Achse Y zeigt, dass sich der Einfluss der Verschiebung in x- und y-Richtung mit der Abminderung des Schubmoduls verringert. Dieser Effekt ist auf die kaum mögliche Spannungsübertragung der weichen Verbundfolie zurückzuführen. Des Weiteren ist in Abbildung 136 zu erkennen, dass eine Steigerung des Schubmoduls von 4 auf 40 N/mm^2 zu keiner signifikanten Änderung der Querverformung führt.

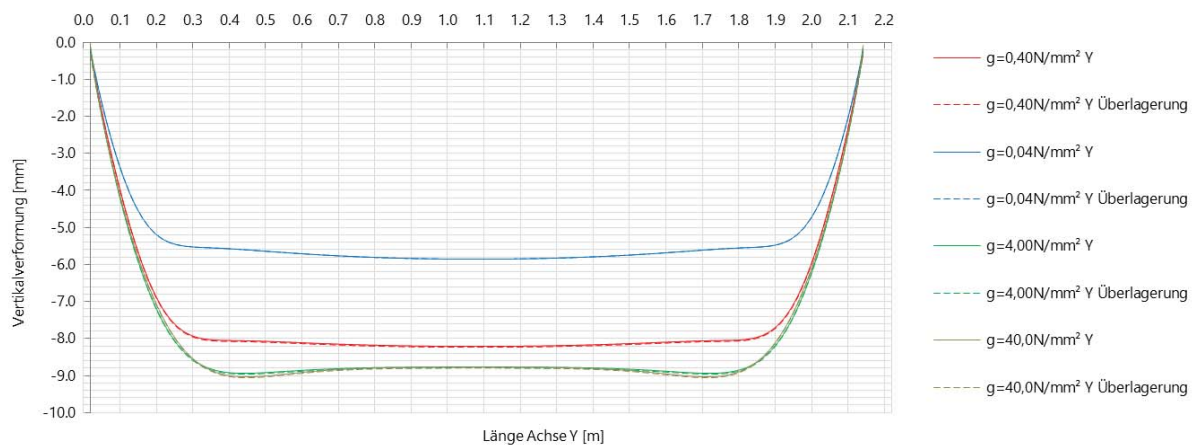


Abbildung 136: Krümmung entlang der Achse Y

Aus den Diagrammen in Abbildung 137 und Abbildung 138 ist zu erkennen, dass die lasteinleitungsbedingten Spannungsspitzen im Bereich der Auflagerpunkte beim Modell mit einem Schubmodul der Verbundfolie von 40 N/mm^2 , einen wesentlich größeren Einfluss auf die ausgewerteten Hauptzugspannungen hat, als bei den Modellen geringer Steifigkeit. Eine weiche Verbundfolie hingegen verhindert die direkte Kraftübertragung von den Auflagerpunkten zur oberen Scheibe. Dies spiegelt sich anhand der Auswertung der an der Oberseite der obersten Glasscheibe befindlichen Achse Y wieder

Der eingangs bereits erwähnte Einfluss der Verschiebung in x- und y- Richtung beeinflusst die in Abbildung 137 dargestellten Hauptzugspannungen in Querrichtung bei dem Modell mit einem sehr geringen Schubmodul von $0,04 \text{ N/mm}^2$ wesentlich weniger, als bei den Modellen erhöhter Steifigkeiten.

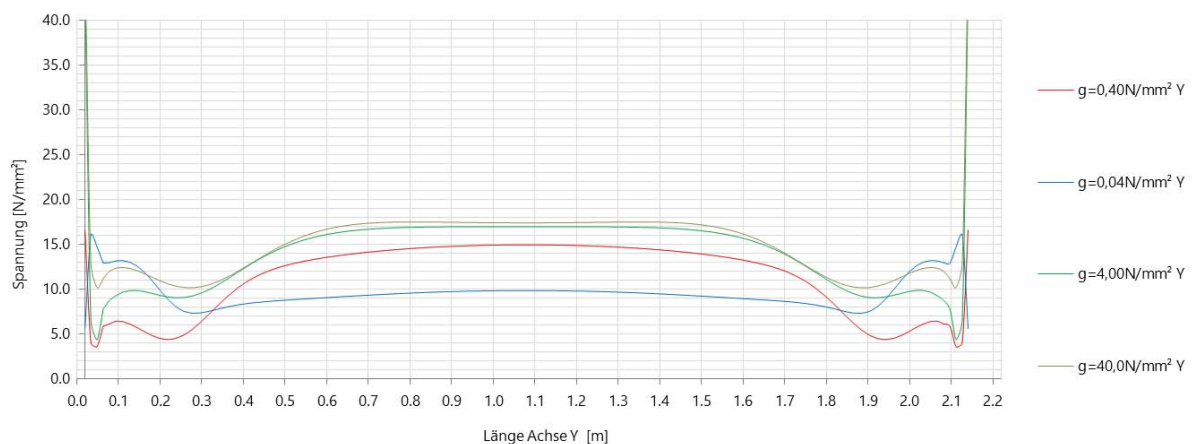


Abbildung 137: Hauptzugspannungen entlang der Achse Y

In Abbildung 138 ist anfänglich (über die Längsachse Y) ein gleichmäßiger Spannungsanstieg, infolge des steifer werdenden Schubmoduls, zu erkennen. Der durch die Lasteinleitung (ab ca. $1,9 \text{ m}$) entstehende Spannungsanstieg verschiebt sich bei den Modellen erhöhter Steifigkeit jedoch

vermehrt in die Richtung des Lasteinleitungspunktes. Dadurch kommt es zu einer Überschneidung der Spannungsverläufe.

Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass der auflagernahe Spannungsanstieg beim Modell mit einem Schubmodul von nur $0,04 \text{ N/mm}^2$ wesentlich niedriger ist als bei den Modellen höherer Steifigkeit.

Das stark voneinander abweichende Verhalten im Nahbereich des Lasteinleitungspunktes, beeinflusst maßgebend die Auswertung der maximalen Hauptzugspannungen.

