

Numerische und experimentelle Analyse des Tragverhaltens von kaltgebogenem Glas

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann, Maximilian Laurs

Institut für Stahlbau, RWTH Aachen University

Zusammenfassung: Die Rufe nach ressourcen- und energiesparenden, aber geometrisch anspruchsvollen, Fassaden erstarken weiter. Die vorherrschende Lösung zur Realisierung von gekrümmten Fassaden aus Glas - die Heißbiegung - widerspricht diesem. Das Kaltbiegen von Glas stellt eine nachhaltige Methode für diese Anwendungen dar. Jedoch können die dafür benötigten aufwendigen Berechnungsmethoden oft nur im Fall von Prestigebauten gerechtfertigt werden. So muss die Kaltbiegung durch weitere Untersuchungen den Weg in den Alltag der Glaswelt finden. Um den Spannungszustand in Abhängigkeit des Kaltbiegungsgrades zu bestimmen sind FE-Berechnungen bis jetzt unumgänglich. Die Güte dieser hängt maßgeblich von den verwendeten Modellen und geometrischen Imperfektionen ab. An experimentellen Beispielen wird der Einfluss dieser erläutert.

1 Einleitung

Glas ist in den letzten Jahrzehnten mehr und mehr in den Fokus der modernen Architektur gerückt. Filigrane und leichte Strukturen mit größtmöglicher Transparenz werden immer häufiger eingesetzt, um einerseits Aspekte der Repräsentativität zu erfüllen und andererseits die Modernität von Architekturkonzepten zu unterstreichen. Die dabei geforderte Auflösung von massiven Tragstrukturen stellt den Ingenieur vor neue Herausforderungen. Zum einen müssen die resultierenden Rahmensysteme, bedingt durch den Wegfall möglichst vieler Elemente der Substruktur, mehr Lasten abtragen. Zum anderen müssen diese unter Vermeidung von massiven Querschnitten durchdachter gestaltet werden. Durch den Verzicht Rahmenstrukturen ist eine Tesselierung von gekrümmten Geometrien nur noch bedingt möglich. So müssen die nun größeren Ausfachungsflächen gekrümmt ausgeführt werden. Die müssen folglich mehr äußere Lasten auf die Unterkonstruktion übertragen und werden daher stärker beansprucht. Neben diesem Phänomen ist das Streben moderner Architekten nach immer komplexeren Formen unübertroffen und glatte, gekrümmte Oberflächen sind ein wesentlicher Bestandteil dieser Prämisse. Um diese Nachfrage bedienen zu können, haben

Ingenieure effiziente Glasdesigns und eine Vielzahl von Verfahren entwickelt, um Glas so zu biegen, dass es den erforderlichen geometrischen Bedingungen entspricht.

Während Glas in der Vergangenheit heiß gebogen wurde – also bis zur Erweichungstemperatur erhitzt und anschließend auf eine vorgefertigte Form gelegt wurde – gewinnt die Methode der Kaltbiegung immer weiter an Popularität [1]. Dabei wird Glas ohne weitere Vorbearbeitung in seine benötigte Position gezwängt und anschließend durch an der Unterkonstruktion montierte Klemmsysteme in Position gehalten, oder aber gleich mit einem gelenkig-verschieblichen Rahmensystem in die gewünschte Form gebogen. Trotz seiner scheinbaren Simplizität ist dieses Verfahren von komplexer Natur, denn die Biegung ist rein elastisch und daraus resultierende Rückhaltekräfte sowie eingeprägte Spannungszustände müssen bei der Bemessung des Glases berücksichtigt werden. Außerdem müssen die „intrinsischen“ Spannungen aus dem Kaltbiegungsprozess mit den „extrinsischen“ Spannungen – resultierend aus Wind und/oder Schnee – überlagert werden. Daher müssen die Grenzen und Möglichkeiten dieser Methode genau untersucht werden. Anwendungsgrenzen können dabei unterschiedlich motiviert sein. Die rein mechanischen Grenzzustände betreffen z.B. das Spannungsversagen des Glases, die Fähigkeit der Unterkonstruktion, den entstehenden Auflagerreaktionen standzuhalten, oder Belastungen von Komponenten wie bspw. Randverbundsysteme von Isoliergläsern [2][3]. Aber auch ästhetische Anforderungen, wie z.B. die Vermeidung von Beuleffekten und der daraus resultierenden Systemwechsel, die zu Verwerfungen der Scheibe führen [4], können entscheidend sein.

