Beitrag zur Aussteifung von Gebäuden durch Glas – Konzentrierte Lasteinleitung im Eckbereich

Daniel Neumer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation.

Gutachter/Gutachterin:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Geralt Siebert
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Wellershoff

Die Dissertation wurde am 29.05.2018 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften am 29.11.2018 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 03.12.2018 statt.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für konstruktiven Ingenieurbau an der Universität der Bundeswehr München. Ihren Ursprung hat diese Arbeit in dem durch ein vom AiF gefördertes ZIM - Kooperationsprojekt mit dem Titel „Holz-Glas-Fachwerk“.

Zunächst möchte ich mich bei den am Forschungsprojekt beteiligten Kooperationspartnern (HUF HAUS und Glas Schneider) für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Weiterhin bedanke ich mich beim ANSYS-Support der Firma CADFEM für die Unterstützung. Auch der Firma DLUBAL gilt mein Dank für die Bereitstellung der Softwareprodukte im Zuge der Erstellung dieser Arbeit.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.- Prof. Dr.-Ing. G. Siebert, für die Möglichkeit der Erstellung dieser Arbeit und das entgegengebrachte Vertrauen, sowie Herrn Univ.- Prof. Dr.-Ing. F. Wellershoff für die Übernahme der Prüfung meiner Arbeit als externer Gutachter und Herrn Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas Taras für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen Michael Kraus und Martin Botz für die anregenden Diskussionen und die freundschaftliche Unterstützung. Mein Dank gilt auch den übrigen Kollegen am Institut. Die sportlichen Wettkämpfe, sowie wertvollen Diskussionen am Mittagstisch und über den Feierabend hinaus bildeten eine Grundlage für diese Arbeit. Weiterhin möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Labors für die Unterstützung bedanken. Allen voran Herrn Robert Nothaft. Seine Hilfsbereitschaft und Unterstützung bei der Versuchsdurchführung bildeten ein weiteres Fundament für die Erstellung dieser Arbeit.

Mein herzlichster Dank gilt meinen engsten Freunden und meiner Familie die mich während der ganzen Zeit unterstützt haben. Besonders meiner Frau Sarah und Tochter Emilie, durch deren Ausdauer, Geduld und Rückhalt die Fertigstellung dieser Arbeit ermöglicht wurde. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

Ludwigshafen am Rhein, im Mai 2018

Daniel Neumer

Kurzfassung

Die zeitgemäße Architektur strebt nach hoher Transparenz und schlanken Strukturen. Dies ist ohne den Einsatz von Glas nicht umsetzbar. Allerdings beschränkt sich der Einsatz von Glas dabei meist auf die optische Gestaltung und die Erfüllung bauphysikalischer Aufgaben der Gebäudehülle. Nach aktuellem Stand der Normung für Glas im konstruktiven Ingenieurbau darf Glas zwar zum Lastabtrag von flächig angreifenden Lasten herangezogen werden, jedoch sind bislang Beanspruchungen in Scheibenebene zusätzlich zum Eigengewicht explizit ausgeschlossen. Grund dafür sind unter anderem fehlende Grundlagen, obwohl die Anfänge des „modernen Glasbaus“ bis ins frühe 19. Jahrhundert zurück reichen. Im Rahmen diverser Forschungsprojekte wurde diese Thematik bereits untersucht. Allerdings sind die dort entwickelten Ansätze baupraktisch oft nicht übertragbar.

Die Zielstellung dieser Arbeit liegt darin, eine für die Baupraxis relevante Methode zur Aktivierung der Verglasung als aussteifendes Element im Gebäude zu entwickeln. Dazu wird das Prinzip der Lagerung einer Festverglasung durch Klotzung aufgegriffen. Diese Herangehensweise ermöglicht die Ausbildung eines Schubfeldes im Glas, ähnlich zu einem Fachwerksystem. Es stellen sich auf Druck beanspruchte Diagonalverbände ein, die so zur „optischen“ Reduzierung der Tragkonstruktion beitragen.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt anhand numerischer und experimenteller Untersuchungen eine Beurteilung verschiedener Randbedingungen auf das Tragverhalten. Anschließend wird aufgrund dieser Ergebnisse ein Bemessungskonzept für den Nachweis der Verglasung entwickelt.

In einem ersten Schritt wird die Belastbarkeit von Glaskanten für die beschriebene Anwendung experimentell und numerisch untersucht und verschiedene Einflussgrößen identifiziert. Dazu zählen neben geometrischen Eigenschaften der Verglasung ebenfalls die Oberflächenbeschaffenheit der Kantenbearbeitung, der Werkstoff der Lagerung (Konnektor), sowie der Randabstand und die Länge der Lagerung.

Danach erfolgt die experimentelle und numerische Untersuchung der Stabilität der Verglasung unter Verwendung der zuvor beschriebenen Lagerung. Anhand der versuchstechnischen Durchführung wird das numerische Modell validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass sich das System zum Lastabtrag in Scheibenebene hervorragend eignet.

Auf Basis der Untersuchungen werden in einem letzten Schritt ein Bemessungs- und ein Sicherheitskonzept für die Nutzung von Glas als Primärtragwerk im Einsatz als aussteifendes Element entwickelt. Dabei findet das Szenario „Ausfall einer Verglasung“ Berücksichtigung.

Abstract

Modern architecture strives for high transparency and lean structures. This cannot be achieved without the use of glass. However, the use of glass is usually limited to the optical design and the fulfilment of building physic tasks in the building envelope. According to the current status of standardization for glass in structural engineering, glass may be used for load transfer of loads acting on the surface, but up to now stresses in-plane in addition to the dead weight have been explicitly excluded. One reason for this is a lack of basic principles, although the beginnings of "modern glass construction" date back to the early 19th century. This topic has already been investigated in various research projects. However, the approaches developed there are often not transferable in terms of construction practice.

The objective of this work is to develop a method for activating the glazing as a stiffening element in the building that is relevant for construction practice. For this purpose, the principle of the bearing of a fixed glazing by blocking is taken up. This approach enables the formation of a shear field in the glass, similar to a strut-and-tie system. Diagonal braces subjected to pressure are adjusted, thus contributing to the “visual“ reduction of the load-bearing structure.

Within the scope of this work, numerical and experimental investigations are used to assess the load-bearing behaviour of various boundary conditions. Subsequently, a design concept for the verification of the glazing is developed on the basis of these results.

In a first step, the loading capacity of the glass edge for the described application is investigated experimentally and numerically and various influencing variables are identified. In addition to the geometric properties of the glazing, these include the surface finish of the edges, the material of the bearing (connector), as well as the edge distance and the length of the bearing.

Then the stability of the glazing is examined experimentally and numerically using the bearing described above. The numerical model is validated on the basis of the test procedure. The results show that the system is excellently suited for load transfer in-plane.

Based on the investigations, a design and a safety concept for the use of glass as primary structure in use as a bracing element is developed in a final step. The "failure of a glazing" scenario is taken into account.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 1

1.1 Motivation ... 1

1.2 Ziel der Arbeit und Aufgabenstellung ... 2

1.2.1 Ziel der Arbeit ... 2

1.2.2 Aufgabenstellung ... 3

2 Grundlagen ... 5

2.1 Werkstoffe ... 5

2.1.1 Glas ... 5

2.1.2 Polyoxymethylen (POM) ... 6

2.2 Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen ... 8

2.2.1 Allgemein ... 8

2.2.2 Lineare Viskoelastizität ... 10

2.2.3 Boltzmannsches Superpositionsprinzip ... 11

2.2.4 Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip ... 11

2.2.5 Nichtlineare Viskoelastizität ... 11

2.3 Stabilität (Plattenbeulen) ... 12

2.3.1 Einführung in die Stabilitätstheorie ... 12

2.3.2 Lineare Beultheorie ... 15

2.3.3 Nichtlineare Beultheorie ... 17

2.3.4 Numerische Lösungsmethode (Finite Elemente Methode) ... 18

2.4 Stand der Technik ... 20

2.4.1 Glas im Bauwesen ... 20

2.4.2 Toleranzen ... 22

2.4.3 Kantenbearbeitung ... 22

2.4.4 Lagerung von Glas (Klotzung) ... 22

2.4.5 Festigkeit der Glaskante 22
2.5 Stand der Forschung 23
2.5.1 Lagerung von Glas (Klotzung) 23
2.5.2 Kantenfestigkeit (Glas) 23
2.5.2.1 Kante unter Zugbelastung 23
2.5.2.2 Kante unter Druckbelastung 23
2.5.3 Lastabtrag durch Glas 24
3 System 25
3.1 Materialien 25
3.2 Tragsystem Verbundelement 25
3.3 Äußere Einwirkung 27
3.4 Vorverformung / Verwerfung 28
3.5 Parameter 29
3.6 Bauphysikalische Aspekte 31
4 Experimentelle Untersuchung 33
4.1 Lasteinleitung 33
4.1.1 Allgemein 33
4.1.2 Glaskantenform und Konnektormaterial 33
4.1.3 Laststellung 36
4.1.4 Materialeigenschaften von POM-C 40
4.1.4.1 Allgemein 40
4.1.4.2 Kurzzeitfestigkeit 40
4.1.4.3 Dauerstandfestigkeit 42
4.1.5 Ermittlung Reibkoeffizient 52
4.1.6 Rahmenecke 53
4.2 Verbundelement 54
4.2.1 Allgemein 54
4.2.2 Stahlrahmen 54

4.2.3 Holzrahmen 57

5 Numerische Untersuchung 61

5.1 Lasteinleitung 61

5.1.1 Allgemein 61

5.1.2 Modellscheibe 2D 62

5.1.3 Modellscheibe 3D 64

5.2 Verglasung 68

5.2.1 Allgemein 68

5.2.2 Verzweigungslast und Beuleigenform 68

5.2.3 Vorverformung 74

5.2.4 Nichtlineare Beulanalyse 76

5.2.5 Plattenbeanspruchung 79

5.2.6 Interaktion Scheiben- und Plattenbeanspruchung 80

5.2.7 Vergleich mit Schubfeld unter Schubbeanspruchung 81

5.3 Parameterstudie am Gesamtsystem 82

5.3.1 Allgemein 82

5.3.2 Parameterstudie unter Berücksichtigung aller Eingangsgrößen 84

5.3.3 Parameterstudie mit reduzierten Eingangsgrößen 86

5.3.4 Parameterstudie zur Berücksichtigung von Abweichungen der Lagerung 88

5.3.5 Zusätzliches Element in Reihe 90

6 Analytischer Ansatz 93

6.1 Scheibengleichung 93

6.1.1 Einführung Randwertproblem 93

6.1.2 FOURIER Reihenentwicklung 95

6.1.3 Verfahren nach GIRKMANN 95

6.1.3.1 Teilsystem 1 (symmetrisch-symmetrisch) 97

6.1.3.2 Teilsystem 2 (antimetrisch-antimetrisch) 101

6.2 Stabilitätsproblem (Verzweigungslast) 105

7 Validierung der Ergebnisse 107

7.1 Validierung des FEM Modells gegen Versuchsergebnisse 107

7.2 Validierung des ANSYS Ergebnisses gegen Dlubal Ergebnisse 111

7.2.1 Verzweigungslast und Beuleigenform 111

7.2.2 Nichtlineare Beulanalyse 113

8 Bemessung 115

8.1 Bemessungskonzept 115

8.2 Grenzspannung Glas 117

8.3 Beulen 118

8.3.1 Ermittlung Verzweigungslast 118

8.3.2 Beulnachweise 119

8.3.2.1 Modifikationsfaktor 119

8.3.2.2 Finite Element Methode 124

8.3.3 Interaktion 124

8.4 Mehrscheibenisolierglas 125

8.5 Gebrauchstauglichkeit 126

8.6 Ausfall einer Verglasung 127

8.7 Ableitung äußerer Horizontalkräfte auf einzelne Wandscheiben 129

8.8 Berücksichtigung von vertikalen Schiefstellungen 129

9 Zusammenfassung und Ausblick 131

9.1 Zusammenfassung 131

9.2 Ausblick 132

Literaturverzeichnis 135

Abkürzungen und Bezeichnungen

Abkürzungen

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
abP	Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis
abZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
BSH	Brettschichtholz
CoP	Coefficient of Prognosis
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DMA	Dynamisch-mechanische Analyse
DMTA	Dynamisch-mechanisch-thermische Analyse
E-Modul	Elastizitätsmodul
ESG	Einscheibensicherheitsglas
FE	Finite Elemente
FEA	Finite Element Analyse
FEM	Finite Element Methode
FKG	Fachverband für konstruktiven Ingenieurbau
Float	Floatglas
GF	Glasfaser
LA	Lastableitung
LBO	Landesbauordnung
LE	Lasteinleitung
LEBA	Lineare Eigenwert Beualanalyse
LO	linker Scheibenrand oben
LU	linker Scheibenrand unten
M	Mitte
MBO	Musterbauordnung
MVV TB	Muster-Verwaltungsvorschrift – Technische Baubestimmungen
OL	oberer Scheibenrand links
OR	oberer Scheibenrand rechts
POM	Polyoxymethylen
POM-C	POM - Copolymer

POM-H	POM - Homopolymer
RO	rechter Scheibenrand oben
RU	rechter Scheibenrand unten
Stdabw	Standartabweichung
TVG	Thermisch teilvorgespanntes Glas
UL	unterer Scheibenrand links
UR	unterer Scheibenrand rechts
UV	Ultraviolett
VG	Verbundglas
VSG	Verbundsicherheitsgläser
ZiE	Zustimmung im Einzelfall
ZIM	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand
ZTV	Zeit-Temperatur-Verschiebung

Lateinische Buchstaben

A	Scheibenfläche
a_T	Shift-Faktor bei ZTV
AK	Abstand des Konnektors von der Glasecke
b	Breite
BK	Kontaktlänge zwischen Konnektor und Glas
C_d	Bemessungswert Gebrauchtauglichkeitskriterium
c_F	Federsteifigkeit
c_V	Vorspannkraft
c_φ	Drehfedersteifigkeit
D	Plattensteifigkeit
E	Elastizitätsmodul
E‘	Speichermodul
E“	Verlustmodul
Ed	Bemessungswert Einwirkung
F	Stammfunktion der Scheibengleichung
F	Einzellast

f_k	Charakteristischer Wert der Biegezugfestigkeit
h	Höhe
I	Flächenträgheitsmoment
k_c	Beiwert zur Berücksichtigung der Art der Konstruktion
k_{mod}	Modifikationsbeiwert
L	Länge
N	Normalkraft
P_{Krit}	Verzweigungslast
R_d	Bemessungswert Tragwiderstand
T_g	Glasübergangstemperatur
T_m	Kristallitschmelztemperatur
t	Zeit
t	Materialdicke
q	Plattenbelastung
W	Wertebereich
w	Verformung senkrecht zur Scheibenebene
x	Achsenbezeichnung
y	Achsenbezeichnung

Griechische Buchstaben

χ	Modifikationsbeiwert
ε	Verzerrung
ε_0	Elastische Verzerrung
εrel	Zeitabhängige und reversible viskoelastische Verzerrung
εv	Zeitabhängige und irreversible viskose Verzerrung
δ	Phasenverschiebung
γ	Teilsicherheitsbeiwert
γ_M	Materialteilsicherheitsbeiwert
$\bar{\lambda}$	Bezogene Schlankheit
μ	Querdehnzahl
μ	Reibkoeffizienten

ν	Poissonzahl Glas
ψ	Beiwert für Lastkombination in Abhängigkeit der Nutzung
σ	Spannung
τ	Schubspannung
Δ	Laplace-Operator

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Anfänge des „modernen Glasbaus“ reichen bis ins frühe 19. Jahrhundert zurück. Durch den Wunsch exotische Flora in der gemäßigten Zone zu pflanzen bedurfte es den Bau von Gewächshäusern. Um das einfallende Sonnenlicht bestmöglich auszunutzen erfolgte dabei der Einsatz von Eisen und Glas, wobei der Eisenanteil auf ein Minimum reduziert wurde. Die notwendige Stabilität der Gesamtkonstruktion stellte dabei die Formgebung (Kuppel) in Verbindung mit ausschließlich auf Druck beanspruchten Gläsern sicher. Erst dadurch wurden filigrane Strukturen ermöglicht, da sich die Sprödigkeit des Werkstoffes Glas unter Druck kaum festigkeitsmindernd auswirkt. Dieser damalige Einsatz von Glas als flächigem Tragelement beeindruckt noch heute.

Heutzutage beschränkt sich der Einsatz von Glas meist auf die optische Gestaltung und der Erfüllung bauphysikalischer Aufgaben in der Gebäudehülle. Nach aktuellem Stand der Normung darf Glas zwar zum Lastabtrag von orthogonal zur Ebene angreifenden Lasten (wie z.B. Wind) beansprucht werden, in Scheibenebene allerdings ausschließlich durch das Eigengewicht. So sind bei der Nutzung von Glas als vertikales Element alle der Schwerkraft folgenden Lasten durch Stützen, Riegel oder Unterzüge in andere Bauteile umzuleiten. Zusätzlich kann der Ausfall ganzer Wandscheiben (Austausch durch großflächige verglaste Elemente) Herausforderungen hinsichtlich der räumlichen Stabilität aufwerfen. Diese spielt bei der Tragwerksplanung zwar häufig eine Nebenrolle, versagt die Aussteifung allerdings, ist die Gesamtsicherheit des Gebäudes betroffen (Primärtragwerk). In diesen Fällen sind dann ergänzende Bauteile zur Gewährleistung der Stabilität des Gebäudes (wie Aussteifungsverbände) anzuordnen, welche wiederum das Sichtfeld beeinträchtigen. Der Lösungsansatz biegesteife Rahmensysteme zum Lastabtrag der Horizontallasten zu verwenden erfordert meist massive Bauteilabmessungen, die ebenfalls gestalterischen Ansprüchen widerstreben. Im Grunde genommen steht die gewünschte Transparenz im Widerspruch zu den geforderten filigranen Strukturen der modernen Architektur. Um diesen Anforderungen doch gerecht zu werden, bietet es sich an, die in diesen Bereichen ohnehin vorhandenen Verglasungen beim Lastabtrag zu berücksichtigen. Besonders da Glas in der Lage ist Druckbelastungen planmäßig aufzunehmen, wie die Automobilindustrie schon seit Jahren zeigt. Dort trägt die Festverglasung zur Aussteifung der Karosserie bei.

Bei der Ausbildung von Schubfeldern aus Glas können sich, ähnlich wie bei einem Fachwerksystem, auf Druck beanspruchte Diagonalverbände einstellen, die zu einer Reduzierung der Tragkonstruktion beitragen. Bislang sprechen fehlende baupraktische Grundlagen gegen diesen Einsatz im Bauwesen. Wie zum Beispiel redundante Sicherheitskonzepte, welche die Standsicherheit bei plötzlichem Versagen des spröden Werkstoffs gewährleisten.

1.2 Ziel der Arbeit und Aufgabenstellung

1.2.1 Ziel der Arbeit

Die Zielstellung dieser Arbeit ist die Überprüfung der planmäßigen Belastbarkeit einer ausfachenden Verglasung in Scheibenebene um diese an der Gebäudeaussteifung zu beteiligen. Dazu wird eine in der Baupraxis simpel umsetzbare Lagerbedingung entwickelt (vgl. Kapitel 3). Anhand von Untersuchungen (numerisch und experimentell) erfolgt anschließend eine Einschätzung des Einflusses der Randbedingungen auf das Tragverhaltens, sowie der Vorschlag eines Bemessungskonzeptes für die Vordimensionierung bzw. den Nachweis der Verglasung.

Abbildung 1: Zielstellung des begleitenden Forschungsprojektes:
Monitoring-Projekt im HUF-Dorf in Hartenfels (Aussteifung erfolgt nur durch Glas)

1.2.2 Aufgabenstellung

Das Versagen von auf Druck beanspruchten Gläsern hängt stark von der Art und Ausführung der Lagerung ab. Eine konzentrierte Lagerung führt im Allgemeinen zu Spannungsspitzen und Querzugkräften an der Lasteinleitung. Eine zu weiche Lagerung versagt, bevor ein Stabilitätsversagen auftreten kann. Prinzipiell kann die Einleitung von Schubkräften in ein ausfachendes Element durch verschiedene Ansätze umgesetzt werden:

- Diagonale Klotzung
- Bolzen- oder Reibschlussverbindungen im Eckbereich
- Linienförmige Verklebung entlang der Scheibenränder
- Profilierung von Glaskante und Beschlag (Verzahnung)

Unabhängig von der Belastungssituation, muss auf eine kontrollierte Lasteinleitung der Druckkräfte in die Scheibe geachtet werden.

In dieser Arbeit wird der Ansatz der diagonalen Klotzung verfolgt. Dieses System stellt eine einfache, schnelle und kostengünstige Umsetzung in Aussicht, da es keiner Neuentwicklung bzw. Anpassung bezüglich der geometrischen Formen der Beschläge bedarf. Das bedeutet, das System kann für bestehende Profile übernommen werden. Des Weiteren kann auf Bohrungen in der Verglasung verzichtet werden, was zu einer Reduktion der Fertigungskosten führt. Zusätzlich ist die Verbindung dauerhaft und benötigt keine besondere Maßnahmen oder Herstellerqualifikationen wie dies in der Regel bei Klebeverbindung der Fall ist.

Für die Nutzung dieser Variante werden folgende grundlegende Punkte im Rahmen dieser Arbeit untersucht:

1. **Lagerung (Lasteinleitung)**

Für den in dieser Arbeit gewählten Ansatz zur Aktivierung der Verglasung als aussteifendes Element, spielen diverse Faktoren eine Rolle bei der Lasteinleitung in diese. Jedoch ist allen voran die Kantenqualität der Verglasung anzuführen, da sie in der Regel die Schwachstelle einer Verglasung darstellt und hier zur Ausbildung einer kraftschlüssigen Verbindung in den Scheibenecken herangezogen wird. Möglichkeiten zur Einflussnahme auf die Kantenfestigkeit sind die Vorspannung der Verglasung, sowie die geometrische Ausbildung der Kante und deren Endbearbeitung (z.B. gesäumt). Des Weiteren ist die Wahl eines geeigneten Werkstoffs der Klötze, im Folgenden auch als Konnektor bezeichnet, für die Regulierung der Ausbildung von Spannungsspitzen in der Verglasung zu beachten. In diesem Zusammenhang sind ebenfalls die geometrischen Randbedingungen der Lagerung wie der Randabstand und Länge des

Konnektors von Bedeutung. Weitere Anforderungen an die Lagerung bestehen in der Aufnahme von Zwängungen (z.B. Temperatureinflüsse, Schwind- und Quellprozesse) bei gleichzeitig ausreichender Steifigkeit, um auftretende Druckbeanspruchungen aufnehmen zu können. Zusätzlich sind Fertigungstoleranzen der Verglasung und Rahmenkonstruktion auszugleichen.

2. Stabilität

Ein weiterer Aspekt ist das Ausfallkriterium der Scheibe. Es gilt zu klären welches Szenario (Spannungskriterium oder Stabilität) für das Versagen maßgebend wird. Falls sich überkritisches Tragverhalten einstellt, sind die Einflüsse aus der Lagerung und von Imperfektionen zu beachten. Im Rahmen der Untersuchung ist zudem die Ableitung von Bemessungsformeln anzustreben.

2 Grundlagen

2.1 Werkstoffe

2.1.1 Glas

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über den Werkstoff Glas gegeben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den für diese Arbeit relevanten Eigenschaften. Für ein vertiefendes Studium sei auf einschlägige Literatur wie (Siebert & Maniatis, 2012) und die dort angegebenen Quellen verwiesen.

Glas weist in dem für die Baupraxis relevanten Temperaturbereich ein linear-elastisches Materialverhalten auf und besitzt ein sprödes Materialversagen. Das bedeutet, es kommt bei zu hoher Beanspruchung zu einem plötzlichen Versagen des gesamten Bauteils ohne jegliche Vorankündigung wie zum Beispiel plastischer Verformung oder einer lokal begrenzten Schädigung. Aus diesem Grund ist die Betrachtung von Spannungsspitzen, wie sie bei einer konzentrierten Lasteinleitung auftreten können, maßgeblich für die Bemessung des Werkstoffs. Um dem spontanen Versagen einer Verglasung entgegenzuwirken (Resttragfähigkeit), können Verbund- (VG) bzw. Verbundsicherheitsgläser (VSG) eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um einen Mehrfachscheibenaufbau, bei dem die einzelnen Scheiben durch eine Folie oder Harze zu einer Einheit gefügt werden. Dadurch ist insbesondere bei Überkopfverglasungen eine Resttragfähigkeit beim Ausfall einer oder mehrerer Scheiben gewährleistet.

Die Festigkeit von Glas wird im Wesentlichen vom Schädigungszustand der Oberfläche bestimmt. Diese weist immer sogenannte Mikrorisse auf. Dabei handelt es sich um zufällig verteilte, mikroskopisch kleine Oberflächendefekte, welche die theoretische Festigkeit reduzieren, da sie durch Spannungsspitzen am Rissgrund einen Bruch einleiten. Dies gilt besonders für die Glaskante. Sie ist durch die höhere spezifische Oberfläche und mechanische Bearbeitung, wie Zuschnitt und gegebenenfalls Kantenschliff, als Schwachstelle einer Verglasung auszumachen. So sind bei Vertikalverglasungen gebrochene Scheiben zu erkennen, deren Rissursprung häufig an der Lasteinleitung der Glaskante beginnt. Abschließend ist festzuhalten, dass sich keine Aussage über die absolute Glasfestigkeit treffen lässt. Es können nur ausreichend sicher gewählte Ausfall- bzw. Versagensszenarien bestimmt werden.

Zur Steigerung der Festigkeit von Glas ist es möglich dieses vorzuspannen. Der Vorspannprozess kann thermisch oder chemisch erfolgen. Das Prinzip hinter beiden Methoden ist das gleiche. Die Oberfläche wird durch beide Verfahren einer dauerhaften Druckbeanspruchung ausgesetzt, welche die Oberflächendefekte überdrückt. Je nachdem welcher Vorspannprozess Anwendung findet kann sich das Bruchbild gegenüber dem von Floatglas (früher Spiegelglas), auch Basisglas bezeichnet, verändern. Die im Bauwesen gängigen, durch thermisches Vorspannen erzeugten Produkte sind thermisch teilvorgespanntes Glas (TVG) und Einscheibensicherheitsglas (ESG). In Tabelle 1 werden die Materialeigenschaften von Basisglas und vorgespannten Gläsern (Kalk-Natronsilicatglas) gegenübergestellt.

Tabelle 1: Materialeigenschaften von Basisglas und vorgespannten Gläsern (Kalk-Natronsilicatglas)

Eigenschaften	Einheit	Floatglas	TVG	ESG
E-Modul	MPa	70.000	70.000	70.000
Querdehnzahl	-	0,23	0,23	0,23
Biegezugfestigkeit*	MPa	45	70	120

* 5% Quantilwert bei 95% Aussagewahrscheinlichkeit

2.1.2 Polyoxymethylen (POM)

Das folgende Kapitel soll einen Einblick über den Werkstoff Polyoxymethylen (POM) geben. Für Angaben zu den Eigenschaften, zur Verarbeitung und der Herstellung empfiehlt sich die einschlägige Literatur. Die in dieser Arbeit zitierte Literatur umfasst unter anderem (Kaiser, 2006), (Erhard, 2008) und (Grellmann & Seidler, 2015).

POM, auch als Polyacetale bezeichnet, ist ein Kunststoff und den teilkristallinen Thermoplasten zuzuordnen. Je nach Herstellungsprozess wird zwischen POM-Homo- (POM-H) und -Copolymere (POM-C), die maßgeblich in ihrer Stabilität voneinander abweichen, unterschieden.

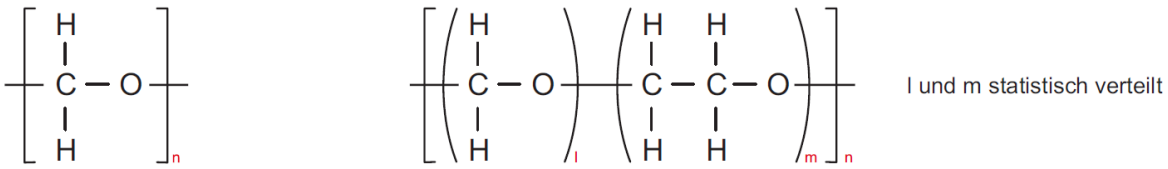


Abbildung 2: Molekülketten von POM-H (links) und POM-C (rechts) (Kaiser, 2006)

Die Anwendungsbereiche von POM sind vielseitig aufgrund der hohen Maßhaltigkeit (auch bei Kleinteilen), sowie der guten Bearbeitbarkeit in Verbindung mit den Materialeigenschaften. So findet der Werkstoff in der Automobilindustrie, Elektrotechnik, Geräte- und Maschinenbau sowie im Konsumgüterbereich Einsatz.

Die charakteristischen Eigenschaften von POM sind:

- Hohe Festigkeit
- Hohe Steifigkeit
- Hohe Schlagzähigkeit
- Hohe Härte
- Geringe Feuchteaufnahme
- Gute chemische Beständigkeit
- Hoher elektrischer Widerstand
- Sehr gutes Gleit- und Abriebverhalten
- Einsatztemperatur von -40°C bis 100°C
- Glasübergangstemperatur: -60°C
- Geringe Kosten
- Gute Zerspanbarkeit
- Farbe: weiß

Die Materialeigenschaften lassen sich durch die Zugabe von Zusatzstoffen, wie zum Beispiel Glasfasern, beeinflussen (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Materialeigenschaften von Polyoxymethylen (Kaiser, 2006)

Eigenschaften	Einheit	POM-H	POM-C	POM-C GF30
Zug E-Modul	MPa	3.000 – 3.200	2.600 – 3.000	9.000 – 10.000
Streckspannung	MPa	60 - 75	62 - 68	120 - 130
Streckdehnung	%	8 - 25	8-12	3

Die UV-Beständigkeit von POM ist niedrig. Durch Zugabe von UV-Stabilisatoren kann dem entgegengewirkt werden. Der Einsatz dieser Stabilisatoren macht sich meist durch eine schwarze Farbgebung kenntlich.

Besonders im Glasbau ist die Materialverträglichkeit von POM mit Zwischenfolien und dem Randverbund zu überprüfen. Für das im Rahmen dieser Arbeit bearbeitete Forschungsprojekt wurden die Verträglichkeitsuntersuchungen durch den im Forschungsprojekt kooperierenden Glashersteller mit dem eingesetzten Randverbund durchgeführt. Die Verträglichkeit der Kunststoffe konnte bestätigt werden.

2.2 Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen

In den folgenden Unterkapiteln erfolgt die Vorstellung der Grundlagen mechanischer Eigenschaften von Kunststoffen. Für vertiefte Grundlagen wird auf einschlägige Literatur wie (Lion, 2007), (Kaiser, 2006), (Grellmann & Seidler, 2015) und (Ehrenstein & Pongratz, 2007) verwiesen.

2.2.1 Allgemein

Das mechanische Verhalten von Kunststoffen ist stark zeit- und temperaturabhängig. Für das Verständnis der folgenden Kapitel werden diese Abhängigkeiten explizit anhand zweier Beipiele erläutert. In Abbildung 3 erfolgt dies für einen teilkristallinen Thermoplasten (eine Untergruppe der Polymere, z.B. POM) anhand der Schubmodul-Temperatur-Beziehung und in Abbildung 4 durch das für alle Kunststoffe typische Dehnungsverhalten über die Zeit.

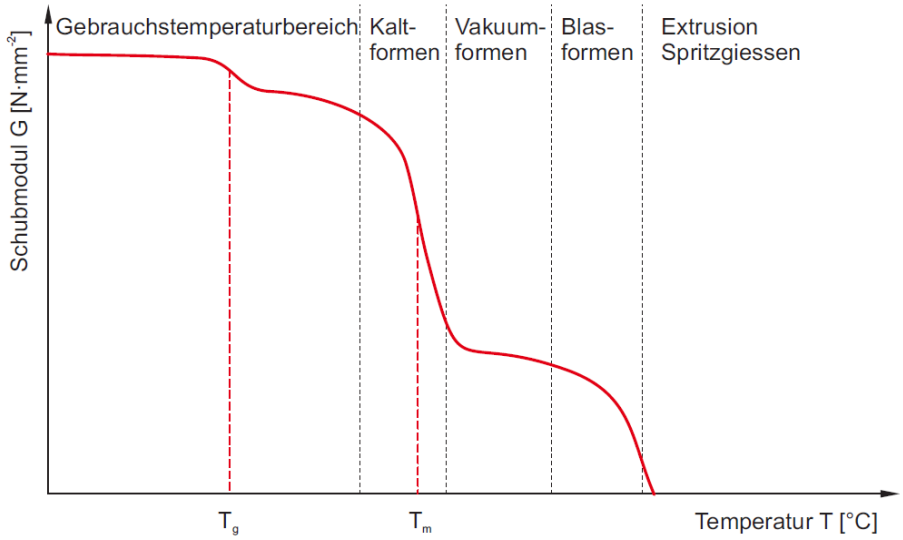


Abbildung 3: Schematische Schubmodul-Temperatur-Kurve eines teilkristallinen Thermoplasten (Kaiser, 2006)

Kennzeichnend für teilkristalline Thermoplaste ist neben der Glasübergangstemperatur T_g die Kristallitschmelztemperatur T_m. Beide bewirken eine deutliche Änderung des mechanischen Verhaltens (vgl. Abbildung 3). Die Kristallitschmelztemperatur unterscheidet die teilkristallinen Thermoplaste maßgebend von den amorphen Thermoplasten, die diese nicht aufweisen. In der Regel besitzen teilkristalline Polymere im Gebrauchstemperaturbereich ein hartzähes Materialverhalten.

Das Verformungsverhalten von Kunststoffen unterscheidet sich vom rein elastischen Verformungsverhalten, das durch das Hookesche Gesetz beschrieben wird. Die Abweichung besteht in einer zusätzlichen zeitabhängigen Verzerrungskomponente, die sich in einen reversiblen und einen irreversiblen Anteil aufteilt. Der zeitabhängige Spannungsabbau wird als Relaxation bezeichnet. Anhand Abbildung 4 wird dies für eine konstante Beanspruchung (σ_0 = konstant) bis zum Zeitpunkt t‘ und einer anschließenden Entlastung dargestellt. Es treten folgende Verformungsanteile auf:

- Spontane und reversible rein elastische Dehnung ε_0
- Zeitabhängige und irreversible viskose Dehnung ε_v
- Zeitabhängige und reversible viskoelastische / relaxierende Dehnung ε_{rel}

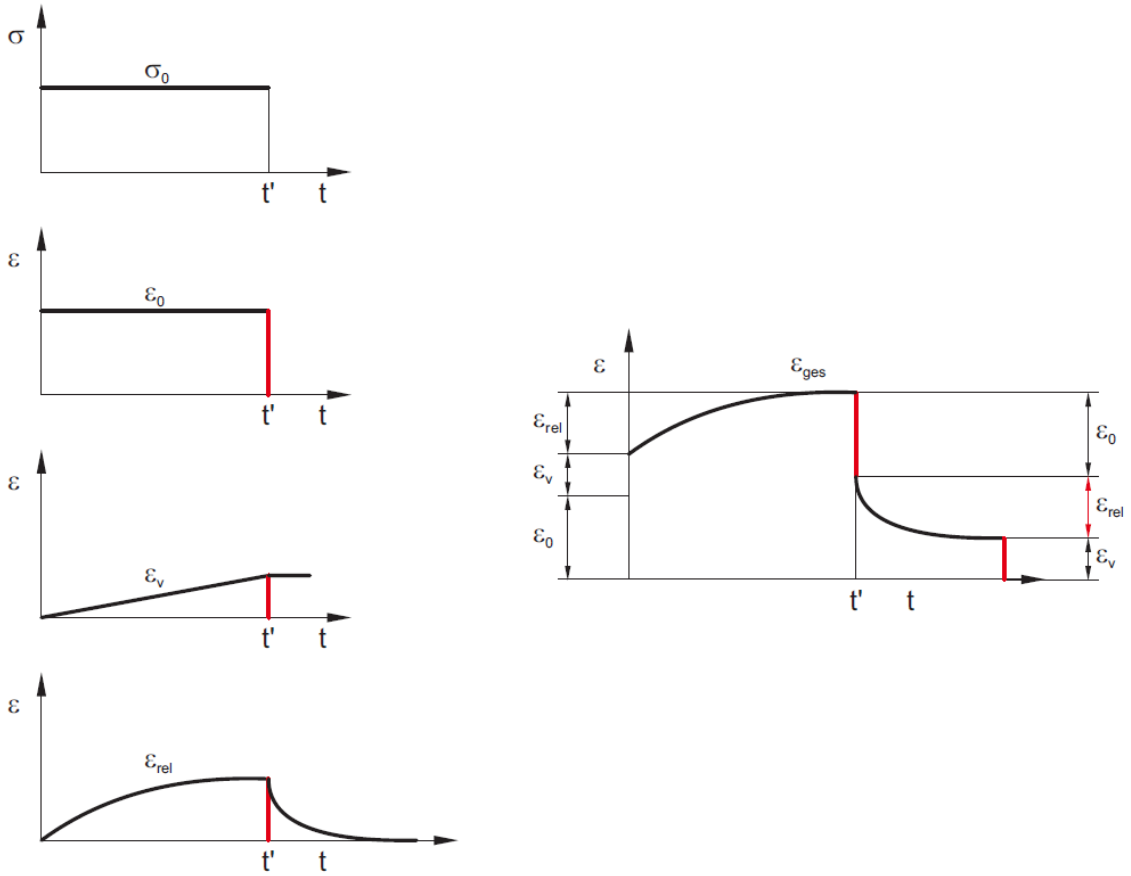


Abbildung 4: Beschreibung des Verformungshaltens von Kunststoffen bei Be- und Entlastung (Kaiser, 2006)

Die Geschwindigkeit der Prozesse hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Beanspruchung (Art, Dauer und Intensität)
- Temperatur
- Feuchtegehalt des Kunststoffs
- Ausrichtung der Fasern bei faserverstärkten Kunststoffen

Das bedeutet, je nach Einflussfaktor bzw. Kombination der Einflussfaktoren resultieren Abweichungen im Verformungsverhalten eines Kunststoffbauteils. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass schnelle Beanspruchung und tiefe Temperaturen zu einer spröden und steifen Materialantwort und umgekehrt eine langsame Beanspruchung und hohe Temperaturen zu zähem und weichem Materialverhalten führen.

In der Praxis müssen zusätzliche Faktoren berücksichtigt werden. So können z.B. Verarbeitungsprozesse nachhaltige Beeinflussungen nach sich ziehen, deren Ausmaß wiederum von den bereits zuvor angeführten Faktoren abhängt. Das bedeutet, selbst wenn der Grundwerkstoff die Anforderungen an die Einsatzbedingungen erfüllt, kann durch unsachgemäße Verarbeitung eine zufriedenstellende Anwendung gegebenenfalls nicht erfolgen. Darüber hinaus ist eine Änderung des Materialverhaltens durch äußere Einflüsse während der Dauer der Verwendung zu berücksichtigen. Diese können chemische Reaktionen einleiten, welche die Eigenschaften des Kunststoffes maßgebend beeinflussen. Daher ist der Kunststoff vor diesen zu schützen beziehungsweise das Antwortverhalten zu untersuchen.

2.2.2 Lineare Viskoelastizität

Die lineare Viskoelastizität beschreibt den Bereich der Materialeigenschaften, in dem dieser von der Zeit, jedoch nicht von der Beanspruchungshöhe abhängig ist. Das bedeutet, in der linearen Viskoelastizität besitzt das viskose Verhalten einen linearen Zusammenhang zwischen Spannungs- und Deformationsgeschwindigkeit. Dies wird als Newtonsches Werkstoffverhalten bezeichnet. Genau genommen gilt es ausschließlich für infinitesimale Beanspruchungen. In der Praxis hat sich allerdings eine Gültigkeitsgrenze für feste Polymere mit Dehnungen kleiner 1,0% bewährt (Grellmann & Seidler, 2015).

Die theoretische Näherung dieses Materialverhaltens kann durch mechanische Analogiemodelle wie dem Maxwell- oder Voigt-Kelvin-Modell erfolgen. Beide Modelle bestehen aus einem Feder-Dämpfer-Element. Dabei bildet die Feder das rein elastische Materialverhalten (Hookesches Gesetz) und der Dämpfer das Newtonsche Werkstoffverhalten ab. Die Modelle

unterscheiden sich lediglich durch die Anordnung der Elemente. Beim Maxwell-Modell sind diese in Reihe (Addition der Verzerrungen) und beim Voigt-Kelvin-Modell Parallel (Verzerrungsgleichheit) geschaltet. Durch die Verwendung mehrerer Elemente kann die Modellqualität gesteigert werden. Auf diese Weise wird komplexes Materialverhalten besser abgebildet.

2.2.3 Boltzmannsches Superpositionsprinzip

Das Boltzmannsche Superpositionsprinzip gilt bei linearer Viskoelastizität. Es beschreibt den Einfluss der mechanischen Vorgeschichte auf das Werkstoffverhalten. Es besagt, dass sich zeitabhängige Wirkungen aufeinanderfolgender Veränderungen linear zur Gesamtwirkung zusammensetzen.

2.2.4 Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip

Ändert eine Steigerung der Temperatur lediglich die Geschwindigkeit der thermisch aktivierbaren Prozesse und nicht ihre Art und Anzahl, handelt es sich um einen thermorheologisch einfachen Werkstoff. Das bedeutet, bei höherer Temperatur verschiebt sich das Relaxations- bzw. Retardations-Zeit-Spektrum hin zu kürzeren Zeitspannen ohne die Gestalt der viskoelastischen Kennwertfunktion entlang der Zeitachse (logarithmisch aufgetragen) zu ändern. Daraus resultiert die Möglichkeit einer Vorhersage des Langzeitverhaltens, da die Kurven eines bestimmten Zeitintervalls für verschiedene Temperaturen horizontal (durch einen Shift-Faktor a_T) verschoben werden können, um eine sogenannte Masterkurve zu ermitteln.