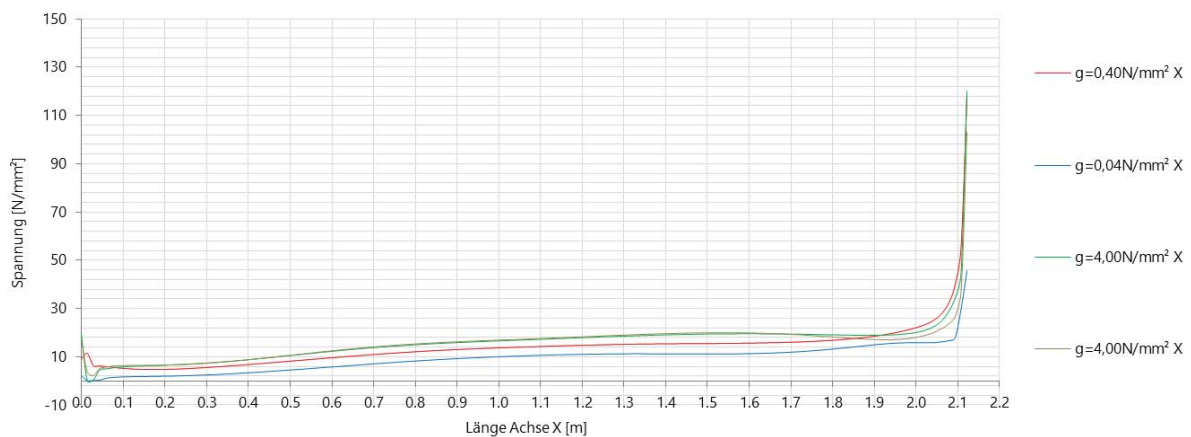


Abbildung 138: Hauptzugspannungen entlang der Achse X

Liest man aus den in Abbildung 138 dargestellten Graphen jeweils die Hauptzugspannungswerte 10 mm vor dem Lasteinleitungspunkt ab, so erhält man die in Abbildung 139 dargestellten Maxima. Es ist zu erkennen, dass der Wert der maximalen Hauptzugspannung des Modells $g=0,04 \text{ N/mm}^2$ im Verhältnis zu den drei anderen Modellen wesentlich geringer ist.

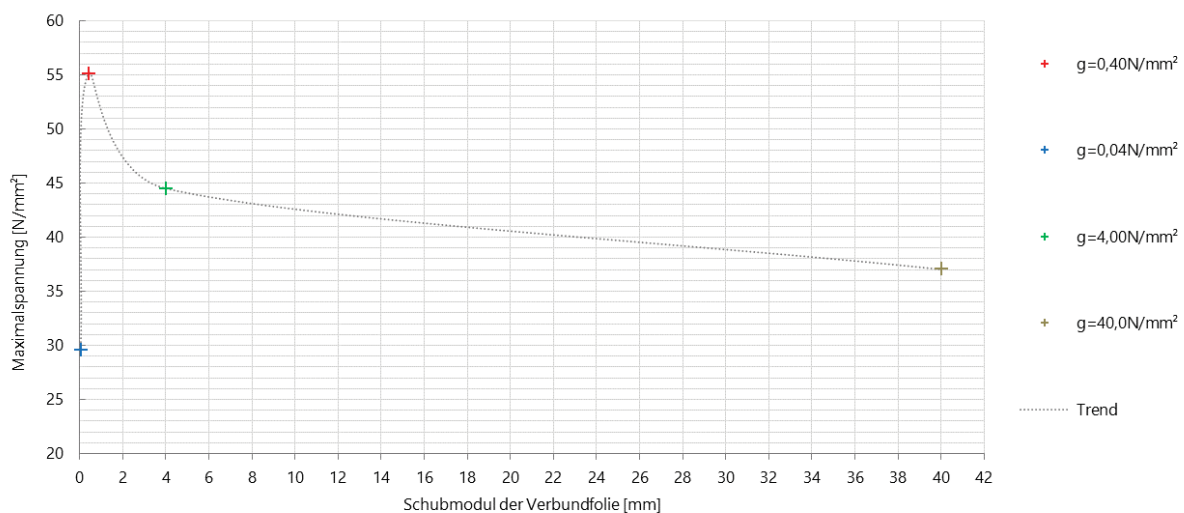


Abbildung 139: Maximale Hauptzugspannung infolge der Variation des Schubmoduls der Verbundfolie

Vergleicht man die an der Achse X ausgewerteten Spannungsverläufe mit den Oberflächenspannungen in Abbildung 140, so kann der konstante Spannungsanstieg des

Referenzmodells und die geringen Spannungen im Punkt 3 des Modells mit der weichen Verbundfolie sehr gut erkannt werden.

Allgemein kann anhand der Abbildung 140 und Abbildung 141 festgestellt werden, dass die Spannungen an der Oberfläche der obersten Scheiben weit unter den Festigkeiten von im Bauwesen zur Anwendung kommendem Glas liegen.

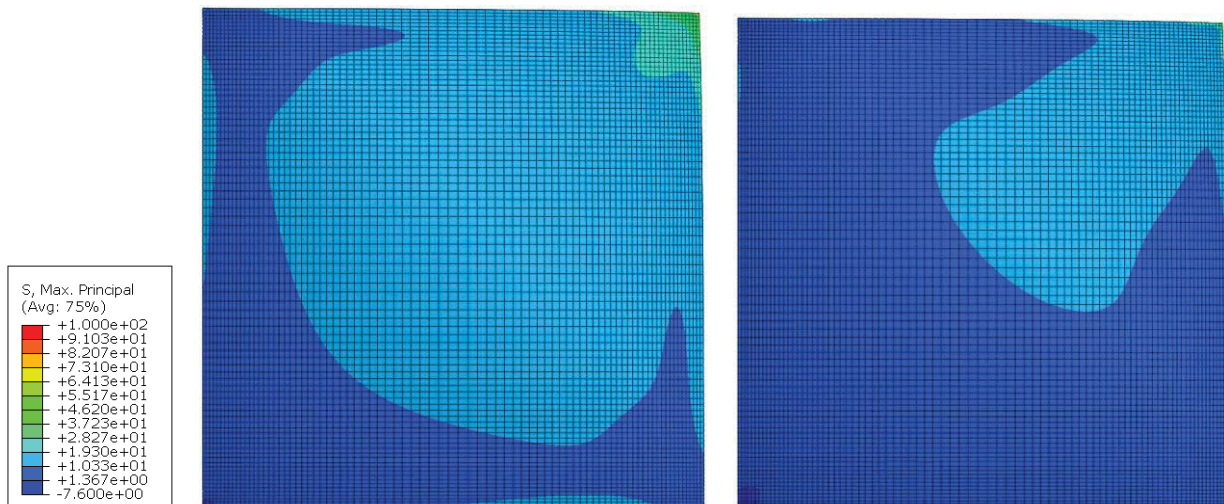


Abbildung 140: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $g=0,40\text{N/mm}^2$ (links) und $g=0,04\text{N/mm}^2$ (rechts)