In diesem Beitrag werden experimentelle Untersuchungen vorgestellt, welche anschließend numerisch nachvollzogen wurden. Anhand der numerischen Modelle lassen sich weitere Parameterstudien durchführen und die Einflüsse von Imperfektionen validieren.

2 Grundlagen

Die Kaltbiegung von Glasscheiben wird bereits seit einiger Zeit untersucht. Eine grundlegende Unterscheidung ist hierbei entsprechend der angestrebten Geometrie zu treffen. Während einfachgekrümmte Geometrien, wie Bögen oder Zylinder, eine Gauß'sche Krümmung $K = 0$ aufweisen, weisen doppelt gekrümmte Geometrien zwei Richtungskrümmungen und damit eine Gauß'sche Krümmung $K \neq 0$ auf. Haben diese beiden das gleiche Vorzeichen ($K > 0$), so handelt es sich um eine synklastische Krümmung, Beispiele sind Kugelausschnitte (Krümmungen sind überdies ident). Unterscheiden sich die Vorzeichen ($K < 0$), so handelt es sich um antiklastische Flächen, wie beispielsweise einen Hypar. Hier sei erwähnt, dass es sich bei einem Hypar – auch wenn er sich aus Geraden zusammensetzen lässt – nicht um eine abwickelbare Fläche handelt. Demnach kann ein Hypar nicht in eine ebene Fläche überführt werden, ohne Dehnungen oder Stauchungen hervorzurufen. Daraus resultieren im Falle der Kaltbiegung Spannungen in der Mittelebene des Glases, die bei einer Bemessung berücksichtigt werden müssen.

Welche Form bei der Kaltbiegung der zu Beginn planen Glasscheibe angenommen wird, hängt von den Randbedingungen ab (Lagerung der Kanten, Anzahl der gelagerten Kanten/Ecken). Wie stabil diese Verformungsfigur gegenüber äußeren Lasten ist, ist abhängig von der Größe der aufgebrachtten Verformung sowie der Systemsteifigkeit. Bei der Kaltbiegung wird dies in der Regel erreicht, indem Verformungen oder Verdrehungen

entlang der Kanten oder an Ecken aufgebracht werden. Verdreht man die Kanten um eine Achse, die senkrecht auf der Mitte der Kanten in der Ebene der Glasscheibe verläuft, so wird die Glasscheibe tordiert. Diese Verformung kann auch über die Verschiebung einer Ecke aus der Ebene der planen Glasscheibe heraus erreicht werden. Die Diagonalen der Glasscheibe sind dabei anfangs Geraden, werden durch die Verformung allerdings gekrümmt. Die gleiche Verformungsfigur entsteht dabei durch die Auslenkung einer Ecke, oder die Aufbringung der Hälfte dieser Verformung auf zwei gegenüberliegenden Eckpunkten.

Ein Vorteil der gekrümmten Geometrie im Vergleich zur planen Geometrie, ist im statischen Entwurf die Aktivierung von dreidimensionalen Tragwirkungen. Das bedeutet, dass die Geometrie nicht mehr nur orthogonal zu ihrer Querschnittsachse belastet wird, sondern Kraftanteile auch in der Ebene des Bauteils übertragen werden.

Während sich die meiste Forschung auf an ihren Ecken punktförmig gelagerte Glasscheiben konzentriert [4][5][6], gibt es auch neuere Untersuchungen zu kaltgebogenen Gläsern, die entweder auf eine linienförmige Lagerung herabgebogen wurden, oder mitsamt dieser in die gebogene Form gebracht wurden [7]. Alle Untersuchungen stellten dabei fest, dass ab einer bestimmten Durchbiegung ein Verformungswechsel auftritt. Wodurch dieser beeinflusst wird, ist auch Thema dieses Beitrags. Der Fokus dieses Berichts liegt auf Glasscheiben, die an ihren Kanten durchgängig gelagert sind. Dies verzögert den Verformungswechsel und geht im Allgemeinen mit einer aufwendigeren Modellierung einher.