Auch für thermorheologisch komplexe Materialien kann eine Zeit-Temperatur-Verschiebung (ZTV) erfolgen. Allerdings ist hier neben der horizontalen Verschiebung eine vertikale Verschiebung und unter Umständen eine Rotation erforderlich (Marques & Creus, 2012).

2.2.5 Nichtlineare Viskoelastizität

Nach Überschreiten der Gültigkeitsgrenze der linearen Viskoelastizität erfolgt zusätzlich zur Zeit- und Temperaturabhängigkeit eine Abhängigkeit zur Beanspruchung. Die Beschreibung dieses Verhaltens ist mathematisch sehr anspruchsvoll. Bislang existieren dafür nur Näherungslösungen, die sich für die praktische Anwendung jedoch nicht durchgesetzt haben (Grellmann & Seidler, 2015).

2.3 Stabilität (Plattenbeulen)

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Stabilitätstheorie, besonders im Hinblick auf Plattenbeulen (*kurz:* Beulen), behandelt. Dabei soll dem Leser ausschließlich ein Überblick vermittelt werden. Für weitergehende Informationen sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen. Dazu zählen unter anderem (Girkmann, 1986), (Petersen, 1982), (Timoshenko & Woinowski-Krieger, 1959) und (Wolmir, 1962).

2.3.1 Einführung in die Stabilitätstheorie

Unter dem Begriff Stabilität wird das Versagen eines Systems unter Druckbeanspruchung und evtl. zusätzlicher Querbeanspruchung verstanden. Generell unterscheidet man drei Formen (Abbildung 5):

- **Knicken**
  Liegt bei stabförmigen Elementen vor. Durch eine zentrische Belastung in Stabachse erfolgt ein Ausweichen (Knicken). Zusätzliche Belastungen quer zur Achse oder Momente können die Ausweichung unterstützen (Biegedrillknicken).
- **Kippen**
  Ist eine Sonderform des Biegedrillknickens.
- **Beulen**
  Gilt für flächige Strukturen. Der größte Unterschied zu den vorherigen Formen liegt in der zweiachsigen Krümmung.

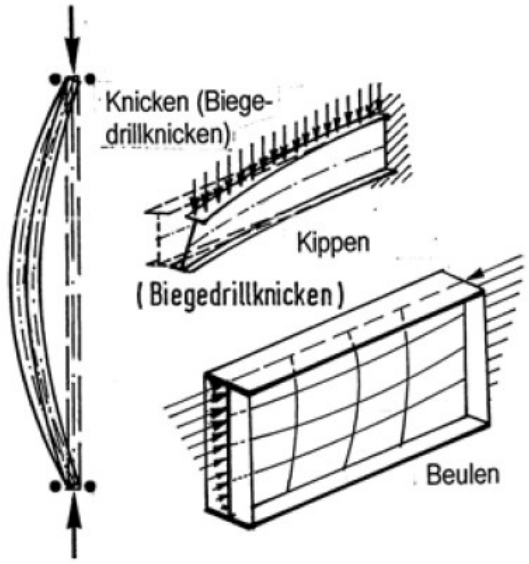


Abbildung 5: Formen der Instabilität (Petersen, 2013)

Dabei differenziert die Stabilitätstheorie für das Eintreten dieser Formen wiederum zwischen drei Gleichgewichtsformen (Abbildung 6):

- **Stabil** (unterhalb Verzweigungspunkt)
  Das System kehrt in die Ausgangslage zurück, nachdem eine auslenkende Einwirkung entfernt wird.
- **Labil** (oberhalb Verzweigungspunkt)
  Das System bewegt sich nach der Auslenkung weiter und kehrt nicht in die Ausgangslage zurück.
- **Indifferent** (Verzweigungspunkt)
  Das System erlaubt infinitesimale Bewegungen ohne Laständerung. Der Zustand ist ein wichtiges Phänomen der Stabilitätstheorie.

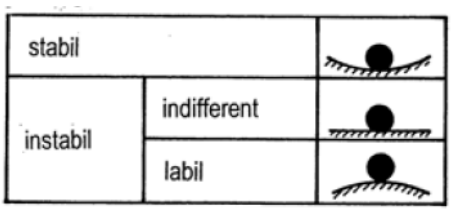


Abbildung 6: Gleichgewichtszustände (Petersen, 2013)

Wird beispielsweise eine Platte mit einer geringen Dicke t im Verhältnis zu den Scheibenabmessungen durch eine Druckkraft entlang der Ränder (frei beweglich) parallel zur Ebene beansprucht entstehen zunächst Membranspannungen. Die Platte befindet sich im stabilen Gleichgewichtszustand. Mit dem Erreichen einer bestimmten Last (Stabilitätsgrenze) tritt dann der indifferente Zustand der ebenen Gleichgewichtslage ein. Der Verzweigungspunkt ist erreicht. Bei anschließender Überschreitung dieser Belastung wird das Gleichgewicht instabil. Die Platte verlässt ihre ebene Gleichgewichtslage und geht in eine andere stabile Gleichgewichtslage über (Beulen).

Die Besonderheit bei plattenartigem Beulen gegenüber anderen Versagensformen der Stabilität ist der nach dem Beulvorgang entstehende Aufbau überkritischer Tragmechanismen. Diese erfolgen aus der Wandlung der anfänglich ideal ebenen Platte in eine doppelt gekrümmte, nicht abwickelbare Fläche. Dabei ist in Bezug auf die hier bearbeitete Fragestellung anzuführen, dass die Ausbildung einer nicht abwickelbaren Fläche durch elastische Verformungen einer Fläche möglich ist und aus diesem Grund auch der spröde Werkstoff Glas das überkritische Tragvermögen aktivieren kann.

Ergänzend wird an dieser Stelle noch ein Sonderfall beim Beulen vorgestellt. Das knickstabähnliche Beulverhalten. Im Gegensatz zum Stabknicken zeichnet sich das Tragverhalten einer Platte nach Beginn des Beulens durch eine höhere überkritische Tragfähigkeit aus (Abbildung 7). Besitzt die Platte allerdings in der vorrangig gedrückten Richtung im Vergleich zur Querrichtung kurze Abmessungen, tritt die typische zweidimensionale Lastabtragung (Doppelkrümmung) im ausgebeulten Zustand nicht mehr ein. Die Platte verhält sich dann vielmehr wie ein Knickstab und weist geringere bis keine Systemreserven bezüglich der Quertragfähigkeit auf.

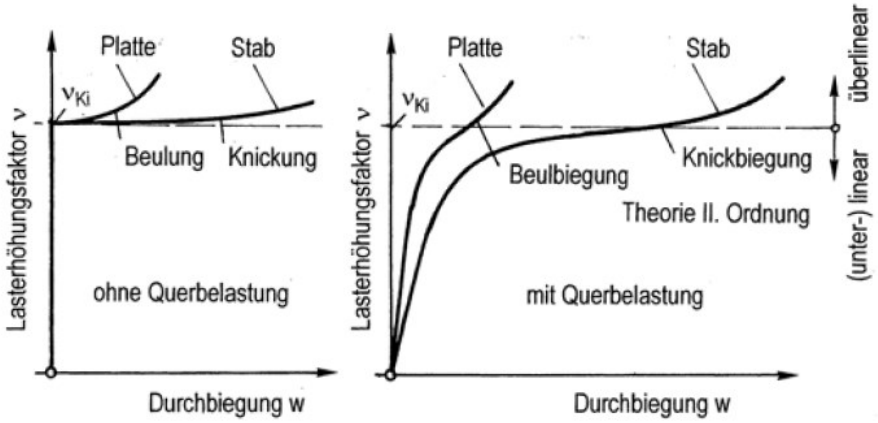


Abbildung 7: Vergleich des Tragverhaltens von Stab und Platte (Petersen, 2013)

Für die Bestimmung der Beullast eines Systems ist eine Vielzahl von Parametern zu berücksichtigen. Nachfolgend werden diejenigen mit maßgebendem Einfluss auf das Verformungsverhalten vorgestellt:

- Die Bauteilgeometrie einschließlich aller Imperfektionen
- Die Rand- und Lagerbedingungen
- Die Beschreibung des Materialverhaltens (linear / nichtlinear)
- Die Art der Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearitäten (lineare / nichtlineare Theorie)

2.3.2 Lineare Beultheorie

Bei der linearen Beultheorie wird von einem idealen Beulverhalten ausgegangen. Das bedeutet, die kritische Beullast bzw. kritische Beulspannung wird auf Grundlage der Annahme einer ideal ebenen Fläche mit elastischem, isotropem Materialverhalten und absolut zentrischer Belastung ermittelt. Imperfektionen und Nichtlinearitäten, die das Erreichen der theoretischen Beullast verhindern, werden nicht berücksichtigt. Daraus folgt eine plötzlich einspringende Beulfigur bei Erreichen des indifferenten Gleichgewichtes. Unterhalb der Verzweigungslast erfolgt lediglich eine Beanspruchung in der Ebene (reine Scheiben- oder Membranbeanspruchung). Das heißt, die lineare Theorie führt zu optimistischen Ergebnissen (auf der unsicheren Seite liegend).

Die lineare Theorie von Platten und Scheiben kann als Differentialgleichung dargestellt werden. Die Dehnungen und Schnittgrößen werden dazu auf die Mittelfläche der Platte bezogen. Die Annahme verschiedener Randbedingungen vereinfacht die Gleichung enorm. Die wichtigste Voraussetzung für die Anwendung der linearen Theorie sind kleine Durchbiegungen im Verhältnis zur Plattendicke, denn dann dürfen die geometrischen Beziehungen linearisiert werden. Weitere Voraussetzungen der linearen Theorie sind nachfolgend zusammengefasst:

- Plattengeometrie:
  - Ebene Plattenmittelfläche
  - Dünne Platte / Scheiben (Dicke << Flächenabmessungen)
  - Konstante Dicke t
- Belastung
  - Zeitunabhängige Beanspruchung
- Kinematik/Verformungen
  - Kleine Verzerrungen
  - Kleine Verschiebungen
  - Bernoulli-Hypothese ist gegeben
- Werkstoffeigenschaften
  - Werkstoff ist homogen und isotrop
  - Linear elastisches Werkstoffverhalten
  - Zeitunabhängiges Werkstoffverhalten

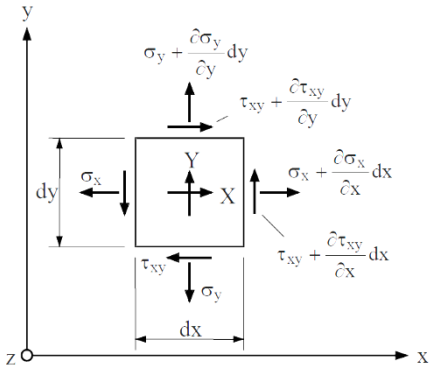


Abbildung 8: Bezeichnung am inkrementellen Element (vgl. (Girkmann, 1986))

Wie bereits erwähnt werden für die Herleitung der Grundgleichungen der linearen Beultheorie alle Gleichungen linearisiert. Dazu erfolgt das Streichen aller Quadrate in den Ableitungen der Verschiebungen in den Gleichungen der nichtlinearen Theorie (vgl. Kapitel 2.3.3). Durch die Vernachlässigung dieser Terme werden Gleichung (2) und Gleichung (4) entkoppelt. Die Längskräfte N_x, N_y, N_{xy} sind nicht mehr von der Verformung w abhängig.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad ; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad ; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \tag{1}$$

Daraus ergibt sich die Scheibengleichung zu:

$$\Delta\Delta F = 0 \tag{2}$$

mit:

Δ Laplace-Operator

$$\ddot{F} = \sigma_x = \frac{N_x}{t} \quad ; \quad F'' = \sigma_y = \frac{N_y}{t} \quad ; \quad -\dot{F}' = \tau_{xy} = \frac{N_{xy}}{t} = \frac{N_{yx}}{t} \tag{3}$$

und die Grundgleichung der Platte für die Theorie 2. Ordnung:

$$\Delta\Delta w = \frac{p}{D} \tag{4}$$

$$D = \frac{E\,t^3}{12(1-\mu^2)} \tag{5}$$

$$p = N_x\, w'' + 2\, N_{xy} \dot{w}' + N_y\, \ddot{w} + q(x,y) \tag{6}$$

mit:

$q(x,y)$ senkrecht zur Platte gerichtete äußere Belastung

Eine ausführliche Herleitung ist in (Petersen, 1982), (Girkmann, 1986) et cetera. zu finden. Eine geschlossene Lösung existiert nur für wenige bestimmte Randbedingungen.

2.3.3 Nichtlineare Beultheorie

Die nichtlineare Beultheorie berücksichtigt den Einfluss von Verformungen einer Platte senkrecht zu ihrer Ebene. Mit Hilfe der nichtlinearen Beultheorie kann daher das Tragverhalten nach dem Überschreiten der Verzweigungslast dargestellt werden. Die Differenz zwischen der tatsächlichen, finalen Belastung und der Verzweigungslast wird als überkritische Tragfähigkeit bezeichnet. Der Betrag dieser Differenz hängt dabei maßgeblich von den Randbedingungen und Materialeigenschaften ab. In der Regel übersteigt die Belastung durch Aktivierung des überkritischen Tragverhaltens die Verzeigungslast deutlich, vorausgesetzt die Platte weist kein knickstabähnliches Verhalten auf.

Durch die Anwendung der Theorie großer Verformungen reicht der lineare Zusammenhang (vgl. Kapitel 2.3.2) zwischen Verformungen und Verzerrungen nicht mehr aus. Aus diesem Grund bedarf es einer nichtlinearen Betrachtung. Die theoretische Beschreibung des Beulverhaltens gestaltet sich dadurch aufwendiger.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \quad ; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \quad ; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \tag{7}$$

Im Gegensatz zur linearen Theorie sind die Differentialgleichungen für die Scheiben- und Plattenschnittgrößen bei der nichtlinearen Theorie gekoppelt. Die Grundgleichungen der nichtlinearen Beultheorie (nach Karman) ergeben sich demnach zu:

$$\Delta\Delta w\, D = N_x\, w'' - 2\, N_{xy} \dot{w}' + N_y\, \ddot{w} + q(x,y) \tag{8}$$

2.3.4 Numerische Lösungsmethode (Finite Elemente Methode)

Alternativ zu analytischen Methoden kann ein numerisches Verfahren wie die Finite Element Methode (FEM) eingesetzt werden. Durch die Rechenleistung heutiger Computer sind diese in der Lage komplexe Aufgaben, die analytisch nur schwer zu beschreiben sind, in kurzer Zeit zu lösen. Bei der Anwendung sind allerdings ausreichende Grundkenntnisse und hohe Aufmerksamkeit notwendig (vgl. (Knothe & Wessels, 2008) & (Rust, 2011)). So kann in der Finite Element Analyse (FEA) zum Beispiel durch das Aktivieren eines Kontrollkästchens zwischen einer Berechnung nach linearer oder nichtlinearer Theorie unterschieden werden. Vor einer Berechnung ist prinzipiell die Festlegung der gesuchten Ergebnisse notwendig. Erst danach kann die entsprechende Berechnungsmethode gewählt werden. Für eine Beuluntersuchung an dem Werkstoff Glas sind folgende Ansätze möglich (vgl. (DIN EN 1993-1-6, 2010)):

- **LA** (Linear Analysis)
  lineare elastische Berechnung
- **LBA** (Linear Buckling Analysis) oder **LEBA** (Linear Eigenvalue Buckling Analysis)
  lineare elastische Verzweigungs(-eigenwert)berechnung
- **GNA** (Geometric Nonlinear Analysis)
  Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung
- **GNIA** (Geometric Nonlinear Analysis with Imperfections)
  Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen

Bei der LEBA wird die theoretische Beullast eines linear elastischen Systems bestimmt. Mittlerweile bieten viele FE-Programme dafür ein Tool an. In der Regel wird dazu zunächst ein Einheitslastfall in einer strukturmechanischen Analyse (Berechnung von Spannungen und Verformungen) definiert. Dabei handelt es sich um den sogenannten Vorspannungszustand. Auf dieser Grundlage wird dann ein Lastmultiplikator bestimmt, mit dem der Einheitslastfall zu multiplizieren ist. Das Produkt aus Anfangslast und Lastmultiplikator ergibt sich dann zu der theoretischen Beullast. Da es sich bei der Ermittlung des Lastmultiplikators um ein Eigenwertproblem handelt, können auch mehrere Lastmultiplikatoren ausgegeben werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass nicht der Lastmultiplikator mit dem geringsten Betrag maßgebend ist, muss vom Anwender abgewogen werden. Liegen die Lastmultiplikatoren beispielsweise eng beieinander, kann das System durchaus in eine höhere Eigenform ausweichen. Des Weiteren gibt eine solche Analyse Auskunft über die zu erwartenden Verformungsfiguren entsprechend der einzelnen Lastmultiplikatoren. Nichtlinearitäten, egal ob geometrisch oder materiell (ist bei Glas auszuschließen), werden nicht berücksichtigt, genauso wie Kontaktbedingungen. Sollen diese

jedoch Beachtung finden, muss eine nichtlineare Beulanalyse durchgeführt werden.

Auf geometrische Nichtlinearitäten soll an dieser Stelle noch näher eingegangen werden. Denn in der Realität weist jede Struktur Herstellungsungenauigkeiten auf, sogenannte Imperfektionen. Platten erfahren dadurch bereits im Vorbeulbereich Membran- und Biegebeanspruchungen. Je nach Größe und Form der Vorverformung variiert dabei das Eintreten des Nachbeulverhaltens. Allgemein gilt, dass die Auswirkungen durch Imperfektionen im Bereich der kritischen Beullast den größten Einfluss besitzen. Für Lasten im überkritischen Bereich sind diese geringer, je weiter die Belastung die kritische Last übersteigt. Die Empfindlichkeit gegen die Imperfektionen kann durch Sensitivitätsdiagramme abgebildet werden. Grundlegend gilt, dass sich das Ansetzen von Imperfektionen einfach gestaltet. Die Schwierigkeit liegt darin die richtige Imperfektion zu verwenden. Denn im Falle eines Durchschlagproblems ist die Eigenform zwar ähnlich zum Verformungszustand, im Falle eines Verzweigungsproblems allerdings völlig verschieden. Zum Aufbringen von Imperfektionen bestehen verschiedene Möglichkeiten, die nachfolgend kurz erläutert werden (vgl. (Rust, 2011)):

- **Imperfektion durch Kräfte**
  Dabei gilt es die Beulform mit dem niedrigstem Lastpfad anzuregen. Falls dieser nicht bekannt ist, darf die sich einstellende Beulform nicht durch äußere Lasten überbestimmt sein. Das heißt, es sind nur wenige Lasten zu verwenden und dadurch Freiheitsgrade offen zu lassen.
- **Imperfektion durch geometrische Vorgaben**
  Darunter versteht man das Generieren einer spannungsfreien Vorverformung durch Verschieben der Netzknoten. Das Finden einer geeigneten Verformung zum Anregen des Beulvorgangs ist allerdings schwierig, da nicht sichergestellt werden kann, dass die gewählte Beulform zur niedrigsten Beullast führt. Zufällige Knotenverschiebungen verhalten sich teilweise sogar ungünstiger, besonders wenn sie höhere Beullasten als die ideelle Beullast ermitteln. Zudem besteht dabei das Risiko des Auftretens von Spalten oder Überlagerungen.
- **Imperfektion durch lineare Beulanalyse**
  Bei dieser Variante (allgemeiner Ansatz) wird die Eigenform aus einer Beulanalyse in einer nichtlinearen Berechnung verwendet. Dies entspricht einer Koordinatenänderung um den skalierten Eigenvektor. Das ist zielführend, wenn lineares Verhalten bis zum Eintritt des Beulens vorliegt. Wenn allerdings mehrere Eigenwerte vorliegen, die nah beieinander liegen, sind alle dazugehörigen Eigenformen zu berücksichtigen.

- **Imperfektion durch begleitende Eigenwertanalyse**
  Dabei handelt es sich um die aufwendigste Variante. Imperfektionen aus der Eigenwertanalyse gelten als die ungünstigsten und sind zu empfehlen, wenn man die wahre Vorverformung nicht kennt. Sie ist besonders für komplexe Strukturen (globales und lokales Beulen) zu verwenden.
  Bei der Durchführung einer nichtlinearen Berechnung wird wiederholt nach dieser bzw. parallel zu dieser eine Beulanalyse durchgeführt. Diese erfolgt auf der Basis der aktuellen Tangentenmatrix. Dabei ist allerdings fraglich, wie oft diese Analyse durchzuführen ist und wie die Imperfektionen aufzubringen sind, um Verzweigungspunkte beziehungsweise das Verbleiben auf einem instabilen Pfad sicherzustellen. Zudem muss gewährleistet sein, dass der dadurch ermittelte Verzeigungspunkt überhaupt erreicht wird.

2.4 Stand der Technik

2.4.1 Glas im Bauwesen

In den Jahren 2014 / 2015 wurde die Normenreihe 18008 Teil 1 bis 5 bauaufsichtlich in den Bundesländern eingeführt. Sie ersetzte damit die davor gültigen Regelwerke im konstruktiven Glasbau. Dadurch wurde die Glasbemessung auf das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte umgestellt. Bei anderen Werkstoffen wie Stahl, Beton und Holz erfolgte diese Umstellung schon deutlich früher. In der DIN 18008 wurden die bis zu dieser Zeit gültigen technischen Regeln und DIN-Normen zur Bemessung und Konstruktion von Verglasungen in einem Regelwerk zusammengefasst. Nachfolgend ist eine Zusammenstellung der bereits eingeführten, derzeit sich in Bearbeitung befindlichen und noch geplanten Teile der DIN 18008 angeführt:

- Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen
- Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen
- Teil 3: Punktförmig gelagerte Verglasungen
- Teil 4: Zusatzanforderungen an absturzsichernde Verglasungen
- Teil 5: Zusatzanforderungen an begehbare Verglasungen
- Teil 6: Zusatzanforderungen an zu Instandhaltungsmaßnahmen betretbare Verglasungen und an durchsturzsichere Verglasungen
- Teil 7: Sonderkonstruktionen (noch nicht fertig gestellt)

Teil 6, der die Zusatzanforderungen an zu Reinigungs- und Wartungsmaßnahmen betretbare Verglasungen beinhaltet, ist veröffentlicht, allerdings baurechtlich noch nicht eingeführt. In Vorbereitung befindet sich Teil 7, in dem zukünftig Sonderkonstruktionen beschrieben werden (u.a. gebogenes Glas und Glasstützen). Auf genauere Erläuterungen der einzelnen Normenteile wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Primärliteratur verwiesen.

Die bislang in den eingeführten Teilen der DIN 18008 angeführten Konstruktionen und deren Anwendung sind bauaufsichtlich geregelt. Sie bedürfen keiner weiteren Nachweispflicht. Die Verwendung bauaufsichtlich nicht geregelter Bauprodukte und Bauarten hingegen ergab sich bis zu einem Urteil des europäischen Gerichtshofs vom 16. Oktober 2014 nur durch die Beantragung einer Übereinstimmung mittels einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE), einem allgemein bauaufsichtlichen Prüfzeugnis (abP) oder einer allgemein bauaufsichtlichen Zulassung (abZ). Allerdings wurde durch das Urteil C-100/13 des Europäischen Gerichtshofs das Vorgehen Deutschlands, nationale Zusatzanforderungen an Bauprodukte mit CE-Kennzeichnung zu stellen, für unzulässig erklärt. Aus diesem Grund erfolgte eine Überarbeitung des deutschen Bauordnungsrechts. Die Umsetzung und Prüfung der Konformität mit dem europäischen Recht findet zurzeit statt.

Die neuen Rechtsvorschriften sehen eine strikte Abgrenzung zwischen den Anforderungen an Bauprodukte, soweit diese im Sinne des europäischen Rechts zulässig sind, und den Regelungen für das Zusammenführen von Bauprodukten zu baulichen Anlagen (Bauarten) vor. Anstatt der bisherigen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) oder Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für Bauarten wird nun eine allgemeine oder vorhabenbezogene Bauartgenehmigung erteilt. Für künftige Anträge beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) werden dafür drei Fälle unterschieden:

- **Fall 1: Antrag nur für bauproduktbezogene Aspekte**
  Es wird weiterhin eine abZ erteilt.
- **Fall 2: Antrag für bauprodukt- als auch bauartbezogene Aspekte**
  Es wird eine abZ für das Bauprodukt erteilt, die gleichzeitig eine Bauartgenehmigung umfasst.
- **Fall 3: Antrag nur für bauartbezogene Aspekte**
  Es wird eine Bauartgenehmigung erteilt.

(Deutsches Institut für Bautechnik, 2017)

Eine Überarbeitung der Musterbauordnung (MBO) liegt bereits vor. Nun müssen die Bundesländer die Landesbauordnungen (LBO) anpassen. Eine Muster-Verwaltungsvorschrift – Technische Baubestimmungen (MVV TB) soll dann künftig die Bauregelliste und Liste Technischer Baubestimmungen ersetzen.

2.4.2 Toleranzen

Die zulässigen Toleranzen im Glasbau sind durch die Normen (DIN EN 572-2, 2012), (DIN EN 12150-1, 2015), (DIN EN 1863-1, 2012) und (DIN EN ISO 12543-5, 2011) geregelt.

Da die Glasdicke durch die Fertigung mittlerweile sehr genau eingestellt werden kann, bewegt sich diese aus Gründen der Wirtschaftlichkeit häufig entlang des unteren Grenzwerts der in der Normung zugelassenen Toleranzen. Im Vergleich zur Glasdicke spielt die Toleranz von Scheibenhöhe und -breite nur eine untergeordnete Rolle für das Stabilitätsverhalten der Verglasung.

2.4.3 Kantenbearbeitung

In (DIN 1249-11, 1986) werden die Kantenformen und -ausführung geregelt. Zusätzlich erfolgt in den Produktnormen für ESG (DIN EN 12150-1, 2015) und TVG (DIN EN 1863-1, 2012) eine Vorstellung der gebräuchlichen Arten der Kantenbearbeitung. Weiterhin wird in den Produktnormen festgelegt, dass die Glaskanten vor dem Vorspannprozess zu bearbeiten sind.

2.4.4 Lagerung von Glas (Klotzung)

Die Normung (DIN EN ISO 14439, 2007) und (DIN EN 12488, 2016) bzw. technische Richtlinien (Bundesinnungsverband des Glaserhandwerks, 2009) befassen sich mit der Lagerung von Glas durch Klotzung. Allen gemein ist die Restriktion, dass die Verglasung keine zusätzlich eingebrachten Lasten tragen darf. Des Weiteren erfolgen Vorgaben und Empfehlungen bezüglich der Position und Abmessung der Klotzung.

2.4.5 Festigkeit der Glaskante

Für die Ermittlung einer Kantenfestigkeit im Sinne der hier beschriebenen Anwendung (vgl. Kapitel 3) existiert kein genormtes Prüfverfahren. Lediglich (DIN EN 1288-3, 2000) beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung einer Kantenfestigkeit. Allerdings erfolgt dessen Bestimmung auf Grundlage eines Vierschneiden-Biegeversuchs, bei dem eine Zugbeanspruchung für das Versagen maßgebend ist. Die Produktnormen für ESG (DIN EN 12150-1, 2015) und TVG (DIN EN 1863-1, 2012) treffen keinerlei Aussage zur Kantenfestigkeit. Nach (DIN 18008-1, 2010) wird nur verlangt, dass bei Verglasungen ohne thermischer Vorspannung unabhängig von der

Kantenbearbeitung eine Abminderung der charakteristischen Biegezugfestigkeit um 20% zu erfolgen hat, wenn die Kante planmäßig unter Zugbeanspruchung steht. Ausschließlich in (DIN 1249-10, 1990) erfolgt die Angabe einer Druckfestigkeit von 700 bis 900 N/mm². Allerdings ist die Ermittlung dieser Druckfestigkeit an zylindrischen Proben (Durchmesser 10mm) mit einer Kraftanstiegsgeschwindigkeit von 3 bis 4 kN/s durchgeführt worden.

2.5 Stand der Forschung

2.5.1 Lagerung von Glas (Klotzung)

In (Ebert, 2014) erfolgt die Untersuchung der Eignung verschiedener Kunststoffe für den Einsatz als hochbelastbares Klotzungsmaterial. Die Klotzungsmaterialen aus Kunststoff weisen ein temperatur- und beanspruchungsabhängiges Verhalten auf (vgl. Kapitel 2.2).

2.5.2 Kantenfestigkeit (Glas)

2.5.2.1 Kante unter Zugbelastung

Allgemein wird davon ausgegangen, dass der finale Bearbeitungszustand der Kanten eines Glases Aufschluss über dessen Festigkeit gibt. Je feiner der Endzustand desto besser (geschnitten < gesäumt < geschliffen < poliert). Allerdings haben die Ergebnisse des Fachverbands Konstruktiver Glasbau (FKG) – Arbeitskreis Kantenfestigkeit gezeigt, dass dies lediglich eine Faustregel darstellt. Je nach Hersteller kann die Kantenfestigkeit deutlich abweichen. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind:

- Schneiden (Geschwindigkeit und Druck)
- Säumen
- Schleifen
- Geometrie des Schneidrädchens
- Zusammensetzung von Schneide- und Kühlmittel

2.5.2.2 Kante unter Druckbelastung

In einigen Arbeiten, wie zum Beispiel (Luible, 2004), (Wellershoff, 2006), (Englhardt, 2007), (Haese, 2013) und (Westerkamp-Freitag, 2013) wird gezeigt, dass Glaskanten hohe Lasten abtragen können. Auch eine konzentrierte Lasteinleitung über die Glaskante ist realisierbar. Für weitere Informationen erfolgt an dieser Stelle ein Verweis auf diese Literatur.

2.5.3 Lastabtrag durch Glas

In den Arbeiten von (Luible, 2004), (Wellershoff, 2006), (Englhardt, 2007), (Mocibob, 2008), (Huveners, 2009), (Haese, 2013) und (Westerkamp-Freitag, 2013) werden Systeme für lastabtragende Verglasungen vorgestellt. Die Lasteinleitung erfolgt dabei durch Klotzung, Punkthalter, Klebung oder durch deren Kombination. In einzelnen Projekten, hauptsächlich eingeschossige Gebäude, wurden lastabtragende Verglasungen bereits verwirklicht. Für weitere Informationen wird auf die Primärliteratur verwiesen.

3 System

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit soll der Einsatz von Glas als aussteifendes Element untersucht werden. Die Zielstellung ist, ein in der Baupraxis einfach umzusetzendes System zu entwickeln. In diesem Kapitel erfolgt die Vorstellung des untersuchten Systems und dessen Randbedingungen.

3.1 Materialien

Die Untersuchungen der in dieser Arbeit eingesetzten Materialien legen den Fokus auf den ausfachenden Werkstoff Glas und den zur Lagerung verwendeten Kunststoff POM. Der Werkstoff der Rahmenkonstruktion besitzt nur eine sekundäre Rolle. Dahinter steht die Zielstellung das System in beliebigen Rahmenwerkstoffen einsetzen zu können. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit betreuten Forschungsprojekts wird für die Rahmenkonstruktion Holz verwendet (siehe Kapitel 4.2.3). Dabei handelt es sich um Brettschichtholz (BSH GL 24 h). Eine der zentralen Aufgaben ist eine Verbindung für die hohen Kräfte in dem Rahmenecken zu entwickeln (siehe Kapitel 4.1.6). Um das Finite Element Modell zu validieren erfolgen zusätzlich Versuche mit einem Stahlrahmen (siehe Kapitel 4.2.2).

Für detaillierte Angaben zu den Materialeigenschaften der Werkstoffe und deren Bemessungsgrundlagen wird auf Kapitel 2 verwiesen.

3.2 Tragsystem Verbundelement

In Abbildung 9 wird der Aufbau des Systems und das Prinzip der Lastabtragung gezeigt. Das Tragsystem setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

- Ausfachendes Element
- Konnektor (Lastübertragung bzw. Distanzstück)
- Rahmenkonstruktion

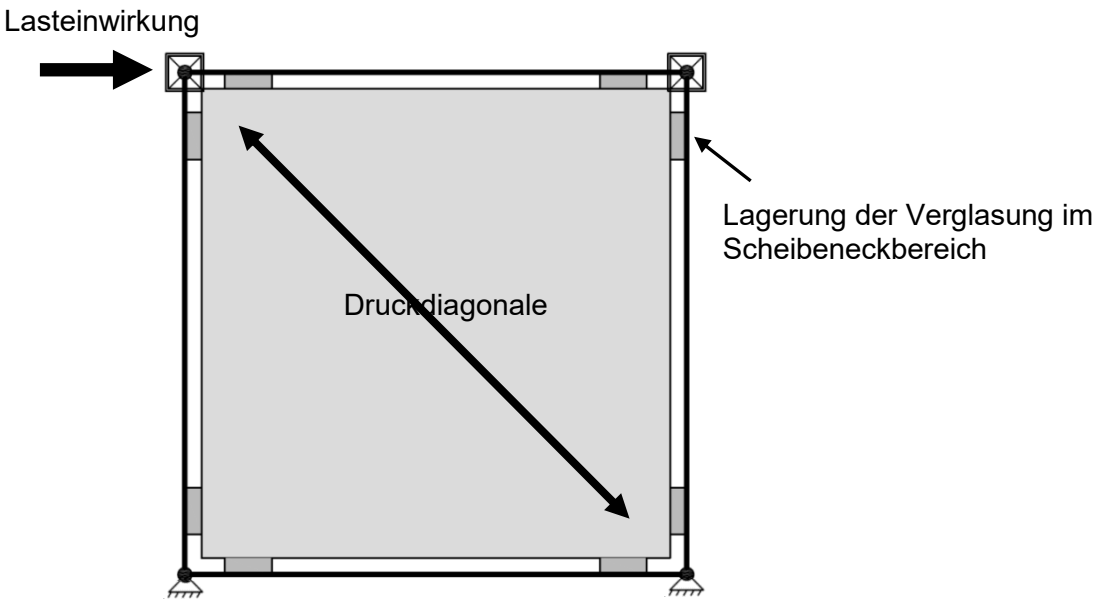


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Systems und der Lastabtragung

Das Glas wird als ausfachendes Element eingesetzt und übernimmt ausschließlich die Funktion der Aussteifung durch die Ausbildung einer Druckdiagonalen. Dies erfolgt durch den Einsatz einer monolithischen Glasscheibe, welche an den Kanten mittels Klotzung durch Konnektoren formschlüssig mit dem Rahmen verbunden ist. Diese Anwendung erfordert Untersuchungen zum konzentrierten Lasteintrag in die Glaskante (vgl. Kapitel 4.1). Um den bauphysikalischen Anforderungen an eine Fassade gerecht zu werden ist die lastabtragende Glasscheibe, die mittlere Scheibe einer Dreifach-Isolierverglasung. Dies gewährleistet einen zusätzlichen Schutz der mittleren Scheibe vor äußeren Einwirkungen.

In den Eckbereichen der Verglasung wird diese, wie bei der herkömmlichen Lagerung einer Festverglasung, durch insgesamt acht Konnektoren gelagert. Dabei werden folgende Anforderungen an die Konnektoren gestellt:

- Ausgleich von Toleranzen zwischen Verglasung und Rahmen
- Lasteinleitung ausschließlich in die Glaskante der Mittelscheibe
- Vermeidung von Spannungsspitzen
- Aufbringen einer Vorspannung
- Reproduzierbarer Einbau (Vorspannung)
- Einfache Montage
- Dauerhafte Verbindung herstellen
- Simpler Austausch der Verglasung

- Verträglichkeit mit dem Randverbund
- Wasserdampfdiffusion am Randverbund nicht behindern
- Keine Wärmebrücke erzeugen
- Beständigkeit gegen Feuchte
- Temperaturbeständigkeit

Da es bisher keinen entsprechenden Konnektor gibt, erfolgt die Entwicklung und Untersuchung eines geeigneten (vgl. (Neumer, 2017)). Für den Kontaktbereich mit Glas wird der Werkstoff POM-C verwendet. Genauere Angaben zu dem Konnektor werden in dieser Arbeit aufgrund von Schutzrechten nicht angeführt.

Der Rahmenwerkstoff wird für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen nicht explizit betrachtet, denn das System soll davon unabhängig Verwendung finden. Trotzdem sind einige Randbedingungen zu erfüllen. So muss der Rahmen alle Vertikallasten aufnehmen und in den Baugrund einleiten, sodass die Verglasung ausschließlich den Lastabtrag von Horizontallasten übernimmt. Zusätzlich müssen die aus der Druckdiagonalen resultierenden Kräfte vom Rahmen in den Baugrund eingeleitet werden. Weiterhin muss das Tragsystem so ausgebildet sein, dass keine Horizontalverformungen des Rahmens senkrecht zur Scheibenebene auftreten. Es wird dabei davon ausgegangen, dass der Rahmen an den vier Eckpunkten gegen horizontale Verformungen senkrecht zur Scheibenebene gehalten ist. Zum Beispiel durch die Ausbildung einer Deckenscheibe. Die Rahmenverbindungen (Anschlüsse der Riegel an die Stützen) müssen in der Lage sein die auftretenden Lasten aufzunehmen. Dies stellt speziell für den Werkstoff Holz (vgl. Kapitel 4.1.6) eine besondere Herausforderung dar.

3.3 Äußere Einwirkung

In diesem Kapitel werden die zu berücksichtigenden äußeren Einwirkungen auf das System vorgestellt. Dazu erfolgt eine prinzipielle Einteilung der Belastungen in:

- Vertikallast
- Horizontallast orthogonal zur Scheibenebene
- Horizontallast in Scheibenebene

Vertikale Lasten, wie zum Beispiel Eigengewicht von über dem System befindlichen Bauteilen, werden für dieses System nicht weiter betrachtet. Wie bereits unter Kapitel 3.2 angeführt, wird davon ausgegangen, dass diese von den Rahmenstützen direkt in den Baugrund eingeleitet werden. Aus diesem Grund sind diese Lasten für die aussteifende Verglasung nicht von Bedeutung. Aus Stützenschiefstellung resultierende Horizontallasten sind in Scheibenebene allerdings zu berücksichtigen.

Für Horizontallasten orthogonal zur Scheibenebene sind verschiedene Lastfälle zu berücksichtigen. Insbesondere bei Verwendung einer Mehrscheibenisolierglaseinheit. Dazu zählen unter anderem Wind- und Klimabelastung (Temperaturdifferenz) beim Einsatz als Fassadenelement, Änderung des atmosphärischen Drucks, Ortshöhendifferenz und Holmlast. Gegebenenfalls muss auch noch eine absturzsichernde Funktion vorliegen. Ein horizontaler beziehungsweise gegen die vertikale geneigter Einbau des Systems ist nicht vorgesehen. Daher entfallen Lastfälle wie Eigengewicht und Schneelast.

Die Horizontallasten in Scheibenebene beschränken sich auf die Resultierende der Windlast und der Stützenschiefstellung. Diese können zu einer äußeren Last zusammengefasst werden. Eine Unterscheidung der Lasten ist erst bei den Bemessungsansätzen erforderlich. Unter Umständen sind Erdbebenlasten zu beachten.

Die maßgebende Einflussgröße für das System ist Wind, insbesondere wenn es als Fassadenelement Anwendung findet. Eine pauschale Aussage zur Größenordnung der Windlast kann nicht getroffen werden, da diese von vielen Einflüssen abhängig ist. Unter anderem zählen dazu die Abmessung der Fassade, Position des Systems in der Fassade, umliegende Bebauung und geographische Lage. Aus diesem Grund ist die Untersuchung verschiedener Windszenarien erforderlich.

3.4 Vorverformung / Verwerfung

Imperfektionen haben einen maßgebenden Einfluss auf das Verformungs- und Tragverhalten eines stabilitätsgefährdeten Systems. Grundsätzlich sind zwei Arten zu unterscheiden. Dabei handelt es sich zum einen um Abweichungen in der Form (geometrische Imperfektion) und zum anderen um Abweichungen im Werkstoff (strukturelle Imperfektion). Letztere beschreibt Inhomogenität sowie Anisotropie im Medium und wird in dieser Arbeit nicht näher behandelt,

da sie bislang durch die Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffeigenschaften auf der Widerstandsseite berücksichtigt werden. Für die Bemessung stabilitätsgefährdeter Bauteile aus Glas existieren bislang keine Regelungen für die anzusetzenden geometrischen Imperfektionen (Vorverformungen). Gegenwärtig sind ausschließlich die Verwerfungen, die bei der Veredelung von Glas entstehen, in Produktnormen reguliert.

Erfahrungsgemäß ist als ungünstigste Vorverformung eine skalierte Eigenform anzusetzen. Meistens handelt es sich dabei um die erste Eigenform. Allerdings können höhere Eigenformen schneller zu maßgebenden Hauptzugspannungen führen (vgl. (Luible, 2004) & Kapitel 5.2.3). Die Amplitude der anzusetzenden Vorverformung wurde in verschiedenen Forschungsarbeiten bereits untersucht. (Belis, et al., 2011) empfiehlt für die Amplitude L/400 anzusetzen. Allerdings wird dieser Wert bei den untersuchten Probekörpern zum Teil überschritten. Die in den Produktnormen von TVG (DIN EN 1863-1, 2012) und ESG (DIN EN 12150-1, 2015) angegebene zulässige maximale Amplitude von L/333 wird hingegen immer eingehalten. Auf dieser Grundlage in Verbindung mit EC-3 Teil 1-6 (DIN EN 1993-1-6, 2010) der die Festigkeit und Stabilität von Schalen aus dem Werkstoff Stahl regelt, erfolgt die Wahl der anzusetzen Amplitude zu L/333.

Für die Materialstärke der Glasscheibe wird in den nachfolgenden numerischen Untersuchungen (siehe Kapitel 5) jeweils von den minimal zulässigen Glasdickengrenzabmaßen nach Abzug der Toleranzgrenzwerte nach (DIN EN 572-2, 2012) ausgegangen.