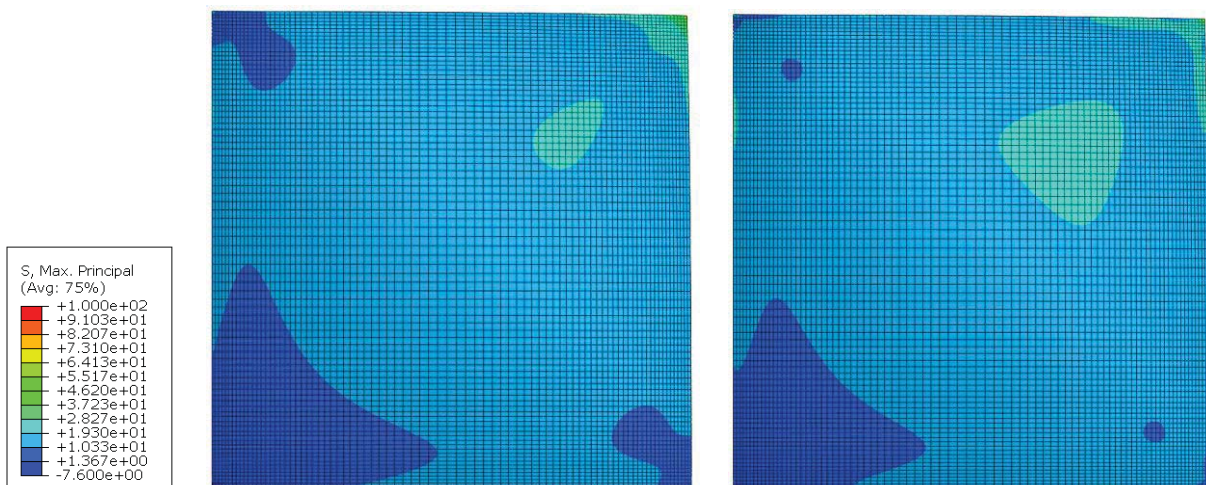


Abbildung 141: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $g=4,00\text{N/mm}^2$ (links) und $g=40,0\text{N/mm}^2$ (rechts)

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Durch den Einsatz von gebogenen Glasscheiben eröffnet sich in der Architektur ein extrem breites Anwendungsspektrum. Anfangs beschränkte sich der Einsatzbereich von Verglasungen auf die Funktion als raumabschließende Deckschicht mit lastabtragenden Unterkonstruktionen aus Beton, Holz oder Stahl. Mit dem steigenden Anspruch an Transparenz entwickelte sich jedoch ein starkes Interesse seitens der Architektur und Bauindustrie lastabtragende Elemente aus Glas zu konstruieren.

Spätestens an der Schnittstelle zwischen Entwurf und Abschätzung des Tragverhaltens stoßen viele innovativen Pläne auf Komplikationen. So bedarf es derzeit in der Praxis, aufgrund der mangelnden Richtlinien und fehlenden normativen Grundlagen zur Bemessung von gebogenen Glasscheiben, in einzelnen Fällen „Allgemeiner Bauaufsichtlicher Zustimmungen“ oder „Zustimmungen im Einzelfall“.

Ziel dieser Arbeit ist es einen Beitrag zur Erforschung gebogener Glasscheiben zu leisten und als Grundlage für weitere Forschungsprojekte in diesem Bereich zu dienen. Zu diesem Zweck wurde der gegenwärtige Stand der Technik, sowie der aktuelle Stand der Wissenschaft in der Literaturrecherche zusammengefasst. Dabei wurden die essenziellen Materialeigenschaften und Materialkennwerte erfasst, sowie die wichtigsten Produktionsmethoden erläutert. Als Grundlage für die Parameterstudie wurden zudem die derzeit produzierbaren Abmessungen von Dünnglas und deren Dicken bei den nennenswertesten Produktionsfirmen erfragt.

Aufbauend auf dieser Recherche wurde eine Parameterstudie erstellt. Diese Studie soll den Einfluss einiger praxisrelevanter Parameter wie Krümmung, Scheibenbreite, Scheibendicke und Schubmodul der Verbundfolie auf die Spannungen, infolge des Krümmungsprozesses, zeigen.

In den beiden folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der verschiedenen Serien analysiert und deren Auswirkungen in Kontext zueinander gesetzt.

5.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse des einachsigen Biegens

Krümmung

Die in Serie 01 untersuchte Verringerung des Radius von 3 m auf 1 m verursacht erwartungsgemäß einen signifikanten Anstieg der Spannungen im Bereich der Symmetrieebene. Zudem gewinnt die Querbiegung bei kleinen Krümmungen an Einfluss. Demzufolge entstehen während dem Biegeprozess, bei kleinen Radien, Verformungen in Krümmungsrichtung, welche die absolute Querbiegung erhöhen. Die daraus resultierenden Spannungen in Feldmitte, im Bereich von 0,8 bis 1,2 m der Hauptkrümmungsrichtung, bilden den absoluten Maximalwert der Hauptzugspannung ab.

Hinsichtlich des Kaltbiegeprozesses ist zu erwähnen, dass eine Reduktion des Radius von 3,0 auf 1,0 m zu einer signifikanten Erhöhung der erforderlichen Anpresskraft führt.

Scheibenlänge

Bedingt durch den von der Scheibenlänge unbeeinflusst bleibenden Radius, kommt es durch eine Längenänderung der Scheibe zu keinem nennenswerten Anstieg der maximalen Hauptzugspannungen. Erwähnenswert ist jedoch, dass beim Modell mit einer Länge von 0,5 m die Querverformung im Gegensatz zu den längeren Modellen, eine synklastische Verformung an der Symmetrieebene aufweist. Diese Verformungsänderungen verursachen verhältnismäßig geringere Spannungen zu Beginn der Achse entlang der Krümmungsform.

Die Steigerung der erforderlichen Anpresslast, verhält sich proportional zur ansteigenden Scheibenlänge.

Glasstärke

Die benutzungsbedingte Aufbaustärke ist der einflussreichste Faktor bei der Bemessung von Glasscheiben. Anhand der Analyse in Serie 03 kann gezeigt werden, dass sich der Spannungsanstieg zufolge der Erhöhung der Glasstärken linear verhält. Unter dem Einfluss der flächigen Druckbelastung, kommt es beim Referenzmodell mit 1 mm dicken Scheiben zu erheblichen Schwankungen im Verlauf der Hauptzugspannungen. Dieses, infolge der hohen Druckbelastung auf die vorverformte Scheibe, auftretende Verformungsverhalten lässt sich mit dem Schalenbeulen zylindrischer Querschnitte vergleichen. Bei einem durch einen Oberflächendruck belasteten Zylinder kommt es vor dem Ausbeulen nur zu sehr geringen Verformungen. Wird jedoch die kritische Last erreicht, tritt eine abrupte Verformung auf. Dieser Zeitpunkt wird bei dem Modell mit einer Dicke von 1,0 mm im Bereich zwischen einer Belastung von 0,25 und 0,50 kN/m² erreicht. Durch eine Erhöhung der Scheibenstärke auf jeweils 2 mm kann dieser Effekt auf wesentlich höhere Lastgrößen verschoben werden.

Der Maximalwert der für den Kaltbiegeprozess erforderlichen Anpresskraft tritt beim Modell mit einem Aufbau von 2 x 4 mm Glasscheiben und 0,76 mm Verbundfolie mit einem Wert von 5933 N auf.