Aufbauend auf den vorangegangenen Untersuchungen wird hier die gängige Nomenklatur übernommen. Abbildung 1 fasst die zur Untersuchung des mechanischen Verhaltens von kaltgebogenen Glasscheiben herangezogenen Größen zusammen. Hervorzuheben sind dabei die Verformungsgrößen $\delta_1(\xi')$ und $\delta_2(\xi)$. Diese stellen die relative Verformung der Diagonalen der verformten Geometrie zu den Verbindungslinien zwischen zwei gegenüberliegenden Eckpunkten bezogen auf die Projektion der Diagonalen auf die Grundfläche dar. Im Fall eines Hypars haben diese beiden Größen folglich unterschiedliche Vorzeichen, da je eine Diagonale konvex und eine konkav gebogen ist. dZ bezeichnet des Weiteren die Eckauslenkung. Die Geometrie kann durch einfache geometrische Transformationsbeziehungen von dieser Darstellung in ein Koordinatensystem überführt werden, in dem zwei gegenüberliegende Ecken um jeweils $dZ/2$ verschoben werden. Dies entspricht dann dem δ - ξ - ξ' -Koordinatensystem. Die Verformungsfigur ist darin vor dem Ausbeulen doppelsymmetrisch. Die Diagonale, deren Enden in dieser Untersuchung herabgezogen werden, wird nachfolgend Lastdiagonale genannt. Die übrige Diagonale wird als Lagerungsdiagonale bezeichnet. Als Anzeichen für einen Verformungswechsel kann demnach die Mittendurchbiegung u_{mid} beziehungsweise das Auseinanderfallen der Diagonaldurchbiegungen herangezogen werden.

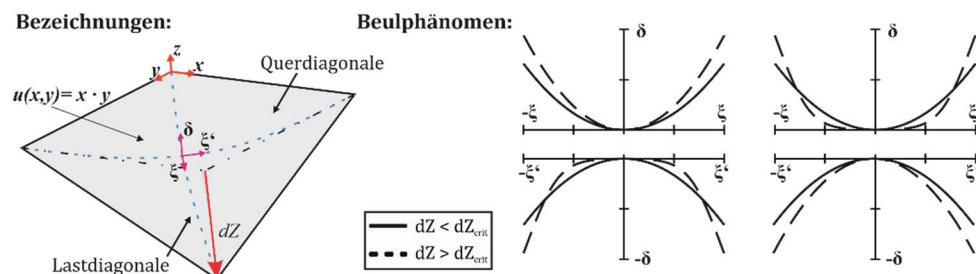


Abbildung 1: Übersicht der in dieser Veröffentlichung verwendeten Bezeichnungen

3 Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen an kaltgebogenen Gläsern wurde der Fokus zunächst auf den Einfluss geometrischer Parameter bei liniengelagerten Systemen aus Monogläsern gelegt. Die untersuchten Parameter waren die Dicke der Verglasung und das Seitenverhältnis, sowie die Höhe der Vorspannung. Es wurden 4 mm, 6 mm und 8 mm dicke Scheiben in den Formaten 1000x1000 mm², 1000x2000 mm² und 1000x3000 mm² untersucht. Von jeder Dicken- und Format-Kombination wurden TVG- und ESG-Gläser getestet, deren Vorspannungsverteilung zuvor mit photoelastischen Methoden bestimmt worden war.

3.1 Versuchsaufbau

Der entwickelte Versuchsstand simuliert die Kaltbiegung einer Glasscheibe mitsamt ihrer Unterkonstruktion, wie beispielsweise in [7] angewendet. Die Rahmenkonstruktion ist dabei aus massiven Stahlquerschnitten, mit einer im Vergleich zum Glas vielfach höheren Biegesteifigkeit, ausgeführt, um eine Beeinflussung der Verformungsfigur durch Verformungen des Rahmens zu vermeiden. An den Ecken der Lagerungsdiagonale sind momentenfreie Gelenke angebracht. Der Prüfcylinder wurde über ein kardanisches Gelenk, das in der Plattenebene verschieblich ist, angeschlossen. Die Glasscheibe ist an allen Kanten gelenkig aufgelagert, um eine freie Verdrehung der Kanten zu ermöglichen. Alle Kanten lagen auf EPDM-Streifen und PTFE-Streifen auf, um Stahl-Glas-Kontakt zu vermeiden und Reibungseinflüsse zu minimieren. Der Versuchsaufbau und ein Querschnitt der Lagerung sind in Abbildung 2 dargestellt.