3.5 Parameter

Fassaden sind im Allgemeinen gezielt an ein Bauwerk angepasst. Sie müssen dafür spezielle architektonische, technische und klimatische Anforderungen erfüllen. Aus diesem Grund sind allgemeine Aussagen in der Regel schwer zu treffen. Trotzdem soll das in dieser Arbeit vorgestellte System allgemein beleuchtet werden. Dazu sind Untersuchungen verschiedener Parameter und deren Einfluss erforderlich. Zusätzlich erfolgt die Präsentation einer möglichen Ausführungsvariante, die im Rahmen des begleitenden Forschungsprojekts entwickelt wird.

Für die Validierung des Systems wird die Finite Element Methode an einem idealisierten Modell (Abbildung 10) durchgeführt. Durch die Verwendung geeigneter Randbedingungen und Materialkennwerte für das in Kapitel 3.2 beschriebene Tragsystem können somit numerische

Berechnungen erfolgen. Nach der Verifizierung des Modells, zum Beispiel durch versuchstechnische Untersuchungen, spart diese Methode Zeit und vor allem Kosten für die Durchführung von aufwendigen experimentellen Versuchsplänen. Die Zielstellung ist dabei eine Optimierung des Systems und die Bestimmung von Grenzwerten.

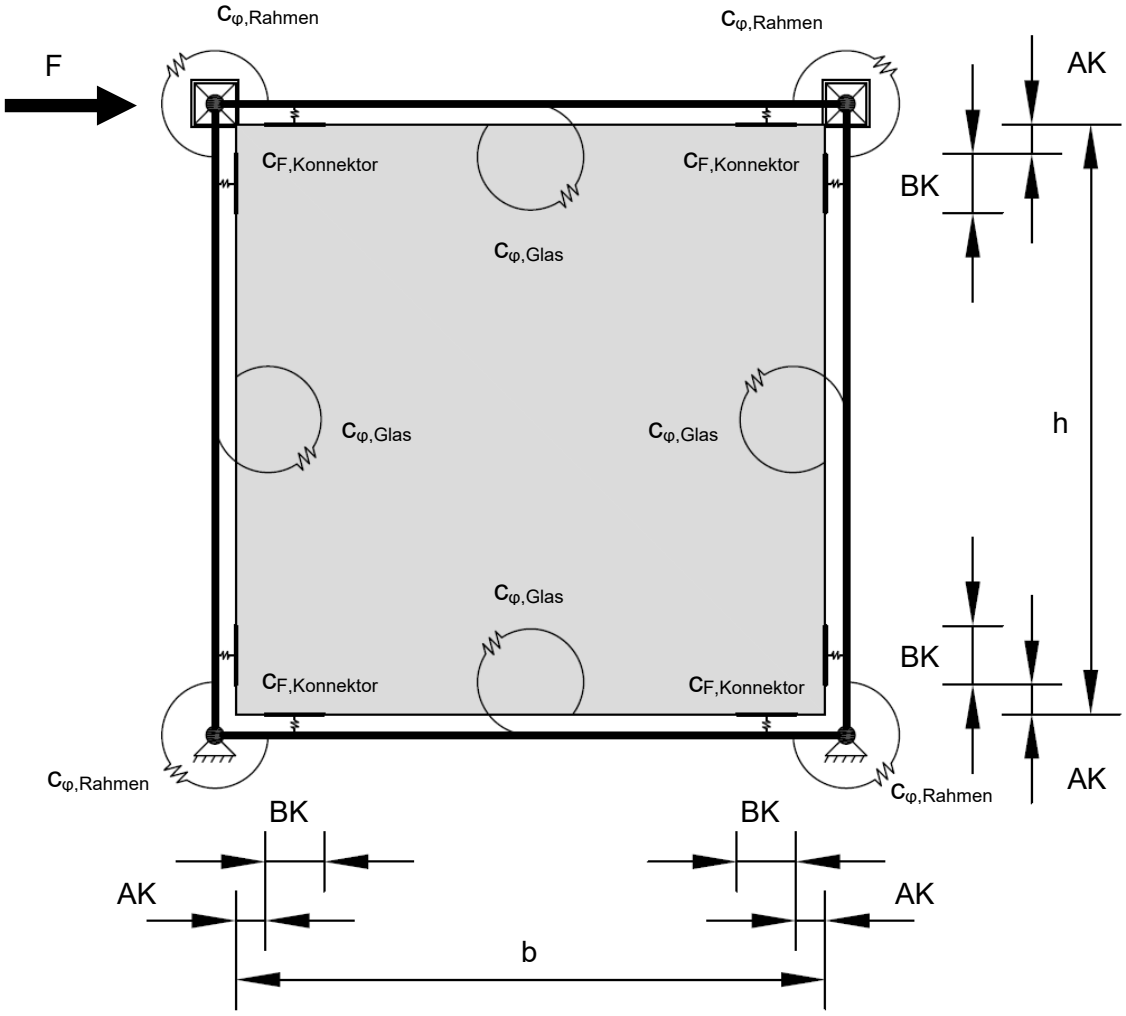


Abbildung 10: Bezeichnungen des Systems (vgl. Tabelle 3)

Nachfolgend wird die experimentelle und numerische Untersuchung der Einfluss nehmenden Parameter behandelt. Dies erfolgt zum einen durch die Betrachtung des Gesamtsystems und zum anderen durch Untersuchungen, die für gezielte Fragestellungen optimiert sind. In Tabelle 3 erfolgt die Darstellung der wesentlichen Parameter (vgl. Abbildung 10).

Tabelle 3: Systemparameter

Parameter	Einheit	Erläuterung
b	mm	Breite der Glasscheibe
h	mm	Höhe der Glasscheibe
t	mm	Dicke der Glasscheibe
E_{Glas}	MPa	E-Modul der Glasscheibe
ν_{Glas}	-	Poissonzahl Glas
E_{Rahmen}	MPa	E-Modul des Werkstoffs der Rahmenkonstruktion
I_{Rahmen}	mm^4	Flächenträgheitsmoment der Rahmenquerschnitts
AK	mm	Abstand des Konnektors von der Glas Ecke
BK	mm	Kontaktlänge zwischen Konnektor und Glas
$c_{F,Konnektor}$	Nmm	Federsteifigkeit des Konnektors
$c_{V,Konnektor}$	Nmm	Vorspannkraft des Konnektors
$c_{\varphi,Glas}$	Nmm/°	Drehfedersteifigkeit zwischen den Kanten der Mittelscheibe und der Rahmenkonstruktion
$c_{\varphi,Rahmen}$	Nmm/°	Drehfedersteifigkeit der Rahmenecken
F	kN	Horizontale Einzellast in Scheibenebene
q	N/mm^2	Horizontale Flächenlast senkrecht zur Scheibenebene
w	mm	Verformung senkrecht zur Scheibenebene (Imperfektion)

3.6 Bauphysikalische Aspekte

Die Aufgabe einer Fassade ist die Trennung von Außenklima und Raumklima. Um den daraus folgenden bauphysikalischen Ansprüchen gerecht zu werden, ergeben sich hohe Anforderungen an die Gebäudehülle. Aus diesem Grund findet bei dem hier vorgestellten System eine Dreifach-Isolierverglasung als ausfachendes Element Anwendung. Neben der hervorragenden dämmenden Eigenschaft (geringer Wärmedurchgangkoeffizient) bieten die äußeren Scheiben der Mehrscheibenisolierverglasung, nur die Mittelscheibe wird zum Lastabtrag angesetzt, eine schützende Funktion gegenüber horizontalen Einwirkungen orthogonal zur Scheibenebene.

Bei der Lagerung der Verglasung sind Wärmebrücken zu vermeiden. Diese können zu Tauwasserbildung führen. Weiterhin müssen die Verglasungsrichtlinien eingehalten werden, um die Funktionsfähigkeit der Isolierglaseinheit zu gewährleisten. Dazu zählen unter anderem eine fachgerechte Lagerung der Einzelscheiben, Verträglichkeit mit dem Randverbund, keine Behinderung des Dampfdruckausgleichs und Alterungsbeständigkeit. Genauere Information hierzu sind in (Bundesinnungsverband des Glaserhandwerks, 2009) sowie in den Verglasungsrichtlinien verschiedener Glashersteller zu finden.

Um den hohen bauphysikalischen Ansprüchen auch für die Rahmenkonstruktion gerecht zu werden, findet im Zuge des Forschungsvorhabens der Werkstoff Holz Einsatz. Der Naturwerkstoff zeichnet sich durch hervorragende Eigenschaften für den Wärmeschutz aus (vgl. (Lohmeyer, et al., 2005)).

Durch die Verwendung eines mehrschichtigen Glaspakets wird auf den Einsatz von Verbundsicherheitsverglasungen (VSG) verzichtet um die Transparenz nicht zusätzlich zu beeinträchtigen. Darüber hinaus entfallen somit zusätzliche Anforderungen an den Konnektor bezüglich des Ausgleichs etwaiger Fertigungstoleranzen bei der Herstellung von VSG.

4 Experimentelle Untersuchung

4.1 Lasteinleitung

4.1.1 Allgemein

Für das in Kapitel 3 vorgestellte System zur Aktivierung von Glas als aussteifendes Element hat neben der Stabilität die Lasteinleitung einen maßgeblichen Einfluss auf die Tragfähigkeit. Zwar ist bekannt, dass Glas in der Lage ist, hohe Druckbeanspruchungen aufzunehmen (siehe Kapitel 2.1), allerdings liegen wenige wissenschaftlich abgesicherte Kennwerte für den materialgerechten Ansatz einer auf Druck belasteten Glaskante vor. Unter Kapitel 4.1 werden aus diesem Grund experimentelle Untersuchungen zur Lasteinleitung in die Verglasung behandelt. Dazu erfolgt neben Kleinteilversuchen an Modellscheiben die Ermittlung von Materialkennwerten für den Einsatz in der Finiten Element Methode.

Die eingesetzten Modellscheiben sind dem Eckbereich einer Rechteckverglasung nachempfunden (Abbildung 11). Anhand dieser wird die Kombination der Glasveredelung, Kantenausbildung und dem Lagermaterial sowie die Position der Lasteinleitung im Eckbereich untersucht.

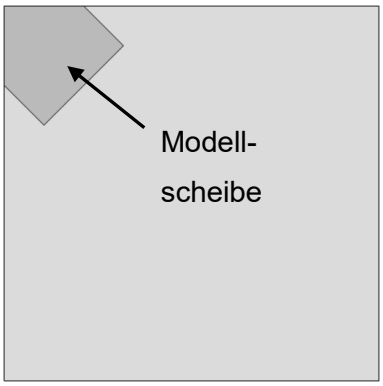


Abbildung 11: Modellscheibe und ihre Anordnung in einer Rechteckscheibe

4.1.2 Glaskantenform und Konnektormaterial

Um eine geeignete Lasteinleitung in die Glaskante sicherzustellen erfolgen Druckversuche an Modellscheiben mit verschiedenen Kantenbearbeitungen unter Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe für den Konnektor (vgl. Tabelle 4 & Abbildung 12).

Tabelle 4: Untersuchte Parameter bei den Versuchen zur Glaskantenform und Konnektormaterial

Glasart	Kantenbearbeitung	Konnektor
FG (F)	Schnittkante (nur bei FG) (S)	POM-C
ESG (E)	C-Schliff (C)	HILTI HIT HY 70
	Kante gesäumt (KG)	Buche
	Kante poliert (KP)	Stahl (S235)

In Vorversuchen hat sich herausgestellt, dass das Holz der Buche im Vergleich europäischer Hölzer die besten Eigenschaften unter einer Druckbeanspruchung aufweist. Bessere Ergebnisse liefern nur tropische Hölzer, die aus Kostengründen für die weitere Untersuchung nicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass für alle untersuchten Hölzer eine Belastung auf das Stirnholz den höchsten Widerstand bei gleichzeitig kleinster Verformung erkennen lässt (Neumer, 2015). Als Vertreter der Kunststoffe wird POM-C gewählt (vgl. Kapitel 4.1.4). POM-C besticht gegenüber anderen Kunststoffen durch den geringen Preis und erfüllt dabei alle Anforderungen an die Anwendung (vgl. Kapitel 3.2). Des Weiteren wird dieser Werkstoff bereits seit geraumer Zeit im Bauwesen eingesetzt und hat seine Verträglichkeit mit anderen relevanten Kunststoffen bewiesen. Zusätzlich findet sich ein Vergussmörtel der Firma HILTI, der bereits langjährig in Glaskonstruktionen (insbesondere bei Punkthaltern) eingesetzt wird, und Stahl als sehr harter Werkstoff in der Auswahl wieder.

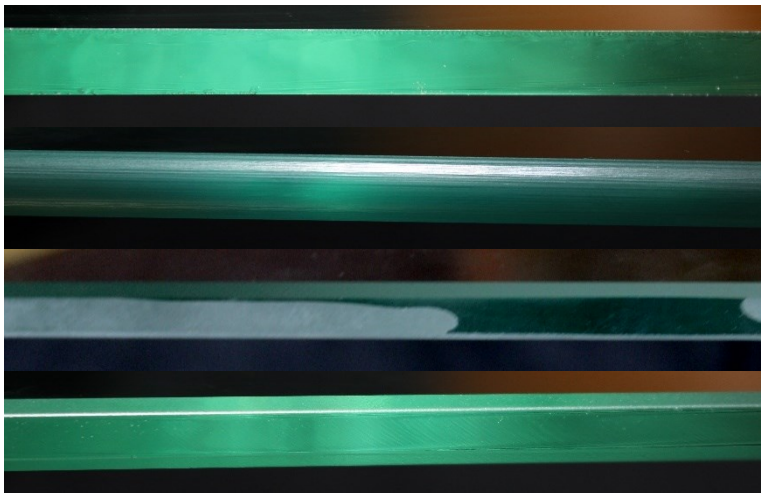


Abbildung 12: Kantenbearbeitung der Versuchsscheiben

Für die Versuchsdurchführung wird die Modellscheibe (t = 6mm) mit der Spitze nach unten in einer Stahlkonstruktion positioniert. Zwischen Glas und Stahlkonstruktion befinden sich die Konnektoren. Die Belastung erfolgt durch einen Hydraulikzylinder der Firma Schenk an der parallel zum Grund verlaufenden Kante. Wegaufnehmer in horizontaler und vertikaler Ausrichtung zeichnen die Verformungen der Modellscheibe während des Versuchs auf (Abbildung 13). Der Ablauf der Versuche erfolgt in Anlehnung an DIN 18008-3. Demnach wird eine Ziellast (hier 30kN) festgelegt und anschließend die Belastung in 10%-Schritten dieser belastet. Zwischen den einzelnen Belastungsschritten findet eine komplette Entlastung statt und die Komponenten werden auf elastisches Systemverhalten untersucht. Bei Erreichen der dreifachen Ziellast erfolgt der Versuchsabbruch. Neben der Normvorschrift dient dies zusätzlich dem Schutz der Kraftmessdose. Eine weitere Entlastung des Systems wird bei Erreichen der doppelten Ziellast durchgeführt. Die Belastung erfolgt weggesteuert mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,05mm/s.

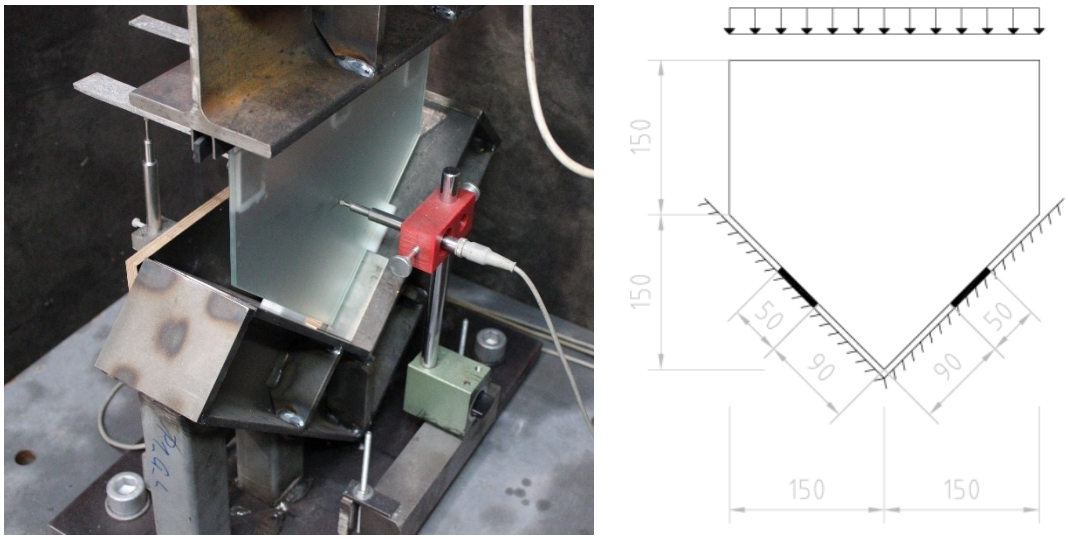


Abbildung 13: Versuchsaufbau der Versuche zur Glaskantenform und Konnektormaterial (Neumer & Siebert, 2016)

Die Versuche bestätigen die hohe Druckfestigkeit von Glas (siehe (Neumer, 2015) & (Luible, 2004)). So zeichnet sich erst bei der Verwendung von Stahl als Konnektor ein Unterschied im Einsatz von Floatglas und ESG sowie der abweichenden Kantenbearbeitungen ab. Bei der Versuchsdurchführung versagt demnach der Konnektor. Ausgenommen sind dabei der Konnektor aus Stahl, bei dessen Gebrauch auch das Erreichen der maximalen Beanspruchung zum Ende des Versuches führt, sowie die Kombination von Schnittkante und POM. Zur Kantenform ist anzuführen, dass sich die Schnittkante und der C-Schliff (schlechtere Eignung

je härter der Werkstoff des Konnektors) nicht eignen. Beide Oberflächen führen zu Spannungskonzentrationen, die einen Riss einleiten können. Die gesäumte Kante zeigt im Mittel gegenüber der polierten Kante geringfügig höhere Maximalbelastungen. Dies ist auf die unregelmäßigere Oberfläche zurückzuführen (höhere Reibung). Allerdings kommt es dadurch vereinzelt zu frühzeitigerem Versagen. Der Injektionsmörtel (HIT HY 70) ist auf Grundlage der verwendeten Versuchsanordnung nicht für die Lasteinleitung heranzuziehen. Es zeigen sich große Streuungen in den Versuchswerten. Die Annahme besteht, dass der Einsatz einer Querdehnungsbehinderung einen positiven Effekt auf die Verwendung ausübt. Wie groß dieser ist kann nicht abgeschätzt werden. Das Holz der Buche und POM zeichnen sich durch hohe Reproduzierbarkeit aus. Allerdings überzeugt der Kunststoff durch seine höhere Belastbarkeit, dem annähernd elastischen Verhalten bis zur Ziellast und einem plastisch-zähem Versagen gegenüber dem Sprödbruch bei Holz (vgl. Abbildung 14 und Abbildung 63 im Anhang).

Abbildung 14: Typisches Versagen bei Belastung durch polierte Kante (links: POM; rechts: Buche)

Abschließend ist anzuführen, dass für die Lagerung bei den Großbauteilversuchen die Kombination aus polierter Kante (ESG) und POM gewählt wird. Eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse befindet sich im Anhang.

4.1.3 Laststellung

In diesem Kapitel werden erneut Druckversuche an Modellscheiben vorgestellt. Ziel dieser Untersuchung ist allerdings die Ermittlung der Auswirkung von Lageranordnungen auf die in der Verglasung auftretenden Spannungen (siehe auch (Eichhorn, 2017)). Dazu werden insgesamt drei Lagerpositionen miteinander verglichen. Es weichen lediglich die Abstände zur Scheibenecke/-kante (AK) voneinander ab. Die Länge des Konnektors (BK) beträgt immer 50mm (vgl. Abbildung 10). Zusätzlich zum „idealen Lagerwinkel“ (= Ebene Glas zu Ebene Konnektor verlaufen senkrecht zueinander, dies entspricht 0 Grad Abweichung in Tabelle 5)

werden zwei zusätzliche Neigungen eingestellt. Dabei erfolgt die Messung der Spannungen sowohl auf der belasteten als auch auf der unbelasteten Scheibenoberfläche (vgl. Abbildung 15). Als Konnektormaterialien werden POM-C und Stahl S235 herangezogen. Bei den untersuchten Kantenformen handelt es sich um die in Kapitel 4.1.2 vorgestellten. Mit Ausnahme der Schnittkante, bei der Floatglas eingesetzt werden muss, erfolgt die Nutzung von ESG-Scheiben. Ein Überblick der verwendeten Parameter befindet sich in Tabelle 5.

Tabelle 5: Untersuchte Parameter bei den Versuchen zur Laststellung

Kantenbearbeitung	Konnektor	Lagerung (AK)	Neigung
Schnittkante (FG)	POM-C	50mm/50mm	0°
C-Schliff (ESG)	Stahl (S235)	100mm/100mm	10°
Kante gesäumt (ESG)		50mm/100mm	20°
Kante poliert (ESG)			

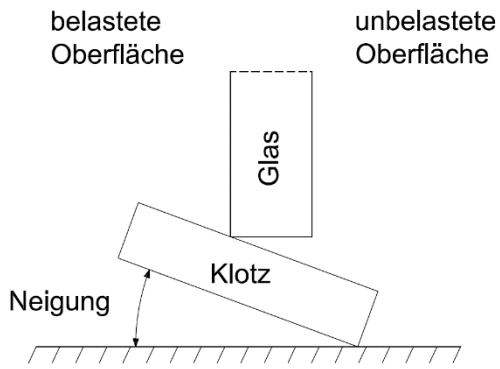


Abbildung 15: Schematische Darstellung (Querschnitt) des Versuchsaufbaus für die Laststellung

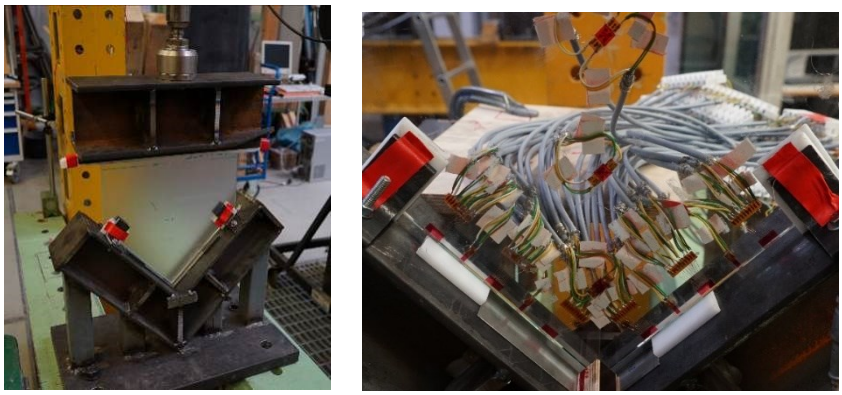


Abbildung 16: Versuchsaufbau der Untersuchungen zur Laststellung

Die Versuchsanordnung entspricht prinzipiell der aus Kapitel 4.1.2. Sie ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Modellscheiben werden bis maximal 5kN belastet. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt dabei 0,1mm/s (Zylinder: Zwick Roell Z50; Kraftmessdose Nennlast 10kN). Die Aufzeichnung der Spannungen an der Scheibenoberfläche erfolgt durch den Einsatz von Dehnungsmessstreifen (DMS). Die Anordnung dieser kann aus Abbildung 17 entnommen werden. Für die Kantenbearbeitungen Schnittkante und gesäumte Kante wird eine Messtechnikanordnung von 16 DMS, bei C-Schliff und polierte Kante eine Anordnung von 40 DMS eingesetzt. Eine angestrebte optische Dehnungsmessung konnte nicht realisiert werden, da die Auflösung der existierenden Systeme nicht ausreicht. Die Messergebnisse bewegen sich in der Größenordnung des Messrauschens beziehungsweise darunter.

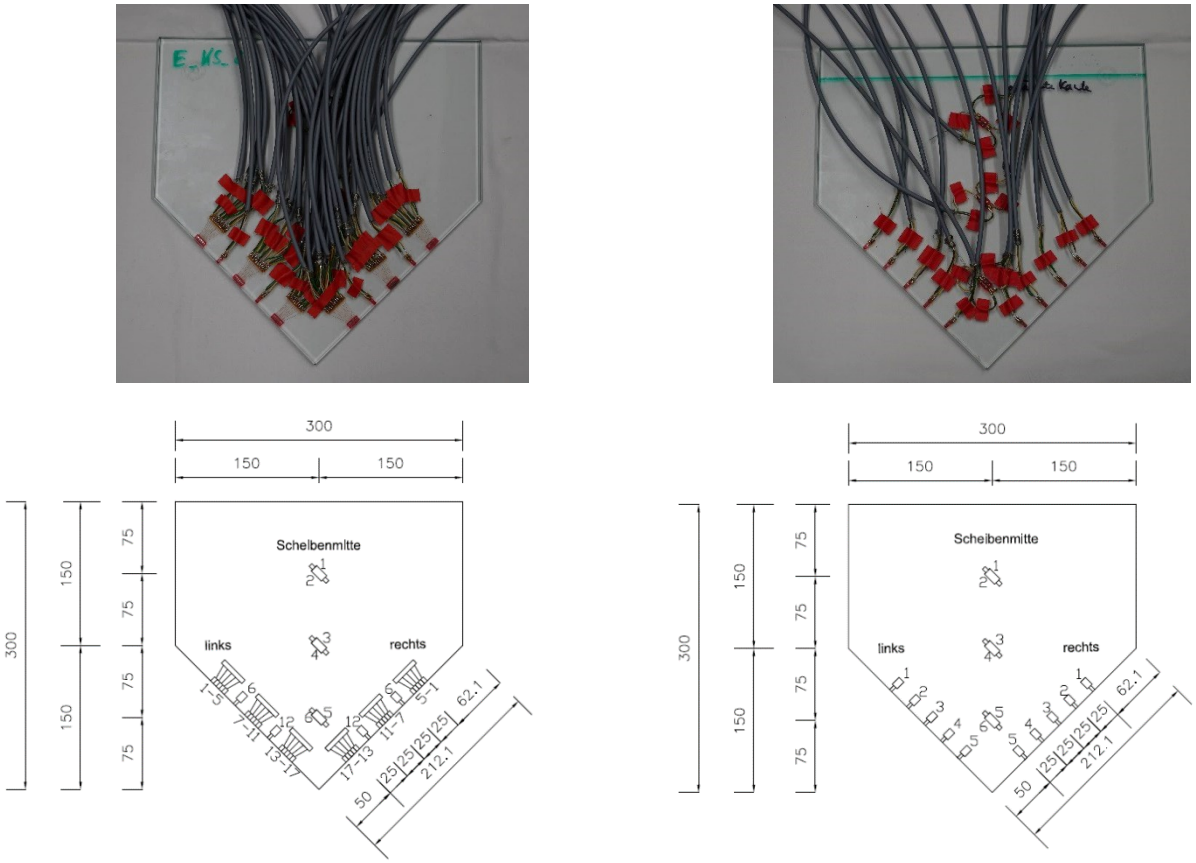


Abbildung 17: Anordnung der Messtechnik auf den Modellscheiben (Eichhorn, 2017)

Die Auswertung der Versuche erfolgt bei einer Belastung von 1kN. Bis dahin kann ein linearer Anstieg der Verzerrungen beobachtet werden (Neigung 0° & 10°) (vgl. exemplarische Darstellung im Anhang). Bei höherer Belastung treten an der Lasteinleitung in Abhängigkeit von der Kombination der Parameter Verformungen senkrecht zur Ebene auf, die durch undefinierte Randbedingungen (wie z.B. Zwängungen an Klemmen) zu nichtlinearen Spannungsverläufen

führen. Die Daten bei einer Neigung von 20° können aus diesem Grund nicht herangezogen werden. Hier beginnen diese Verformungen orthogonal zur Ebene noch deutlich vor einer Belastung von 1kN. Weiterhin werden die Ergebnisse der Schnittkante nachfolgend nicht berücksichtigt. Durch das Versagen der Verglasung nach wenigen Versuchen, konnte keine ausreichende Erhebung von Daten erfolgen.

Ferner ist zu den Ergebnissen anzuführen, dass es sich ausschließlich um punktuelle Stauchungskennwerte handelt und die ermittelten Verläufe daher Ungenauigkeiten bzw. Abweichungen aufweisen können. Lokale Maxima werden nicht zwingend erkannt. Dadurch sind Differenzen in den Messwerten bei symmetrischer Lagerung zu erklären. Weitere Ursachen für Ungenauigkeiten bzw. Abweichungen können sein:

- Winkelabweichungen der Verglasung oder der Stahlunterkonstruktion von 90°
- Abweichungen vom Sollmaß bei der Montage der Messtechnik
- Unregelmäßigkeiten des Konnektors (z.B. Längenabweichung)
- Unregelmäßigkeiten der Lasteinleitung (z.B. mangelnder Formschluss Kugelgelenk))

Folglich dienen die Versuche nur zum Aufzeigen von Tendenzen und liefern einen Wertebereich für die Validierung numerischer Untersuchungen (vgl. Kapitel 5.1).

Bei der Betrachtung der Stauchungen entlang der Scheibenkante zeigt sich, wie Kapitel 4.1.2 vermuten lässt, dass Stahl gegenüber POM einen deutlich höheren Widerstand aufweist. Es treten deutlich höhere Beträge in den Stauchungen bei dem Einsatz von Stahl auf. Des Weiteren wird durch einen Vergleich der Kantenformen deutlich, dass der C-Schliff gegenüber der polierten und geschliffenen Kante, die ähnliche Stauchungen erzielen, die geringsten Stauchungen erfährt. Bezüglich der Lagerposition kann festgehalten werden, dass eine symmetrische Lagerung einem unterschiedlichen Abstand zur Kante (AK) vorzuziehen ist. Der Abstand bei einer symmetrischen Lagerung bleibt hier ohne Einfluss. Dies gilt insbesondere bei einer Lagerung ohne Neigung. Sobald eine Neigung vorliegt, wird diese maßgebend und lässt keine Aussage über den Einfluss der Lagerposition zu. Zum Stauchungsprofil ist zu erwähnen, dass die maximalen Stauchungsbeträge immer an einem der Endpunkte der Kontaktfläche von Glas und Konnektor auftreten (i.d.R am oberen Ende). Dies deutet auf Winkelabweichungen bzw. Toleranzen der Konnektoren bezüglich ihrer Materialstärke hin, die keine gleichmäßig belastete Kontaktfläche zulassen.

4.1.4 Materialeigenschaften von POM-C

Auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 4.1.2 wird POM-C für den Einsatz als Konnektor im Gesamtsystem gewählt. In diesem Zusammenhang erfolgt die Untersuchung verschiedener Materialeigenschaften, die nachfolgendend vorgestellt werden.

4.1.4.1 Allgemein

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfolgen Zug-, Druck- und Stempeldruckversuche (Abbildung der Glaskante durch Stahlblech) unter Raumtemperatur (Hemschenherm, 2015). Diese bestätigen die Ergebnisse von (Ebert, 2014). Darüber hinaus erfolgt an dieser Stelle der Verweis auf (CAMPUS(R), 2017). Das CAMPUS® Online-Informationssystem bietet kostenlose Datenblätter für Kunststoffe teilnehmender Produzenten an. Die Versuchskurven verschiedener Materialparameter können dort angezeigt und Kennwerte verschiedener Hersteller graphisch direkt miteinander verglichen werden. Bei vielen Kunststoffen sind zusätzlich Versuchsdaten für verschiedene Prüftemperaturen hinterlegt. Auch hier liegt eine Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen aus (Hemschenherm, 2015) vor. Daher wird auf eine Darstellung der Versuche aus (Hemschenherm, 2015) verzichtet und auf (Ebert, 2014) sowie (CAMPUS(R), 2017) verwiesen, da dort nicht nur die Vorstellung weiterer Materialkennwerte erfolgt, sondern auch Versuchsdurchführungen bei von der Raumtemperatur abweichenden Temperaturen vorgestellt werden.

4.1.4.2 Kurzzeitfestigkeit

Für den späteren Einsatz von POM-C als Konnektor ist sowohl die Kurzeitfestigkeit als auch das Verhalten unter dauernder Beanspruchung von Bedeutung. Dabei wird die Kurzzeitfestigkeit hauptsächlich durch Windbelastungen in Scheibenebene aktiviert. Aus diesem Grund erfolgt eine kurze Vorstellung der Ergebnisse zur Kurzzeitfestigkeit nach (Ebert, 2014).

In (Ebert, 2014) werden die Kurzzeitfestigkeiten verschiedener Kunststoffe aus den Druckversuchen für drei unterschiedliche Temperaturen (-20°C, +23°C und +50°C) nach drei Auswertekriterien gegenübergestellt. Bei den Auswertekriterien handelt es sich um:

- Prinzip der maximalen Druckspannung
- Begrenzung der Stauchung (2% und 3%)
- Begrenzung des Steifigkeitsverlustes (20% und 30%)

Bei den Untersuchungen kann eine zufriedenstellende Kurzzeitdruckfestigkeit von POM-C für die geplante Anwendung festgestellt werden, auch wenn eine hohe Temperaturabhängigkeit

zu erkennen ist. Bei einem Temperaturanstieg von -20°C auf +50°C nimmt die Steifigkeit um 25 bis 50 Prozent ab. An den Versuchsergebnissen ist nicht zufriedenstellend, dass diese auf der Gesamtdehnung der Probekörper beruhen, also auch viskose Dehnungen implizieren. Für Ingenieuranwendungen ist es allerdings erstebenswert diese zu vermeiden, um die Verbindung bzw. den Einsatz dauerhaft zu gestalten. Aus diesem Grund wird in (Ebert, 2014) ein Verfahren zur Bestimmung der Stauchungsanteile (vgl. Kapitel 2.2.1) für kurzeitige Beanspruchung vorgestellt. Beispielhaft wird das Ergebnis der Versuchsdurchführung in Abbildung 18 für den Kunststoff POM-C bei Raumtemperatur gezeigt.

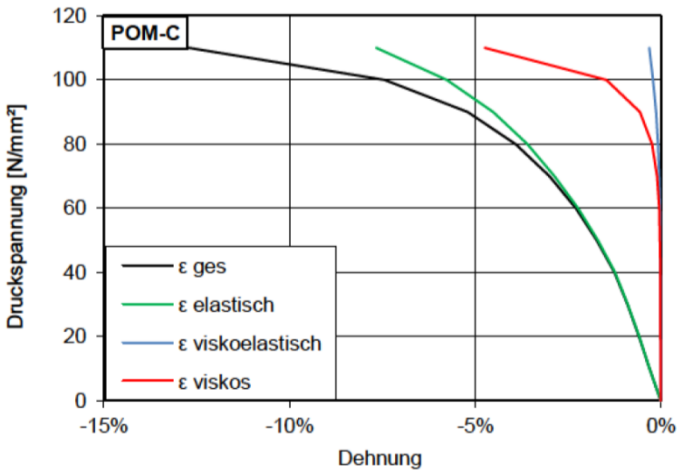


Abbildung 18: Stauchungsanteile von POM-C bei Raumtemperatur unter Druckkraftbeanspruchung (Ebert, 2014)

Für den Vergleich der Kurzzeitfestigkeit verschiedener Kunststoffe nach dieser Methode wird die Begrenzung des viskosen Stauchungsanteils auf 0,1% festgelegt und die dazugehörige Druckkraftbeanspruchung ermittelt. Die Wahl des Stauchungskriteriums erfolgt in Anlehnung an die Bestimmung der Streckgrenze bei hochfesten Stählen. Dabei zeigt sich, dass POM-C bei Raumtemperatur mit 70MPa Kurzzeitdruckfestigkeit deutlich besser abschließt.

Abschließend gilt es festzuhalten, dass die vorgestellte Stauchungsverteilung nur für Raumtemperatur zutrifft. Dies liegt an dem beanspruchungs-, temperatur- und zeitabhängigen Eigenschaften (vgl. (Klompen, 2005)). Somit kann keine Aussage zur Kurzzeitfestigkeit für andere Temperaturen getroffen werden. Dafür sind weitere Untersuchungen erforderlich (vgl. Kapitel 4.1.4.3).

4.1.4.3 Dauerstandfestigkeit

Die Sicherstellung einer formschlüssigen Verbindung zwischen Verglasung und Rahmen erfolgt durch das Aufbringen einer Vorspannkraft (Konnektor). Um dies dauerhaft zu gewährleiten ist die Kenntnis über das temperatur- und zeitabhängige Verhalten des eingesetzten Kunststoffs POM-C von großer Bedeutung. Untersuchungen zu dieser Fragestellung werden nachfolgend vorgestellt.

Zur Einschätzung des Verhaltens von POM-C werden zwei Relaxationsversuche unter abweichender Druckbelastung durchgeführt (Abbildung 19 & Tabelle 6). Diese Versuche sind nicht genormt. Lediglich (DIN EN ISO 899-1, 2015), dort werden Kriechversuche (konstante Belastung) unter Zugbeanspruchung geregelt, kann zur Berücksichtigung wichtiger Randbedingungen herangezogen werden. Für den verwendeten Versuchsaufbau der Relaxationsversuche (Weg = konstant) hingegen erfolgt der Aufbau gemäß der späteren Anwendung (vgl. Kapitel 3.2). Das bedeutet der Konnektor wird in einen Rahmen mit zwei gegenüberliegenden unverschieblichen Flächen positioniert und eine Vorspannung aufgebracht (mechanisch durch eine in dem Konnektor implizierte Spreizvorrichtung). Für die Abbildung der Scheibenkante ist auf einer Seite ein Vierkantprofil (8mm x 8mm) aus Stahl zwischen dem Konnektor und der Rahmenfläche angeordnet (siehe Anhang). Während der Versuchsdauer wird der Temperaturverlauf und Luftfeuchtegehalt aufgezeichnet (Tabelle 7).

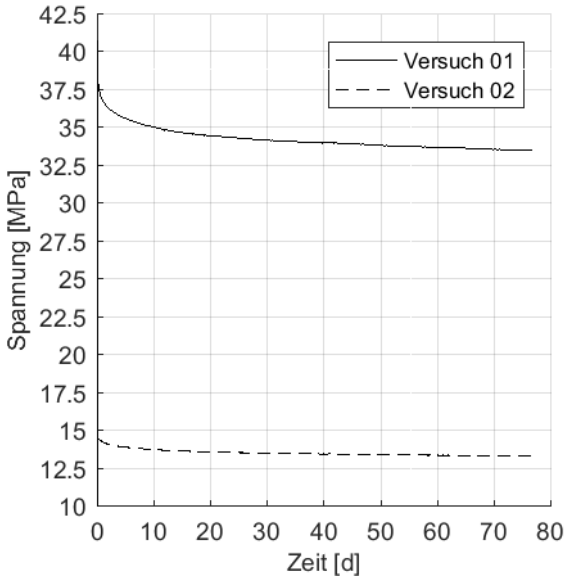


Abbildung 19: Relaxationsversuch am Konnektor (vgl. Abbildung 22)

Tabelle 6: Kennwerte zum Relaxationsversuch

	Versuch 01	**Versuch 02**
max Spannung [MPa]	41,9	16,1
min Spannung [MPa]	33,5	13,4
Restspannung [%]	80,0	83,2

Es kann festgehalten werden, dass die prozentuale Veränderung der Beanspruchung aus beiden Versuchen nur geringfügig voneinander abweicht. Dies lässt darauf schließen, dass sich die Beanspruchungen im Bereich der linearen Viskoelastizität bewegen (vgl. Abbildung 18). Eine Extrapolation auf beliebige Lastniveaus und Temperaturen ist aufgrund der durchgeführten Versuche nicht möglich und ein darauf ausgelegtes Versuchskonzept ist sehr zeitaufwendig.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Klimadaten des Relaxationsversuchs

	Mittel-wert	Stdabw	Max	Min
Temperatur [°C]	20,5	0,33	21,4	19,7
relative Luftfeuchtigkeit [%]	25,1	2,81	31,6	20,2

Die gleichen Erkenntnisse können allerdings mit Hilfe der in Kapitel 2.2 vorgestellten Grundlagen durch DMA- (dynamisch mechanische Analyse) bzw. DMTA- (dynamisch mechanische thermische Analyse) Versuche in deutlich geringerer Zeit ermittelt werden. Daher wird diese Untersuchungsvariante für das weitere Vorgehen herangezogen.

Bei DMA-Versuchen wird eine periodisch wechselnde Beanspruchung in Form einer Sinusanregung aufgebracht. Durch eine Variation der Frequenz erfolgt die Charakterisierung der Zeitabhängigkeit. Eine Änderung der Umgebungstemperatur (DMTA) erlaubt weitere Aussagen zum Langzeitverhalten unter Verwendung der ZTV (vgl. Kapitel 2.2.4). Dadurch können innerhalb kurzer Versuchszeiten viskoelastische Kennwerte für große Zeiträume und verschiedene Temperaturen ermittelt werden. In der Praxis steht dafür eine Reihe von Verfahren zur Verfügung. Diese unterscheiden sich im umsetzbaren Frequenzbereich, der Art der Beanspruchung und der Eignung zur Messung einer Werkstoffeigenschaft. In der Normenreihe DIN EN ISO 6721 sind verschiedene Methoden der Schwingungsanregung standardisiert.