Schubmodul

Hinsichtlich der Untersuchung des Einflusses der Zwischenschicht ist zu erwähnen, dass eine Erhöhung des Schubmoduls von 0,04 auf 4 N/mm² einen erheblich größeren Einfluss hat, als eine Steigerung von 4 auf 40 N/mm². Des Weiteren konnte anhand der Spannungsverläufe entlang der Mittelachse festgestellt werden, dass eine Erhöhung des Schubmoduls zu einer Verschiebung der Maximalspannungen in Richtung der Symmetrieebene führt.

Die Auswertung des erforderlichen Anpressdrucks im Zuge des Kaltbiegens hat gezeigt, dass sich die beiden Modelle mit den Schubsteifigkeiten von 4 und 40 N/mm² bis zu einer z-Verschiebung von 300 mm beinahe ident verhalten. Im Endzustand der Biegung tritt jedoch ein Kraftunterschied von 3285 N auf.

5.1.2 Zusammenfassung der Ergebnisse des zweiachsigen Biegens

Krümmung

Anhand der Auswertungen der Verformungen der belasteten Diagonale hat sich gezeigt, dass mit steigender Krümmung der Einfluss der Verformung in x- und y-Richtung, in Bezug auf die Gesamtverformung der gehaltenen Diagonale, zunimmt. Diese Verformung verursacht im auflagernahem Bereich starke Schwankungen im Spannungsverlauf, welche sich durch eine Erhöhung der Krümmung noch verstärken. Allgemein führt eine verstärkte Biegung zu einem annähernd linearen Anstieg der maximalen Hauptzugspannungen.

Der Einfluss der zunehmenden Krümmung auf die erforderliche Anpresskraft zeigt ein stetig, nicht-linear ansteigendes Verhalten.

Scheibenlänge

Im Gegensatz zum einachsigen Biegen entsteht anhand der Längenänderung bei gleichbleibender Verschiebung des belasteten Eckpunktes eine Krümmungsänderung. Diese Krümmungsänderung verursacht analog zu Serie 05 eine leicht synklastische Krümmung der gehaltenen Diagonale. Allgemein kann jedoch festgestellt werden, dass sich die Verformungsfigur der gehaltenen Diagonale mit steigender Länge (mit Ausnahme von $l=0,5$ m) kaum ändert.

Anhand der Auswertung des erforderlichen Anpressdrucks kann mit zunehmender Scheibenlänge (bei gleichbleibender z-Verschiebung des belasteten Eckpunktes) festgestellt werden, dass sich der Wert reduziert. Dieser Effekt entsteht, weil durch die Verlängerung der Scheibe die Krümmung reduziert wird.

Glasstärke

Ähnlich dem Verhalten zufolge einer Erhöhung des Schubmoduls der Zwischenschicht, verursacht die Verwendung stärkerer Scheiben eine Versteifung der Hauptkrümmungsachse. Die daraus resultierende, reduzierte Krümmung, muss über eine erhöhte Verformung der gehaltenen Diagonale ausgeglichen werden, was wiederum einen Anstieg der Spannungen im auflagernahen Bereich zur Folge hat.

Das bereits bei einachsigem Biegen festgestellte, extrem verformungsweiche Verhalten des Referenzmodells mit einer Scheibenstärke von 1,0 mm unter Flächenbelastung, spiegelt sich auch als Resultat der Belastung in Serie 07 wieder. Im Gegensatz zum einachsigen Biegen, tritt dieser Effekt beim Modell des zweiachsigen Biegens, bereits bei einer Belastung von $0,20 \text{ kN/m}^2$ auf. Darüberhinaus kann festgestellt werden, dass der Einfluss des Druckes von $1,0 \text{ kN/m}^2$ bei einer Scheibendicke von 2 und 3 mm bereits schwankende Verformungen verursacht, diese jedoch noch nicht signifikant zum Vorschein treten.

Der Anstieg der Anpresskraft anhand der starker werdenden Scheibendicken erreicht mit 585 N das absolute Maximum der beim zweiachsigen Biegen untersuchten Modelle. Dieser Wert liegt deutlich unter dem des einachsigen Biegens von 5933 N, bei identem Aufbau.

Schubmodul

Analog zum Modell des einachsigen Biegens, kann anhand der Auswertung der Serie 08 festgestellt werden, dass eine Steigerung des Schubmoduls von 4 auf 40 N/mm² kaum zu Änderungen im Verformungsverhalten führt.

Des Weiteren kann gezeigt werden, dass eine Erhöhung des Schubmoduls von 4,0 N/mm² auf 40 N/mm² lediglich eine Steigerung des erforderlichen Anpressdrucks von ca. 3 N mit sich bringt. Wohingegen eine Steigerung von 0,04 N/mm² auf 0,4N/mm² ein Anwachsen des erforderlichen Anpressdrucks von ca. 17,5 N zur Folge hat.

5.2 Ausblick

Zielsetzung dieser Arbeit war es eine Parameterstudie zu erstellen, um den Einfluss der Krümmung, der Scheibengröße, der Glasdicke und des Schubmoduls der Verbundfolie auf die Spannungen und Verformungen in der Glasscheibe infolge einachsiger und zweiachsiger Kaltverformung zu untersuchen.

Die dabei gewonnenen Ergebnisse sollen für weitere Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet als Referenz bzw. als Vergleichswerte für Versuchsergebnisse dienen.

In erster Linie wäre die Durchführung von Versuchen von hoher Priorität um das Verhalten der Scheibe und insbesondere den Einfluss der Verbundfolie überprüfen zu können.

Des Weiteren wäre auch eine detailliertere Abbildung der Materialeigenschaften der Verbundfolie im Finite Elemente Modell von hoher Bedeutung. Es ist bekannt, dass die visko-plastischen Materialeigenschaften der Folie einen erheblichen Einfluss auf das Materialverhalten von kaltgebogenen Verbundsicherheitsglasscheiben während des Biegeprozesses haben. Sowohl der Schubmodul, als auch die Poissonzahl der Folie, sind von der Temperatur und der Belastungsgeschwindigkeit abhängig. Da die Umgebungsbedingungen bei in-situ Verformung situationsbedingt sehr unterschiedlich sein können, wäre eine umfangreiche Untersuchung dieser Einflüsse für die Bemessung von Bedeutung.

Darüber hinaus könnte eine genauere Abbildung des Lasteinleitungsbereiches aufschlussreiche Erkenntnisse über die Kraftübertragung in Auflagernähe und somit über die belastungsbedingten Spannungsspitzen geben.

Bezogen auf die Untersuchung der flächenförmigen druckbelasteten Scheiben, wäre eine tiefer greifende Untersuchung des Stabilitätsverhaltens (Schalenbeulens) von Bedeutung, um aussagekräftige Ergebnisse für die Abschätzung des Tragverhaltens zu erhalten. Des Weiteren wäre, um die Tragfähigkeit zu erhöhen, eine Untersuchung von VSG - Paketen mit 3 bis 4 Scheiben von hoher Relevanz.