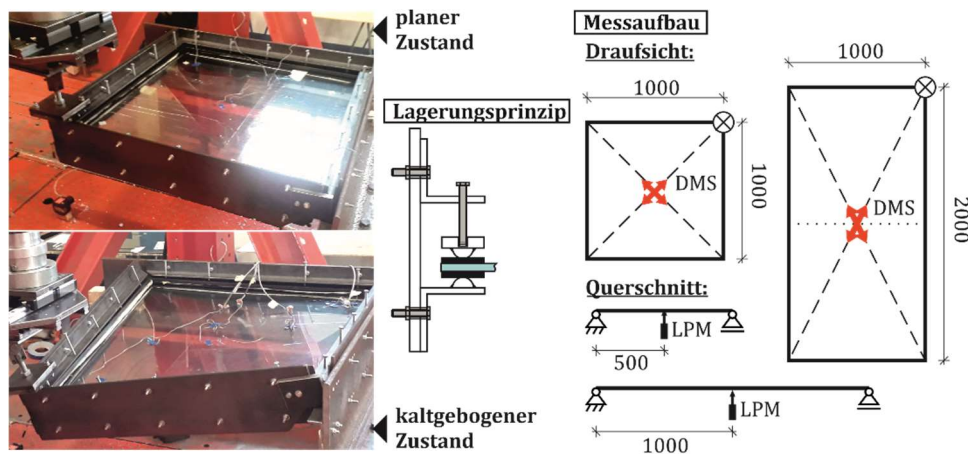


Abbildung 2: Experimenteller Versuchs- und Messaufbau

Zur Erfassung der Mittendurchbiegung wurde ein Wegmesser unterhalb der Plattenmitte positioniert. Die Eckauslenkung und Kraft wurde durch den Prüfcylinder gemessen. Dehnungen wurden in Plattenmitte auf der Oberseite der Glasscheibe in Richtung der beiden Diagonalen mithilfe von Dehnungsmessstreifen gemessen. Aufgrund des ideal-elastischen Materialverhaltens des Glases bis zum Bruch können aus diesen Dehnungen die während des Kaltbiegeprozesses auftretenden Spannungen berechnet werden.

3.2 Einfluss geometrischer Parameter auf Verformungsfigur

Nachfolgend werden die Einflüsse der Dicke und der Abmessungen der monolithischen Scheiben auf die Formfindung dargestellt. Durch den Ansatz effektiver Systemsteifigkeiten sind die Erkenntnisse aus den Untersuchungen mit verschiedenen Dicken auch auf Verbundgläser übertragbar.

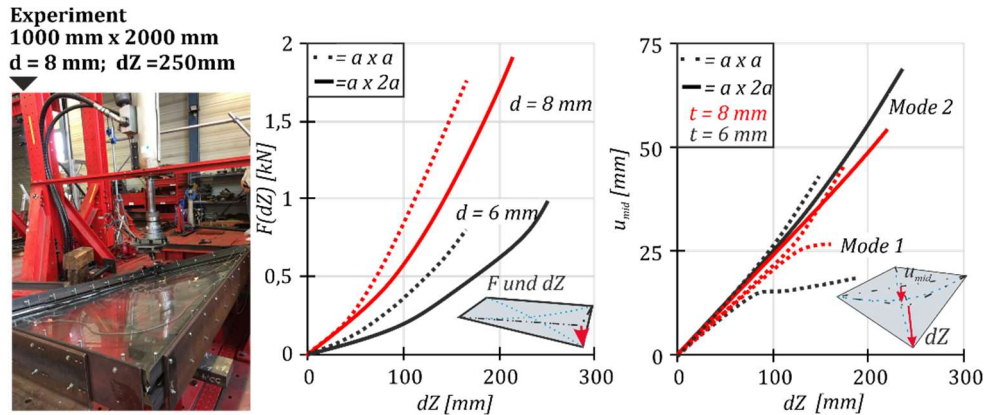


Abbildung 3: Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an quadratischen ($a \times a$) und rechteckigen ($a \times 2a$) Scheiben; (links) $F(dZ)$ - Diagramm; (rechts) $u_{mid}(dZ)$ - Diagramm

In Abbildung 3 auf der linken Seite wird deutlich, dass die benötigte Kraft zur Realisierung einer Eckauslenkung von der Dicke und den Abmessungen der Glasscheibe abhängt. Für rechteckige Scheiben wird eine geringere Kraft bei gleicher Durchbiegung benötigt. Da es sich um eine weggesteuerte Belastung handelt, sind die maximal möglichen Verformungen bei der dickeren Scheibe geringer. Es kommt früher als bei der dünneren Scheibe zu einem Spannungsversagen. Dies ist bei den rechteckigen Scheiben deutlicher, als bei den quadratischen.