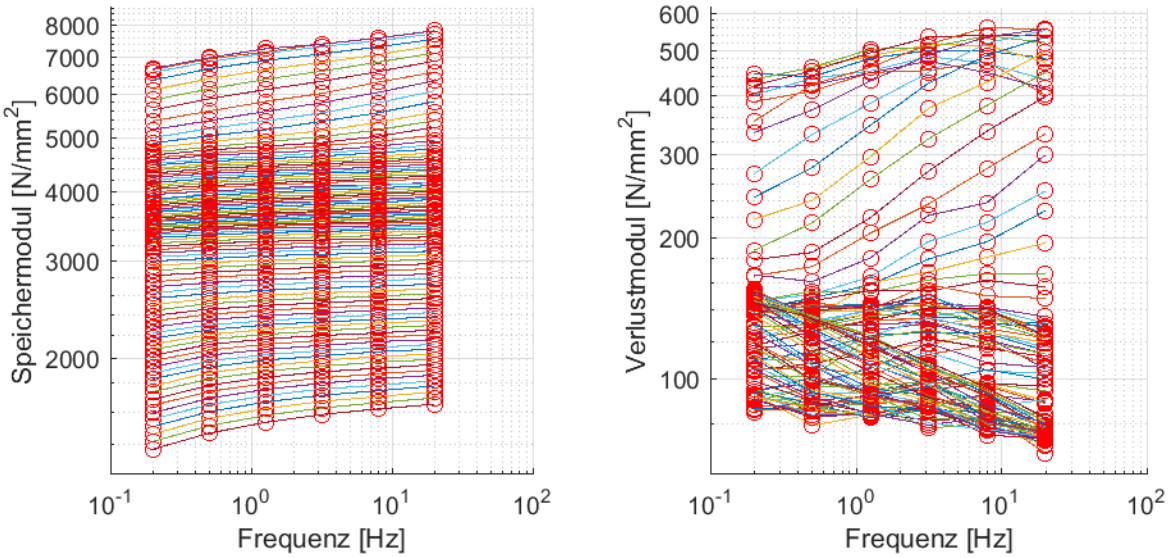


Abbildung 20: Ergebnisplots aus der DMTA im Frequenzbereich (Hersteller 2; Starttemperatur -80°C; Endtemperatur +100°C)

Bei der in dieser Arbeit eingesetzten Methode „Verfahren mit erzwungenen Schwingungen“ wird der Prüfkörper mit einer sinusförmigen Anregung (konstante Frequenz und Amplitude) beansprucht und das zeitverzögerte Antwortsignal gemessen. Im linear-viskoelastischen Bereich zeigen dann beide Signale (Beanspruchung und Systemantwort) die gleiche Frequenz bei verschiedenen Phasenlagen. Die Abweichung beschreibt die Phasenverschiebung δ zwischen Spannung und Dehnung. Bei ideal elastischem Materialverhalten ist die Phasenverschiebung gleich dem Wert Null. Zur Darstellung des geschilderten Spannungs-Dehnungs-Zusammenhangs infolge Phasenverschiebung muss der E-Modul als komplexe Größe E^* eingeführt werden.

$$E^* = E' + i\,E'' \tag{9}$$

Der Realteil E', auch Speichermodul genannt, ist ein Maß für die während der Schwingungsperiode speicherbare Energie. Der dazugehörige Imaginärteil E'' wird als Verlustmodul bezeichnet und beschreibt die während der Schwingungsperiode dissipierte Energie.

$$\tan\delta = \frac{E''}{E'} \tag{10}$$

Das Verhältnis von Verlust- zu Speichermodul ist der Verlustfaktor *tan δ*. Dieser charakterisiert das Dämpfungsverhalten des Werkstoffs.

Insgesamt werden vier Versuche durchgeführt. Jeweils zwei Versuche an POM-C von zwei verschiedenen Herstellern. Dies dient dem Vergleich des POM-C aus den Versuchen zur Ermittlung der Materialeigenschaften (Hersteller 1; Diagramme sind im Anhang einzusehen) und dem POM-C der Formteile für den Konnektor (Hersteller 2; Abbildung 21 bis Abbildung 24). Die Versuche erfolgen an der Prüfmaschine Eplexor 2000N der Firma NETSCH Gabo. Die Beanspruchung wird kraftgesteuert durch einen 3-Punkt-Biegeversuch aufgebracht. Der getestete Temperaturbereich liegt zwischen -80°C und +100°C bei einer Heizrate von 2,0°C und einer Soaktime, Zeit die dem Probekörper zum Temperieren auf die nächste Prüftemperatur zuteilwird, von 300 Sekunden. Der untersuchte Frequenzbereich liegt zwischen 0,2Hz bis 20Hz bei einem Anstieg von 2,5Hz pro Dekade. Die statische Last beträgt 40,0N (entspricht einer Dehnung bzw. Stauchung der Randfaser von <1,0%) und die dynamische 2,0N. Die Probekörperabmessungen sind (b x t x h) 12mm x 6mm x 60mm. Entgegen der Empfehlung in (Ebert, 2014) wird die Starttemperatur je Hersteller einmal von warm nach kalt und einmal entgegengesetzt gewählt. Die Auswertung erfolgt nach dem Verfahren GUSTL (Kraus & Niederwald, 2017).

Nach (Ehrenstein & Pongratz, 2007) ist die „Physikalische Alterung“ eine Eigenschaftsänderung von Kunststoffen, die durch unterhalb der Glasübergangstemperatur vorliegende thermodynamische Ungleichgewichte (z.B. Eigenspannungen, Orientierung der amorphen Struktur, unvollkommene Kristallstruktur) beim Abkühlen entsteht. Der Kunststoff erstarrt in einer unterkühlten Schmelze. Der chemische Aufbau bleibt davon unberührt.

Die physikalische Alterung zeigt sich deutlich beim Vergleich der untersuchten POM-C Probekörper. Die Versuchsergebnisse ähneln sich weitaus besser in Bezug auf das angewendete Temperaturprofil als in Bezug auf den Hersteller. Die Versuche bei fallender Prüftemperatur weisen für beide Materialien einen nahezu linearen Verlauf des Shift-Faktors auf, wohingegen bei steigender Prüftemperatur ein deutlicher nichtlinearer Verlauf oberhalb der Referenztemperatur von +20°C zu erkennen ist. Dies legt die Vermutung nahe, dass Effekte der physikalischen Alterung die Ursache sind. Im weiteren nichtlinearen Verlauf führt dies zu einer Verzerrung der Versuchskurven von Speicher- und Verlustmodul. Es empfiehlt sich daher mit der DMTA stets oberhalb der Glastemperatur zu starten, da die physikalische Alterung zu einer Erweichung des Systems führt.

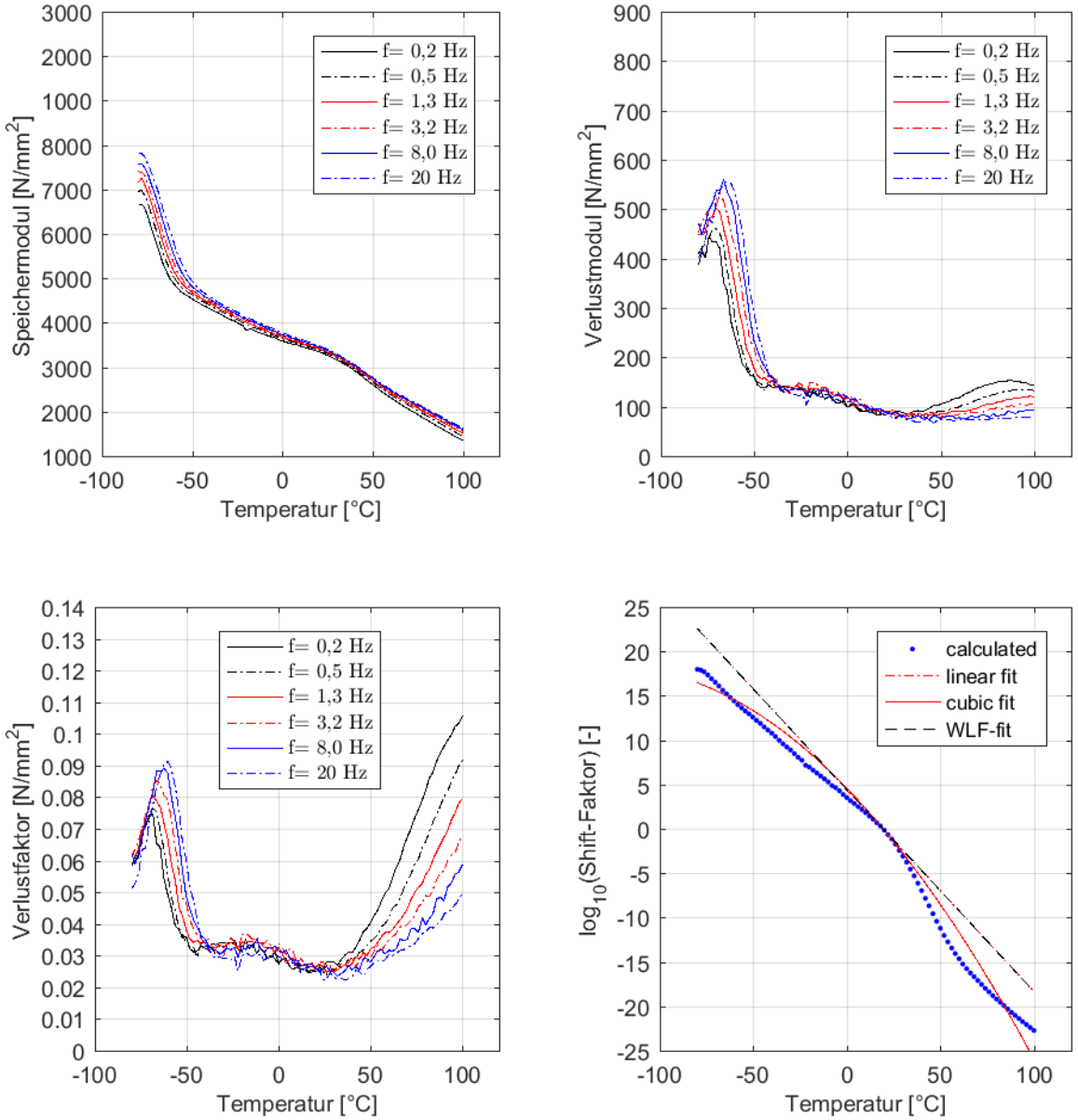


Abbildung 21: Kennwerte über die Temperatur (DMTA Hersteller 2; Prüfstarttemperatur -80°C; Endtemperatur +100°C)

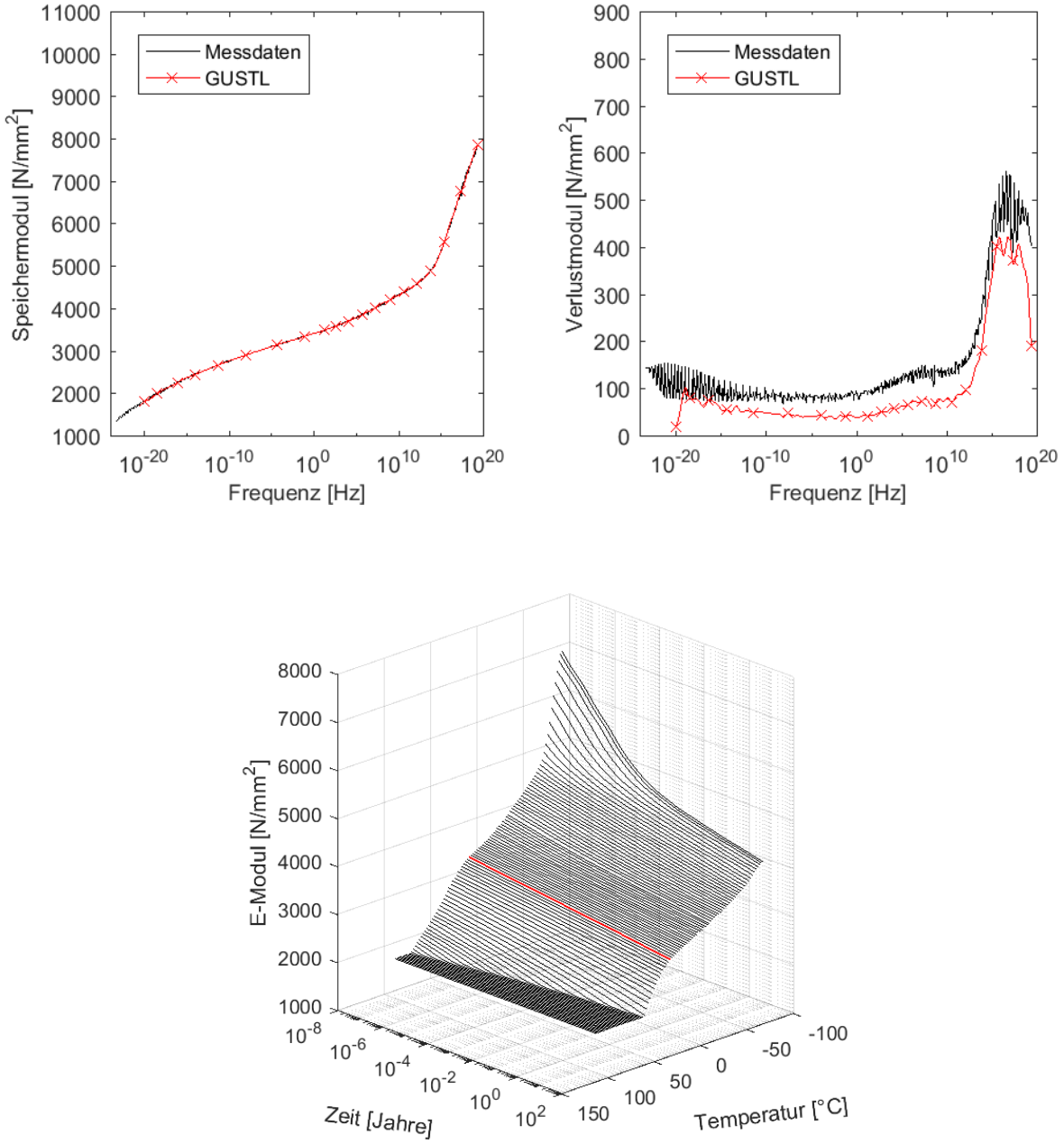


Abbildung 22: Masterkurve über die Frequenz (oben) und Prognose des E-Moduls über die Zeit in Abhängigkeit der Temperatur (unten) (DMTA Hersteller 2; Prüfstarttemperatur -80°C; Endtemperatur +100°C; Referenztemperatur 20°C)

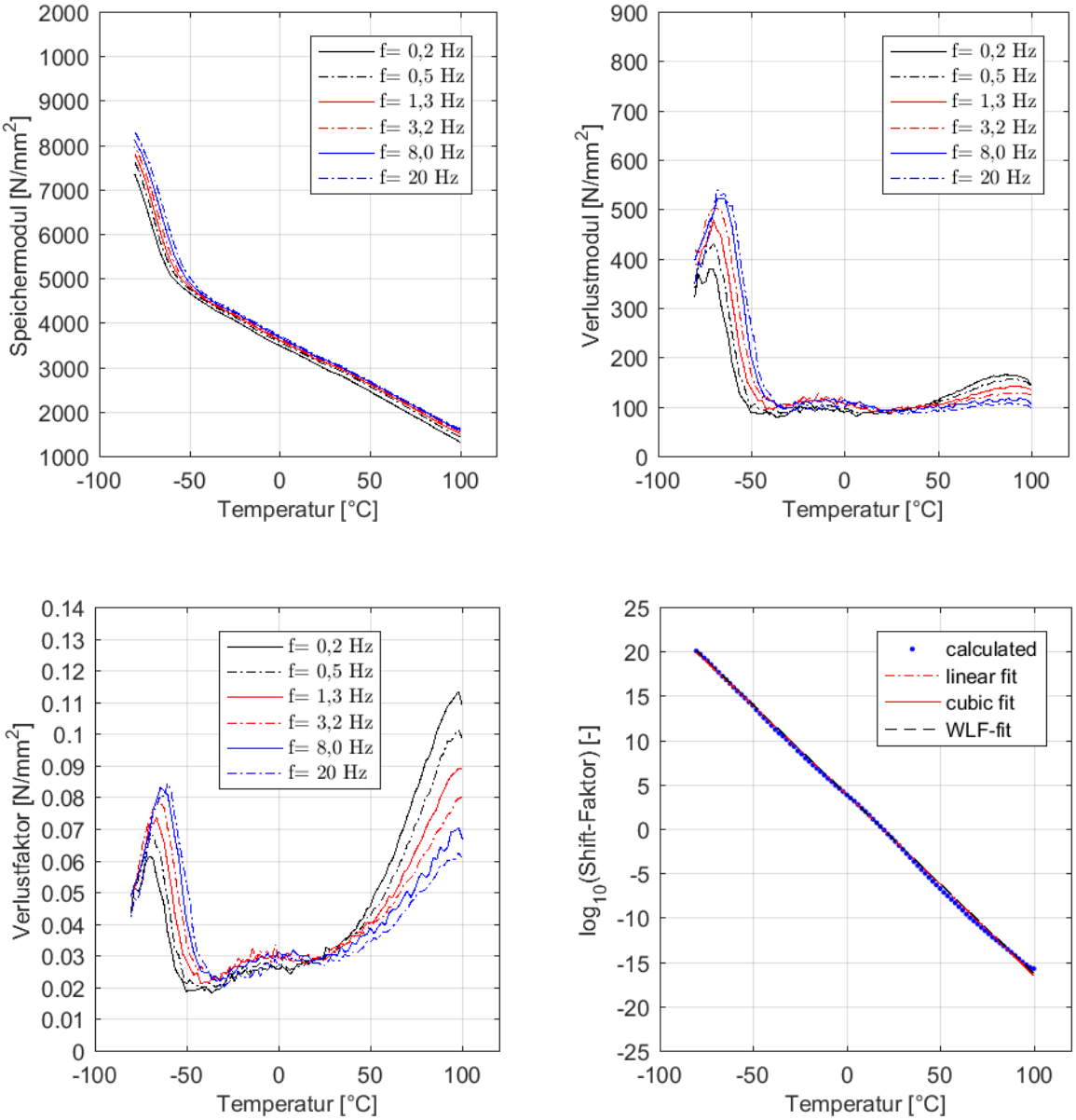


Abbildung 23: Kennwerte über die Temperatur (DMTA Hersteller 2; Prüfstarttemperatur +100°C; Endtemperatur -80°C)

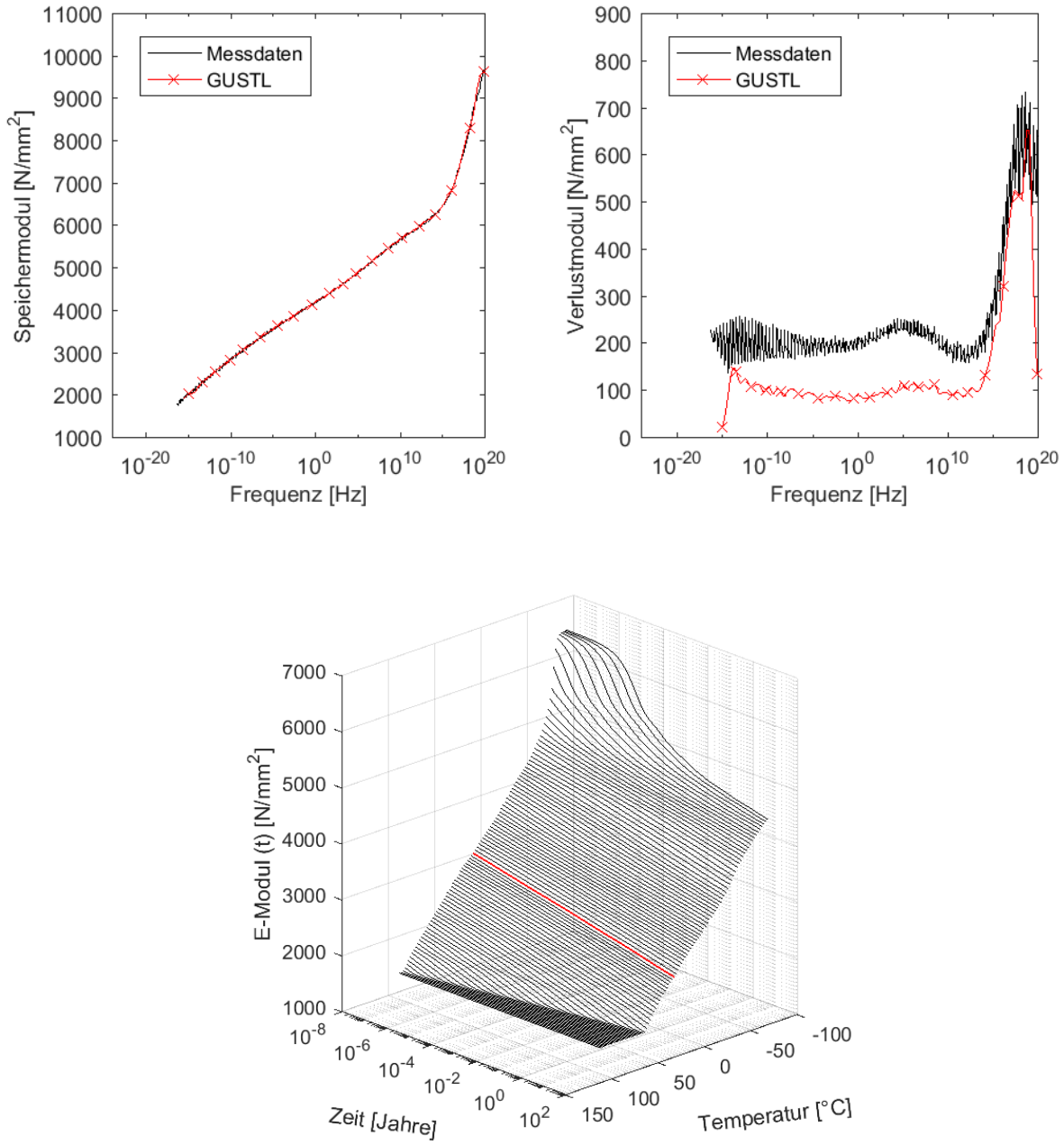


Abbildung 24: Masterkurve über die Frequenz (oben) und Prognose des E-Moduls über die Zeit in Abhängigkeit der Temperatur (unten) (DMTA Hersteller 2; Prüfstarttemperatur +100°C; Endtemperatur -80°C; Referenztemperatur 20°C)

An dieser Stelle soll der Fokus auf den für den Konnektor relevanten bzw. zu erwartenden Temperaturbereich erfolgen. Denn der untersuchte Temperaturbereich ist in dieser Hinsicht zu großzügig gewählt. Im Verbundelement wird voraussichtlich mit Temperaturen von -10°C bis +50°C zu rechnen sein. Dieser Temperaturbereich liegt deutlich innerhalb der in der Baupraxis üblicherweise anzunehmenden Grenzen. Grund dafür ist die Anordnung des Konnektors im Glasfalzraum. In verschiedenen Forschungsprojekten wie (Feldmeier, et al., 2008) und (Schmid, et al., 2009) werden Messdaten zu dieser Fragestellung erhoben. Diese zeigen Temperaturen im Glasfalzraum, die stets signifikant zwischen der Außenluft- und Innenlufttemperatur liegen. Außerdem werden bei Langzeitversuchsständen an Holzfassaden maximale Oberflächentemperaturen von +50°C nicht überschritten.

Obwohl es sich bei POM-C um einen Copolymeren Kunststoff handelt, dies ist in der Regel ein Indiz für einen thermorheologisch komplexen Werkstoff, lässt sich das Werkstoffverhalten sehr gut durch die ZTV für thermorheologisch einfache Werkstoffe abbilden. Ein Hinweis auf thermorheologisch einfaches Werkstoffverhalten ist die stetige Steigung des Speichermoduls ohne Vorzeichenwechsel bis zur Glasübergangstemperatur. Dies ist bis zu der aus der Literatur bekannten Glasübergangstemperatur von -60°C der Fall und deutet auf einen Relaxationsprozess hin. Allerdings lässt sich ein zweites Maximum im Kurvenverlauf des Verlustmoduls bei ca. 10^7Hz beziehungsweise bei -10°C vermuten. Prinzipiell ist die Bewertung des Speichermoduls gegenüber der des Verlustmoduls zu empfehlen, da es beim Erfassen des Messsignals mit einem geringeren Rauschen behaftet ist (die Intensität der Messsignale unterscheiden sich um eine Potenz). Weil Verlust- und Speichermodul über den Verlustfaktor (vgl. Gleichung (10)) in direktem Zusammenhang zueinander stehen, stellt dies in der Regel keinen Unterschied der Informationsmenge dar. In den durchgeführten Versuchen zeichnet sich jedoch auch eine Unstetigkeit im Verlustfaktor ab, die wiederum mit großem Messrauschen behaftet ist. Daher kann an dieser Stelle ein weiterer Glasübergang nicht mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden.

In (Gilbert, 2017) wird für Polyacetale angeführt, dass der Glasübergang in der Regel mit der Temperatur übereinstimmt, bei der die Bewegung der Moleküle der amorphen Struktur von 50 bis 150 Backbone erfolgt. In einem hauptsächlich kristallinen Polymer ist dieser amorphe Anteil jedoch sehr gering, weshalb dieser Glasübergang nur einen vernachlässigbaren Effekt ausübt. Daher könnte der wahre Glasübergang bei -13°C liegen. Ein Glasübergang bei -73°C hingegen fällt deutlich signifikanter aus. Gilbert begründet diesen mit der Bewegung von viel kleineren Elementen durch den Schatzki Crankshaft Effekt. Diese Aussagen bestätigen den Verdacht eines zweiten Relaxationsvorgangs. Allerdings geht aus der Literatur weiter hervor, dass

zur Herstellung von POM-C aus POM-H eine Copolymerisation von Trioxan und Dioxan (in einem festgelegten Mischverhältnis) erfolgt. Diese Kunststoffe besitzen wiederum andere Glasübergangs- und Schmelztemperaturen als POM-H, die je nach dem Mischverhältnis dieser Komponenten einen stärkeren oder geringeren Einfluss auf das Endprodukt (Copolymer) ausüben. Der Schmelzpunkt von Dioxan liegt bei +11,8°C und der von Trioxan bei +62,0°C. Dies würde den Anstieg des Verlustmoduls und Verlustfaktors auch erklären. In einer ergänzenden DMTA (Abbildung 25) zeigt sich, dass dieser Anstieg auch durch die Schmelzpunkte der „Zuschläge“ in den Schmelzvorgang des Homopolymers ab ca. +160°C übergehen kann. Um die Fragestellung der Relaxationsvorgänge endgültig zu klären erfordert es die Durchführung einer „Dynamischen Differenzkalorimetrie“ (DSC). Eine solche Untersuchung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht.

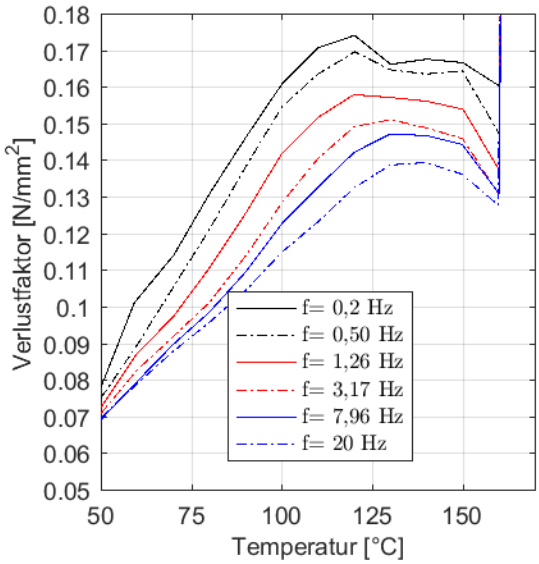


Abbildung 25: Verlustfaktor über die Temperatur an ergänzender DMTA (Hersteller 2; Prüfstarttemperatur +30°C; Prüfendtemperatur +180°C)

Abschließend ist festzuhalten, dass der Fit der Messdaten durch das Verfahren GUSTL (Kraus & Niederwald, 2017) eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen liefert. Der in den „Prognosen des Elastizitätsmoduls über die Zeit in Abhängigkeit der Temperatur“ angegebene minimale Wert (Ebene parallel zur Zeitachse) ist allerdings nicht korrekt, da POM-C bei einem Temperaturanstieg bis zur Kristallitschmelztemperatur weiter entfestigt (vgl. Abbildung 25). Bei dem angegebenen Wert handelt es sich um die Festlegung eines Zielwertes, die für die Auswertung mit GUSTL benötigt wird. Weil die Festlegung außerhalb des Ge-

brauchstemperaturbereichs liegt, hat sie keinen Einfluss auf die Bewertung. Für den zu erwartenden Temperaturbereich zeigt der Werkstoff POM-C auf Basis der ermittelten Kennwerte ausreichende Eigenschaften zur sachgemäßen Erfüllung der Aufgabenstellung.

4.1.5 Ermittlung Reibkoeffizient

Bei der konzentrierten Lasteinleitung in einen Halbraum (z.B. durch einen Klotz) besitzt der Reibkoeffizient zwischen den eingesetzten Materialien einen signifikanten Einfluss auf die Spannungsverteilung und deren Maximalwerte (vgl. Kapitel 5.1.1). Aus diesem Grund ist die Kenntnis dieses Parameters für die Untersuchung des in dieser Arbeit vorgestellten Systems von entscheidender Bedeutung. In der Literatur finden sich nur vereinzelte und zum Teil widersprüchliche Angaben zu Reibungskoeffizienten zwischen Glas und anderen Reibpartnern. Die Gleitreibkoeffizienten von einigen Kunstoffen auf Glas werden in (Ebert, 2014) vorgestellt.

Die Wissenschaft und Technik von aufeinander wirkenden Oberflächen in Relativbewegung zueinander wird als Tribologie (griechisch: Reibungslehre) bezeichnet. Sie befasst sich neben der Beschreibung des Reibungskoeffizienten mit dem Verschleiß und einer notwendigen Schmierung von Reibpartnern. Grundsätzlich wird bei Reibung zwischen Haft- und Gleitreibung unterschieden. Die Ermittlung des Reibkoeffizienten μ erfolgt nach Coulomb aus dem Quotient von Reibungskraft F_R zu Gewichtskraft F_N. Weitere Eingangsgrößen wie Oberflächenbeschaffenheit der Gleitpartner, Flächenpressung, Temperatur und Gleitgeschwindigkeit werden in dieser Formel vernachlässigt (Czichos & Habig, 2015).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in (Brendiek, 2016) Haft- und Gleitreibkoeffizienten für Glas und die Reibpartner Aluminium, Stahl, POM-C und Fichtenholz (BSH; Reibfläche: Stirnholz) ermittelt. Variable Parameter waren dabei Oberflächenrauigkeit, Reibgeschwindigkeit und Flächenpressung. Je Parameter wurden zwei Einstellgrößen untersucht. Die Kenngrößen Verschleiß und Schmierung sind für das hier untersuchte System nicht von Bedeutung und wurden nicht genauer betrachtet. Für die Ermittlung der Reibkoeffizienten wird der Reibpartner mittels eines Prüfzylinders unter definierten Randbedingungen über die Glasplatte gezogen und die Zugkraft durch eine Kraftmessdose aufgezeichnet (siehe Anhang). Eine Spezifizierung der in diesem Versuch verwendeten Parameter befindet sich im Anhang. Für jede Kombination erfolgen 50 Einzelmessungen.

Die Ergebnisse bestätigen die bereits aus der Tribologie bekannten Zusammenhänge für den Einfluss von Oberflächenrauigkeit, Gleitgeschwindigkeit und Flächenpressung (vgl. (Czichos & Habig, 2015)). Zur Quantifizierung der Reibkoeffizienten für die untersuchten Gleitpartner in

Hinsicht auf Oberflächenrauigkeit, Reibgeschwindigkeit und Flächenpressung reicht der Versuchsplan nicht aus. Dies entspricht nicht der Zielstellung der durchgeführten Versuche. Dazu müssten weitere Untersuchungen erfolgen. In Tabelle 8 werden die Mittelwerte der Parameterkombinationen mit den kleinsten ermittelten Reibkoeffizienten für die Gleitpartner gezeigt. Die Ergebnisse für den Reibungskoeffizient unter Verwendung anderer Parameter sind im Anhang angeführt.

Tabelle 8: Reibkoeffizienten μ für Glas und verschiedene Reibpartner (vgl. Anhang)

	Glas & Aluminium	Glas & Stahl	Glas & POM-C	Glas & Fichte
Gleitreib-koeffizient	0,12	0,12	0,09	0,16
Haftreib-koeffizient	0,16	0,14	0,13	0,22

4.1.6 Rahmenecke

In diesem Unterkapitel soll zur Vollständigkeit der durchgeführten Untersuchungen die Rahmenecke des Verbundelementes kurz angeführt werden. Diese nimmt für den im begleitenden Forschungsprojekt eingesetzten Holzrahmen eine Funktion von entscheidender Bedeutung ein. Die auftretenden Einwirkungen müssen durch geringe elastische Verformungen aufgenommen werden. Plastische Verformungen sind in Hinsicht auf die Gebrauchstauglichkeit auf jeden Fall zu vermeiden. Dies bedarf bei der eingesetzten Holzgüte (BSH GL 24 h) und Belastungen parallel zur Faserrichtung durch die ausfachende Verglasung einer sorgfältigen Planung, da zugleich wirtschaftliche Aspekte zufriedenstellend zu erfüllen sind. Aus diesem Grund werden vier Rahmeneckvarianten ausgearbeitet. Die Untersuchung dieser erfolgt in Anlehnung an (DIN EN 12512, 2005) unter zyklischer Belastung.

Abschließend kann festgehalten werden, dass sich nur eine Rahmenecke für den geplanten Einsatz ausgezeichnet hat. Dabei handelt es sich um Variante 1, die durch einen Stahlwinkel verstärkt wird (Neumer, 2015). Diese Variante findet in den Großbauteilversuchen Verwendung. Für genauere Angaben zu den Rahmenecken wird auf (Neumer, 2015) verwiesen. Auszüge des Berichts werden im Anhang angeführt.

4.2 Verbundelement

4.2.1 Allgemein

In diesem Kapitel werden Untersuchungen am Verbundelement vorgestellt. Die Versuche erfolgen an einem Verbundsystem bestehend aus ausfachendem Element, Konnektor und Rahmenkonstruktion. Die Abmessungen der ausfachenden Verglasung betragen für alle Probekörper (b x h) 2280mm x 2100mm. Dies resultiert aus dem begleitenden Forschungsprojekt. Das Verbundelement wird entgegen der späteren Verwendung horizontal eingebaut. Dies dient der Erzeugung einer Imperfektionslast, die einer Windbelastung ähnelt. Diese Belastung erfolgt lediglich durch das Eigengewicht. Anschließend wird das Element bis zum Versagen in Scheibenebene belastet. Die Lastaufbringung erfolgt am oberen Riegel durch einen Hydraulikzylinder (vgl. Abbildung 9 & exemplarisch Abbildung 26).

4.2.2 Stahlrahmen

Zur Verifizierung des FE-Modells (vgl. Kapitel 7.1) wird ein Verbundelement mit Stahlrahmen (Abbildung 26), welches gelenkige Rahmenecken sicherstellen soll, untersucht. Daher erfolgt neben dem Einsatz zahlreicher Wegaufnehmer zur Erfassung der Verformungen in und orthogonal zur Scheibenebene die Verwendung von DMS an ausgewählten Punkten (vgl. Abbildung 50 in Kapitel 7.1). Die Verglasung besteht aus einer Monoscheibe (ESG) mit einer Nenndicke von 8mm. Sie ist orthogonal zur Scheibenebene linienförmig entlang aller Kanten mit einer Aufstandslänge von 20mm gehalten. Die Verglasung liegt lediglich auf den Linienlagern auf (abhebender Kontakt). Die Lagerung in Scheibenebene im Eckbereich der Verglasung erfolgt durch Konnektoren aus POM (hier: AK = 150mm; BK = 120mm).

Abbildung 26: Versuchsaufbau des Gesamtsystems mit Stahlrahmen

Das Verbundelement versagt bei einer Belastung von ca. 45kN und einer Horizontalverformung am oberen Riegel von ca. 32mm. Die Ursache ist ein Herausspringen der Verglasung aus der Lagerung in Scheibenebene (siehe Abbildung 27). Die Verglasung bleibt dabei intakt.

Abbildung 27: Ausfall der Verglasung bei maximaler Belastung (Kapitel 4.2.2)

In den nachfolgenden Diagrammen werden zwei Spannungs-Kraft-Diagramme (Abbildung 28 und Abbildung 29) und ein Verformungs-Kraft-Diagramm (Abbildung 30) an ausgewählten Punkten nach Abbildung 50 vorgestellt. Erläuternd ist zu erwähnen, dass eine negative Verformung einer Auslenkung entgegen der Schwerkraft entspricht. Die Indizes O (Scheibe oben) und U (Scheibe unten) geben die Position der DMS auf der Verglasung an. Da zweiaxiale DMS zum Einsatz kamen, ist der Zusatz „Druck-„ beziehungsweise „Zugrichtung“ erforderlich.

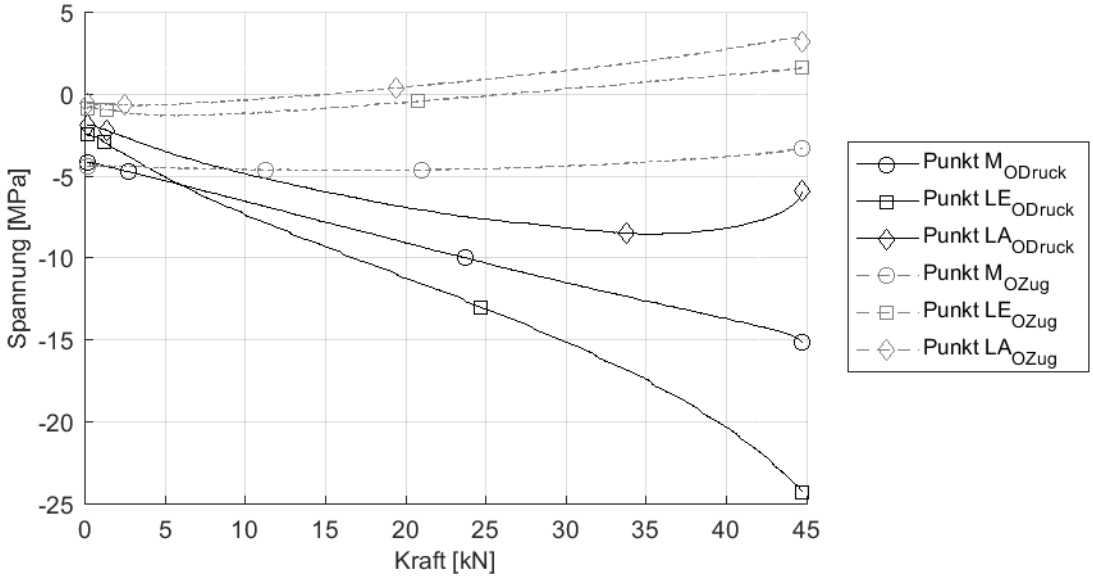


Abbildung 28: Spannungs-Kraft-Diagramm (Scheibenoberkante) (Kapitel 4.2.2)

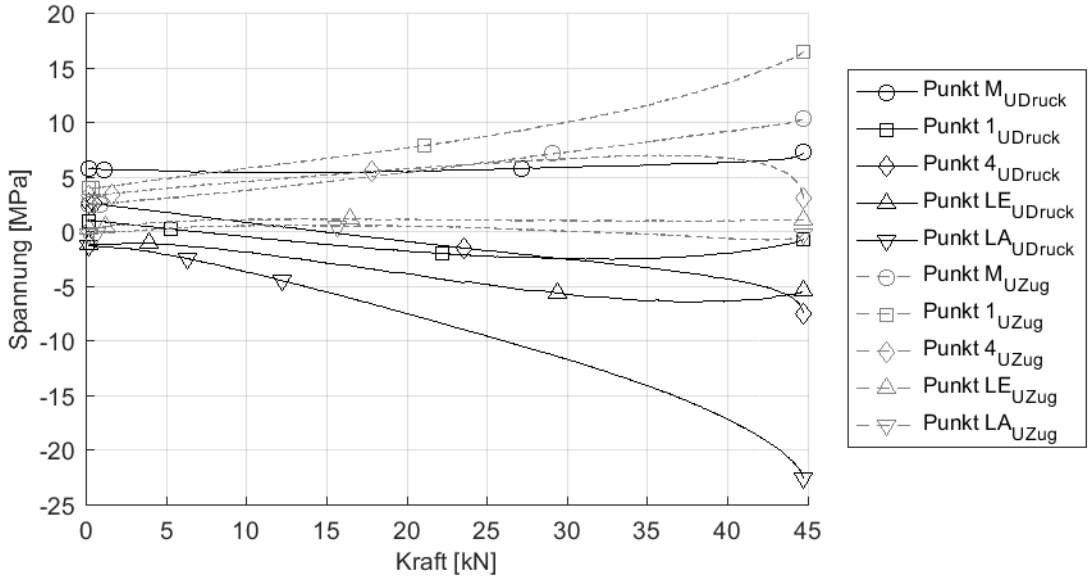


Abbildung 29: Spannungs-Kraft-Diagramm (Scheibenunterkante) (Kapitel 4.2.2)

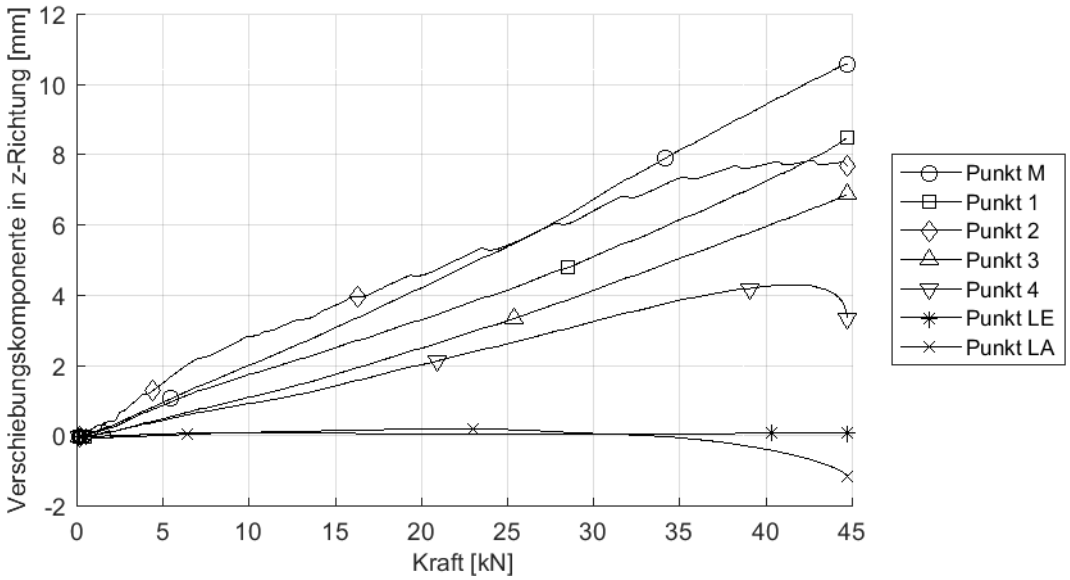


Abbildung 30: Verformungs-Kraft-Diagramm (Kapitel 4.2.2)

Anhand der Diagramme, sowie dem aufgezeichneten Videomaterial, ist deutlich zu erkennen, dass die Verglasung in der Lastausleitung der Druckdiagonalen von deren Lagerung in Scheibenebene rutscht. Dies kündigt sich kurz zuvor durch ein Aufwölben der Verglasung (entgegen der Schwerkraft) im Bereich der Lastausleitung (Punkt LA und Punkt 4) an. Die dabei auftretenden Spannungen an den Messpunkten bewegen sich in einem unkritischen Bereich für den Werkstoff Glas.