In Hinblick auf die fehlende normative Regelung sollte das Ziel weiterer Forschungsarbeiten zu diesem Thema sein, ein praxisorientiertes, allgemein gültiges Bemessungskonzept zu erarbeiten. Dieses Konzept soll das gewonnene Wissen einer breiteren Nutzungsgruppe zugänglich machen und so den vermehrten Einsatz von gebogenen Glasscheiben in der Architektur ermöglichen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Glasvorbau des Bahnhofs in Straßburg [1]	1
Abbildung 2: Spannungs-Dehnungs-Kurven von Glas , Stahl St37 und Beton C45/55 [5]	5
Abbildung 3: Herstellungsprozess von Floatglas [5]	8
Abbildung 4: Glasherstellung im Down-Draw Verfahren (links) und im Overflow-Fusion Verfahren (rechts) [18]	9
Abbildung 5: Spannungsüberlagerung von biegebeanspruchtem ESG [5]	10
Abbildung 6: Darstellung des Spannungsverlaufs über den Glasquerschnitt von ESG (links), TVG (mittig) und ChVG (rechts) [4]	12
Abbildung 7: Zeit- und temperaturabhängige Veränderung des Schubmoduls von PVB [24]	14
Abbildung 8: Kriechverhalten der Verbundfolie nach dem Glasbruch [25]	15
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Warmbiegeprozesses [30]	17
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Workflows beim Laminationsbiegen [30]	20
Abbildung 11: Nordkettenbahn Innsbruck [32]	22
Abbildung 12: Glasvorbau des Bahnhofs in Straßburg [33]	22
Abbildung 13: Atriumüberdachung des Aria Hotels in Budapest [34]	23
Abbildung 14: Erweiterung des Städel Museums [35]	23
Abbildung 15: Präsentation einer Ganzglasbrücke auf der glasstec 2008 [37]	24
Abbildung 16: Bombay Sapphire Headquarter in Whitchurch [38]	25
Abbildung 17: Faltnetzwerk aus Dünnglasbögen, SFL Technologies, [18]	25
Abbildung 18: Grundprinzip der Biegegeometrie [24]	26
Abbildung 19: Normativ geregelte Anordnung der Probe [41]	28
Abbildung 20: Kraft/Spannungs-Diagramm beim Biegen von Dünnglas [8]	29
Abbildung 21: Versuchsaufbau [8]	30
Abbildung 22: Maximale Spannung in Scheibenmitte als Funktion der Verformung [8]	30
Abbildung 23: Vergleich zwischen den Spannungen aus dem modifizierten Vier-Punkt-Biegeversuch und dem Knickversuch [8]	31
Abbildung 24: Geometrie des Biegemodells [39]	32
Abbildung 25: Charakteristisches Spannungsbild in tangentialer Richtung [39]	32
Abbildung 26: Spannung beim Biegen entlang der Längskante (3,5m x 0,5 m, 6mm) [39]	33
Abbildung 27: Spannung beim Biegen entlang der Längskante (3,5m x 3,5 m, 6mm) [39]	34
Abbildung 28: Spitzenbelastungsfaktor bezogen auf die Breite der Scheibe [39]	34
Abbildung 29: Schematische Systemdarstellung der Scheibe im Grundriss [43]	36
Abbildung 30: Versuchsaufbau mit verschiedenen Auflagerbedingungen [43]	36
Abbildung 31: Vertikale Verschiebung der Scheibenmittellachse in Relation zur Verschiebung des Lasteinleitungspunktes [43]	38
Abbildung 32: Systemdarstellung der Verformung einer ebenen Platte zu einem hyperbolischen Paraboloid [31]	39
Abbildung 33: Verzweigungspunkt beim Limit der symmetrischen Verformung [31]	40
Abbildung 34: Spannungsbilder nach Auslenken der Ecken: 10 mm Auslenkung (links), 70 mm Auslenkung (rechts) [31]	41

Abbildung 35: Verformung in Abhängigkeit der Poisson-Zahl (links), Einfluss der Poisson-Zahl auf die Krümmung in Querrichtung (rechts) [31]	41
Abbildung 36: Modellskizze der einachsigen Biegung	44
Abbildung 37: Skizze der Auflagerbedingungen des Symmetrielagers	45
Abbildung 38: Geometrischer Zusammenhang der z-Verschiebung	46
Abbildung 39: Spannungsbilder während des Verformungsprozesses	47
Abbildung 40: Netzfeinheit der Konvergenzstudie: M50 (links), M25 (mittig), M12.5 (rechts)	49
Abbildung 41: Achsenbeschriftungen	49
Abbildung 42: Spannungsverlauf über die Glasoberfläche M12,5	50
Abbildung 43: Hauptzugspannungen Achse A, B, C über die Länge im Endzustand der Biegung	50
Abbildung 44: Spannungsanstieg zufolge Aufknicken im letzten Lastschritt (links), kein Spannungsanstieg im vorletzten Belastungsschritt (rechts)	51
Abbildung 45: Hauptzugspannungen Achse D, E, F über die Länge im Endzustand der Biegung	52
Abbildung 46: Hauptzugspannungen Achse G, H, I über die Länge im Endzustand der Biegung	52
Abbildung 47: z-Verformung in die Querrichtung	53
Abbildung 48: Finite Elemente Netz des Referenzmodells	54
Abbildung 49: Vergleich der Hauptzugspannungen zwischen dem Referenzmodell und M12,5	54
Abbildung 50: Spannungsabbildung an der Oberfläche im Zuge der Verifizierung des Referenzmodells	55
Abbildung 51: Spannungsauswertung im Zuge der Verifizierung des Referenzmodells	55
Abbildung 52: Vergleich zwischen dem Referenzmodell und einem Modell mit einer Krümmungsform aus Polyoxymethylen (POM)	56
Abbildung 53: Hauptzugspannungen über die Länge der Scheibe mit einer unterschiedlichen Elementanzahl über die Dicke der Zwischenschicht	56
Abbildung 54: Geometrische Anpassung des Referenzmodells an die ideale Kreisbogenform	57
Abbildung 55: Skizze der variierenden Biegeradien - Serie 01	58
Abbildung 56: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 01	58
Abbildung 57: Hauptzugspannungen über die Länge im Endzustand der Biegung	59
Abbildung 58: Differenz der Querverformung in z und x-Richtung	60
Abbildung 59: Maximale Hauptzugspannung infolge Variation des Radius	60
Abbildung 60: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell R=3 m (links) und R=1 m (rechts)	61
Abbildung 61: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell R=9 m (links) und R=12 m (rechts)	61
Abbildung 62: Skizzen der unterschiedlichen Scheibenlängen - Serie 02	62
Abbildung 63: Skizzen der unterschiedlichen Scheibenlängen - Serie 02 (Schnitt)	63
Abbildung 64: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 02	63
Abbildung 65: Hauptzugspannungen über die Länge im Endzustand der Biegung	64
Abbildung 66: Querbiegung Scheibenbeginn	65
Abbildung 67: Relative Verformung zwischen dem Auflager und der Scheibenmitte	65
Abbildung 68: Maximale Hauptzugspannung infolge der Variation der Scheibendicke	66
Abbildung 69: Vergleich der Hauptzugspannungen des Referenzmodelles mit einer 3 m breiten Scheibe	66
Abbildung 70: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: L=1,5m (links), L=0,5m (mittig) und L=1,0m (rechts)	67
Abbildung 71: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: L=2,0m	67