Auf der rechten Seite in Abbildung 3 sind die gemessenen Mittendurchbiegungen u_{mid} in Abhängigkeit der Eckauslenkung dargestellt. Hier wird das bereits oben beschriebene Phänomen der Kaltbiegung deutlich. Während die Mittendurchbiegung zunächst proportional zur Eckauslenkung steigt (mit dem Faktor 2 zu $dZ/2$), wird ab einem bestimmten Verzweigungspunkt das Wachstum überproportional oder aber flacht ab. Die beiden Verformungsfiguren werden als Mode 1 und Mode 2 bezeichnet und beschreiben, ob die Last- oder die Lagerungsdiagonale während der Verformung abflacht. Wann dieser Punkt erreicht ist, hängt dabei maßgeblich von der Dicke der Scheibe ab. Je dünner die Scheibe ist, desto früher kommt es zur Verzweigung. Dieses Phänomen wurde bereits von [4] und [5] beobachtet, konnte bei den rechteckigen Scheiben jedoch nicht beobachtet werden. Das liegt daran, dass bei rechteckigen Scheiben nicht zwangsläufig die Mitte ausbeulen muss, sondern auch die Teilquadrate des Rechtecks in entgegengesetzte Richtungen beulen können, was in der Mitte nicht messbar wäre.

Mit dem Versuchsstand konnten reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Die Entwicklung der Spannungen wird nachfolgend repräsentativ an den quadratischen Formaten diskutiert.

3.3 Einfluss geometrischer Parameter auf Spannungszustand

Weiterhin wurde der Spannungszustand in kaltgebogenen Glasscheiben untersucht. Abbildung 4 macht deutlich, dass auch der Spannungszustand am Verzweigungspunkt zwei unterschiedliche Richtungen einschlägt. Zu Vergleichszwecken sind hier vier gleiche Scheibenformate derselben Glasart dargestellt, von denen sich lediglich eine von den übrigen dreien qualitativ unterscheidet. Dieser Unterschied tritt bereits vor dem an der Mittendurchbiegung erkenntlichen Verzweigungspunkt auf.

Zum Vergleich sind hier die Ergebnisse von FE-Rechnungen dargestellt. Woher die drastischen Unterschiede der beiden Moden rühren, wird im nächsten Abschnitt anhand der FE-Untersuchungen erläutert. Im Verlauf der numerischen Studien stellte sich heraus, dass diese Abweichungen durch das Vorzeichen der Imperfektion relativ zur Eckauslenkung der Glasscheibe bedingt werden.

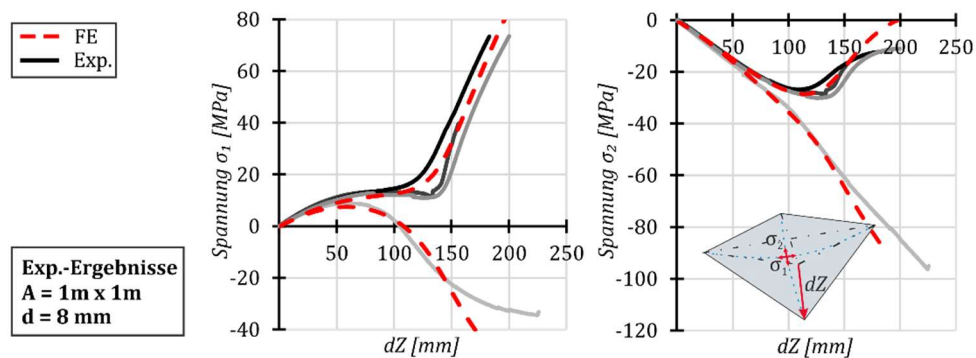


Abbildung 4: Spannungsverläufe von vier 1000x1000mm² ESG-Scheiben mit 8 mm Dicke und den FE-Ergebnissen; (links) DMS auf Lastdiagonale; (rechts) DMS auf Lagerdiagonale