4.2.3 Holzrahmen

Im Zuge des begleitenden Forschungsprojektes erfolgt die versuchstechnische Untersuchung des in Kapitel 3 beschriebenen Verbundelements mit Holzrahmen (Abbildung 31) an vier Probekörpern. In diesem Unterkapitel sollen die Ergebnisse dieser Versuche vorgestellt werden.

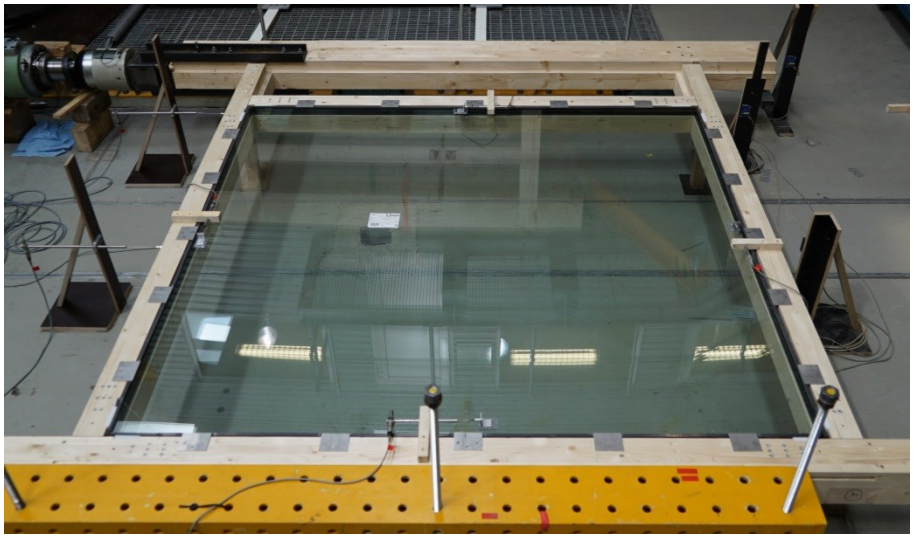


Abbildung 31: Versuchsaufbau des Gesamtsystems mit Holzrahmen

Bei der Untersuchung erfolgt der Einsatz von Messtechnik. Primär werden Wegaufnehmer in Scheibenebene eingesetzt um die Absolutverformungen des Rahmens und die Relativverschiebungen zwischen Verglasung und Rahmen zu erfassen. Sofern es der Versuchsaufbau zulässt, erfolgt zusätzlich die Messung von Verformungen orthogonal zur Scheibenebene an der belasteten Glasscheibe, da nur eine Glasscheibe für den Lastabtrag aktiviert werden soll. Bei den eingesetzten Dreifach-Isolierverglasungen erfolgt dies über eine Anpassung der Geometrie des Konnektors, sodass lediglich die Mittelscheibe zur Lastaufnahme herangezogen wird. Die beiden Außenscheiben schützen diese vor äußeren Einwirkungen. Für eine ausführliche Beschreibung des Versuchsaufbaus wird auf (Neumer, 2016) verwiesen. Im Anhang werden Auszüge aus dem Bericht angeführt.

In den Versuchen werden verschiedene Glasaufbauten eingesetzt. Diese sind in Tabelle 9 aufgelistet. Die Angaben zum Scheibenaufbau bei den Ioslierglaseinheiten erfolgt von oben nach unten gemäß der Einbausituation im Versuch. Die Lagerung der Verglasung orthogonal zur Scheibenebene wird durch eine Linienlagerung entlang aller Kanten sichergestellt. Die Auflageflächenbreite beträgt 20mm. Zusätzlich wird das Glas abschnittsweise durch

Stahlplatten geklemmt (vgl. Abbildung 31). Eine Vermeidung des Kontakts zwischen Stahl und Glas ist dabei gewährleistet. In Scheibenebene erfolgt die Lagerung durch im Eckbereich der Verglasung angeordnete Konnektoren (AK = 30mm; BK = 120mm). Für die Rahmecken findet die in Kapitel 4.1.6 vorgestellte Variante 1 Einsatz.

Tabelle 9: Versuchsergebnisse Verbundelement mit Holzrahmen

	Scheibenaufbau			maximale Belastung [kN]	Verformung Zylinder [mm]	Versagens-kriterium
Versuch 1	ISO	8mm	Float	51,2	66	Verglasung
		15mm	SZR			
		8mm	ESG			
		15mm	SZR			
		6mm	Float			
Versuch 2	ISO	8mm	Float	62,8	74	Verschraubung Fußpunkt
		15mm	SZR			
		8mm	ESG			
		15mm	SZR			
		6mm	Float			
Versuch 3	ISO	8mm	Float	57,3	69	Verglasung
		15mm	SZR			
		6mm	ESG			
		15mm	SZR			
		6mm	Float			
Versuch 4	Mono	6mm	ESG	37,1	36	Verglasung

Zunächst werden die Versuche zur Ermüdungsfestigkeit des Verbundsystems vorgestellt. Insgesamt erfolgen zwei Ermüdungsversuche (Versuch 2 und Versuch 3) zur Untersuchung des Systemverhaltens unter Dauerbelastung (Neumer, 2016). Dazu wird das Verbundelement mit einer Last von 17,5kN (Druck und Zug) für 1.000 Lastwechsel belastet. Die Prüflast ergibt sich entsprechend den Vorgaben des begleitenden Forschungsprojekts für die Umsetzung eines Monitoring-Objekts. Die Kenngrößen für die Versuchsanordnung werden auf Grundlage von (DIN EN 1995-2 , 2010) gewählt. Die Ergebnisse zeigen, dass kein Anstieg der Verformungen in Scheibenebene infolge der Lastwechsel stattfindet. Aus diesem Grund wird die Ermüdung

des Systems nicht weiter betrachtet. Im Anhang werden Auszüge der Ermüdungsversuche aus der Dokumentation des Forschungsberichts angeführt.

In Tabelle 9 sind die Maximalkräfte des Zylinders, sowie die dazugehörigen Verformungen beim Versagen des Verbundsystems einzusehen. Dabei gilt es die Maximalbelastung in Versuch 1 gesondert zu betrachten, da im Anschluss an diese Messung eine Optimierung der nachfolgenden Versuche im Bereich der Rahmenecke erfolgt ist. Diese besteht in einer Drehbehinderung des oberen Riegels um dessen Stabachse. Der Vergleich zwischen Versuch 1 und Versuch 2 zeigt, dass diese Maßnahme zu einem deutlichen Anstieg der Maximalbelastung führt. Im Anhang werden Auszüge der Tragfähigkeitsversuche aus der Dokumentation des Forschungsberichts angeführt (Neumer, 2016).

Die erforderliche Kraft um den Rahmen ohne Verglasung um 60mm auszulenken beträgt lediglich 12,4kN.

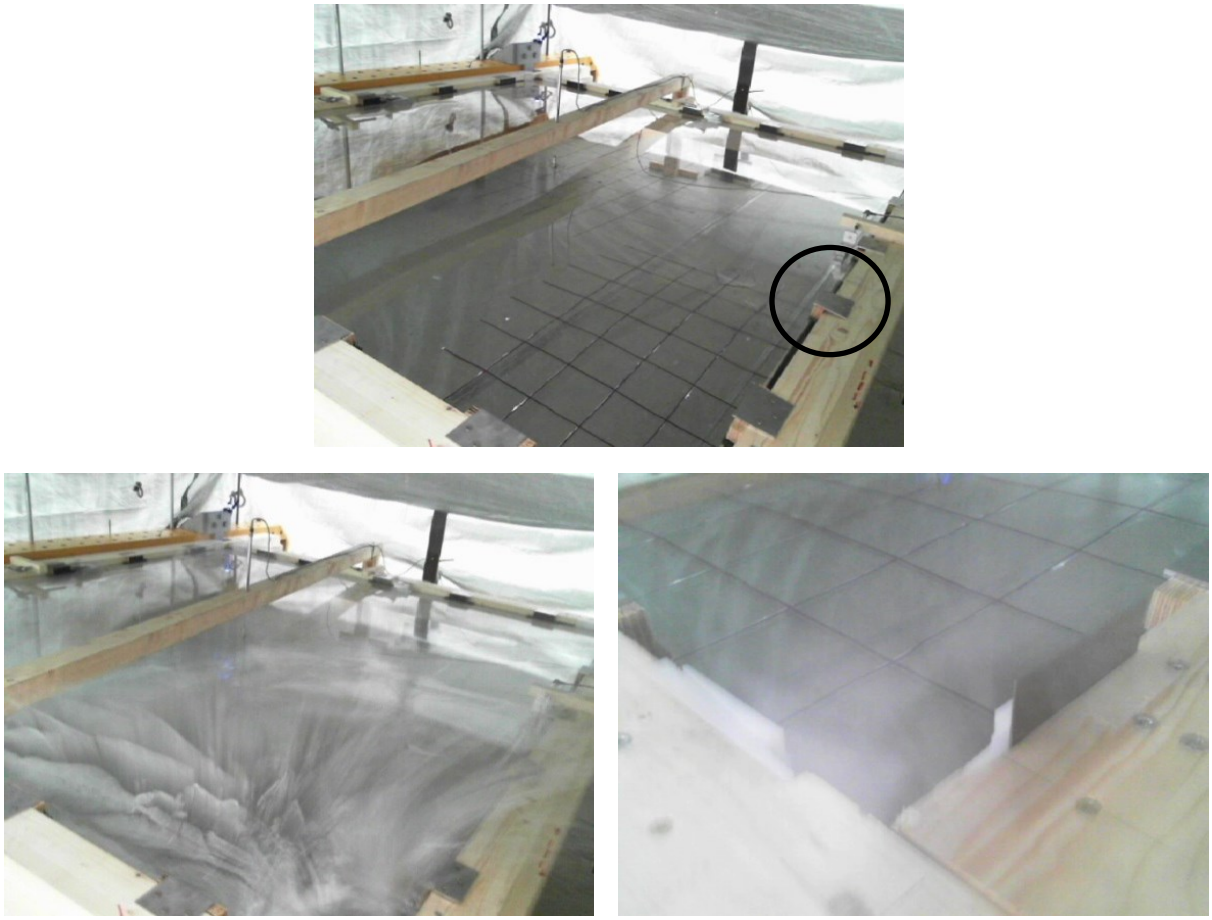


Abbildung 32: Exemplarische Darstellung des Versagens der Verglasung im Holzrahmen (Versuch 4; Perspektive: Lasteinleitung)

Bei allen Versuchen, bei denen die Verglasung das Versagen des Systems einleitet, zeigt sich das gleiche Versagensszenario. Durch eine Verformung der Verglasung orthogonal zur Scheibenebene entlang der Scheibenkante kommt es zu Zwängungen an der Lagerung (Abbildung 32; oben), die zu einem Bruch der Verglasung führen. Der Bruchursprung befindet sich immer in der Nähe der Lasteinleitung der Druckdiagonalen. Anhand Abbildung 32 (unten) lässt sich der Bereich des Ursprungs weiter einschränken. Die Aufnahmen, die zum gleichen Zeitpunkt aus zwei Perspektiven aufgenommen worden sind, zeigen, dass die Verglasung im Bereich der Lasteinleitung zum Zeitpunkt des Glasbruchs noch intakt ist (Abbildung 32; unten rechts). Allerdings muss der Rissursprung im erweiterten Bereich der Lasteinleitung liegen (Abbildung 32; unten links).

Die Konnektoren weisen nach den Versuchen nur minimale plastische Verformungen auf. Die maximale gemessene plastische Verformung beträgt 0,7mm (Neumer, 2016).

Die Messungen haben gezeigt, dass die Verglasung einen deutlichen Anstieg der äußeren Belastung auf den Holzrahmen erlaubt und das Verbundsystem durchaus für die Aussteifung herangezogen werden kann. Allerdings muss aufgrund des spröden Materialverhaltens von Glas und dem daraus resultierenden spontanen Versagen des Gesamtsystems ein ausreichendes Sicherheitskonzept ausgearbeitet werden (vgl. Kapitel 8.6).

5 Numerische Untersuchung

5.1 Lasteinleitung

5.1.1 Allgemein

Die Lasteinleitung in Glas über dessen Kante nimmt eine wichtige Rolle in der Aktivierung der Verglasung als aussteifendes Element ein. Wie Kapitel 4.1 gezeigt, beeinflussen dabei verschiedene Parameter die maximale Tragfähigkeit. Dazu zählen unter anderem die Kantenbearbeitung und -ausbildung sowie der Werkstoff der Klotzung. Um den Einfluss weiterer Parameter herauszustellen erfolgt im Anschluss die Vorstellung ergänzender numerischer Untersuchungen.

Die Modellierung von konzentrierten Belastungen mit Hilfe der Methode der finiten Elemente erfordert fundierte Kenntnisse der simulierten Werkstoffe in Bezug auf deren Eigenschaften und theoretischen Beschreibung. Insbesondere das linear elastische Materialverhalten von Glas erfordert eine erhöhte Aufmerksamkeit, da auftretende numerische Singularitäten an der Lasteinleitung für die Bemessung maßgebend werden können und zu berücksichtigen sind.

Anhand der hier vorgestellten numerischen Untersuchungen lassen sich lediglich kritische Bereiche und der Einfluss ausgewählter Parameter für die Lagerung ableiten. Für eine Bestimmung des maximalen Widerstandes nach den ermittelten Spitzenspannungen sind die Ergebnisse nicht geeignet. Die Extremwerte der Spannungen treten in der Verglasung in unmittelbarer Nähe zum Kontaktbereich auf. Durch die Messdaten der experimentellen Untersuchungen aus Kapitel 4.1 kann dieser Bereich in den numerischen Untersuchungen nicht hinreichend genau verifiziert werden. Die Messdaten erlauben auch keine Extrapolation. Dies ist der Anordnung der Dehnungsmessstreifen geschuldet, die durch die Kantenbearbeitung vorgegeben wird. Zudem werden die Messergebnisse durch die Unregelmäßigkeiten im Versuchsaufbau (siehe Kapitel 4.1.3) beeinflusst. Infolgedessen wurde die maximale Beanspruchbarkeit für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Holz-Glas-Verbundelement aus experimentellen Versuchen abgeleitet.

Für die numerische Untersuchung der Lasteinleitung in die Scheibenecke werden 2D- und 3D-Modelle unter Einsatz des Softwareprodukts ANSYS (Version 16.1) erzeugt. Die Abmessungen richten sich dabei nach den Modellscheiben, die in Kapitel 4.1 beschrieben werden.

5.1.2 Modellscheibe 2D

An einem 2D-FE-Modell wird der Einfluss der Position der Konnektoren (Klötze) auf deren Lagerkräfte (kraftresultierende) und ihre Spannungsantwort an ausgewählten Punkten untersucht.

Die Modellierung der Glasscheibe erfolgt durch Elemente des Typs SHELL181. Die Elementgröße beträgt 0,5mm. Richtung Scheibenrand (Lagerung) erfolgt eine Netzverfeinerung auf ca. 0,15mm. Die Vernetzung wird vom Programm automatisch generiert (Vorgabe: quadratische Elemente; vgl. Anhang). Entsprechend der Versuchsdurchführung aus Kapitel 4.1.3 erfolgt die Lasteinleitung an der parallel zum Grund verlaufenden Kante. Die Belastung beträgt 1kN. Die Lagerbedingungen der Klötze (Behinderung der Verschiebung) werden direkt an der Scheibenkante appliziert. Ein Vergleich der Ergebnisse aus der FE-Berechnung und den Versuchsergebnissen aus Kapitel 4.1.3 für das Konnektormaterial POM (AK = 50mm & BK = 50 mm) zeigt, dass die Verzerrungen wie in den vorangegangenen Experimenten vorliegen. Dabei überschreiten die Werte aus den Berechnungen die Versuchsergebnisse nicht.

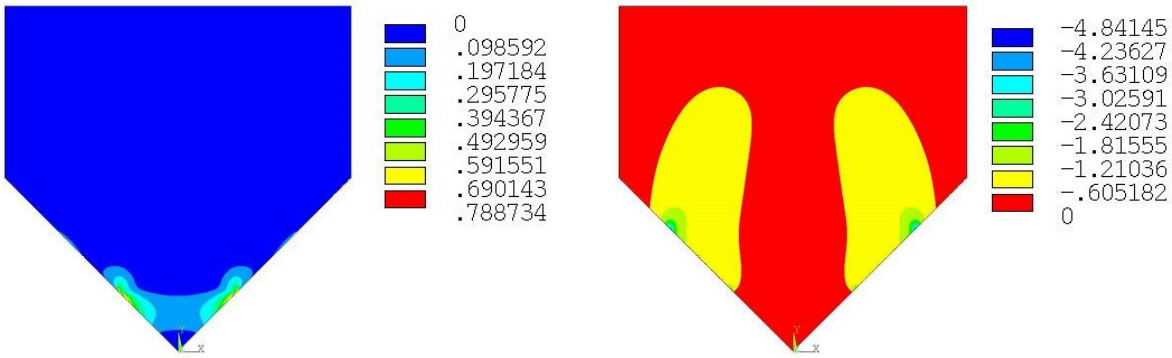


Abbildung 33: Exemplarische Darstellung der Spannungsverteilung für die Lagerbedingungen AK_links = 75mm, AK_rechts = 75mm und BK = 75 mm in MPa (links: Hauptzugspannungen; rechts: Hauptdruckspannungen)

Für die Parameterstudie werden die Eingangsgrößen der Lagerbedingungen nach Tabelle 10 variiert. Der Vergleich der Spannungsantwort erfolgt an ausgewählten Punkten. Dabei handelt es sich um die Messpunkte in Scheibenmitte, sowie um lediglich einen Messpunkt am oberen und unteren Ende beider Klötze, nach Kapitel 4.1.3.

Tabelle 10: Eingangsgrößen für die Untersuchung der Lasteinleitung am 2D FE-Modell

Parameter	Einheit	Wert	Bemerkung
AK_links	mm	25; 50; 75; 100	Abstand Konnektor vom Scheibenrand (links)
AK_rechts	mm	25; 50; 75; 100	Abstand Konnektor vom Scheibenrand (rechts)
BK	mm	50; 75; 100	Breite des Konnektors

An dieser Stelle wird exemplarisch Abbildung 34 angeführt. Sie zeigt die Auswirkung der Klotzanordnung auf die Lagerreaktion in Richtung der x-Achse. Ein konstantes AK führt bei einer Vergrößerung zu einer ansteigenden Kraftresultierenden. Dies gilt auch für breitere BK.

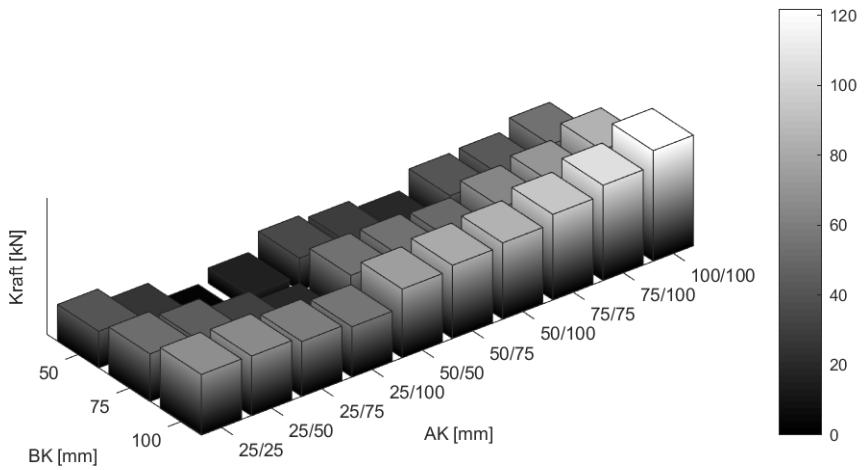


Abbildung 34: Kraftresultierende in x-Achse ($AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

Abschließend kann festgehalten werden, dass die auftretenden Druckspannungen vom Betrag um ein mehrfaches größer sind als die Zugspannungen (unterer Punkt Konnektor Faktor ca. 2,5; oberer Punkt Konnektor Faktor strebt gegen ∞). Aus den Versuchen (Kapitel 4.1.2) geht nicht hervor ob der Rissursprung der Verglasung am oberen oder unteren Ende des Konnektors zu erwarten ist. Beide Szenarien treten auf. Allerdings kann aufgrund dieser Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass ein Rissursprung am oberen Ende des Konnektors durch Querzugspannung in Scheibendicke eingeleitet wird.

Weiterhin zeigt sich, dass ein abweichender Abstand der Lagerung von der Scheibenkante ($AK_{links} \neq AK_{rechts}$) bei dieser Versuchsanordnung (entspricht einem quadratischen Scheibenformat) einen ungünstigen Einfluss ausübt.

Im Anhang sind unter Abbildung 84 bis Abbildung 101 grafische Auswertungen für weitere Ausgangsparameter angeführt.

5.1.3 Modellscheibe 3D

An einem 3D-FE-Modell erfolgt eine Parameteridentifizierung weiterer Einflussgrößen (vgl. Tabelle 11). Variationen der Kantenausbildungen (z.B. Schnittkante) werden bei der Untersuchung nicht berücksichtigt.

Die Abbildung der Glasscheibe erfolgt durch Elemente des Typs SOLID186. In der Kontaktfläche zwischen Glaskante und Konnektor werden Elemente des Typs TARGET170 und CONTACT174 eingesetzt. Der Kontakt wird als reibungsbehaftet definiert. Die Elementgröße beträgt im Kontaktbereich 0,25mm. Die Vernetzung wird vom Programm automatisch generiert (Vorgabe: hexaeder Elemente; vgl. Anhang). Entsprechend der Versuchsdurchführung aus Kapitel 4.1.3 erfolgt die Lasteinleitung an der parallel zum Grund verlaufenden Kante. Die resultierende Belastung beträgt 1kN. Für den Klotz wird ein linear elastisches, isotropes Materialmodell gewählt. Dieses Materialmodell bildet das Verhalten thermoplastischer Kunststoffe lediglich unter geringen Belastungen ausreichend ab. Da die Parameterstudien allerdings auf die Einflussgrößen mit maßgebender Änderungen der Spannungsverteilung an der Glaskante abzielen und eine geringe Belastung angesetzt wird, wird der Fehler als hinnehmbar eingestuft. Zur Reduzierung der Größe des FEM-Modells und der damit verbundenen Verkürzung der Berechnungszeit erfolgt die Einführung von zwei Symmetriebedingungen in der vertikalen Ebene. Das System wird demzufolge geviertelt. Ein weiterer Vorteil ist die Vereinfachung der Lagerbedingungen im 3D-Modell. Ein Vergleich der Ergebnisse aus der FE-Berechnung und den Versuchsergebnissen (Maximalwerte der Verzerrung) aus Kapitel 4.1.3 für das Konnektormaterial POM (AK = 50mm & BK = 50 mm) zeigt eine ausreichend gute Näherung (Abweichung < 15%).

Für die Parameterstudie werden die Eingangsgrößen nach Tabelle 11 variiert. Die Lagerbedingungen AK und BK betragen jeweils 50mm. Eine Neigung des Konnektors um die Scheibenebene wird nicht berücksichtigt.

Tabelle 11: Eingangsgrößen für die Untersuchung am 3D FE-Modell

Parameter	Einheit	Wert	Bemerkung
AK	mm	50	Abstand Konnektor zu Scheibenrand
BK	mm	50	Breite des Konnektors
Fase	mm	0,5 ; 1,0; 1,5	Schenkellänge der Glasfase
μ_R	-	0,10; 0,13; 0,16	Reibkoeffizient zwischen Glas und Konnektor
E_{Glas}	GPa	63; 70; 73	E-Modul der Glasscheibe
μ_{Glas}	-	0,20; 0,23; 0,26	Querkontraktionszahl von Glas
E_{POM}	MPa	1,5; 3,0; 4,5	E-Modul des Konnektors
μ_{POM}	-	0,40; 0,45	Querkontraktionszahl des Konnektors

Die Auswertung der Ergebnisse (vgl. Abbildung 35) zeigt, dass die Änderung der Fasenabmessung einen maßgebenden Einfluss auf die Hauptachsenspannungen im Kontaktbereich ausübt. Die Abweichungen anderer Eingangsgrößen sind im Vergleich dazu vernachlässigbar. Im Anhang werden ausgewählte Spannungsdiagramme der Untersuchung abgebildet.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Auswertung dieser und nachfolgender Parameterstudien unter Verwendung von Mittelwert und Standardabweichung (als Maß der Variabilität) erfolgt. Es handelt sich dabei um keine Monte-Carlo- oder Zuverlässigkeitsberechnung mit stochastischen Größen.

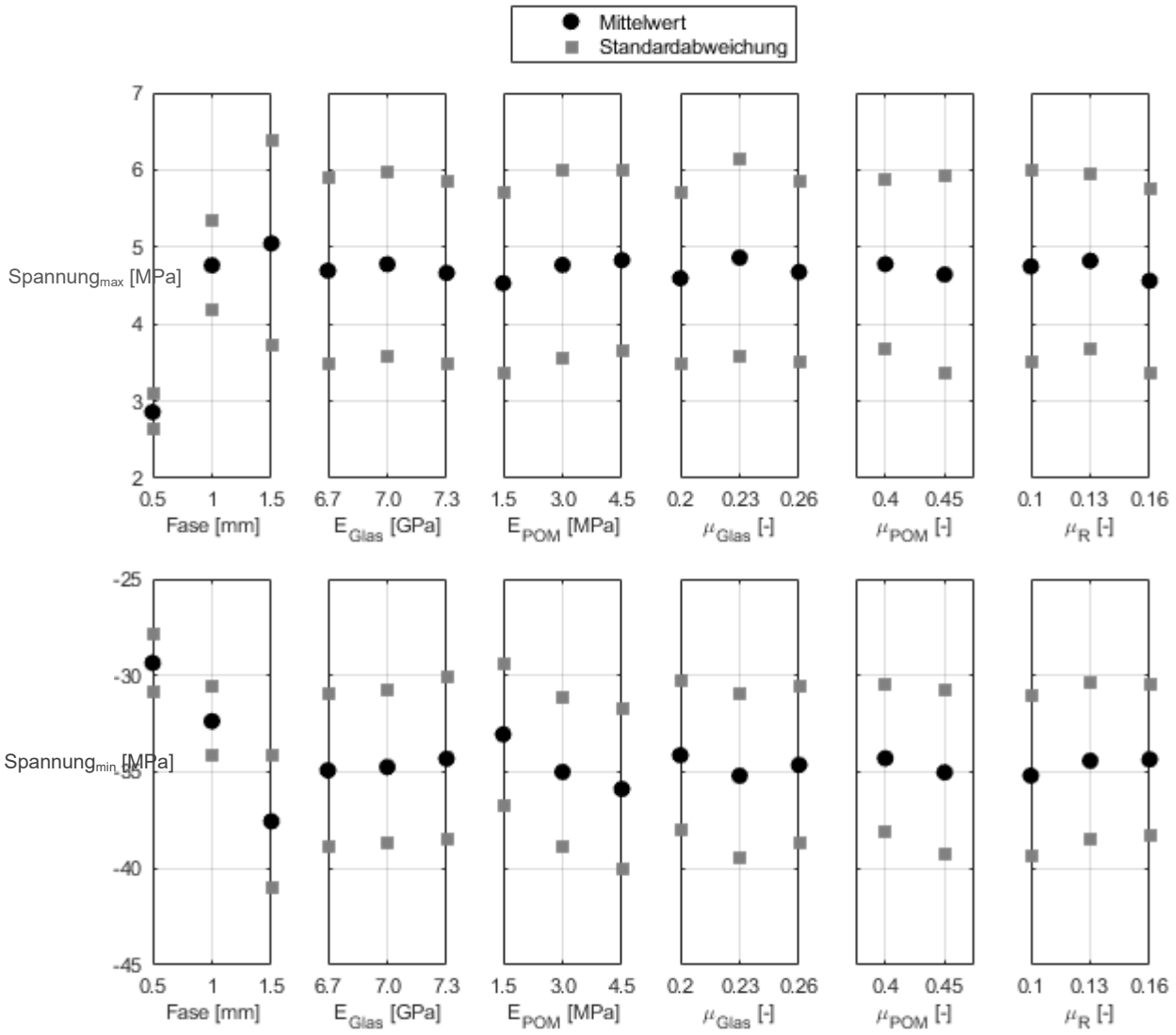


Abbildung 35: Einfluss der Eingangsgrößen (Tabelle 11) auf die Extremwerte der Hauptachsenspannungen

Ein Vergleich des Rissverlaufs aus den Versuchen mit dem Plot der Hauptstauchungskomponenten (Abbildung 36) zeigt, dass sich die Risse mit dem Grenzverlauf zwischen positiven und negativen Werten der maximalen Hauptachsendehnungen decken.

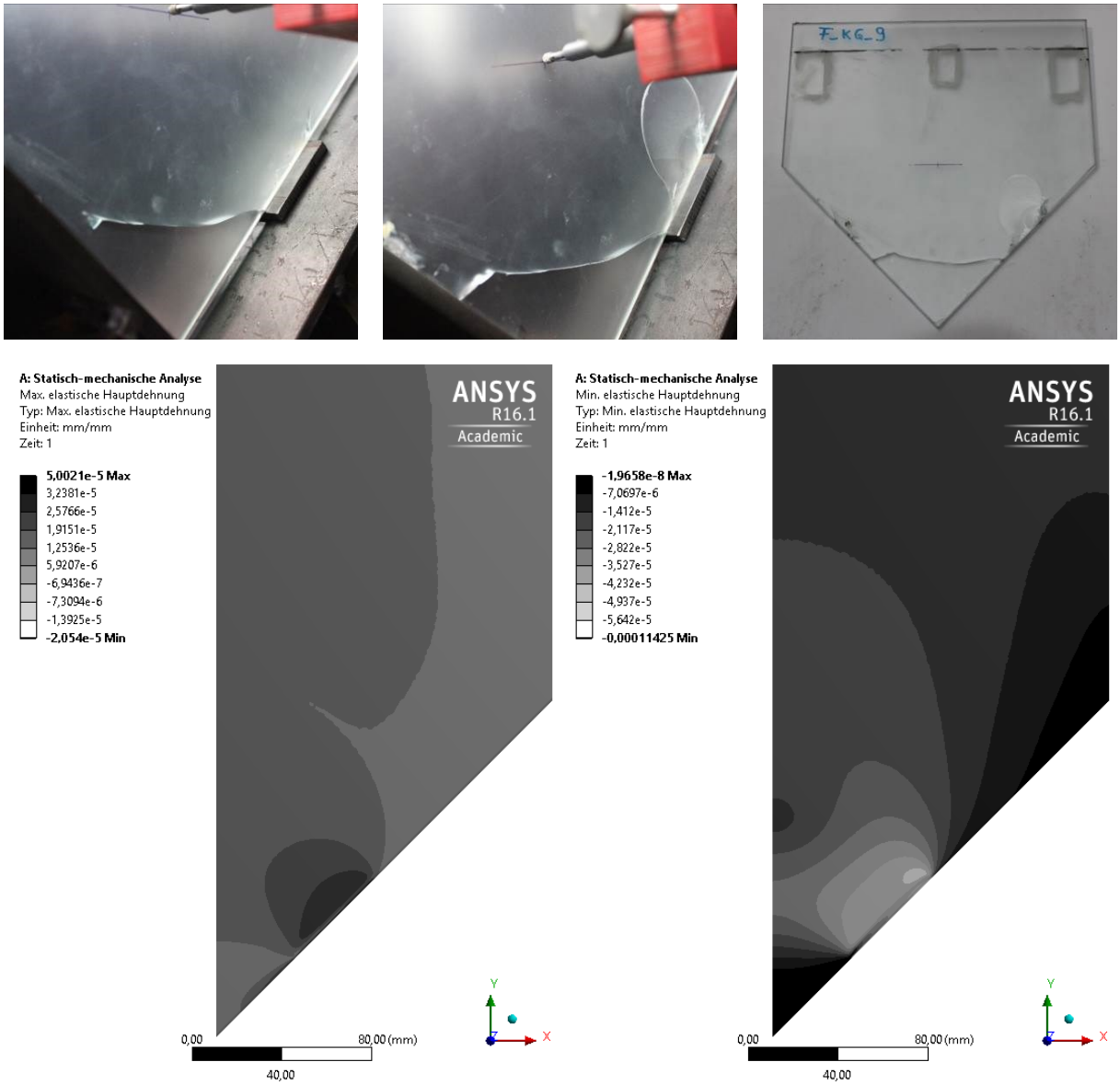


Abbildung 36: Rissverlauf Modellscheibe (oben) und Stauchungsverlauf FEM (unten)

5.2 Verglasung

5.2.1 Allgemein

Für die numerische Untersuchung der Verglasung unter konzentrierter Lasteinleitung im Eckbereich wird das Softwareprodukt ANSYS (Version 16.1) herangezogen. Dieses Programm nutzt die Methode der Finiten Elemente.

Die Abbildung der Glasscheibe erfolgt durch Elemente des Typs SHELL181. Die Elementgröße beträgt dabei jeweils 20mm. Zum Scheibenrand hin erfolgt eine Netzverfeinerung auf ca. 5mm. Die Vernetzung wird vom Programm automatisch generiert (Vorgabe: quadratische Elemente; vgl. Anhang). Auf ein konstantes Verhältnis Netzgröße zu Scheibenabmessung wird verzichtet um eine einheitliche Abbildung der Lasteinleitung zu gewährleisten. Netzstudien haben eine ausreichende Netzqualität belegt (vgl. Anhang).

Die Lagerung der Verglasung erfolgt entlang aller Scheibenkanten orthogonal zur Scheibenebene. Auf der sicheren Seite liegend handelt es sich bei dieser Lagerung um ein ideales Gelenk. In Scheibenebene werden die Lagerbedingungen (Konnektoren) direkt an der Scheibenkante appliziert.

5.2.2 Verzweigungslast und Beuleigenform

In einer Linearen-Eigenwert-Beul-Analyse (LEBA) werden die ersten fünf Verzweigungslasten (F_{Krit}) und dazugehörigen Beulfiguren für verschiedene Scheibenabmessungen und -dicken unter Berücksichtigung abweichender Lagerbedingungen (vgl. Tabelle 12) ermittelt (Lanczos Methode).

Tabelle 12: Eingangsgrößen für die Untersuchung des Einflusses auf die Verzeigungslast

Parameter	Einheit	Wert	Bemerkung
b	mm	1000 bis 3000 Schrittweite 250	Glasscheibenabmessung (Breite)
h	mm	1000 bis 3000 Schrittweite 250	Glasscheibenabmessung (Höhe)
t	mm	5,8; 7,7; 9,7	min. Scheibendicke nach Toleranzabzug
AK	mm	1; 50; 100; 150; 200	Abstand Konnektor zu Scheibenrand
BK	mm	50; 100; 150; 200	Breite des Konnektors

Es zeigt sich, dass sich je nach Verhältnis der Abmessungen sowie der Lagerbedingungen einer Verglasung die Beulfiguren bezüglich ihrer Form ändern können (vgl. Abbildung 37 und Abbildung 38).

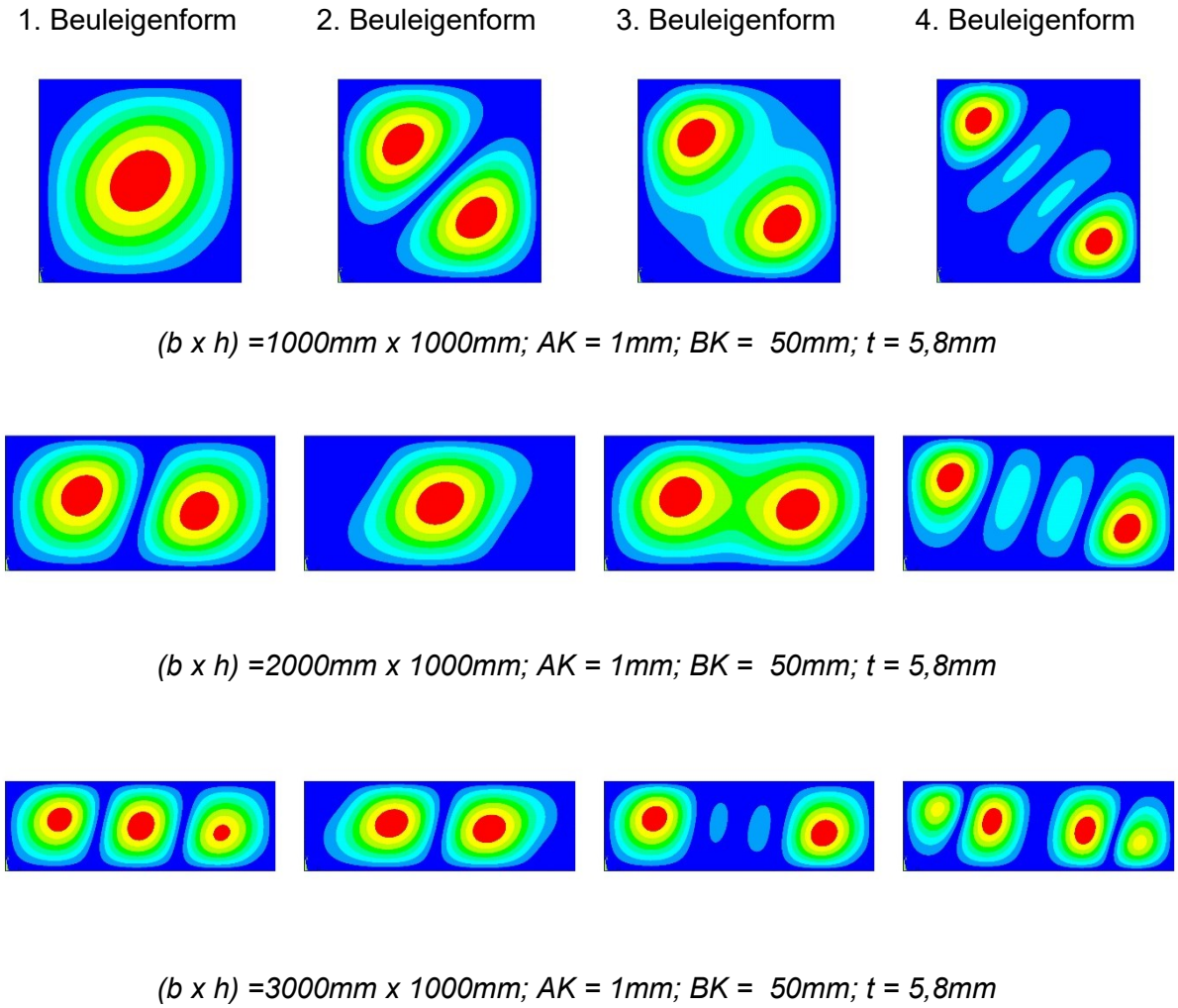


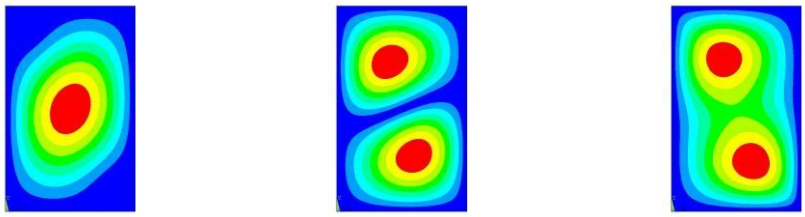
Abbildung 37: Exemplarische Vorstellung verschiedener Beulfiguren

Bei Betrachtung der Verzweigungslast, die hier als diagonal wirkende Resultierende definiert ist, wird deutlich, dass spätestens die dritte Eigenform für eine Bemessung nicht mehr relevant ist. Das Delta der Verzweigungslast zwischen dritter und erster Beulfigur lässt ein Eintreten der höheren nicht erwarten. Dies gilt auch für einen Großteil der zweiten Beuleigenformen. Allerdings treten bei den durchgeführten Untersuchungen vereinzelt Grenzfälle auf. Bei diesen ist das Delta der Verzweigungslast zwischen erster und zweiter Beuleigenform sehr gering. Solche Grenzfälle werden hier als „Sonderfall“ bezeichnet. Das bedeutet, die zweite Beulfigur ist in diesem Falle in einer nichtlinearen Beulanalyse zusätzlich zur ersten zu berücksichtigen.

Denn eine höhere Eigenform kann durchaus zum schnelleren Erreichen kritischer Spannungen gegenüber der ersten führen (vgl. (Luible, 2004) & Kapitel 5.2.3). Für den Eintritt eines Sonderfalls wird ein Lastkriterium (Delta der Verzweigungslast < 1,0kN) festgelegt. Zusätzlich zeichnen sich diese Sonderfälle auch in den Beulfiguren ab. In der Regel wird dies durch den Tausch der Reihenfolge von Beuleigenformen kenntlich (vgl. Abbildung 38).