Abbildung 72: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: L=2,5m	68
Abbildung 73: Skizzen der unterschiedlichen Glasdicken - Serie 03	68
Abbildung 74: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses	69
Abbildung 75: Hauptzugspannungen über die Länge im Endzustand der Biegung	69
Abbildung 76: Maximale Hauptzugspannung zufolge der Variation der Scheibendicke	70
Abbildung 77: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: A=1,0 mm (links) und A=2,0 mm (rechts)	70
Abbildung 78: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: A=3,0 mm (links) und A=4,0 mm (rechts)	71
Abbildung 79: Skizze der Auflagerbedingungen der flächig druckbelasteten Scheibe	71
Abbildung 80: Spannungsentwicklung zufolge der steigenden Druckbelastung, A=1mm	72
Abbildung 81: Relativverformung zwischen dem Auflager und der Scheibenmitte, A=1mm	73
Abbildung 82: Entwicklung der Hauptzugspannungen für die Serie 03, zufolge einer Druckbelastung	73
Abbildung 83: Spannungsentwicklung zufolge Druckbelastung, A=2mm	74
Abbildung 84: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche zufolge Druckbelastung: Referenzmodell (links) und A=3 mm (rechts)	74
Abbildung 85: Änderung der Vertikalverformung an der Mittelachse zufolge Druckbelastung	75
Abbildung 86: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 04	76
Abbildung 87: Hauptzugspannungen über die Länge im Endzustand der Biegung	77
Abbildung 88: Maximale Hauptzugspannung infolge der Variation des Schubmoduls der Verbundfolie	77
Abbildung 89: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $G=0,40\text{N/mm}^2$ (links) und $G=0,04\text{N/mm}^2$ (rechts)	77
Abbildung 90: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $G=4,00\text{N/mm}^2$ (links) und $G=40,0\text{N/mm}^2$ (rechts)	78
Abbildung 91: Vergleich der maximalen Querverformung von Serie 01 und Serie 02 mit dem Referenzmodell	79
Abbildung 92: Vergleich der maximalen Querverformung von Serie 03 und Serie 04 mit dem Referenzmodell	79
Abbildung 93: Modellskizze der zweiachsigen Biegung	80
Abbildung 94: Skizze der Auflagerbedingungen der unterstützten und der belasteten Ecken	80
Abbildung 95: Spannungsbilder im Laufe des Verformungsprozesses	81
Abbildung 96: Achsenbeschriftungen	83
Abbildung 97: Hauptkrümmung entlang der Achse X	83
Abbildung 98: Vertikalverformung der Achse Y, Querbiegung	84
Abbildung 99: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 05	85
Abbildung 100: Krümmung entlang der Achse X	86
Abbildung 101: Verformung entlang der Achse Y; quer zur Hauptkrümmung	86
Abbildung 102: Hauptzugspannungen entlang der Achse Y	87
Abbildung 103: Verformungsüberlagerung in x- und y-Richtung	87
Abbildung 104: Spannungsvergleich anhand von S11, S22, S33 und Hauptzugspannung	88
Abbildung 105: Hauptzugspannungen entlang der Achse X	88
Abbildung 106: Nicht berücksichtigte Spannungspitze zufolge Lasteinleitung	88
Abbildung 107: Maximale Hauptzugspannung infolge der zunehmenden Krümmung	89
Abbildung 108: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $z=200\text{mm}$ (links) und $z=300\text{mm}$ (rechts)	89
Abbildung 109: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $z=400\text{mm}$ (links) und $z=500\text{mm}$ (rechts)	90
Abbildung 110: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 06	91

Abbildung 111: Krümmung entlang der Achse X	91
Abbildung 112: Krümmung entlang der Achse Y	92
Abbildung 113: Hauptzugspannungen entlang der Achse Y	92
Abbildung 114: Verformungsüberlagerung in x- und y-Richtung	93
Abbildung 115: Hauptzugspannungen entlang der Achse X	93
Abbildung 116: Maximale Hauptzugspannung infolge der Veränderung des Schubmoduls	94
Abbildung 117: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: $l=1,5$ m (links) und $l=0,5$ m (rechts)	94
Abbildung 118: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $l=2$ m	95
Abbildung 119: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $l=2,5$ m	95
Abbildung 120: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 07	96
Abbildung 121: Krümmung entlang der Achse X	97
Abbildung 122: Hauptzugspannungen entlang der Achse Y	97
Abbildung 123: Verformung entlang der Achse X; quer zur Hauptkrümmung	98
Abbildung 124: Hauptzugspannungen entlang der Achse X	98
Abbildung 125: Maximale Hauptzugspannung infolge der zunehmenden Scheibendicke	99
Abbildung 126: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: $A=1,0$ mm (links) und $A=2,0$ mm (rechts)	99
Abbildung 127: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: $A=3,0$ mm (links) und $A=4,0$ mm (rechts)	100
Abbildung 128: Skizze der Auflagerbedingungen der Druck belasteten Scheibe	100
Abbildung 129: Spannungsentwicklung zufolge der steigenden Druckbelastung	101
Abbildung 130: Verformungen relative zur gekrümmten Ausgangslage, $A=1$ mm	101
Abbildung 131: Hauptzugspannungen entlang der Achse X, infolge einer Druckbelastung	102
Abbildung 132: Krümmung entlang der Achse X, infolge einer Druckbelastung	102
Abbildung 133: Vergleich der Oberflächenspannungen zwischen den Modellen $a=1,0$ mm und $a=4,0$ mm	103
Abbildung 134: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Kaltbiegeprozesses der Serie 08	104
Abbildung 135: Krümmung entlang der Achse X	104
Abbildung 136: Krümmung entlang der Achse Y	105
Abbildung 137: Hauptzugspannungen entlang der Achse Y	105
Abbildung 138: Hauptzugspannungen entlang der Achse X	106
Abbildung 139: Maximale Hauptzugspannung infolge der Variation des Schubmoduls der Verbundfolie	106
Abbildung 140: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $g=0,40\text{N/mm}^2$ (links) und $g=0,04\text{N/mm}^2$ (rechts)	107
Abbildung 141: Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche: Modell $g=4,00\text{N/mm}^2$ und $g=40,0\text{N/mm}^2$ (rechts)	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialkennwerte von Kalk-Natron-Silicatglas [3] und Borosilicatglas [2].....	4
Tabelle 2: Charakteristische Festigkeitswerte von Floatglas, TVG und ESG [7].....	5
Tabelle 3: Materialkennwerte von SentryGlas® Plus und PVB-Folie [7], [26], [25].....	15
Tabelle 4: Mögliche Krümmungsradien in Abhängigkeit vom Herstellungsprozess.....	16
Tabelle 5: Geometrische Rahmenbedingungen der Forschungsprojekte zum Thema einachsige Biegung.....	26
Tabelle 6: Geometrische Rahmenbedingungen der Forschungsprojekte zum Thema zweiachsige Biegung.....	35
Tabelle 7: Materialkennwerte der Parameterstudie: Krümmungsform, Glas, Verbundfolie [4].....	43
Tabelle 8: Parametermatrix der Studie.....	47
Tabelle 9: Eigenschaften der in Serie 01 untersuchten Modelle.....	57
Tabelle 10: Erforderliche Kräfte für die einachsige Kaltverformung der Serie 01.....	59
Tabelle 11: Eigenschaften der in Serie 02 untersuchten Modelle.....	62
Tabelle 12: Erforderliche Kräfte für die einachsige Kaltverformung der Serie 02.....	64
Tabelle 13: Eigenschaften der in Serie 03 untersuchten Modelle.....	68
Tabelle 14: Erforderliche Kräfte für die einachsige Kaltverformung der Serie 03.....	69
Tabelle 15: Eigenschaften der in Serie 04 untersuchten Modelle.....	75
Tabelle 16: Erforderliche Kräfte für die einachsige Kaltverformung der Serie 04.....	76
Tabelle 17: Parameter und Aufbauten der einzelnen Serien.....	82
Tabelle 18: Eigenschaften der in Serie 05 untersuchten Modelle.....	84
Tabelle 19: Erforderliche Kräfte für die zweiachsige Kaltverformung der Serie 05.....	85
Tabelle 20: Eigenschaften der in Serie 06 untersuchten Modelle.....	90
Tabelle 21: Erforderliche Kräfte für die zweiachsige Kaltverformung der Serie 06.....	91
Tabelle 22: Eigenschaften der in Serie 07 untersuchten Modelle.....	95
Tabelle 23: Erforderliche Kräfte für die zweiachsige Kaltverformung der Serie 07.....	96
Tabelle 24: Eigenschaften der in Serie 08 untersuchten Modelle.....	103
Tabelle 25: Erforderliche Kräfte für die zweiachsige Kaltverformung der Serie 08.....	104