4 Numerische Untersuchungen

Numerische Berechnungen zur Bestimmung des Systemwechsels von kaltgebogenen Hyparen sind in der Literatur bekannt. Im Fall der an ihren Ecken punktgehaltenen Glasscheibe sind [8] und im Fall von Eck- und Linienlagerung [5] zu nennen. Dennoch ist die Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen bisher mangelhaft. Die hier vorgestellten Modelle bilden zum ersten Mal das Verhalten nach dem beobachteten Systemwechsel ab und stellen heraus, wodurch die unterschiedlichen Verläufe bedingt sind.

Das System mit der kommerziellen Simulationssoftware ABAQUS untersucht. Die Geometrie wurde mit quadratischen Volumenelementen mit reduzierter Integration des Tys Q3D20R modelliert. Das Glas wurde als linear elastisches Material mit einem E-Modul von 70.000 N/mm² und einer Querkontraktionszahl von $\nu = 0,23$ modelliert [9]. Die Verformung wurde von den Ecken der Lagerungsdiagonalen zu den Ecken der Lastdiagonalen linear steigend an den Nodes der Kanten als Randbedingung aufgebracht. Die Lagerung der Platte erfolgte in ihrer Ebene statisch bestimmt. Eigengewicht wurde durch eine konstante Flächenlast abgebildet. Das Modell ist in Abbildung 5 dargestellt.

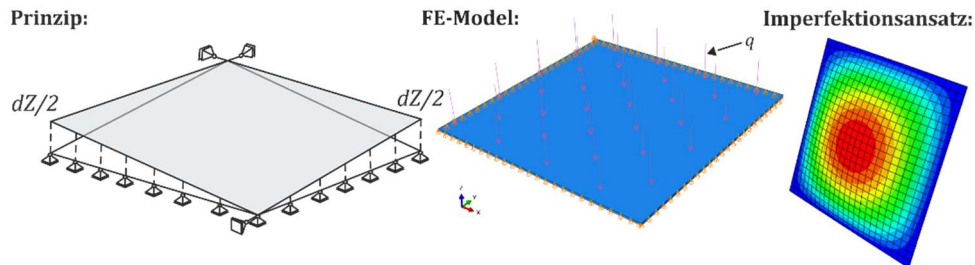


Abbildung 5: Numerisches Modell mit Mesh, Randbedingungen, Eigenlast und Eigenform

Die Berechnung ist dabei in zwei Schritte aufgeteilt. Zunächst wird eine lineare Beulanalyse durchgeführt, um die Eigenformen der Platte zu bestimmen. Die Eigenform ergibt sich in jedem Fall wie in Abbildung 5 dargestellt. Anschließend wurde die Amplitude der Eigenform auf den Wert e [mm] skaliert und als geometrische Imperfektion mit Amplitude relativ zur Eckauslenkung auf das Grundmodell übertragen. Anschließend wurde die Verschiebung in einer geometrisch nichtlinearen statischen Riks-Berechnung auf das imperfekte System aufgebracht.

Anschließend wurden die numerischen Ergebnisse anhand der Versuchsergebnisse validiert und eine Parameterstudie durchgeführt.

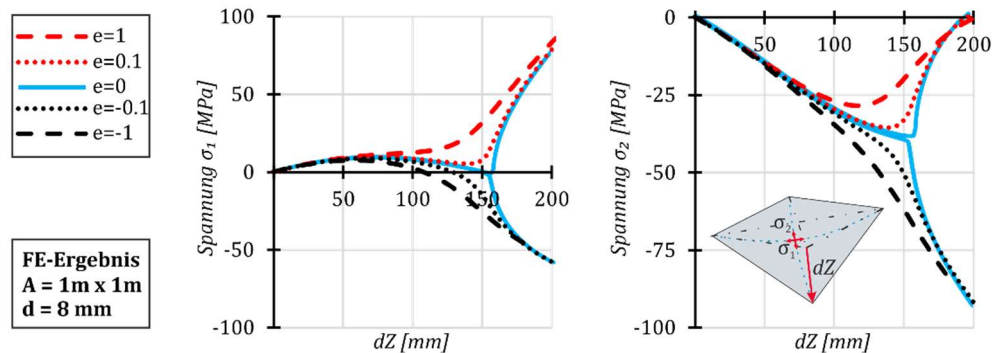


Abbildung 6: Einfluss der Imperfektion auf die Spannungen in Plattenmitte; (links) Lastdiagonale σ_1 ; (rechts) Lagerdiagonale σ_2