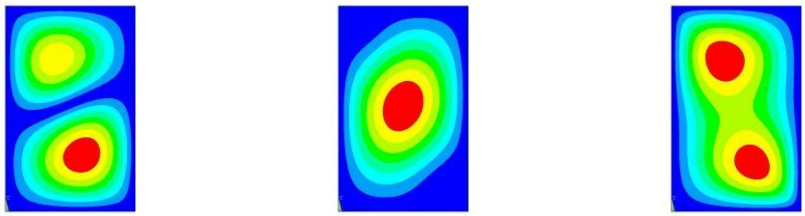
Aus den Ergebnissen der FEA können bezüglich der Sonderfälle keine Regeln abgeleitet werden. Festzuhalten ist allerdings, das dünnere Scheiben affiner sind und diese Beobachtung häufiger bei einem Seitenverhältnis (kürzere Scheibenkante zu längerer Scheibenkante) von ca. 1:3 und ca. 2:3 auftritt. Ob die zweite Beuleigenform zu berücksichtigen ist, muss demnach im Einzelfall geprüft werden. Ein Einfluss der Netzgröße konnte nicht festgestellt werden.

1. Beuleigenform 2. Beuleigenform 3. Beuleigenform



F_{Krit} = 133,1kN F_{Krit} = 133,2kN F_{Krit} = 192,3kN

(b x h) =1750mm x 3000mm; AK = 1mm; BK = 100mm; t = 9,7mm



F_{Krit} = 133,4kN F_{Krit} = 133,8kN F_{Krit} = 192,5kN

(b x h) =1750mm x 3000mm; AK = 1mm; BK = 150mm; t = 9,7mm

Abbildung 38: Exemplarische Vorstellung Sonderfall

Ein Unterschied von stehendem (b < h) zu liegendem (b > h) Format liegt bezüglich der Verzweigungslast und Beulfigur nicht vor. Die ermittelten Abweichungen sind vernachlässigbar und auf numerische Ungenauigkeiten zurückzuführen. Allerdings besteht durch die Ausrichtung des Formates ein gravierender Unterschied des Widerstandes gegen eine horizontal angreifende Belastung in Scheibenebene. Liegende Formate weisen demnach ein erheblich besseres Verhalten gegenüber stehenden Formaten auf.

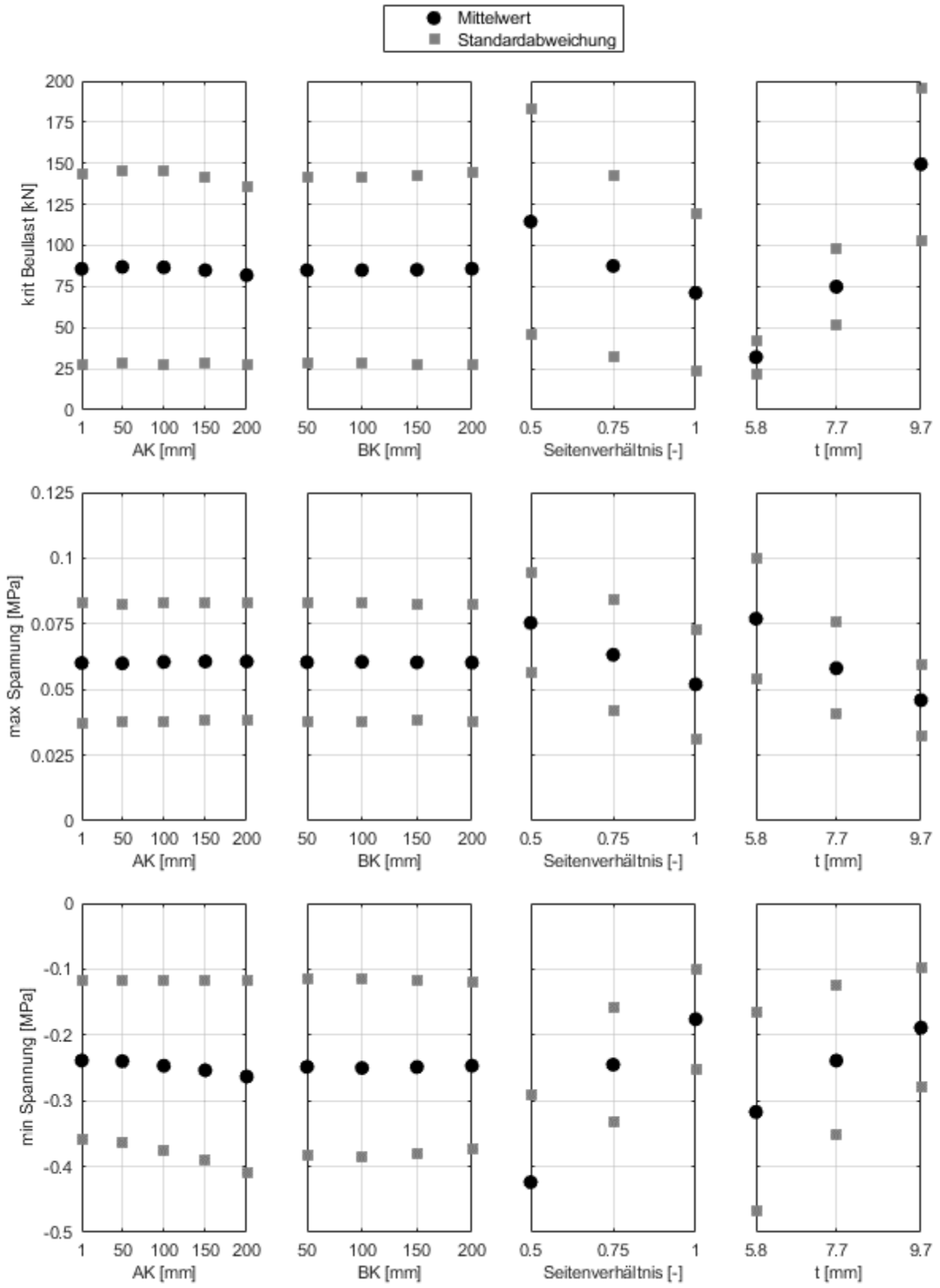


Abbildung 39: Kritische Beullast und Hauptzugspannungen in Scheibenmitte bezogen auf Eingangsgrößen (LEBA)

Da die geringste Verzweigungslast für eine Bemessung den ungünstigsten Fall darstellt, erfolgt die Gegenüberstellung von Antwortverhalten und Eingangsgrößen bezogen auf diese (kritische Beullast). Die Scheibenabmessungen werden durch das Kantenverhältnis a / b (a = kürzere Scheibenkante; b = längere Scheibenkante) ausgedrückt ($0 \leq a / b \leq 0{,}5$ entspricht in der Grafik 0,5; $0{,}5 < a / b \leq 0{,}75 \triangleq 0{,}75$; $0{,}75 < a / b \leq 1{,}0 \triangleq 1{,}0$). Weiterhin wird das Antwortverhalten auf die Hauptzugspannungen in Scheibenmitte bei einer Belastung von 1kN (Initiallast zur Ermittlung der kritischen Beullast) angeführt.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 dargestellt. Sie zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Antwortverhaltens aller Ausgangsgrößen zur Scheibenabmessung und -dicke. Mit zunehmender Scheibendicke und einer Annäherung an ein quadratisches Scheibenformat sinken die Hauptzugspannungen in der Scheibenmitte. Im Gegensatz dazu nimmt die kritische Beullast mit steigender Scheibendicke zu und fällt bei der Annäherung an ein quadratisches Scheibenformat. Bei der Betrachtung der Lagerbedingungen AK und BK zeichnen sich Tendenzen ab, die aufgrund der hohen Streuung lediglich nicht belegbare Vermutungen zulassen.

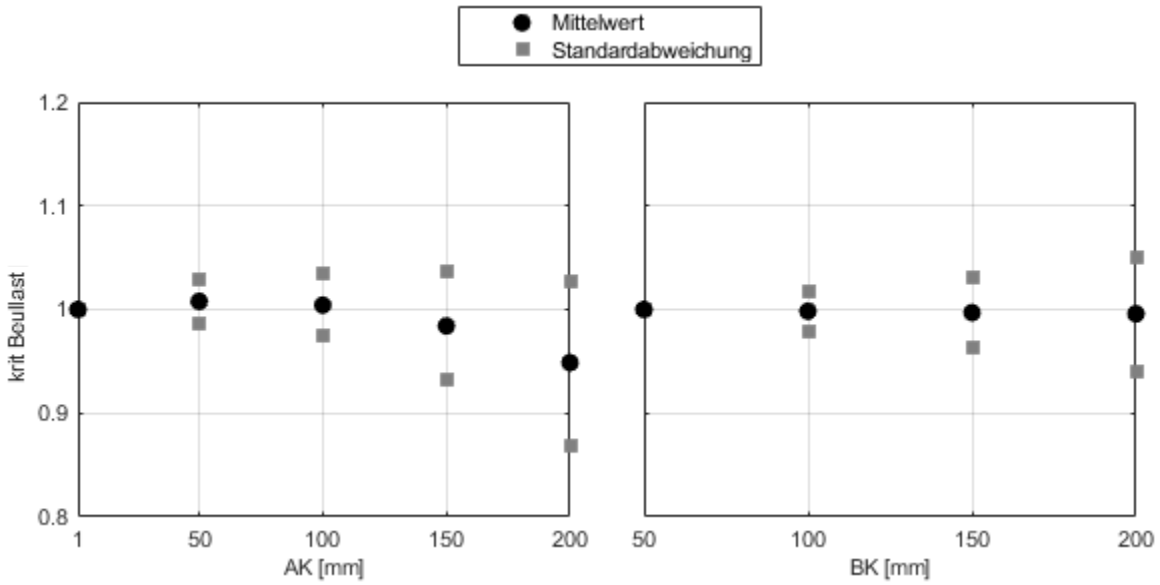


Abbildung 40: Verhältnis der kritischen Beullast je Scheibenabmessung und -dicke bezogen auf die Eingangsgrößen AK und BK (LEBA)

Aus diesem Grund erfolgt eine weitere Auswertung mit relativen Beulwerten je Scheibenformat und -dicke in Abhängigkeit zur Lagerung AK = 1mm und BK = 50mm (Abbildung 40). Dabei zeigt sich zunächst ein Anstieg der Beullast (Mittelwert) bei einer Erhöhung des Abstands der Lagerung von der Scheibenkante (AK) von 1mm auf 50mm und anschließend ein steigender Abfall mit zunehmendem Abstand. Die Breite der Lagerung (BK) zeigt keinen Einfluss auf die Verzweigungslast.

Abschließend erfolgt die Ableitung einer Bemessungsformel für die Ermittlung der kritischen Beullast auf Grundlage der Ergebnisse aus der FEA. Sie beruht auf dem Ansatz der in (Wellershoff, 2006) vorgestellten Formel und nutzt den Zusammenhang zwischen Verzweigungslast und der auf die Diagonale bezogene Plattensteifigkeit. Der vorgestellte Ansatz unterschätzt die kritische Beullast unter Einhaltung der in Tabelle 13 angegebenen Grenzen und liegt somit auf der sicheren Seite. Im Mittel beträgt die Abweichung 3,6% vom minimalen Bemessungswert. Im Bereich der Sonderfälle treten die größten Abweichungen (maximale Abweichung 11,8%) auf. Mithilfe dieses Ansatzes können erste Abschätzungen bzw. Bemessungen auf der sicheren Seite liegend durchgeführt werden. Für eine genauere Ermittlung der Verzweigungslast müssen im Einzelfall andere Methoden wie z.B. die Ermittlung der konkreten Systembeullast mit Hilfe der FEA genutzt werden.

$$P_{Krit} = \bar{D}\left(\left(0{,}869\left(\frac{Min\ (b;h)}{Max\ (b;h)} - 1\right)\right)^8 + \left(0{,}324\left(\frac{Min\ (b;h)}{Max\ (b;h)} - 1\right)\right)^2 + 0{,}058\right) \qquad (11)$$

$$\bar{D} = \frac{D}{l} = \frac{\frac{E\ t^3}{12(1-\mu^2)}}{\sqrt{h^2+b^2}} \qquad (12)$$

mit:

b	Breite der Scheibe
h	Höhe der Scheibe
t	Dicke der Scheibe
l	Diagonale der Scheibe
μ	Querdehnzahl von Glas
E	E-Modul
D	Plattensteifigkeit

Tabelle 13: Grenzen für die Bemessungsformel zur Ermittlung der Verzweigungslast

Parameter	Bedingung	Einheit
b	≥ 1000 ≤ 3000	mm
h	≥ 1000 ≤ 3000	mm
t	≥ 5,8 ≤ 9,7	mm
$\frac{2(AK+BK)}{Min(b;h)}$	≤ 0,4	-
$\frac{2AK}{Min(b;h)}$	≤ 0,1	-

5.2.3 Vorverformung

In diesem Kapitel werden verschiedene Vorverformungen für die nichtlineare Beulanalyse miteinander verglichen. Dazu erfolgt sowohl eine Untersuchung der Auslenkung (Vorverformung bzw. Verformungsamplitude) als auch der Beulfiguren (Ordnungszahl) für ausgewählte Formate und Lagerbedingungen (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Bezeichnungsschlüssel für Abbildung 41

Parameter	Kennzahl	Wert
Beulfigur	1	1. Beulfigur
	2	2. Beulfigur
	3	3. Beulfigur
Vorverformung	1	L/333
	2	L/416,25
	3	L/1000
	4	L/2000

Abbildung 41 zeigt die relativen Ergebnisse der Versuche. Es wird deutlich, dass bei Beulfiguren höherer Ordnung die kritische Spannung (vgl. Kapitel 5.2.4) bei geringerer Belastung zu

erwarten ist. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Untersuchung der in Kapitel 5.2.2 vorgestellten Sonderfälle. Des Weiteren nehmen auch die maximalen Verformungen ab. Dies liegt an der in der Regel vorliegenden höheren Anzahl von Sinushalbwellen. Beide Tendenzen sind auf die steigende Krümmung der imperfekten Geometrie zurückzuführen.

Bei der Auslenkung zeigt sich, dass mit geringerer Vorverformung höhere Lasten bis zum Erreichen der kritischen Spannung aufgebracht werden können. Dies korreliert mit einer größeren maximalen Verformung. Dieses Resultat basiert ebenfalls auf der Krümmung der Scheibe.

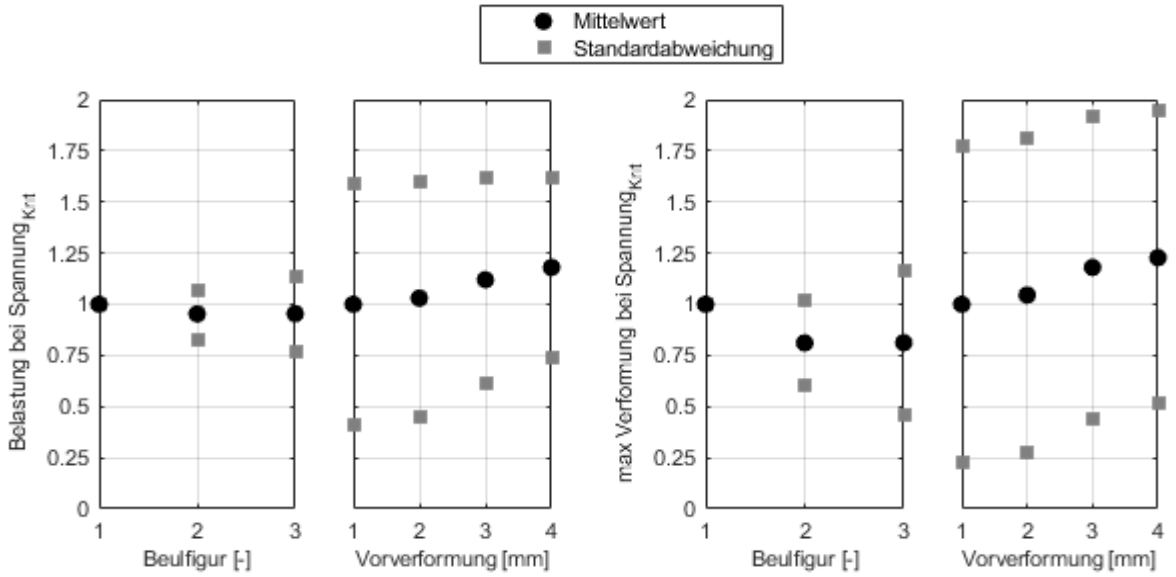


Abbildung 41: Belastung und Verformung orthogonal zur Scheibe bezogen auf Beulfigur und skalierte Vorverformung (GNIA)

In Abbildung 42 erfolgt die Darstellung des Kraft-Weg-Plots in Scheibenebene für die erste Beuleigenform verschiedener Formate und in Abbildung 43 die Gegenüberstellung der ersten drei Beuleigenformen für ein Scheibenformat. Dabei ist der Bezugspunkt für die Verformung der Mittelpunkt des belasteten Konnektors. Anhand der Kurven zeigt sich erneut der Einfluss der Beulfigur und Vorverformung auf die Belastung bis zum Erreichen der kritischen Spannung. Des Weiteren lässt sich die Aktivierung eines überkritischen Tragverhaltens erkennen. Die Abbildungen weiterer Formate sind im Anhang angeführt.

Aufgrund der Untersuchungen und in Einklang mit den Produktnormen von TVG und ESG wird für die weiteren Untersuchungen eine Vorverformung von L/333 Verwendung finden (vgl. Kapitel 3.4). Grundsätzlich erfolgt dies unter Nutzung der ersten Beulfigur. Allerdings wird bei den Sonderfällen zusätzlich die zweite Beuleigenform berücksichtigt.

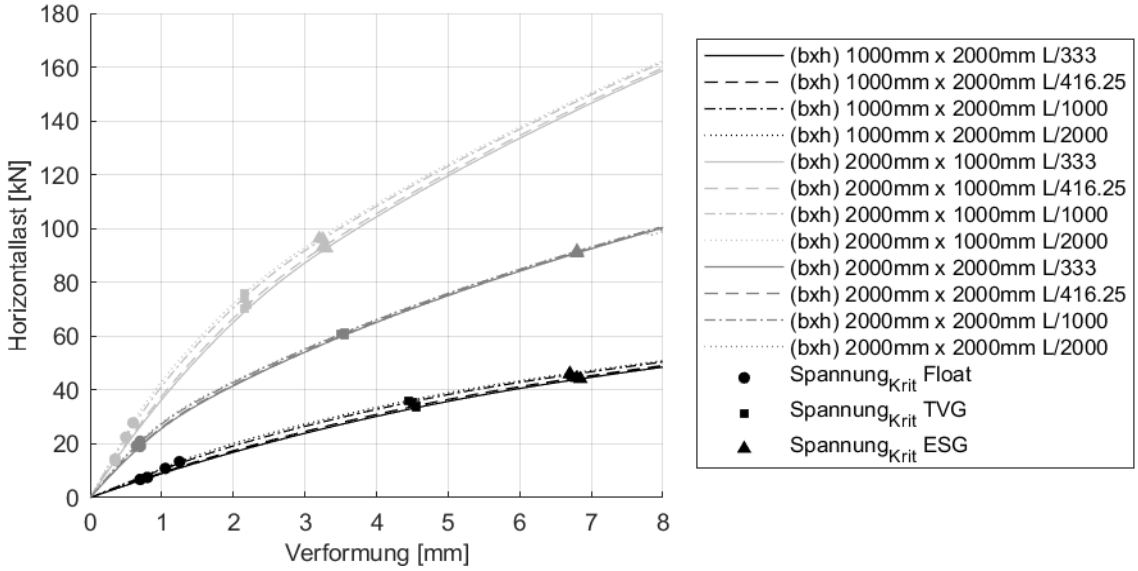


Abbildung 42: Kraft-Weg-Plot in Scheibenebene für verschiedene Abmessungen (AK =1mm; BK =50mm)

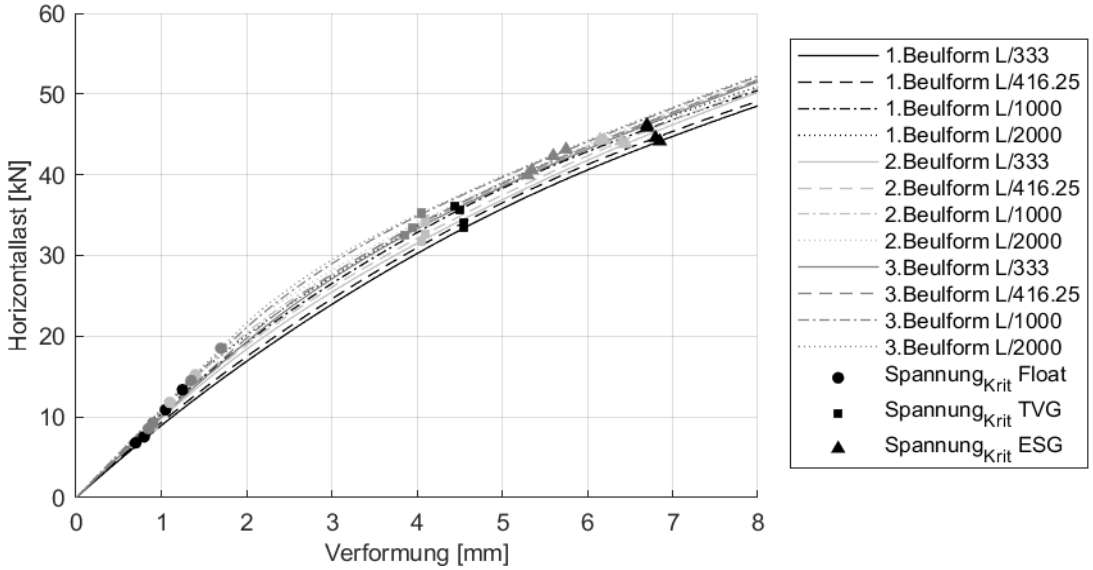


Abbildung 43: Kraft-Weg Plot in Scheibenebene (b x h = 1000mm x 2000mm; AK = 1mm; BK = 50mm)

5.2.4 Nichtlineare Beulanalyse

In einer geometrisch nichtlinearen elastischen Berechnung mit Imperfektionen (GNIA) erfolgt die Ermittlung der Belastungen und dazugehörigen Verformungen senkrecht zur Scheibenebene, für verschiedene Scheibenabmessungen und -dicken unter Berücksichtigung abweichender Lagerbedingungen (vgl. Tabelle 12; ohne AK = 200mm & BK = 200mm), bei denen die kritischen Hauptachsenspannungen für Floatglas, TVG und ESG erreicht werden. Die

Festlegung der kritischen Hauptachsenspannungen erfolgt nach DIN 18008 (vgl. Kapitel 8). Die Sicherheitsbeiwerte auf Material- und Lastseite sind in den angegebenen Werten bereits berücksichtigt.

Bei den Untersuchungen zeigt sich, dass die Ausbildung einer nicht abwickelbaren Fläche durch elastische Verformungen einer Fläche möglich ist und das überkritische Tragvermögen aktiviert werden kann (vgl. Abbildung 44).

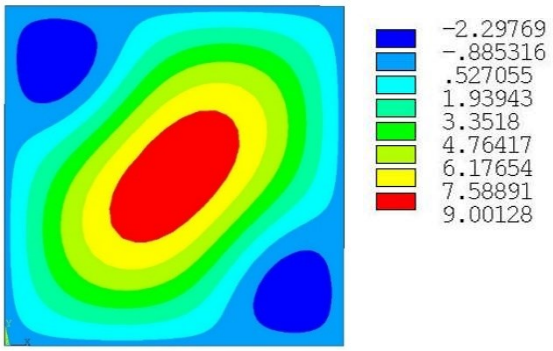


Abbildung 44: Beispiel einer nicht abwickelbaren Verformung mit U_Z in mm (b x h = 1000mm x 1000mm; AK = 50mm; BK = 100mm; t = 5,8mm; Grenzspannung TVG)

Ein Unterschied von stehendem (b < h) zu liegendem (b > h) Format liegt bezüglich der Grenzbelastung und Verformungsfigur nicht vor. Ermittelte Abweichungen können vernachlässigt werden und sind numerischen Ungenauigkeiten geschuldet. Allerdings resultiert durch die Ausrichtung des Formates ein gravierender Unterschied des Widerstandes gegen eine horizontal angreifende Belastung in Scheibenebene. Liegende Formate weisen demnach ein erheblich besseres Verhalten gegenüber stehenden Formaten auf.

In Abbildung 45 erfolgt die Vorstellung des Antwortverhaltens durch variierende Eingangsgrößen auf die kritische Beullast je Grenzspannung auf der Widerstandsseite. Die Scheibenabmessungen werden dabei durch das Kantenverhältnis a / b (a = kürzere Scheibenkante; b = längere Scheibenkante) ausgedrückt (a / b ≤ 0,5 entspricht in der Grafik 0,5; a / b > 0,5 & ≤ 0,75 entspricht in der Grafik 0,75; a / b > 0,75 & ≤ 1,0 entspricht in der Grafik 1,0). Im Anhang sind entsprechend die Verformungen senkrecht zur Scheibenebene angeführt. Weiterhin erfolgt dort ein grafischer Vergleich der relativen kritischen Beullast je Grenzspannung auf der Widerstandsseite je Scheibenformat und -dicke bezogen auf die Eingangsgrößen AK und BK. Daraus gehen die Tendenzen aus Abbildung 45 für AK und BK deutlicher hervor.

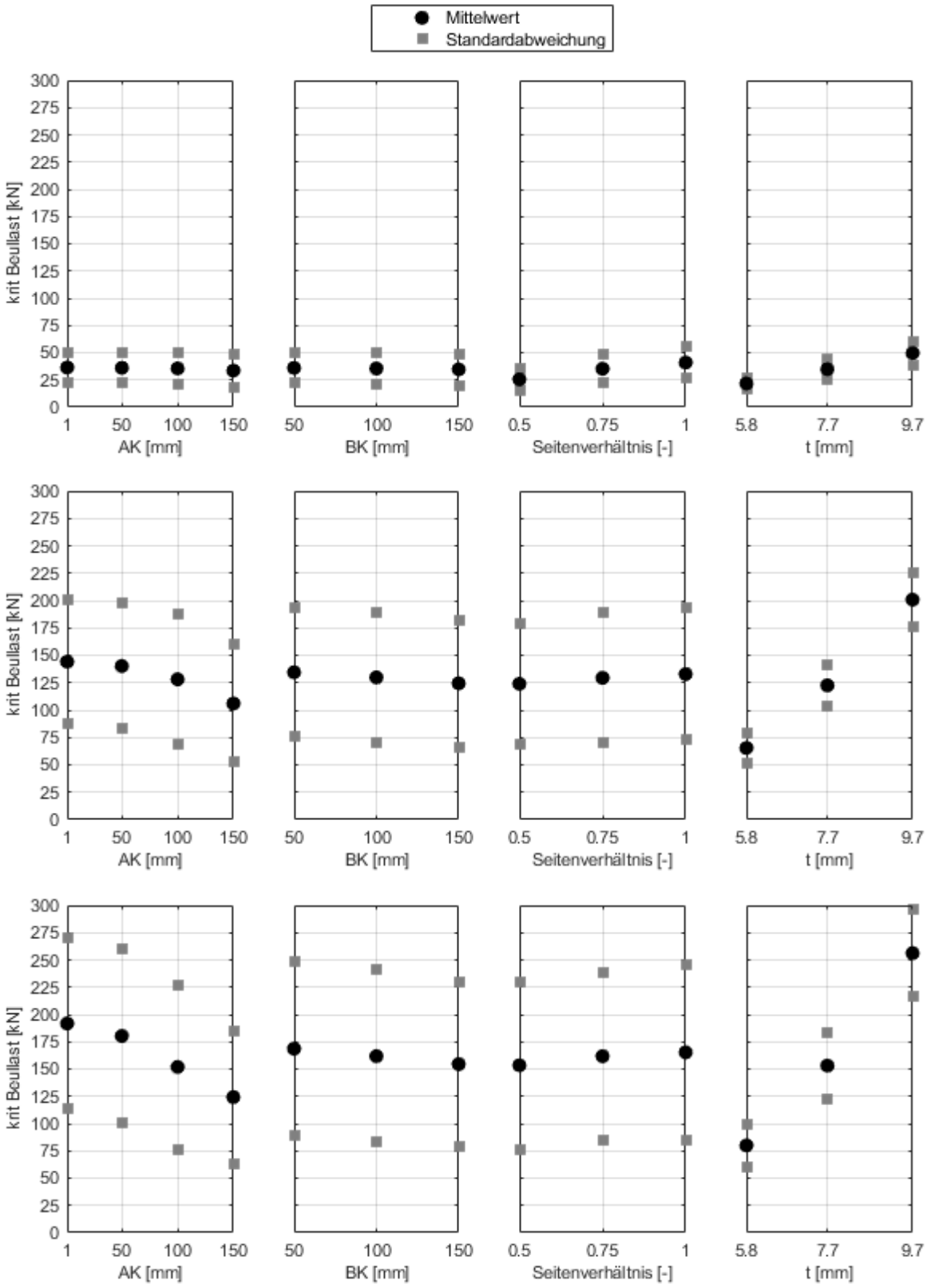


Abbildung 45: Kritische Beullast bezogen auf Eingangsgrößen (GNIA) (oben: Float; mitte: TVG; unten: ESG)

Bei Betrachtung der kritischen Beanspruchung (Abbildung 45), welche durch die diagonal wirkende Resultierende definiert ist, wird deutlich, dass diese mit zunehmender Scheibendicke und einer Annäherung an ein quadratisches Scheibenformat steigt. Bei steigendem Abstand der Lagerung von der Scheibenecke sowie Breite der Lagerung hingegen sinkt die maximale kritische Beanspruchung.

Die Vorstellung von Modifikationsfaktoren, die aus diesen Berechnungen für eine lineare Beulanalyse abgeleitet werden können, erfolgt in Kapitel 8.

5.2.5 Plattenbeanspruchung

Unter einer Platte versteht man ein ebenes Flächentragwerk, bei dem die Belastung senkrecht zur Ebene wirkt. Im Rahmen dieser Arbeit wird an dieser Stelle lediglich eine konstante Belastung über die gesamte Fläche betrachtet. Dies entspricht einer Windbelastung auf die Verglasung. Für die Berechnung dieser Systeme existieren bereits praxisorientierte analytische Methoden, die auf der linearen Theorie dünner Platten basieren. So können nach Beyle (Bucak, 1999) monolithische Platten und nach Feldmeier (Feldmeier, 2012) Mehrscheibenisolierverglasungen bemessen werden. Ab einer Verformung ≥ 0,2 x Plattendicke liegt die lineare Plattentheorie für die Ermittlung der Hauptachsenspannungen und Verformungen allerdings auf der sicheren Seite und kann daher unwirtschaftlich sein. Realitätsnähere Ergebnisse liefert dann eine nichtlineare Berechnung, die die Membrantragwirkung berücksichtigt.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchung von monolithischen Verglasungen nach der nichtlinearen Theorie mittels FEA vorgestellt. Im Vergleich zum späteren Einsatz der aussteifenden Verglasung in einem Mehrscheibenisolierglasverbund (vgl. Kapitel 3.2) liegt die Berechnung von monolithischen Scheiben bezüglich der Verformungen senkrecht zur Scheibe auf der sicheren Seite. Der Grund dafür ist, dass diese durch die Aktivierung des Kisseneffektes (günstige Wirkung der Kopplung der Scheiben über das im Scheibenzwischenraum bzw. -räumen eingeschlossene Gasvolumen) reduziert werden, auch wenn bei der Bemessung einer Mehrscheibenisolierverglasung Klimalasten, Änderungen des atmosphärischen Drucks und Ortshöhendifferenzen zu berücksichtigen sind.

Für den Widerstand gegen die Plattenbelastung ist festzuhalten, dass kleinere Formate eine höhere Belastung bei geringeren Verformungen zulassen. Die Scheibendicke übt dabei einen maßgebenden Einfluss aus. Dickere Verglasungen begünstigen diese Tendenzen. Weiterhin wird die Auswirkung der Angriffsrichtung der Plattenbeanspruchung in Bezug auf die Richtung

einer Auslenkung durch eine Vorverformung betrachtet. Dies ist für die Interaktion von Plattenbeanspruchung und Scheibenbeanspruchung von Bedeutung (vgl. Kapitel 5.2.6). Es zeigt sich für Beulfiguren mit lediglich einer Beule (eine Sinushalbwelle in beide Hauptachsen), dass unter Berücksichtigung der Vorverformung bei gleicher Ausrichtung größere Verformungen senkrecht zur Scheibenebene auftreten. Für Beulfiguren mit mehreren Beulen kann kein Effekt aufgezeigt werden. Bezüglich der Hauptzugspannungen ist anzuführen, dass die Richtung der Plattenbeanspruchung keine gravierenden Unterschiede aufweist. Die Abweichungen betragen weniger als 5 Prozent. Aus diesem Grund wird für die Interaktion eine gleichgerichtete Plattenbeanspruchung in Bezug auf die Richtung einer Auslenkung durch eine Vorverformung herangezogen, da eine höhere Auslenkung einen ungünstigeren Einfluss auf die nichtlineare Beulanalyse ausübt (vgl. Kapitel 5.2.3).

5.2.6 Interaktion Scheiben- und Plattenbeanspruchung

Bei der Bemessung des Systems unter kombinierter Beanspruchung aus Scheiben- und Plattenbelastung werden nichtlineare Berechnungen durchgeführt um Interaktionsverläufe zu bestimmen. Die Eingangsgrößen für die FEA sind in Tabelle 15 angegeben. Die Berechnungen erfolgen am imperfekten System (vgl. Kapitel 5.2.4). Da eine vollfaktorielle Untersuchung mit einem sehr hohen Zeitaufwand verbunden ist, wird an dieser Stelle die statistische Versuchsplanung eingesetzt. Bei ausreichendem Probenumfang ist die Informationsmenge annähernd repräsentativ. Zur Wahl der Zufallsstichproben wird die Methode Advanced Latin Hypercube Sampling verwendet (vgl. Kapitel 5.3.1). Es werden 250 Berechnungen durchgeführt. Die Vorstellung der Interaktionsverläufe erfolgt in Kapitel 8.3.3.

Tabelle 15: Eingangsgrößen für die Untersuchung der Interaktion von Scheiben- und Plattenbelastung

Parameter	Einheit	Wert	Bemerkung
b	mm	1000 bis 3000 Schrittweite 250	Glasscheibenabmessung (Breite)
h	mm	1000 bis 3000 Schrittweite 250	Glasscheibenabmessung (Höhe)
t	mm	5,8; 7,7; 9,7	min. Scheibendicke nach Toleranzabzug
AK	mm	1; 50; 100; 150	Abstand Konnektor vom Scheibenrand
BK	mm	50; 100; 150	Breite des Konnektors
q	Pa	50 bis 3000	Plattenbeanspruchung

5.2.7 Vergleich mit Schubfeld unter Schubbeanspruchung

Die ermittelten Beulfiguren für eine Lagerung durch Konnektoren erinnert an die eines Schubfeldes unter ausschließlicher Schubbeanspruchung (vgl. Abbildung 46). Da für die Belastung durch Schub analytische Lösungsmethoden existieren, lässt sich vermuten, dass durch diese Analogie in der Form auch eine analytische abgeleitet werden kann. Ein Vergleich beider Lagerungen zeigt jedoch, dass sich die Beulfiguren zwar zum Teil ähneln, die Verzweigungslasten jedoch deutlich voneinander abweichen (vgl. Anhang). Eine Ableitung der analytischen Lösung für Schubbeanspruchung ist daher nicht möglich.

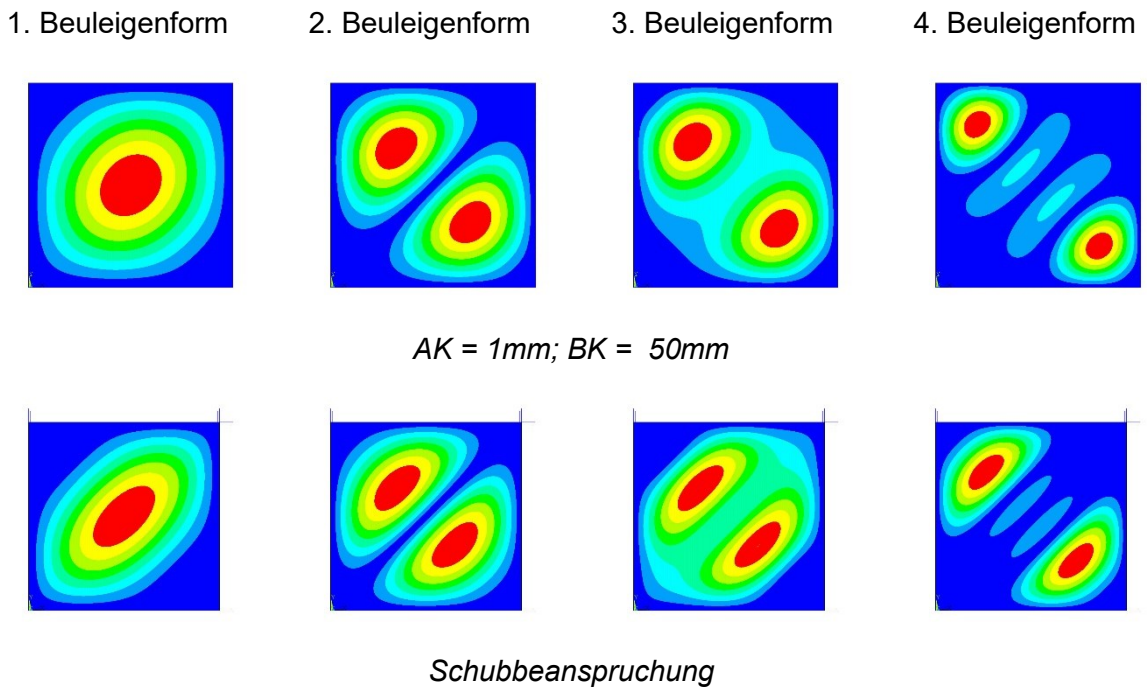


Abbildung 46: Exemplarische Vorstellung der ersten vier Beulfiguren für eine Scheibenabmessung von 2000mm x 2000mm (t = 5,8mm)

5.3 Parameterstudie am Gesamtsystem

5.3.1 Allgemein

Wie bereits in Kapitel 3.5 angeführt, besitzt das vorgestellte System eine Vielzahl von variablen Parametern (vgl. Tabelle 3). Im nachfolgenden Kapitel wird der Einfluss dieser auf die Tragfähigkeit und die Steifigkeit des Verbundelementes (b x h 2280mm x 2100mm; vgl. Kapitel 4.2) mittels einer Parameterstudie durch die FEM untersucht (Sensitivitätsanalyse).

Die FEA erfolgt mit ANSYS (Version 16.1). Die Glasscheibe wird mit SHELL181 und der Rahmen mit BEAM188 Elementen abgebildet. Die Elementgröße beträgt jeweils 20mm. Zum Scheibenrand hin erfolgt eine Netzverfeinerung auf ca. 5mm. Die Vernetzung wird vom Programm automatisch generiert (Vorgabe: quadratische Elemente). Die Randbedingungen des Modells entsprechen Abbildung 10.

Alle untersuchten Eingangsparameter sind in Tabelle 16 angegeben. Die Ausgabeparameter werden in Tabelle 17 gezeigt.

Da der Umfang für die Untersuchung mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan sehr zeitaufwendig ist, wird die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments) eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine Methode zur effizienten Planung und Auswertung von Versuchsreihen. Für weitere Angaben zur statistischen Versuchsplanung wird auf (Siebertz, et al., 2010) verwiesen.

Die Auswertung und Erstellung des Versuchsplans erfolgt unter Verwendung der Statistiksoftware optiSlang (Version 5.2.0). Als Methode zur Wahl der Zufallsstichproben (sampling method) wird das Verfahren Advanced Latin Hypercube Sampling verwendet. Dabei gibt es keine Vorgaben an die Zielfunktion. Dies stellt die Untersuchungen des gesamten Versuchsraums der Parameterstudie sicher.

Für die nachfolgende Auswertung der Parameterstudien wird der CoP (Coefficient of Prognosis) verwendet. Dieser stellt eine modellunabhängige Maßzahl zur Bewertung der Modellqualität dar. Für eine gute Abbildung sollte die Summe der CoP Werte für eine Ausgangsgröße über 90% liegen. Die CoP-Matrix zeigt zusätzlich die wichtigsten Eingangsparameter und ihren Einfluss auf die Ausgangsgröße an. Ein zu geringer CoP deutet auf einen zu geringen Probenumfang hin. Dadurch kann das Metamodell den Sachverhalt nicht hinreichend abbilden. Das kann dazu führen, dass Eingangsparameter fälschlicherweise nicht berücksichtigt oder deren Einfluss über- beziehungsweise unterschätzt werden.

Tabelle 16: Eingangsgrößen für die Parameterstudien am Gesamtsystem (vgl. Tabelle 3)

Parameter	Einheit	Bemerkung
b	mm	Breite der Verglasung
h	mm	Höhe der Verglasung
t	mm	Scheibendicke
E_{Glas}	MPa	E-Modul Glas
ν_{Glas}	-	Querdehnzahl von Glas
E_{Rahmen}	MPa	E-Modul Rahmenwerkstoff
I_{Rahmen}	cm^4	Flächenträgheitsmoment des Rahmenquerschnitts
AK	mm	Abstand der Lagerung (Glas/Rahmen) von Scheibenkante
BK	mm	Breite der Lagerung (Glas/Rahmen)
$c_{F,Konnektor}$	Nmm	Federsteifigkeit der Lagerung (Glas/Rahmen)
$c_{V,Konnektor}$	Nmm	Vorspannkraft der Lagerung (Glas/Rahmen)
$c_{\varphi,Glas}$	Nmm/°	Drehfedersteifigkeit des Randverbundes
$c_{\varphi,Rahmen}$	Nmm/°	Drehfedersteifigkeit der Rahmenecke
F	kN	Horizontalbelastung in Scheibenebene
q	N/mm²	Flächenbelastung orthogonal zur Scheibenebene

Tabelle 17: Ausgangsgrößen der Parameterstudien am Gesamtsystem

Parameter	Einheit	Bemerkung
Kraftreaktion bzw.	kN bzw.	Belastung in Scheibenebene
Verformung X	mm	Horizontalverschiebung in Scheibenebene
max Spannung	MPa	maximale Hauptzugspannung in Scheibenmitte
min Spannung	MPa	minimale Hauptzugspannung in Scheibenmitte
min Verformung Z	mm	minimale Verformung orthogonal zur Scheibenebene (in Richtung der Flächenlast q)
max Verformung Z	mm	maximale Verformung orthogonal zur Scheibenebene

5.3.2 Parameterstudie unter Berücksichtigung aller Eingangsgrößen

In diesem Kapitel wird die Untersuchung der in Tabelle 16 (vgl. auch Kapitel 3.5) angeführten Parameter vorgestellt um die dominierenden Einflussgrößen auf das System aufzuzeigen. Aus diesem Grund wird eine Vielzahl von Unbekannten berücksichtigt. In folgenden Untersuchungen erfolgt die genauere Betrachtung einzelner Eingangswerte.