Literaturverzeichnis

- [1] workonweb - Internetlösungen , „seele,“ workonweb - Internetlösungen , [Online]. Available: <http://seele.com/structure-de/glasvorbau-bahnhof-strassburg.html>. [Zugriff am 12.3.2016].
- [2] *ÖNORM EN 1748-1 Glas im Bauwesen, Spezielle Basiserzeugnisse, Teil 1: Borosilicatgläser*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 1997.
- [3] *ÖNORM EN 572-1 Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas – Teil 1: Natronsilicatglas*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2012.
- [4] Institut für Hochbau, TU - Graz, *Konstruktiver Glasbau*, 2015/2016.
- [5] S. J. F. A. WÖRNER Johann-Dietrich, *Glasbau, Grundlagen, Berechnung, Konstruktion*, Berlin Heidelberg: Springer, 2001.
- [6] „Baunetz Wissen,“ BauNetz Media GmbH, [Online]. Available: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Glas_Festigkeit-von-Glas_159075.html. [Zugriff am 22. März 2016].
- [7] *ÖNORM B 3716-1 Glas im Bauwesen – Konstruktiver Glasbau Teil 1: Grundlagen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2015.
- [8] I. MANIATIS, G. NEHRING und G. SIEBERT, *Studie on the Strength of Thin Glass*, IABSE Madrid Symposium Report, Vol. 102, Madrid, 2014.
- [9] „SCHOTT - glass made of ideas,“ SCHOTT AG, [Online]. Available: http://www.schott.com/advanced_optics/german/products/optical-materials/thin-glass/ultra-white-glass-b-270-i/index.html. [Zugriff am 22. März 2016].
- [10] *ÖNORM EN 572-2 Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas – Teil 2: Natronsilicatglas*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2012.
- [11] *ÖNORM EN 572-4 Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk Natronsilicatglas, Teil 4: Gezogenes Flachglas*, Österreichisches Normungsinstitut, 2012.
- [12] „DETAIL Serie 2015,1/2, Bauen mit Glas,“ 2015. [Online]. Available: <https://issuu.com/detail-magazine/docs/bk-det-2015-1-2-glas>. [Zugriff am 25.2.2016].
- [13] *DIN 18008-1 Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen*, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2010.
- [14] *ÖNORM EN 12150-1 Glas im Bauwesen - Thermisch vorgespanntes Kalknatron - Einscheibensicherheitsglas Teil 1: Definition und Beschreibung*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2000.
- [15] *ÖNORM EN 12337-1 Glas im Bauwesen - Chemisch vorgespanntes Kalknatronglas - Teil 1: Definition und Beschreibung*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2000.
- [16] S. FEIRABEND, „Dokumentenserver der Universität Stuttgart,“ [Online]. Available: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2010/5650/>. [Zugriff am 24. März 2016].