Abbildung 6 verdeutlicht den Einfluss der Imperfektion auf die Spannungsverteilung in Scheibenmitte. Je nach Richtung der Imperfektion relativ zur Eckauslenkung wird eine der beiden Verformungsmoden angenommen. Danach führen weitere Eckauslenkungen zu überproportionalem Spannungswachstum. Dabei kann es zu einem Vorzeichenwechsel der Spannungen auf der Oberseite kommen, was darauf schließen lässt, dass Membranspannungsanteile maßgebend für das Verhalten der Glasscheibe verantwortlich sind. Aufgrund der Doppelsymmetrie des Systems entspricht die Oberseite der einen Mode der Unterseite der anderen, wenn man das System um 90° um die Achse der Eckauslenkungsrichtung rotiert. Dies ist bei der Überlagerung mit externen Lasten (wie Wind, der Schnee) zu berücksichtigen.

5 Schlussfolgerung

Anhand experimenteller Untersuchungen konnten numerische Modelle zur Berechnung der Kaltbiegung validiert werden. Der Einfluss der Imperfektion auf die Spannungsentwicklung im Glas während des Kaltbiegeprozesses kann mit diesen Modellen realitätsgetreu abgebildet werden. Während der Einfluss auf die Spannungen in Scheibenmitte für kleine Durchbiegungen vernachlässigbar klein ist, sollte ab einem Kaltbiegungsgrad größer 10 die Imperfektion bei der numerischen Berechnung berücksichtigt werden. Insbesondere bei der Verformungsberechnung ist allerdings die Imperfektion zu berücksichtigen. Diese bestimmt maßgeblich, wie und wann der Systemwechsel der kaltgebogenen Glasscheibe stattfindet.

Alle gezeigten Versuche wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens Nr.: 20191 N der AiF – Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. durchgeführt.

Literatur

- [1] Rahimzadeh, K., Levelle, E., Douglas, J. Extreme Cold-Bending: Geometric Considerations and Shape Prediction with Machine Learning. In: Belis, Bos & Louter (Hrsg.) Challenging Glass Conference Proceedings – Volume 8, 2022
- [2] Sitte, S., Hayez, V., Kimberlain, J., Mirgon, M., Feng, J. Structural silicone joint behaviour study for cold bent glass. *Glass Structures & Engineering*, 6 (2021), S.39-63
- [3] Demontis, P., Endress, J., Nardini, V., Vernier, A. Design and Durability of Cold-Bent Insulating Glass Units. In: Belis, Bos & Louter (Hrsg.) Challenging Glass Conference Proceedings – Volume 8, 2022
- [4] Datsiou, K. Design and Performance of Cold Bent Glass. University of Cambridge, Cambridge (2017)
- [5] Galuppi, L., Massimiani, S., Royer-Carfagni, G. Buckling phenomena in double curved cold-bent glass. *International Journal of Non-Linear Mechanics* 64 (2014), S. 70–84
- [6] Nehring, G. Design and form finding of cold bent shell structures of thin glass. Universität der Bundeswehr München, München, 2019
- [7] Scherer, T., Scherer, C. Wittwer, W. Twisted Tower – A Feasibility Study for Cold-Bent Insulating Glass Units with an Elastic Edge Seal. In: Louter, C., Schneider, J., Tasche, S., Weller, B. (Hrsg.) Engineered Transparency 2021 - Glass in Architecture and Structural Engineering, 2021, S. 387-402
- [8] van Herwijnen, F., Staaks, D., Eekhout, M. Cold Bent Glass Sheets in Façade Structures. *Structural Engineering International*, 2 (2004), S. 98-101
- [9] Feldmann, M., Kasper, R., Langosch, K. Glas für tragende Bauteile. Reguvis Fachmedien, Köln, 2012