Das verwendete Parameterset ist im Anhang (Tabelle 31) angeführt. Die Parameterstudie umfasst 1427 Berechnungen. Die Residuendiagramme für die durchgeführte Parameterstudie befinden sich im Anhang (Abbildung 113). Sie weisen auf eine zufriedenstellende Modellqualität hin. Auch die CoP-Matrix (Tabelle 18) zeigt Werte, die auf ein hinreichendes Metamodell schließen lassen. Je nach Ausgangsgröße variiert der Einfluss der Eingangswerte erheblich.

Tabelle 18: CoP-Matrix (Kapitel 5.3.2)

Eingangs-größe	Kraft-reaktion	max. Spannung	min. Spannung	max. Verformung	min. Verformung
AK	10,4%	15,6%	10,9%	7,1%	2,6%
BK	3,0%	3,0%	2,7%	3,4%	1,3%
t	1,7%	1,7%	0,8%	1,6%	0,2%
I_{Rahmen}	63,0%	45,9%	40,6%	28,1%	18,2%
E_{Rahmen}	9,4%	1,4%	5,2%	8,6%	3,0%
E_{Glas}	0,2%	1,7%	0,5%	1,5%	0,3%
ν_{Glas}	0,1%	0,9%	0,1%	1,3%	0,0%
$c_{F,Konnektor}$	2,6%	4,6%	3,2%	3,6%	1,2%
$c_{V,Konnektor}$	2,0%	0,9%	0,1%	1,0%	0,2%
$c_{\varphi,Glas}$	1,0%	1,4%	0,9%	1,5%	0,5%
$c_{\varphi,Rahmen,oben}$	0,5%	1,1%	0,3%	1,5%	0,1%
$c_{\varphi,Rahmen,unten}$	0,4%	0,9%	0,2%	0,8%	0,1%
q	2,3%	16,3%	41,7%	29,4%	62,8%
CoP	**83,7%**	**74,8%**	**83,2%**	**62,6%**	**89,1%**

In Tabelle 19 werden die Tendenzen der Ausgangsgrößen bei steigendem Betrag der Eingangsgröße zusammengefasst. Minus (-) bedeutet der Betrag der Ausgangsgröße nimmt ab und Plus (+) bedeutet der Betrag der Ausgangsgröße nimmt zu.

Im Anhang werden zusätzlich die vier Parameter mit dem größten Einfluss auf jede Ausgangsgröße visualisiert (Abbildung 114 bis Abbildung 118).

Tabelle 19: Tendenzen der Ausgangsgrößen bei steigendem Betrag der Eingangsgröße (Kapitel 5.3.2)

Eingangs-größe	Kraft-reaktion	max. Spannung	min. Spannung	max. Verformung	min. Verformung
AK	-	-	-	-	-
BK	+	+	k.a.	+	+
t	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.
I_{Rahmen}	+	+	+	+	+
E_{Rahmen}	+	+	+	+	+
E_{Glas}	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.
ν_{Glas}	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.
$c_{F,Konnektor}$	k.a.	+	+.	+	k.a.
$c_{V,Konnektor}$	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.
$c_{\varphi,Glas}$	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.
$c_{\varphi,Rahmen}$	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.
q	-	+	-	-	+

Die Untersuchungen zeigen, dass der Rahmen (Trägheitsmoment und Werkstoff) einen gravierenden Einfluss auf die Ausgabegrößen des Systems nach Tabelle 17 aufweist. Somit sind die Grenzen des Systems direkt von der Gestaltung der Fassade abhängig. Weitere Eingangsgrößen mit deutlichem Einfluss auf das System sind der Abstand der Lagerung von der Scheibenkante und die Flächenbeanspruchung orthogonal zur Scheibe. Alle anderen Eingangswerte zeigen nur geringe bis keine Auswirkung auf die Ausgabeparameter.

In den nachfolgenden Untersuchungen werden die Eingangsparameter des im Forschungsprojekt eingesetzten Holzrahmens verwendet.

5.3.3 Parameterstudie mit reduzierten Eingangsgrößen

In diesem Kapitel wird die Untersuchung aus den vorherigen Kapitel (Kapitel 5.3.2) mit reduzierten Eingangsgrößen wiederholt. Dazu werden diese auf die im Forschungsprojekt beeinflussbaren Eingangsparameter minimiert. Die Zielstellung ist ein aussagekräftigeres Metamodell zu generieren. Das dabei verwendete Parameterset ist im Anhang (Tabelle 32) einzusehen. Die Parameterstudie umfasst 500 Berechnungen. Die entsprechenden Residuendiagramme sind im Anhang (Abbildung 119) abgebildet. Sie lassen auf eine gute Modellqualität schließen.

Die CoP-Matrix (Tabelle 20) weist auf ein aussagekräftiges Metamodell hin. Für alle Ausgangsgrößen liegt der CoP-Wert über 97%. Des Weiteren lässt sich ableiten, dass die Lagerposition (AK und BK) den maßgebenden Einfluss auf die Ausgangsgrößen ausüben. Die Federsteifigkeit des Konnektors $c_{F,Konnektor}$ und Vorspannkraft $c_{V,Konnektor}$ hingegen besitzen nur eine geringe Bedeutung und können vernachlässigt werden (vgl. Anhang). Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf Kapitel 5.2 verwiesen. Hier werden Parameterstudien zur Lagerung der Verglasung ohne Berücksichtigung der Rahmenkonstruktion an verschiedenen Scheibengeometrien vorgestellt.

Tabelle 20: : CoP-Matrix (Kapitel 5.3.3)

Eingangs-größe	Verformung (in Ebene)	max. Spannung	min. Spannung	max. Verformung (orthogonal)	min. Verformung (orthogonal)
AK	74,5%	69,6%	97,5%	97,5%	16,3%
BK	66,5%	34,2%	15,0%	3,4%	83,7%
$c_{F,Konnektor}$	1,3%	0,2%	0,1%	0,0%	0,1%
$c_{V,Konnektor}$	1,1%	0,0%	0,0%	0,6%	0,1%
CoP	**99,0%**	**99,4%**	**98,2%**	**98,1%**	**97,2%**

In Abbildung 47 sind die 3D-Antwortflächen der Ausgangsgrößen für die zwei maßgebenden Eingangsgrößen dargestellt. Es zeigt sich, dass mit kleinerem Abstand des Konnektors von der Kante und größeren Breiten des Konnektors die Steifigkeit des Systems erhöht wird. Zeitgleich bedeutet dies eine Abnahme der Spannungsbeträge. Allerdings steigt die Verformung orthogonal zur Scheibe an.

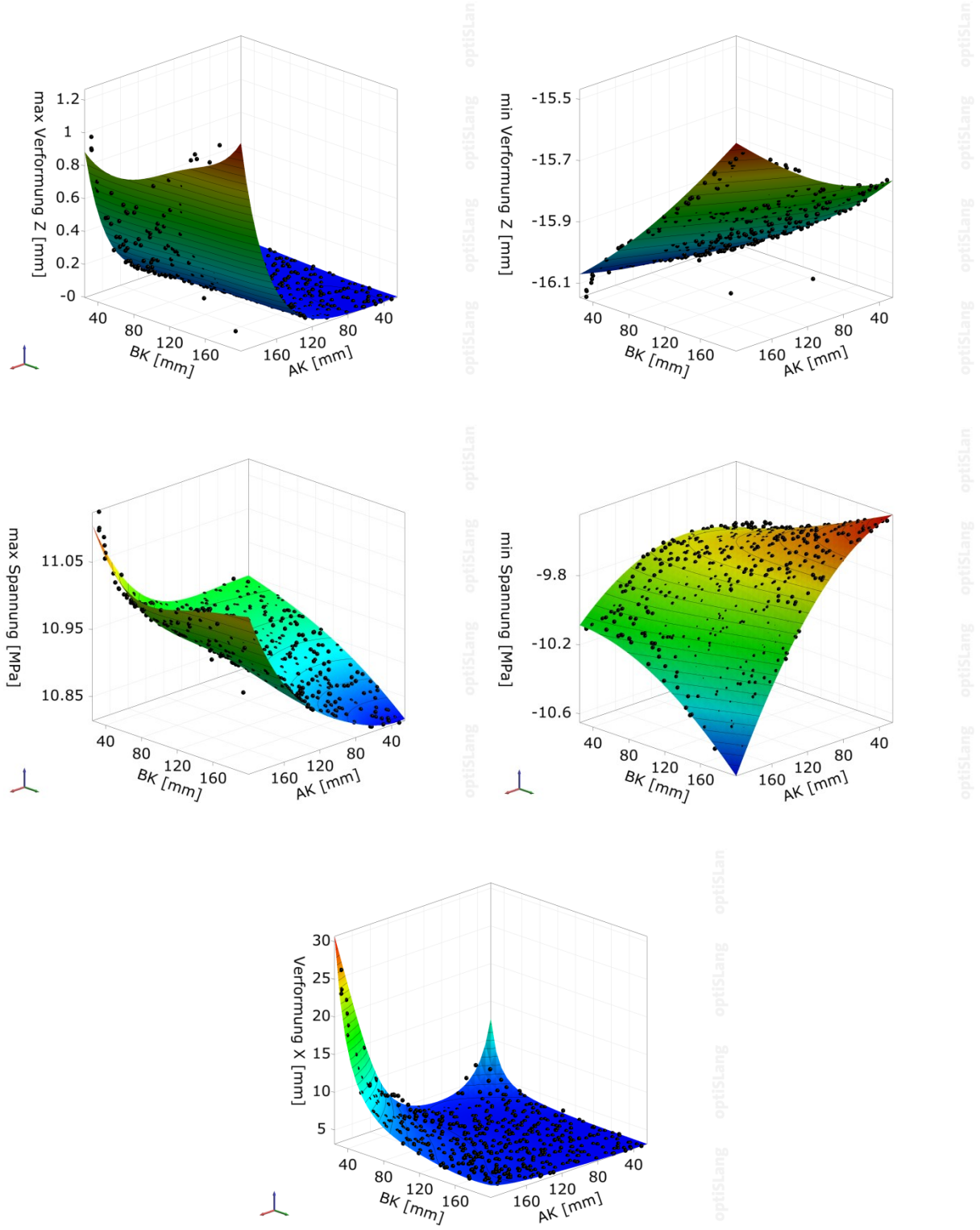


Abbildung 47: 3D-Plot der Antwortfläche der Ausgangsgrößen für die zwei maßgebenden Eingangsgrößen (Kapitel 5.3.3)

5.3.4 Parameterstudie zur Berücksichtigung von Abweichungen der Lagerung

In diesem Kapitel wird die Untersuchung von Abweichungen der Lagerklötze beim Einbau (Montageungenauigkeiten von ±10mm) vorgestellt. Bereits zuvor untersuchte Parameter werden zur Reduzierung der Berechnungsdauer nicht berücksichtigt. Das verwendete Parameterset ist im Anhang (Tabelle 34) angeführt. In Tabelle 21 erfolgt die Einführung in die verwendete Nomenklatur. Die Parameterstudie umfasst 500 Berechnungen. Im Anhang (Abbildung 122) befinden sich die Residuendiagramme für die durchgeführte Parameterstudie. Sie deuten auf eine gute Modellqualität hin.

Tabelle 21: Nomenklatur für die Position einzelner Lagerklötze

Abkürzung	Bedeutung
AK	Abstand der Lagerung (Glas) zur Scheibenkante
BK	Breite der Lagerung (Glas)
LO	linker Scheibenrand oben
LU	linker Scheibenrand unten
OL	oberer Scheibenrand links
OR	oberer Scheibenrand rechts
RO	rechter Scheibenrand oben
RU	rechter Scheibenrand unten
UL	unterer Scheibenrand links
UR	unterer Scheibenrand rechts

Die CoP-Matrix (Tabelle 22) zeigt, dass die Lagerbedingungen in der Druckdiagonalen den bestimmenden Anteil des Metamodells kennzeichnen. Vier Eingangsgrößen besitzen sogar einen maßgeblichen Einfluss auf die Ausgangsgrößen. Dabei handelt es sich um die vier Abstände der Lagerung zum Scheibenrand in der Druckdiagonalen. Die restlichen Parameter zeigen im Vergleich nur geringfügige Auswirkungen.

Tabelle 22: CoP-Matrix (Kapitel 5.3.4)

Eingangsgröße	Verformung X	max Spannung	min Spannung
AK-LO	18,4%	9,9%	17,9%
BK-LO	3,6%	3,3%	1,9%
AK-OL	14,4%	13,8%	17,3%
BK-OL	2,6%	10,4%	4,2%
AK-RU	21,2%	10,9%	17,7%
BK-RU	3,2%	4,2%	2,6%
AK-UR	29,3%	16,8%	18,3%
BK-UR	0,4%	10,5%	4,4%
AK-RO	0,0%	0,3%	0,6%
BK-RO	0,0%	0,3%	0,1%
AK-OR	0,0%	2,0%	0,4%
BK-OR	0,0%	2,2%	0,4%
AK-LU	0,0%	0,5%	0,3%
BK-LU	0,0%	0,2%	0,0%
AK-UL	4,6%	1,5%	0,3%
BK-UL	1,4%	3,3%	1,2%
CoP	**100%**	**85,0%**	**86,4%**

Es zeigt sich, wie bereits in Kapitel 5.3.2 und Kapitel 5.3.3 zu sehen war, dass die maximale Hauptzugspannung in Scheibenmitte mit zunehmendem Abstand der Lagerung zur Scheibenkante sinkt. Das Maximum liegt bei minimalen Abständen. Bei der minimalen Hauptzugspannung in Scheibenmitte und der Verformung in Scheibenebene verhält es sich entgegengesetzt. In Abbildung 48 wird der Einfluss der vier maßgebenden Parameter auf die Kraftreaktion exemplarisch visualisiert.

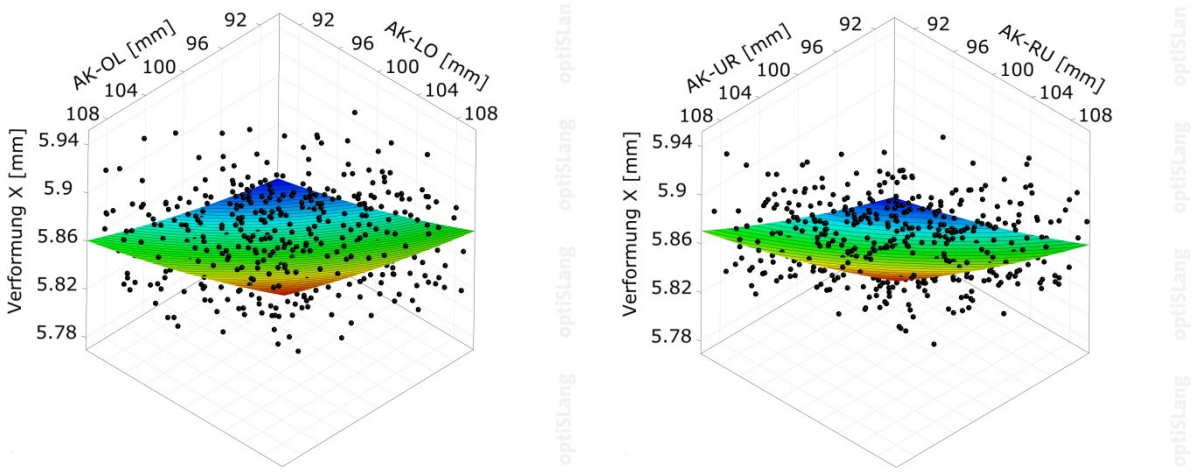


Abbildung 48: 3D-Plot der Antwortfläche für die Ausgangsgröße Kraftreaktion für ausgewählte Eingangsgrößen (Kapitel 5.3.4)

Abschließend ist festzuhalten, dass der Einfluss auf das System durch variierende Lagerbedingungen (Montageungenauigkeiten) vernachlässigt werden kann. Die Abweichungen zwischen Minimal- und Maximalwerten liegt bei allen drei Ausgangsgrößen unter 3% (vgl. Abbildung 122).

5.3.5 Zusätzliches Element in Reihe

Nachfolgend wird die Untersuchung eines zusätzlichen in Reihe geschalteten zweiten Elementes vorgestellt. Der Vergleich zwischen Einzelelement und zwei Elementen erfolgt an dem im Anhang (Tabelle 35) angeführten Parameterset. Lediglich die Flächenlast (Wind etc.) auf die ausfachenden Verglasungen variiert. In dem Modell für zwei Elemente in Reihe werden ausschließlich drei Pfosten angeordnet. Das bedeutet, es befindet sich nur ein Pfosten zwischen den Verglasungen.

Eine Verdopplung der Elemente führt hier bei identischen Randbedingungen zu einer mehr als doppelt so großen (2,3-fache) Kraftreaktion. Die auftretenden Hauptzugspannungen in Scheibenebene und Verschiebungskomponenten orthogonal zur Scheibenebene ändern sich unwesentlich. Wie bereits in Kapitel 5.3.2 gezeigt, besitzt die Flächenlast einen maßgebenden Einfluss auf diese Ausgangsgrößen. Dieser Einfluss wiegt hier deutlich schwerer als der durch die Belastung in Scheibenebene.

Da die Bemessungsgröße Wind nicht konstant über die gesamte Wandfläche angreift, die Außendruckbeiwerte c_{pe} weichen zum Teil um einen Faktor von größer zwei zueinander ab (vgl.

(DIN EN 1991-1-4, 2010)), erfolgt zusätzlich eine Vergleichsrechnung mit voneinander abweichenden Windlasten auf die in Reihe geschalteten ausfachenden Verglasungen. Die Ergebnisse bestätigen den maßgeblichen Einfluss der Flächenbelastung gegenüber der Belastung in Scheibenebene auf die auftretenden Hauptzugspannungen in Scheibenebene und Verschiebungskomponenten orthogonal zur Scheibenebene. Der Erhöhungsfaktor für die Kraftreaktion liegt bei Werten größer dem Wert zwei. Des Weiteren wird ein geringer Einfluss der Anordnung der Flächenlast auf die zwei verglasten Felder festgestellt, der allerdings auch auf numerische Rundungsfehler zurückzuführen ist. Eine tabellarische Übersicht der Ergebnisse befindet sich im Anhang (Tabelle 36).

Zu den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen für ein zusätzliches Element in Reihe ist anzuführen, dass diese nur als eine Voruntersuchung zu verstehen sind. Für genauere Aussagen besitzen die Untersuchungen einen zu geringen Umfang. Allerdings kann abschließend festgehalten werden, dass durch ein weiteres Element in Reihe ein Anstieg der Systemsteifigkeit um einen Faktor größer als zwei zu erwarten ist. Des Weiteren reduziert ein zusätzliches Element in Reihe die Hauptzugspannungen in und Verformungen orthogonal zur Scheibe nur geringfügig. Den maßgebenden Einfluss für diese Ausgangsgröße stellt die Flächenbelastung (z.B. durch Windbelastung) dar.

6 Analytischer Ansatz

Wie in Kapitel 2.3 bereits angeführt existieren geschlossene analytische Lösungen nur für wenige bestimmte Randbedingungen einer Scheibe. Für das im Rahmen dieser Arbeit behandelte System erfolgt daher die Herleitung einer Näherungslösung (vgl. (Girkmann, 1986)). Für die Grundlagen zur Theorie von Flächen wird auf Kapitel 2.3 verwiesen.

6.1 Scheibengleichung

6.1.1 Einführung Randwertproblem

Als Scheiben werden ebene Flächen bezeichnet, die lediglich in ihrer Ebene beansprucht werden (ebener Spannungszustand). Die allgemeine Scheibengleichung (AIRY Spannungsfunktion) dafür lautet wie folgt:

$$\Delta\Delta F = \frac{\partial^4 F}{\partial \mathrm{x}^4} + 2\,\frac{\partial^4 F}{\partial \mathrm{x}^2\,\partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 \tag{13}$$

mit:

Δ Laplace-Operator

Dabei handelt es sich um eine homogene, lineare partielle Differentialgleichung 4. Ordnung, deren Einführung die Gleichgewichtsbedingungen, die geometrischen Beziehungen und die Spannungsgleichungen erfüllt (unter Vernachlässigung der Volumskräfte). Sie stellt eine biharmonische Funktion dar. Auffällig ist, dass die Scheibengleichung keine Werkstoffkonstanten, wie das Elastizitätsmodul oder Querdehnzahl, beinhaltet. Das bedeutet, eine Scheibengleichung ist für jeden homogenen, isotropen Werkstoff, für den das Gesetz nach HOOK gültig ist, anwendbar.

Die Spannungen in der Scheibe ergeben sich zu:

$$\sigma_x = \ddot{F} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \qquad \sigma_y = F'' = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \qquad \tau_{xy} = -\dot{F}' = -\frac{\partial^2 F}{\partial \mathrm{x}\,\partial \mathrm{y}} \tag{14}$$

Dabei gilt:

$$\Delta\left(\sigma_x + \sigma_y\right) = 0 \tag{15}$$

Die Spannungssumme ist eine harmonische Funktion von *x* und *y*.

Die Formänderungen einer Scheibe (Verschiebungen bzw. Verschiebungskomponenten) können bestimmt werden, sobald die den Spannungszustand beschreibende AIRY Funktion *F(x,y)* bekannt ist.

Wird das System lediglich an den Scheibenrändern belastet und werden im Inneren der Scheibe angreifende Volumskräfte (Eigengewicht) nicht berücksichtigt, kann eine Behandlung als Randwertproblem erfolgen. Das bedeutet, in jedem Randpunkt muss das Gleichgewicht zwischen inneren und äußeren Kräften erfüllt sein. Im Sonderfall von Rechteckscheiben, an deren Rändern nur senkrecht wirkende Kräfte angreifen, müssen die Schubspannungen längs aller Ränder demnach verschwinden. Liegen die Ränder zusätzlich parallel zu den Koordinatenachsen x und y gilt:

$$\tau_{xy} = \frac{\partial^2 F}{\partial \mathrm{x}\, \partial \mathrm{y}} = 0 \tag{16}$$

Die Spannungen längs und senkrecht zum Rand sind dann Hauptspannungen. Weiterhin folgt für die Ränder:

$$\mathrm{x} = konst. \;\rightarrow\; \frac{\partial F}{\partial \mathrm{x}} = konst. \tag{17}$$

$$\mathrm{y} = konst. \;\rightarrow\; \frac{\partial F}{\partial \mathrm{y}} = konst. \tag{18}$$

Wie in der Einleitung von Kapitel 6 bereits erwähnt, ist es für das in dieser Arbeit behandelte Scheibenproblem nicht möglich eine geschlossene Lösung des Randwertproblems herzuleiten. Daher wird an dieser Stelle die Herleitung einer Näherungslösung der biharmonischen Stammfunktion durch partikuläre Integrale vorgestellt. Partikuläre Integrale eignen sich speziell für Rechteckscheiben. Dabei zeichnen sich für komplexe Randwertprobleme besonders jene aus Produkten der Exponentialfunktion und der trigonometrischen Sinus- und Cosinus-Funktion von praktischer Bedeutung aus.

Der allgemeine mathematische Ansatz der Scheibengleichung unter Berücksichtigung der zuvor genannten Randbedingungen ergibt sich demnach zu Gleichung (19), wobei sich die Sinus-Funktion durch die Cosinus-Funktion ersetzen lässt.

$$F(x,y) = \frac{1}{{\alpha_n}^2} \cdot N \cdot sin[\alpha_n\, x] + \frac{1}{{\beta_m}^2} \cdot M \cdot sin[\beta_m\, y] \tag{19}$$

mit:

$$\begin{gathered} N = A_n\, cosh[\alpha_n\, y] + B_n\, sinh[\alpha_n\, y] + C_n\, \alpha_n\, y\, cosh[\alpha_n\, y] + D_n\, \alpha_n\, y\, sinh[\alpha_n\, y] + \\ + E_n\, \alpha_n\, x\, cosh[\alpha_n\, y] + F_n\, \alpha_n\, x\, sinh[\alpha_n\, y] \end{gathered} \tag{20}$$

$$\begin{gathered} M = A_m\, cosh[\beta_m\, x] + B_m\, sinh[\beta_m\, x] + C_m\, \beta_m\, x\, cosh[\beta_m\, x] + D_m\, \beta_m\, x\, sinh[\beta_m\, x] + \\ + E_m\, \beta_m\, y\, cosh[\beta_m\, x] + F_m\, \beta_m\, y\, sinh[\beta_m\, x] \end{gathered} \tag{21}$$

6.1.2 FOURIER Reihenentwicklung

Mit Hilfe der FOURIER Reihenentwicklung lassen sich komplexe Randspannungen (z.B. unstetiger Verlauf) durch trigonometrische Sinus- bzw. Cosinus-Funktionen annähern. Wird dieser Ansatz für die Lösung der Scheibengleichung genutzt muss auch die AIRY Spannungsfunktion in Reihenform vorliegen. Für die Theorie der FOURIER Reihen wird an dieser Stelle auf einschlägige Literatur (z.B. (Girkmann, 1986)) verwiesen.

6.1.3 Verfahren nach GIRKMANN

Entsprechend des von GIRKMANN entwickelten Verfahrens zur Ermittlung der Stammfunktion durch das Randwertproblem ist es möglich die in Reihenform darzustellende Scheibengleichung entlang zweier Scheibenränder, je einer Bedingung eines Randes strenge anzupassen. Die zweite Bedingung eines Randes wird in diesem Fall durch den Ansatz einer bestimmten Anzahl von Reihengliedern nur näherungsweise erfüllt. Im Folgenden erfolgt die Herleitung längs jedes Randes für die Normalspannung strenge und für die Schubspannung näherungsweise.

Da das Verfahren lediglich entlang zweier Ränder strenge angewendet werden kann, muss die Nutzung von Symmetrie- bzw. Antimetriebedingungen erfolgen um die Scheibengleichung einer Rechteckscheibe zu entwickeln. Bei der Berechnung nach Theorie I. Ordnung können die Einzellösungen aufgrund des Superpositionsprinzips überlagert werden um die Gesamtlösung zu erhalten. Daraus folgt der in Abbildung 49 gezeigte Lösungsansatz.

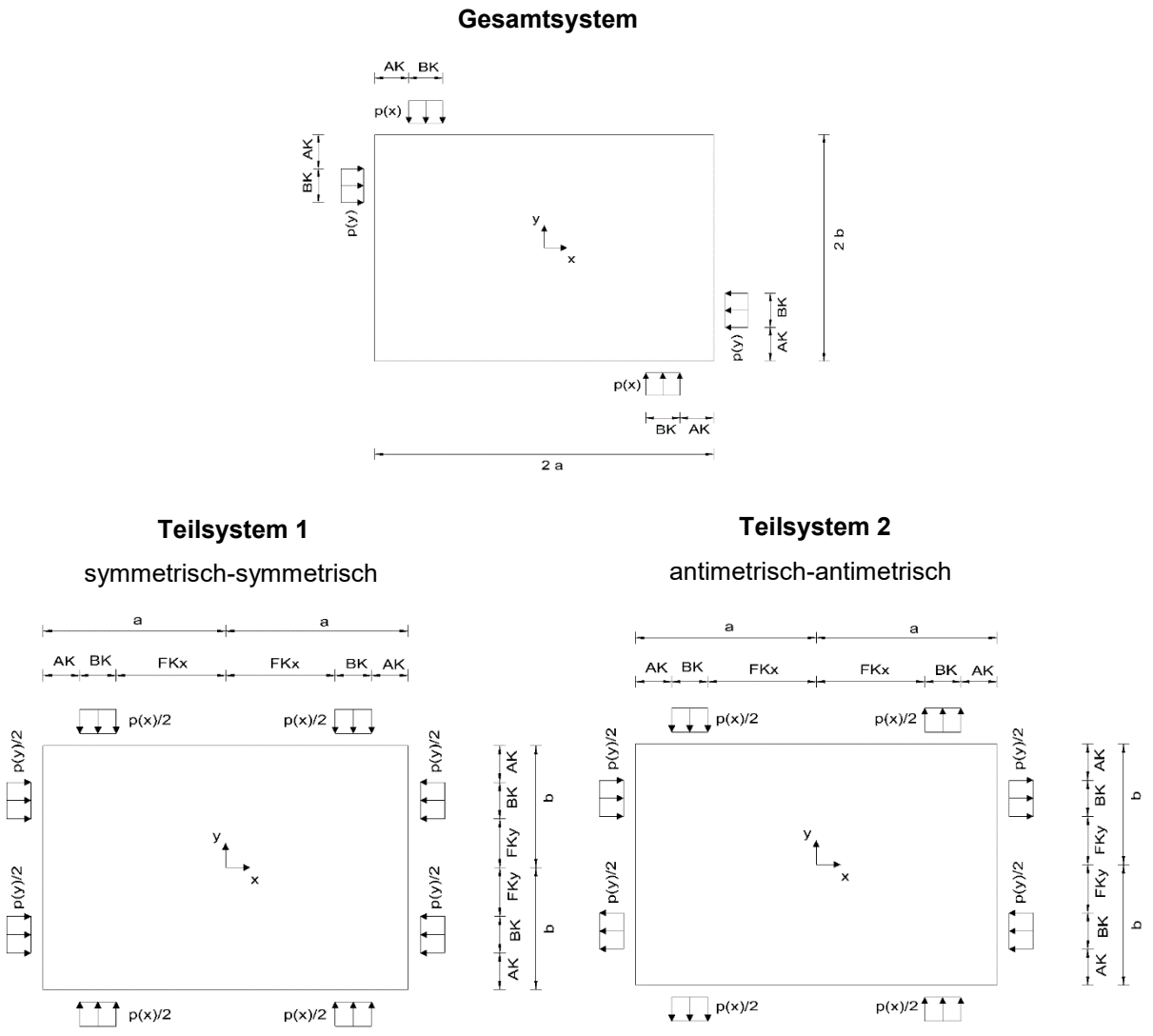


Abbildung 49: Aufteilung der Belastung des Gesamtsystems in einen doppelt symmetrischen und einen doppelt antimetrischen

Ausgehend vom Koordinatenursprung in Scheibenmitte kann nun das Randwertproblem entlang zweier Scheibenränder behandelt werden. Durch die Symmetrie- bzw. Antimetriebedingungen ist das Randwertproblem folglich an allen Scheibenrändern eingehalten.

Da am Gesamtsystem eine Gleichgewichtslage vorliegen muss, gilt für die Belastungen *p(x)* und *p(y)* folgende Beziehung (Annahme einer konstanten Lasteinleitung):

$$p(x) = p(y) \cdot \frac{\left(b-\left(AK+\frac{BK}{2}\right)\right)}{\left(a-\left(AK+\frac{BK}{2}\right)\right)} \tag{22}$$

mit:

$$p(y) = \frac{F_R}{t \cdot BK} \tag{23}$$

mit:

F_R	Horizontale kraftresultierende Einwirkung auf Scheibe
t	Dicke der Scheibe
a	halbe Länge der Scheibe in Richtung der x-Achse (vgl. Abbildung 49)
b	halbe Länge der Scheibe in Richtung der y-Achse (vgl. Abbildung 49)
AK	Abstand der Lagerung von der Scheibenecke (vgl. Abbildung 49)
BK	Breite der Lagerung (vgl. Abbildung 49)

6.1.3.1 Teilsystem 1 (symmetrisch-symmetrisch)

Die Abbildung der Randlasten erfolgt durch FOURIER Reihen. Um die Randbedingungen für die halbe Kantenlange *a* beziehungsweise *b* erfüllen zu können, wird die Periode zu $L = 4 \cdot a$ beziehungsweise $L = 4 \cdot b$ gewählt. Die Randbelastungen werden außerhalb des Geltungsbereiches (Randlänge) fortgesetzt. Dadurch verschwinden die konstanten Glieder $½ \cdot a_0$ der Reihen. Es gilt daher allgemein:

$$p(x) = \sum_n a_n \, cos[\alpha_n \cdot x] \qquad p(y) = \sum_m b_m \, cos[\beta_m \cdot y] \tag{24}$$

mit:

$\alpha_n = \frac{\mathrm{n} \cdot \pi}{2 \cdot a}$ $\qquad n = 1;\ 3;\ 5; \ldots$

$\beta_m = \frac{\mathrm{m} \cdot \pi}{2 \cdot b}$ $\qquad m = 1;\ 3;\ 5; \ldots$

Für das in dieser Arbeit behandelte System folgt daraus (Abbildung 49):

$$\frac{p(x)}{2} = \sum_n -p_x \frac{4\, cos\left[\frac{n\,\pi\,x}{2\,a}\right]\left(sin\left[\frac{n\,\pi}{2}\right] - sin\left[\frac{3\,n\,\pi}{2}\right]\right) sin\left[\frac{BK\,n\,\pi}{4\,a}\right] sin\left[\frac{(2\,AK+BK)\,n\,\pi}{4\,a}\right]}{n\,\pi} \tag{25}$$

$$\frac{p(y)}{2} = \sum_m -p_y \frac{4\, cos\left[\frac{m\,\pi\,y}{2\,b}\right]\left(sin\left[\frac{m\,\pi}{2}\right] - sin\left[\frac{3\,m\,\pi}{2}\right]\right) sin\left[\frac{BK\,m\,\pi}{4\,b}\right] sin\left[\frac{(2\,AK+BK)\,m\,\pi}{4\,b}\right]}{m\,\pi} \tag{26}$$

mit:

$$p_x = \frac{F_R}{t \cdot 2} \frac{\left(b - \left(AK + \frac{BK}{2}\right)\right)}{\left(a - \left(AK + \frac{BK}{2}\right)\right)} \tag{27}$$

$$p_y = \frac{F_R}{t \cdot 2} \tag{28}$$

Entsprechend der zweiachsigen Symmetrie des Teilsystems 1, der Anpassung der AIRY Spannungsfunktion an die Reihenform und dem Spannungszustand, vereinfacht sich der Ansatz der Stammfunktion zu:

$$\begin{aligned} F(x,y) = &\sum_n \frac{cos[\alpha_n x]\,(A_n\, cosh[\alpha_n\, y] + \alpha_n\, B_n\, y\, sinh[\alpha_n\, y])}{{\alpha_n}^2} + \\ &+ \sum_m \frac{cos[\beta_m\, y]\,(C_m\, cosh[\beta_m\, x] + \beta_m\, D_m\, x\, sinh[\beta_m x])}{{\beta_m}^2} \end{aligned} \tag{29}$$

mit den entsprechenden Spannungsgleichungen:

$$\begin{aligned} \sigma_x = &\sum_n cos[x\, \alpha_n]\,(B_n\, y\, \alpha_n\, sinh[y\, \alpha_n] + A_n\, cosh[y\, \alpha_n] + 2\, B_n\, cosh[y\, \alpha_n]) + \\ &- \sum_m cos[y\, \beta_m]\,(D_m\, x\, \beta_m\, sinh[x\, \beta_m] + C_m\, cosh[x\, \beta_m]) \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned} \sigma_y = &- \sum_n cos[x\, \alpha_n]\,(B_n\, y\, \alpha_n\, sinh[y\, \alpha_n] + A_n\, cosh[y\, \alpha_n]) + \\ &+ \sum_m cos[y\, \beta_m]\,(D_m\, x\, \beta_m\, sinh[x\, \beta_m] + C_m\, cosh[x\beta_m] + 2\, D_m\, cosh[x\, \beta_m]) \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = &- \sum_n sin[x\, \alpha_n]\,(A_n\, sinh[y\, \alpha_n] + B_n\, sinh[y\, \alpha_n] + B_n\, y\, \alpha_n\, cosh[y\, \alpha_n]) + \\ &- \sum_m sin[y\, \beta_m]\,(C_m\, sinh[x\, \beta_m] + D_m\, sinh[x\, \beta_m] + D_m\, x\, \beta_m\, cosh[x\, \beta_m]) \end{aligned} \tag{32}$$

Durch Einsetzten der Randbedingungen (Normalspannung) folgt unter Berücksichtigung von $cos[\alpha_n \cdot a] = 0$ und $cos[\beta_m \cdot b] = 0$:

$$A_n = -\frac{a_n + b\, B_n\, \alpha_n\, sinh[b\, \alpha_n]}{cosh[b\, \alpha_n]} \tag{33}$$

mit:

$$a_n = -p_x \frac{4\left(sin\left[\frac{n\,\pi}{2}\right] - sin\left[\frac{3\,n\,\pi}{2}\right]\right) sin\left[\frac{BK\,n\,\pi}{4\,a}\right] sin[\frac{(2\,AK + BK)\,n\,\pi}{4\,a}]}{n\,\pi} \tag{34}$$

und:

$$C_m = -\frac{b_m + a\, D_m\, \beta_m\, sinh[a\, \beta_m]}{cosh[a\, \beta_m]} \tag{35}$$

mit:

$$b_m = -p_y \frac{4\left[\frac{m\,\pi\,y}{2\,b}\right]\left(sin\left[\frac{m\,\pi}{2}\right] - sin\left[\frac{3\,m\,\pi}{2}\right]\right) sin\left[\frac{BK\,m\,\pi}{4\,b}\right] sin[\frac{(2\,AK + BK)\,m\,\pi}{4\,b}]}{m\,\pi} \tag{36}$$

Nun gilt es die Randbedingungen der Schubspannung ($\tau_{xy} = 0$) in den Rändern a und b einzuhalten.

$$\begin{aligned} &\sum_m - (sin[y\,\beta_m]\,(D_m\,x\,\beta_m\,cosh[x\,\beta_m] + D_m\,sinh[x\,\beta_m] - \\ &\quad - sech[a\,\beta_m]\;(b_m + a\,D_m\,\beta_m\,sinh[a\,\beta_m])\,sinh[x\,\beta_m])) - \\ &- \sum_n (\,sin[x\,\alpha_n]\,(b\,B_n\,\alpha_n\,cosh[b\,\alpha_n] + B_n\,sinh[b\,\alpha_n] - \\ &\quad - (a_n + b\,B_n\,\alpha_n\,sinh[b\,\alpha_n])\,tanh[b\,\alpha_n])) = 0 \end{aligned} \tag{37}$$

$$\begin{aligned} &\sum_n - (sin[a\,\alpha_n]\,(B_n\,y\,\alpha_n\,cosh[y\,\alpha_n] + B_n\,sinh[y\,\alpha_n] - \\ &\quad - sech[b\,\alpha_n]\,(a_n + b\,B_n\,\alpha_n\,sinh[b\,\alpha_n])\,sinh[y\,\alpha_n])) - \\ &- \sum_m (sin[y\,\beta_m]\,(a\,D_m\,\beta_m\,cosh[a\,\beta_m] + D_m\,sinh[a\,\beta_m] - \\ &\quad - (b_m + a\,D_m\,\beta_m\,sinh[a\,\beta_m])\,tanh[a\,\beta_m])) = 0 \end{aligned} \tag{38}$$

Diese Beziehungen müssen für jeden Wert von *x* und *y* im Raum von *-a* bis *+a* und von *-b* bis *+b* bestehen. Dementsprechend werden die nachfolgend angeführten Funktionen durch FOURIER Reihen abgebildet.

$$sinh[x\,\beta_m\,] = \sum_n \frac{2\,\beta_m \cosh[a\,\beta_m]\,\sin[\frac{n\pi}{2}]}{a\,(\,\alpha_n \mathrm{n}^2 + {\beta_m}^2)} \sin[\,\alpha_n x] \tag{39}$$

$$sinh[y\,\alpha_n] = \sum_m \frac{2\,\alpha_n \cosh[b\,\alpha_n]\,\sin[\frac{m\pi}{2}]}{b\,(\,{\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2)} \sin[\beta_m y] \tag{40}$$

$$x\,cosh[x\,\beta_m\,] = \sum_n \frac{2\,\sin[\frac{n\pi}{2}](\,\frac{(\,{\alpha_n}^2 - {\beta_m}^2)\cosh[a\beta_m]}{{\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2} + a\,\beta_m \sinh[a\beta_m])}{a\,({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2)} \sin[\,\alpha_n x] \tag{41}$$

$$y\,cosh[y\;\;\alpha_n] = \sum_m \frac{2\,\sin[\frac{m\pi}{2}](-\frac{(\,{\alpha_n}^2 - {\beta_m}^2)\cosh[b\,\alpha_n]}{{\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2} + b\,\alpha_n \sinh[b\,\alpha_n])}{b\,({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2)} \sin[\beta_m y] \tag{42}$$

Daraus resultieren die Beziehungen:

$$B_n = \frac{\sum_m \left(sin[y\,\beta_m] \left(-\frac{2\,\beta_m \left(b_m \left({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2 \right) - 2\,D_m\,{\alpha_n}^2\,cosh[a\,\beta_m] \right)\,\sin\left[\frac{n\pi}{2}\right]}{a\,\left({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2\right)^2} \right) \right)}{-b\,\alpha_n \operatorname{sech}[b\,\alpha_n] - \sinh[b\,\alpha_n]} + \frac{-a_n\,tanh[b\,\alpha_n]}{-b\,\alpha_n \operatorname{sech}[b\,\alpha_n] - \sinh[b\,\alpha_n]} \tag{43}$$

$$D_m = \frac{\sum_n \left(sin[a\,\alpha_n] \left(-\frac{2\,\alpha_n \left(a_n \left({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2 \right) - 2\,B_n\,{\beta_m}^2\,cosh[b\,\alpha_n] \right) \sin\left[\frac{m\pi}{2}\right]}{b\,\left({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2\right)^2} \right) \right)}{-a\,\beta_m \operatorname{sech}[a\,\beta_m] - \sinh[a\,\beta_m]} + \frac{-b_m\,tanh[a\,\beta_m]}{-a\,\beta_m \operatorname{sech}[a\,\beta_m] - \sinh[a\,\beta_m]} \tag{44}$$

Mit diesen Gleichungen wird eine Matrix erzeugt, die genauso viele Gleichungen wie Unbekannte besitzt. Durch die Festlegung der Anzahl der Reihenglieder und eines Seitenverhältnisses *a/b* können demnach alle Konstanten gelöst und die Spannungskomponenten in der Scheibe berechnet werden.