-
- [17] „Material Archiv,“ Datenbankkonzept oSkope media gmbh, 2008/2013 . [Online]. Available: <http://www.materialarchiv.ch/glossar/665/Down-Draw-Verfahren#/glossar/665/down-draw-verfahren>. [Zugriff am 25 2 2015].
- [18] „DETAIL - Zeitschrift für Architektur + Baudetail,“ IT:Agenten GmbH, [Online]. Available: <http://www.detail.de/artikel/glas-in-der-architektur-neue-entwicklungen-1-12954/>. [Zugriff am 24 März 2016].
- [19] „LiSEC,“ LISEC Austria GmbH, [Online]. Available: <http://www.lisec.com/Anlagen/Vorspannen/Vorspannen2/HAL>. [Zugriff am 24 März 2016].
- [20] Corning, „Corning, Gorillia Glass, ION-EXCHANGE PROCESS,“ Corning Incorporated, [Online]. Available: <http://www.corninggorillaglass.com/en/technology/how-its-made>. [Zugriff am 26 2 2016].
- [21] ÖNORM EN ISO 12543-1 Glas im Bauwesen, Verbundglas und Verbundsicherheitsglas, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2011.
- [22] ÖNORM B 3716-3 Glas im Bauwesen - Absturzsichernde Verglasung, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2009.
- [23] ÖNORM EN IS 527-3 Kunststoffe- Bestimmung der Zugeigenschaften Teil3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2003.
- [24] J. BELIS, B. INGHELBRECHT, R. VAN IMPE und D. CALLEWAERT, „cold bending of laminated glass panels,“ Belgien, 2005.
- [25] DUPONT, „The miracles of science,“ [Online]. Available: http://www2.dupont.com/Building_Innovations/zh_CN/assets/downloads/SGPintro_E.pdf. [Zugriff am 13 März 2016].
- [26] G. SIEBERT und I. MANIATIS, Tragende Bauteile aus Glas: Grundlagen, Konstruktion, Bemessung, Beispiele, Berlin: Ernst & Sohn, 2012.
- [27] „leading glass. sedak; biegen mit hoher Präzision,“ sedak GmbH & Co. KG, [Online]. Available: <https://www.sedak.com/de/unternehmen/kompetenzen/biegen-glaslaminat/>. [Zugriff am 5 April 2016].
- [28] B. Dipl.-Ing. FRÖHLICH, „DBZ Deutsche BauZeitschrift online,“ Bauverlag BV GmbH, [Online]. Available: http://www.dbz.de/artikel/dbz_Die_optimale_Haut_Mit_Laminationsbiegen_zur_perfekten_glaesernen_Haut_10223_80.html. [Zugriff am 26 2 2016].
- [29] C. SCHITTLICH, Glas, best of Detail, München: Ed. Detail, 2014.
- [30] T. FILDHUTH, Design and Monitoring of Cold Bent Lamination-Stabilised Glass, Stuttgart: Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart, 2015.
- [31] G. Laura, S. MASSIMIANI und G. ROYER-CARFAGNI, „Buckling phenomena in double curved cold-bent glass,“ Elsevier, Parma, 2013.
- [32] „Zaha Hadid Architects,“ Photography Werner Huthmacher, [Online]. Available: <http://www.zaha-hadid.com/architecture/nordpark-railway-stations/>. [Zugriff am 18 Juli 2016].
- [33] G. Seele, „seele,“ seele verwaltungs GmbH, 2016. [Online]. Available: <http://seele.com/references/strasbourg-railway-station/>. [Zugriff am 18 Juli 2016].
-

-
- [34] sedak GmbH & Co. KG, „sedak,“ edak verwaltungs GmbH, [Online]. Available: <https://www.sedak.com/en/applications/architecture/glass-roofs/>. [Zugriff am 14 April 2016].
- [35] schneider + schumacher Public Relations, „schneider + schumacher,“ Realisierung: FORWARD MEDIA; Konzept, Design, Corporate Design: quandel design und kommunikation, [Online]. Available: <http://www.schneider-schumacher.de/projekte/project-details/7-erweiterung-des-staedel-museums.project>. [Zugriff am 18 Juli 2016].
- [36] H. BARF und S. LENZEN, *Innovativ konstruieren: Synergien im Bauprozess zwischen Herstellern und Planern*, München: Inst. f. Internat. Arch.-Dok, 2009.
- [37] K. LANG und M. WEBER, „DETAIL inspiration,“ [Online]. Available: <http://www.detail-online.com/inspiration/technology-glass-shaping-techniques-in-building-construction-108931.html>. [Zugriff am 14 April 2016].
- [38] „dezeen magazine,“ [Online]. Available: <http://www.dezeen.com/2014/10/09/thomas-heatherwick-bombay-sapphire-gin-distillery-hufton-crow/>. [Zugriff am 14 April 2016].
- [39] M. FEIJEN, I. VROUWE und P. THUN, *Cold-Bent Single Curved Glass; Opportunities and Challenges in Freeform Facades*, Delft: TU Delft, 2012.
- [40] A. VAN DUSER, A. JAGOTA und J. Stephen, „ANALYSIS OF GLASS/POLYVINYL BUTYRAL LAMINATES, SUBJECTED TO UNIFORM PRESSURE,“ *JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS*, 1999.
- [41] ÖNORM EN 1288-3 *Glas im Bauwesen - Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Prüfung von Proben bei zweiseitiger Auflagerung*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2000.
- [42] ÖNORM EN 1288-1 *Glas im Bauwesen - Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Grundlagen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2000.
- [43] K. G. DATSIU und M. OVEREND, *Behaviour of cold bent glass plates during the shaping process*, Düsseldorf, International Conference at glasstec, 2014.
- [44] MANSFIELD, „The inextensional theory for thin flat plates,“ *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1955.
- [45] D. Prof. Dr.-Ing. GROSS, W. Prof. Dr. HAUGER, W. Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. SCHNELL, J. Prof. Dr.-Ing. SCHRÖDER und W. Prof. Dr. WALL, *Technische Mechanik, Band 2: Elastostatik*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [46] ÖNORM EN ISO 12543-1 *Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas – Teil 1: Definitionen und Beschreibung von Bestandteilen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2011.
- [47] ÖNORM EN 1863-1 *Glas im Bauwesen – Teilvorgespanntes Kalknatronglas – Teil 1 Definition und Beschreibung*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2012.
- [48] ÖNORM B 3716-5 *Glas im Bauwesen – Konstruktiver Glasbau Teil 5: Punktförmig gelagerte Verglasungen und Sonderkonstruktionen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2013.
- [49] ÖNORM B 3716-4 *Glas im Bauwesen – Konstruktiver Glasbau Teil 4: Betretbare, begehbare und befahrbare Verglasung*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2009.
- [50] ÖNORM B 3716-2 *Glas im Bauwesen – Konstruktiver Glasbau Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasung*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2013.
-

-
- [51] kuraray, „Physical properties of Sentryglas and butacite,” 2014. [Online]. Available: http://glasslaminatingsolutions.kuraray.com/fileadmin/user_upload/Kuraray_4_1_Physical_Properties_of_Sentryglas.pdf. [Zugriff am 25.2.2016].
- [52] LiSEC Austria, Ing. MADER Leopold, „Herstelltechnologien für 3-fach ISO aus Dünnglas, Marktpotentiale und Anwendungsbeispiele,” 30.4.2014. [Online]. Available: http://mem4win.eu/fileadmin/user_upload/documents/Presentations/ANL_4_LiSEC_3-fach_ISO_Duennglas_HrMader.pdf. [Zugriff am 25.2.2016].
- [53] C. SCHITTLICH, „Glas in der Architektur - neue Entwicklungen,” *DETAIL Zeitschrift für Architekten, Serie 2015, 1/2 Bauen mit Glas*, pp. 72-82, 2015.
- [54] U. PFEIFFER, Die nicht lineare Berechnung ebener Rahmen aus Stahl- oder Spannbeton mit Berücksichtigung der durch das Aufreißen bedingten Achsendrehung, Göttingen: CUVILLIER VERLAG, 2004.
- [55] G. W. EHRENSTEIN, Polymere Werkstoffe, München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [56] C. SCHITTLICH, G. STAIB, D. BALKOW, M. SCHULER und W. SOBEL, Glasbau Atlas, Basel: Birkhäuser, 2007.