6.1.3.2 Teilsystem 2 (antimetrisch-antimetrisch)

Für dieses System erfolgt ebenfalls die Abbildung der Randlasten durch FOURIER Reihen. Um die Randbedingungen für die halbe Kantenlange *a* beziehungsweise *b* erfüllen zu können, wird die Periode allerdings zu $L = 2 \cdot a$ beziehungsweise $L = 2 \cdot b$ gewählt. Die Randbelastungen werden außerhalb des Geltungsbereiches (Randlänge) fortgesetzt. Dadurch verschwinden die konstanten Glieder $\frac{1}{2} \cdot a_0$ der Reihen. Allgemein gilt Gleichung (24) mit:

$$\alpha_n = \frac{\mathrm{n} \cdot \pi}{a} \qquad n = 1;\ 2;\ 3; \ldots$$

$$\beta_m = \frac{\mathrm{m} \cdot \pi}{b} \qquad m = 1;\ 2;\ 3; \ldots$$

Für das in dieser Arbeit behandelte System folgt daraus (Abbildung 49):

$$\frac{p(x)}{2} = \sum_n -p_x \frac{4\,cos[n\,\pi]\,sin\left[\frac{BK\,n\,\pi}{2a}\right] sin\left[\frac{(2\,AK+BK)\,n\,\pi}{2\,a}\right] sin\left[\frac{\pi\,n\,x}{a}\right]}{n\,\pi} \tag{45}$$

$$\frac{p(y)}{2} = \sum_m -p_y \frac{4\,cos[m\,\pi]\,sin\left[\frac{BK\,m\,\pi}{2\,b}\right] sin\left[\frac{(2\,AK+BK)\,m\,\pi}{2\,b}\right] sin\left[\frac{\pi\,m\,y}{b}\right]}{m\,\pi} \tag{46}$$

mit:

$$p_x = \frac{F_R}{t \cdot 2} \frac{\left(b-\left(AK+\frac{BK}{2}\right)\right)}{\left(a-\left(AK+\frac{BK}{2}\right)\right)} \tag{47}$$

$$p_y = \frac{F_R}{t \cdot 2} \tag{48}$$

Entsprechend der zweiachsigen Antimetrie des Teilsystems 2, der Anpassung der AIRY Spannungsfunktion an die Reihenform und dem Spannungszustand, vereinfacht sich der Ansatz der Stammfunktion zu:

$$F(x,y) = \sum_n \frac{sin[\alpha_n x]\,(A_n\,sinh[\alpha_n\,y] + \alpha_n\,B_n\,y\,cosh[\alpha_n\,y])}{{\alpha_n}^2} + \\ + \sum_m \frac{sin(C_m\,sinh[\beta_m\,x] + \beta_m\,D_m\,x\,cosh[\beta_m x])}{{\beta_m}^2} \tag{49}$$

mit den entsprechenden Spannungsgleichungen:

$$\sigma_x = \sum_n sin[x\,\alpha_n]\,(B_n\,y\,\alpha_n\,cosh[y\,\alpha_n] + A_n\,sinh[y\,\alpha_n] + 2\,B_n\,sinh[y\,\alpha_n]) + \\ - \sum_m sin[y\,\beta_m]\,(D_m\,x\,\beta_m\,cosh[x\,\beta_m] + C_m\,sinh[x\,\beta_m]) \tag{50}$$

$$\sigma_y = -\sum_n sin[x\,\alpha_n]\,(B_n\,y\,\alpha_n\,cosh[y\,\alpha_n] + A_n\,sinh[y\,\alpha_n]) + \\ + \sum_m sin[y\,\beta_m]\,(D_m\,x\,\beta_m\,cosh[x\,\beta_m] + C_m\,sinh[x\beta_m] + 2\,D_m\,sinh[x\,\beta_m]) \tag{51}$$

$$\tau_{xy} = \sum_n cos[x\,\alpha_n]\,(A_n\,cosh[y\,\alpha_n] + B_n\,cosh[y\,\alpha_n] + B_n\,y\,\alpha_n\,sinh[y\,\alpha_n]) + \\ + \sum_m cos[y\,\beta_m]\,(C_m\,cosh[x\,\beta_m] + D_m\,cosh[x\,\beta_m] + D_m\,x\,\beta_m\,sinh[x\,\beta_m]) \tag{52}$$

Durch Einsetzten der Randbedingungen (Normalspannung) folgt unter Berücksichtigung von $sin[\alpha_n \cdot\ a] = 0$ und $sin[\beta_m \cdot\ b] = 0$:

$$A_n = (-a_n - b\,B_n\,\alpha_n\,cosh[b\,\alpha_n])\,csch[b\,\alpha_n] \tag{53}$$

mit:

$$a_n = -p_x \frac{4\,cos[n\,\pi]\,sin\left[\frac{BK\,n\,\pi}{2a}\right]\,sin\left[\frac{(2\,AK + BK)\,n\,\pi}{2\,a}\right]}{n\,\pi} \tag{54}$$

und:

$$C_m = (-b_m - a\,D_m\,\beta_m\,cosh[a\,\beta_m])\,csch[a\,\beta_m] \tag{55}$$

mit:

$$b_m = -p_y \frac{4\,cos[m\,\pi]\,sin\left[\frac{BK\,m\,\pi}{2\,b}\right]\,sin\left[\frac{(2\,AK + BK)\,m\,\pi}{2\,b}\right]}{m\,\pi} \tag{56}$$

Nun gilt es die Randbedingungen der Schubspannung ($\tau_{xy} = 0$) in den Rändern *a* und *b* einzuhalten.

$$\begin{aligned}&\sum_m (cos[b\,\beta_m]\,(D_m\,x\,\beta_m\,sinh[x\,\beta_m] + D_m\,cosh[x\,\beta_m] - \\ &\quad - csch[a\,\beta_m]\,(b_m + a\,D_m\,\beta_m\,cosh[a\,\beta_m])\,cosh[x\,\beta_m])) + \\ &\sum_n (cos[x\,\alpha_n]\,(b\,B_n\,\alpha_n\,sinh[b\,\alpha_n] + B_n\,cosh[b\,\alpha_n] - \\ &\quad - (a_n + b\,B_n\,\alpha_n\,cosh[b\,\alpha_n])\,coth[b\,\alpha_n])) = 0\end{aligned} \tag{57}$$

$$\begin{aligned}&\sum_n (cos[a\,\alpha_n]\,(B_n\,y\,\alpha_n\,sinh[y\;\alpha_n] + B_n\,cosh[y\,\alpha_n] - \\ &\quad - csch[b\,\alpha_n]\,(a_n + b\,B_n\,\alpha_n\,cosh[b\,\alpha_n])\,cosh[y\,\alpha_n])) + \\ &\sum_m (cos[y\,\beta_m]\,(a\,D_m\,\beta_m\,sinh[a\,\beta_m] + D_m\,cosh[a\,\beta_m] - \\ &\quad - (b_m + a\,D_m\,\beta_m\,cosh[a\,\beta_m])\,coth[a\,\beta_m])) = 0\end{aligned} \tag{58}$$

Diese Beziehungen müssen für jeden Wert von *x* und *y* im Raum von *-a* bis *+a* und von *-b* bis *+b* bestehen. Dementsprechend werden die nachfolgend angeführten Funktionen durch FOURIER Reihen abgebildet.

$$cosh[x\,\beta_m\,] = \frac{sinh[a\,\beta_m]}{a\,\beta_m} + \sum_n \frac{2}{a}\,\frac{\beta_m\,cos[a\,\alpha_n]\,sinh[a\,\beta_m]}{{\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2}\,cos[\alpha_n\,x] \tag{59}$$

$$cosh[y\,\alpha_n] = \frac{sinh[b\,\alpha_n]}{b\,\alpha_n} + \sum_m \frac{2}{b}\,\frac{\alpha_n\,cos[b\,\beta_m]\,sinh[b\,\alpha_n]}{{\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2}\,cos[\beta_m\,y] \tag{60}$$

$$\begin{aligned}x\,sinh[x\,\beta_m\,] &= \frac{a\,\beta_m\,cosh[a\,\beta_m] - sinh[a\,\beta_m]}{a\,{\beta_m}^2} + \\ &+ \sum_n \frac{2}{a}\frac{cos[a\,\alpha_n]\,(a\,\beta_m\,\left({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2\right)\,cosh[a\,\beta_m] + \left({\alpha_n}^2 - {\beta_m}^2\right)\,sinh[a\,\beta_m])}{({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2)^2}\,cos[\alpha_n\,x]\end{aligned} \tag{61}$$

$$\begin{aligned}y\,sinh[y\;\alpha_n] &= \frac{b\,\alpha_n\,cosh[b\,\alpha_n] - sinh[b\,\alpha_n]}{b\,{\alpha_n}^2} + \\ &+ \sum_m \frac{2}{b}\frac{cos[b\,\beta_m]\,(b\,\alpha_n\,\left({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2\right)\,cosh[b\,\alpha_n] + \left(-{\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2\right)\,sinh[b\,\alpha_n])}{({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2)^2}\,cos[\beta_m\,y]\end{aligned} \tag{62}$$

Unter Berücksichtigung von

$$\sum_m \frac{b_m}{\beta_m} cos[\pi\, m] \equiv \frac{1}{2}\int_{-b}^{b} \sum_m b_m\, sin[\beta_m\, y] \tag{63}$$

und

$$\sum_n \frac{a_n}{\alpha_n} cos[\pi\, n] \equiv \frac{1}{2}\int_{-a}^{a} \sum_n a_n\, sin[\alpha_n\, x] \tag{64}$$

deren Integrale jeweils den Wert 0 besitzen, da die Belastung aller Ränder ein Gleichgewicht bildet, resultieren die Beziehungen:

$$B_n = \tag{65}$$

$$\frac{-a_n\, coth[b\, \alpha_n] + \sum_m \left(-\frac{2\, \beta_m\, cos[a\, \alpha_n]\, cos[b\, \beta_m]\, (b_m({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2) - 2\, D_m\, {\alpha_n}^2\, sinh[a\, \beta_m])}{a\, ({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2)^2} \right)}{-cosh[b\, \alpha_n] + b\, \alpha_n\, csch[b\, \alpha_n]}$$

$$D_m = \tag{66}$$

$$\frac{-b_m\, coth[a\, \beta_m] + \sum_n \left(-\frac{2\, \alpha_n\, cos[a\, \alpha_n]\, cos[b\, \beta_m]\, (a_n({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2) - 2\, B_n\, {\beta_m}^2\, sinh[b\, \alpha_n])}{b\, ({\alpha_n}^2 + {\beta_m}^2)^2} \right)}{-cosh[a\, \beta_m] + a\, \beta_m\, csch[a\, \beta_m]}$$

Wie zuvor gilt (vgl. Kapitel 6.1.3.1), dass mit diesen Gleichungen eine Matrix erzeugt wird, die genauso viele Gleichungen wie Unbekannte besitzt. Durch die Festlegung der Anzahl der Reihenglieder und eines Seitenverhältnisses *a/b* können demnach alle Konstanten gelöst und die Spannungskomponenten in der Scheibe berechnet werden.

6.2 Stabilitätsproblem (Verzweigungslast)

Für die Ermittlung der Stabilität von Platten können zwei grundlegende Methoden angewendet werden. Bei der ersten Methode erfolgt die Ermittlung der Stabilitätsgrenze der Platte aufgrund der Integration der Differentialgleichung der Beulfläche. Die zweite Methode umgeht diese Differentialgleichung und bestimmt die Stabilitätsgrenze näherungsweise auf der Grundlage des Gleichgewichts von innerer und äußerer Energie (Energiemethode; z.B. Rayleigh-Ritz-Prinzip).

Die partielle Differentialgleichung, die der ersten Methode für eine Rechteckplatte mit parallel zu den Rändern verlaufendem Koordinatensystem genügt, ist Gleichung (8). Das Beul- beziehungsweise Verzweigungsproblem liegt vor, wenn die Plattenbelastung *q* gleich dem Wert Null ist (vgl. Gleichung (67)). Die Verformung *w(x,y)* entspricht dann der Beulverformung.

$$\Delta\Delta w\, D - N_x\, w'' + 2\, N_{xy} \dot{w}' - N_y\, \ddot{w} = 0 \tag{67}$$

Zur Lösungen der partiellen Differentialgleichung sind für eine im Gleichgewicht stehende Platte mit beliebigem Randspannungszustand die inneren Spannungen bzw. Schnittkräfte mit Hilfe der Scheibentheorie zu bestimmen. Anschließend sind diese in Abhängigkeit der Achsen *x* und *y* in Gleichung (67) einzusetzen. Geschlossene analytische Lösungen existieren nur für wenige Randbelastungsfälle. Für allgemeine Fälle lassen sich nur Näherungslösungen herleiten (vgl. Kapitel 6.1).

Weiterhin müssen die Rand- beziehungsweise Lagerbedingungen der Plattengleichung angepasst werden. Für eine allseitig gelenkig gelagerte Platte gilt entlang der Ränder:

$$w = 0 \qquad\qquad w'' = M = 0 \tag{68}$$

Bei einer Rechteckplatte mit umlaufend unverschieblichen und frei drehbaren Rändern wäre die Lösung entlang der Längs- und Querränder durch den Ansatz von Sinushalbwellen (*n* bzw. *m* Halbwellen) entlang beider Achsen erfüllt (Gleichung (69)).

$$w(x,y) = A_{nm}\, sin\left[\frac{n\,\pi\,x}{2\,a}\right] sin\left[\frac{m\,\pi\,y}{2\,b}\right] \tag{69}$$

Mit diesem einfachen Ansatz der Verformung lässt sich das Verzweigungsproblem des hier behandelten Systems allerdings nicht lösen. Für Randbelastungszustände mit veränderlichen Normal- beziehungsweise. Schubspannungen lassen sich prinzipiell keine geschlossenen analytischen Lösungen auf Grundlage der Beulgleichung angeben (vgl. (Petersen, 2013)).

Für die Ermittlung der Verzweigungslasten sind in diesen Fällen Näherungsverfahren anzuwenden. Dazu zählen unter anderem das Differenzenverfahren, das direkte Variationsverfahren (Galerkin-Verfahren und Rayleigh/Ritz Verfahren), Finite Differenzen sowie die Methode der Finiten Elemente.

Da die Entwicklung einer solchen Lösung für das Verzweigungsproblem des in dieser Arbeit vorgestellten Systems als nicht zweckmäßig erachtet wird, erfolgt an dieser Stelle der Verzicht auf eine weitere Bearbeitung. Die Ermittlung der Ergebnisse der zu entwickelten Gleichungssysteme ist ohne Berechnungssoftware zu zeitaufwendig. Es erfolgt daher ein Verweis auf Kapitel 5 bzw. Kapitel 7. Dort erfolgt die Behandlung des Verzweigungsproblems bereits rechnergestützt durch die Methode der Finiten Elemente sowie dessen Validierung durch Bauteilversuche und ein weiteres Softwareprodukt. Für Interessierte wird an dieser Stelle auf (Girkmann, 1986) und das dort unter Abschnitt 3 angeführte Literaturverzeichnis verwiesen.

7 Validierung der Ergebnisse

7.1 Validierung des FEM Modells gegen Versuchsergebnisse

In diesem Unterkapitel erfolgt die Gegenüberstellung des vorgestellten Versuches aus Kapitel 4.2.2 mit dem in Kapitel 5.2 eingesetzten FE-Modell (ANSYS). Dazu werden die Spannungen aus Versuch und FE-Modell an ausgewählten Punkten (vgl. Abbildung 50) abgegriffen und miteinander verglichen. Für die Ermittlung der Spannungen finden jeweils die Materialkennwerte gemäß (DIN 18008-1, 2010) Verwendung.

Die in der FEA verwendete Scheibendicke beträgt 7,78mm. Dies ist der Mittelwert aus 10 Messungen der Scheibenstärke an der Testscheibe.

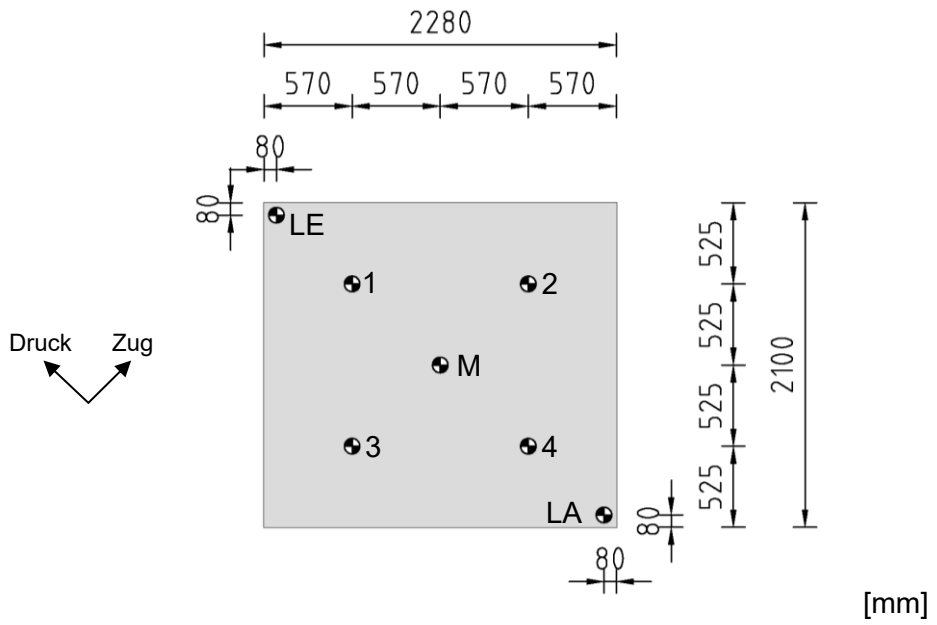


Abbildung 50: Messpunkte für den Vergleich zwischen FEA und Versuch

Aufgrund von Abweichungen bei der Montage der DMS am Probekörper gegenüber der Sollposition, werden bei der FEA zusätzlich Spannungen an sowie mit abweichenden Positionen und Bezugskoordinatensystemen ermittelt. Dazu erfolgt an diesen Positionen eine Netzverfeinerung auf 0,5mm um die Spannungswerte ausgewählter Netzknoten in einem Bereich von ± 2cm (jeweils in x- und y-Richtung) (in 1cm Schritten) zu berechnen (vgl. Abbildung 51). Des

Weiteren wird das Bezugskoordinatensystem in diesen Netzknoten um ± 5° (in 2,5° Schritten) für die Ausgabe der Normalspannungen gedreht. In den Diagrammen wird ein Streubereich aus der mittels FEA ermittelten Kurvenschar angegeben.

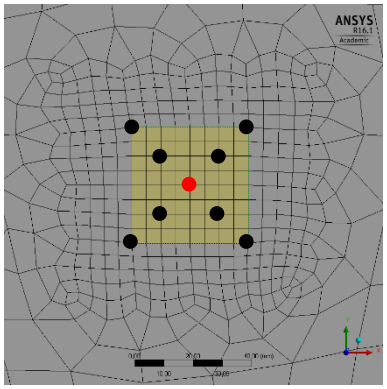


Abbildung 51: Netzverfeinerung im Punkt M (rot: Sollposition; schwarz: zusätzliche Netzknoten)

Da das Messsignal mit einem Messrauschen behaftet ist, wird dieses über eine Fensterlänge von 100 Messpunkten (Messrate 100Hz) mit sich selbst gefaltet und auf diese Weise der gleitende Durchschnitt gebildet. In den Diagrammen erfolgt die Visualisierung des Messrauschens durch dessen Einhüllende und des gleitenden Durchschnitts.

Exemplarisch wird in diesem Kapitel der Vergleich für ausgewählte Punkte (Druckdiagonale) vorgestellt. Die Auswertung weiterer Punkte ist im Anhang angeführt.

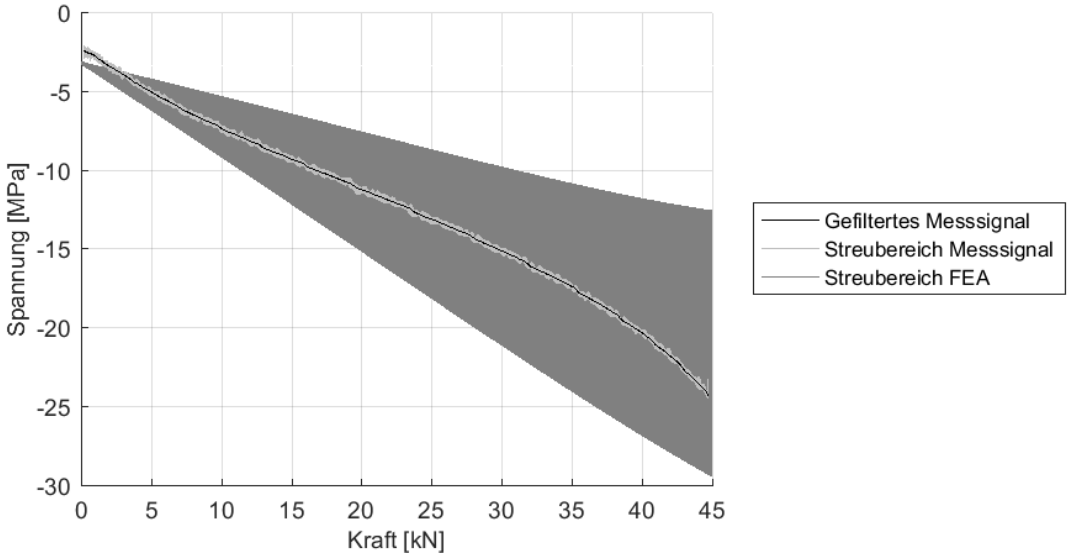


Abbildung 52: Spannungs-Kraft Verlauf Punkt LE; Richtung Druck (Scheibenoberkante)

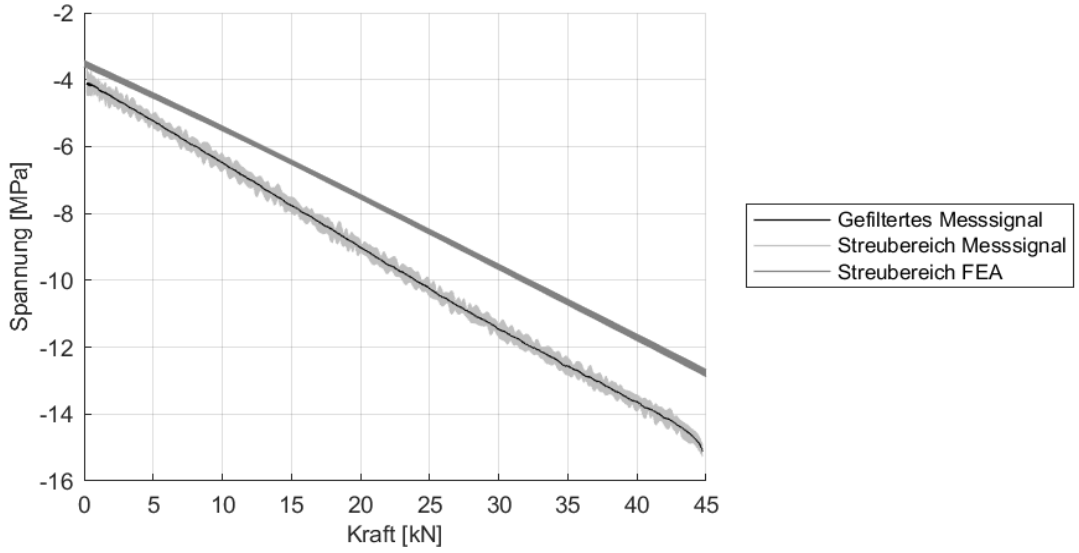


Abbildung 53: Spannungs-Kraft Verlauf Punkt M; Richtung Druck (Scheibenoberkante)

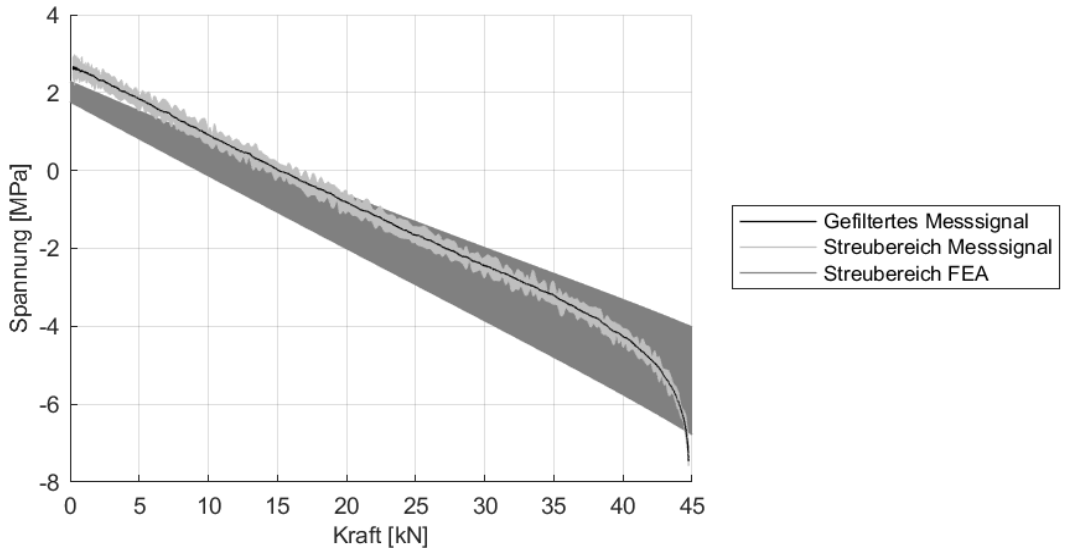


Abbildung 54: Spannungs-Kraft Verlauf Punkt 4; Richtung Druck (Scheibenunterkante)

Die Diagramme aus den Versuchen und der FEA zeigen eine gute Übereinstimmung für den Spannungsverlauf über die Kraft. Lediglich die Startwerte der Spannungen weisen zum Teil deutliche Abweichung zwischen FEA und Versuch auf. Ursachen für Abweichungen zwischen FEA und Versuch können sein:

- Die Lagerung der Verglasung vor dem Versuch auf einem Transportgestell (Glasbock) in Verbindung mit dem Nullstellen aller Kanäle.
- Das Messrauschen und ein durch das Nullstellen der Messkanäle entstandener Offset zwischen Einbau der Verglasung und dem Versuchsstart.
- Nichtlineare Lagerbedingungen im Versuch, die durch die FEA (hier) nicht abgebildet werden, wie beispielsweise Einflüsse durch den Rahmen aufgrund Verdrehungen um die Stabachse.
- Abweichungen der Position der Lagerklötze vom Sollwert.
- Abweichungen bei der Lagerung orthogonal zur Scheibenebene. Die Verglasung liegt nicht zentriert im Rahmen.
- FEA benutzt für die Berechnung ein idealisiertes System. Die Lasteinleitung entspricht der Lastausleitung. Dadurch beult die Verglasung in der FEA zeitgleich an zwei Scheibenecken. Im Versuch beult nur eine Scheibenecke der Druckdiagonalen, was zum Systemversagen führt. Dies ist materiellen und geometrischen Imperfektionen geschuldet, die im Rahmen der Arbeit mittels FEA nicht abgebildet werden.
- Zum Versuchsende versagt das System, weil die Glasscheibe nur auf dem Rahmen aufliegt (abhebendes Lager). Die Scheibe springt aus dem Rahmen. Dies wird in der FEA nicht abgebildet. Im späteren Einsatz erfolgt eine Lagerung des Scheibenrandes durch Klemmleisten, die ein abhebendes Lager unterdrücken.

7.2 Validierung des ANSYS Ergebnisses gegen Dlubal Ergebnisse

7.2.1 Verzweigungslast und Beuleigenform

Da die Finite Element Software ANSYS in der Ingenieurpraxis (speziell im Bauwesen) selten eingesetzt wird, erfolgt in diesem Kapitel die Vorstellung von Ergebnissen aus Berechnungen mit der Finite Element Statiksoftware RFEM von Dlubal. Anhand ausgewählter Geometrien werden die Beuleigenformen und Verzweigungslasten beider Softwareprodukte miteinander verglichen. Für RFEM wird dazu das Zusatzmodul RF-Stabil genutzt.

Das in den Vergleichsberechnungen verwendete FE-Netz sowie die Randbedingungen entsprechen denen der Berechnungen mit ANSYS (vgl. Kapitel 5.2). Zusätzlich erfolgt, abweichend von der Lanczos Methode für die Ermittlung der Eigenwerte, ein Vergleich mit anderen Methoden. Auf diesen wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, da hierdurch keine Beeinflussung der Ergebnisqualität vorliegt. Lediglich die Berechnungszeit variiert zum Teil deutlich.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Verzweigungslasten und Beuleigenformen eine hohe Übereinstimmung vorweisen. Die Abweichung der Verzweigungslasten liegt unterhalb 0,5% für alle untersuchten Geometrien. Eine Auswahl dieser wird im Anhang unter Tabelle 37 gezeigt. Auch in den Beuleigenformen können keine Differenzen festgestellt werden. Im Anhang ist entsprechend der vorgestellten Verzweigungslasten eine Gegenüberstellung einiger Beuleigenformen angeführt.

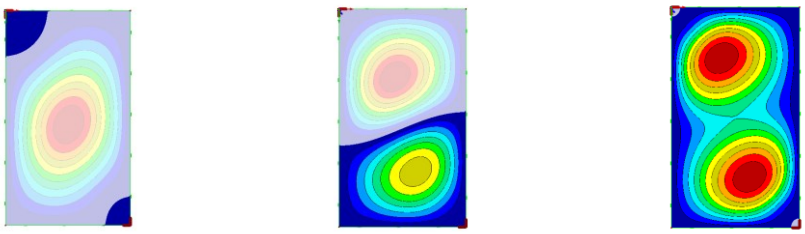
Des Weiteren bestätigt ein Vergleich der Sonderfälle diese hohe Übereinstimmung wie in Tabelle 23 und Abbildung 55 anhand des bereits in Kapitel 5.2.2 vorgestellten Sonderfalls zu erkennen ist. An dieser Stelle wird darauf aufmerksam gemacht, dass die Ergebnisse der Statiksoftware RFEM den Wechsel von erster und zweiter Beuleigenform für diese Geometrieparamter verifiziert.

Es gilt festzuhalten, dass eine Ermittlung der Verzweigungslasten mit der Statiksoftware RFEM die Ergebnisse der Finite Element Analyse mit ANSYS bestätigt und für eine Bemessung der Verglasung entsprechend dem in Kapitel 8 vorgestellten Bemessungskonzeptes herangezogen werden kann.

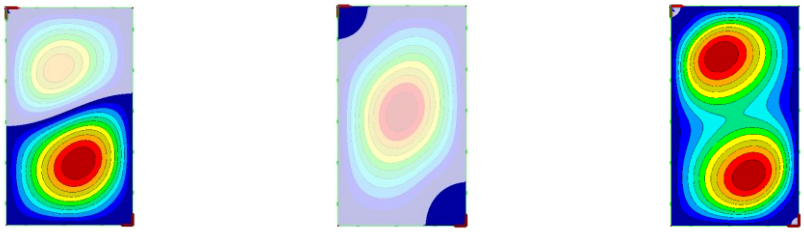
Tabelle 23: Vergleich der exemplarischen Vorstellung des Sonderfalls (Abbildung 38) durch die FE-Berechnungssoftware ANSYS und Dlubal (Verzweigungslast; horizontaler Lastanteil)

Geometrie [mm]	Ordnungszahl Beuleigenform	Verzweigungslast horizontale Belastung		Abweichung
		ANSYS	RFEM	
(bxh) 1750 x 3000	1	65,794	65,876	0,12%
AK = 1	2	65,845	65,942	0,15%
BK = 100	3	95,038	95,187	0,16%
t = 9,7	4	111,685	111,854	0,15%
	5	145,662	145,935	0,19%
(bxh) 1750 x 3000	1	65,285	65,378	0,14%
AK = 1	2	65,492	65,574	0,13%
BK = 150	3	94,202	94,341	0,15%
t = 9,7	4	110,184	110,299	0,10%
	5	143,674	143,785	0,08%

1. Beuleigenform 2. Beuleigenform 3. Beuleigenform



(b x h) =1750mm x 3000mm; AK = 1mm; BK = 100mm; t = 9,7mm



(b x h) =1750mm x 3000mm; AK = 1mm; BK = 150mm; t = 9,7mm

Abbildung 55: Vergleich der exemplarischen Vorstellung des Sonderfalls (Abbildung 38) durch die FE-Berechnungssoftware RFEM (Beuleigenformen)

7.2.2 Nichtlineare Beulanalyse

Durch den Einsatz des Zusatzmoduls RF-IMP bei Verwendung der Statiksoftware der Firma Dlubal lassen sich nichtlineare Berechnungen mit einer skalierten Beuleigenfigur analog Kapitel 5.2.4 (ANSYS) durchführen.

Vergleichsberechnungen unter Einsatz gleicher Randbedingungen (z.B. Lagerung und Netzgröße) des FE-Modells zeigen sehr gute Übereinstimmungen gegen die ermittelten Ergebnisse durch den Gebrauch der Finite Element Software ANSYS. Die Abweichungen betragen kleiner 1,0%. Auf eine Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet.

8 Bemessung

Speziell für das Bauwesen wurde durch die International Standard Organisation - ISO für den Begriff Sicherheit folgende Begriffsbestimmung mit Kommentar gegeben:

„Bis jetzt ist diese Benennung [„Sicherheit“, Anm. d.A.] allgemein im Sinne von Zuverlässigkeit verwendet worden. Im eingeschränkten Sinn bedeutet Sicherheit die Fähigkeit eines Tragwerks, all jenen Einwirkungen sowie bestimmten vorgegebenen außergewöhnlichen Ereignissen zu widerstehen, denen es während der Errichtung und seiner vorgesehenen Nutzung standhalten soll im Hinblick auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit.“

(Klingmüller & Bourgund, 1992)

Demnach ist die Sicherheit eines Systems gewährleistet, wenn die Beanspruchung kleiner als die Beanspruchbarkeit ist. Daraus leiten sich die heute gültigen Bemessungskonzepte ab.

8.1 Bemessungskonzept

Das vorgestellte Bemessungskonzept für aussteifende Verglasungen basiert auf der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte. In DIN EN 1990 (2010-12) ist die grundsätzliche Vorgehensweise dieser Methode beschrieben. Zur Nachweisführung wird demnach zwischen den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unterschieden.

In Übereinstimmung mit DIN 18008-1 (2010-12) erfolgt der Nachweis der ausreichenden Tragfähigkeit von Verglasungen auf Grundlage des Nachweises der maximalen Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche. Die Eigenspannungszustände der Verglasungen werden dabei auf der Widerstandsseite berücksichtigt (vgl. Kapitel 8.2).

Der Nachweis gilt im Allgemeinen als erfüllt wenn:

$$E_d \leq R_d \tag{70}$$

mit:

E_d Bemessungswert Einwirkung

R_d Bemessungswert Tragwiderstand

Bei Applikation einer planmäßigen Vorspannkraft (vgl. Kapitel 3.2) ist für die Nutzung der Beiwerte ψ zur Ermittlung des Bemessungswertes jeweils der Wert 1,0 anzusetzen.

Durch den Nachweis der Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit wird geprüft, ob eine Bemessungskombination festgelegte Randbedingungen für ein Tragwerk beziehungsweise Bauteil bezüglich dessen Gebrauchstauglichkeit überschreitet. Dies erfolgt in der Regel durch die Vorgabe von Grenzverformungen.

Der Nachweis gilt im Allgemeinen als erfüllt wenn:

$$E_d \leq C_d \tag{71}$$

mit:

E_d Bemessungswert Auswirkung

C_d Bemessungswert Gebrauchtauglichkeitskriterium

Für das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte System wird folgendes mehrstufiges Bemessungsschema vorgeschlagen (Abbildung 56). Nachzuweisen ist die Lasteinleitung mit den Konstruktionselementen Glasscheibe, Konnektor und Rahmenecke, der Widerstand der Verglasung in Scheibenebene (Stabilitätsuntersuchung) und senkrecht dazu (Plattenbeanspruchung) sowie deren Interaktion. Alle Einzelnachweise müssen erfüllt werden um den Nachweis für das System erfolgreich abzuschließen.

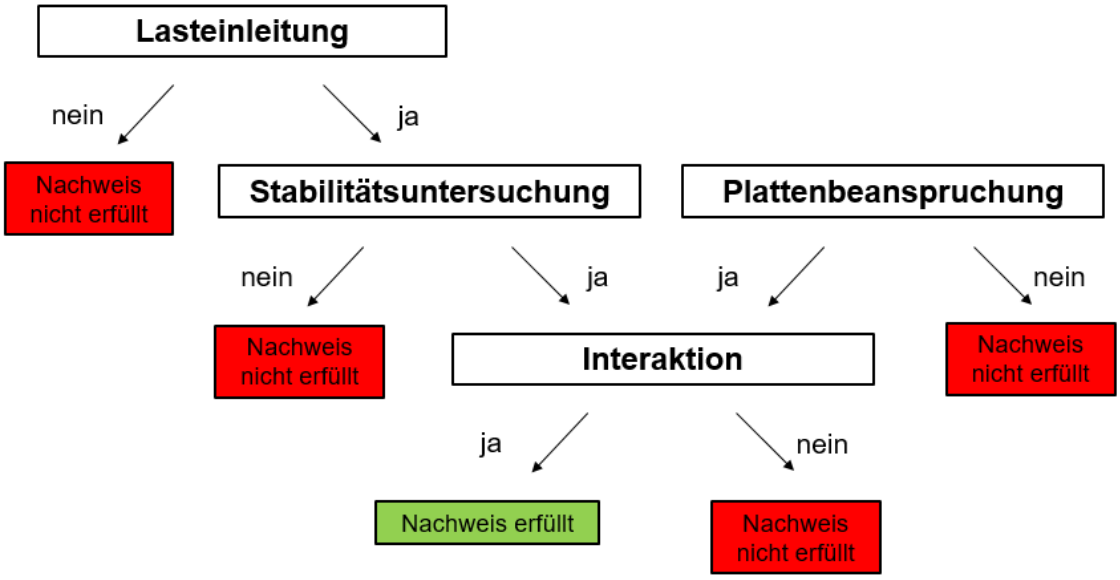


Abbildung 56: Bemessungsschema für aussteifende Verglasungen mit konzentrierter Lasteinleitung im Eckbereich

8.2 Grenzspannung Glas

Nach DIN 18008-1 (2010-12) ist der Bemessungswert des Tragwiderstandes gegen Spannungsversagen wie folgt zu ermitteln.

Für thermisch vorgespannte Gläser gilt:

$$R_d = \frac{k_c\, f_k}{\gamma_M} \tag{72}$$

mit:

R_d	Bemessungswert Tragwiderstand
k_c	Beiwert zur Berücksichtigung der Art der Konstruktion (sofern nichts anderes angegeben gilt k_c = 1,0)
f_k	Charakteristischer Wert der Biegezugfestigkeit
γ_M	Materialteilsicherheitsbeiwert (hier gilt γ_M = 1,5)

Für Gläser ohne planmäßige Vorspannung gilt:

$$R_d = \frac{k_{mod}\, k_c\, f_k}{\gamma_M} \tag{73}$$

mit:

γ_M	Materialteilsicherheitsbeiwert (hier gilt γ_M = 1,8)
k_c	Beiwert zur Berücksichtigung der Art der Konstruktion (bei der Ermittlung gegen Spannungsversagen für allseitig gelagerte Gläser ohne Vorspannung gilt k_c = 1,8)
k_{mod}	Modifikationsbeiwert (variiert in Abhängigkeit von der Lasteinwirkungsdauer; hier gewählt zu k_{mod} = 0,25)

Danach ergeben sich die Grenzspannungen aus Tabelle 24.

Tabelle 24: Grenzspannungen für die verschiedenen Glasarten im Einsatz als aussteifende Verglasung

Glasart	Grenzspannung [MPa]
Float	11,25
TVG	46,67
ESG	80,0

8.3 Beulen

8.3.1 Ermittlung Verzweigungslast

Zur Ermittlung der Verzweigungslast sind verschiedene Methoden anwendbar. Diese sind nachfolgend aufgelistet.

- Finite Element Methode (vgl. Kapitel 2.3.4)
- Analytische Ermittlung nach Kapitel 6.2
- Anhand der abgeleiteten Beziehung aus der FEA (Kapitel 5.2.2)

Anhand der Verzweigungslast und den Modifikationsfaktoren nach Kapitel 8.3.2.1 können Beulnachweise erfolgen.

8.3.2 Beulnachweise

Für den Beulnachweis (Stabilitätsnachweis) können im Allgemeinen zwei Grenzzustände maßgebend werden, die Spannungs- und Stabilitätsgrenze (Beulen). Greift die Spannungsgrenze, versagt das System aufgrund der Überschreitung der kritischen Spannungen. Im Falle der Stabilitätsgrenze ist der Grund des Versagens eine Zunahme von Verformungen ohne Anstieg der Belastung (Überschreiten des Maximums der Last-Verformungskurve).

Für das im Rahmen dieser Arbeit behandelte System ist die Spannungsgrenze für die untersuchten Formate (siehe Kapitel 5.2.2) gültig. Nachfolgend werden zwei Varianten für den Beulnachweis des untersuchten Systems vorgestellt.

8.3.2.1 Modifikationsfaktor

Die Auswertung der Versuchsergebnisse aus Kapitel 5.2.4 zeigt, dass die im Bauwesen üblicherweise verwendeten Modifikationsfunktionen nach Euler, Karman und Winter hier nicht angewendet werden können (vgl. Abbildung 57). Der Grund dafür ist die geringe Ausnutzung bei einer kleinen bezogenen Schlankheit und umgekehrt. In Abbildung 58 wird deshalb der Einfluss ausgewählter Eingangsgrößen auf den Modifikationsfaktor χ und die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_W$ nach (Wellershoff, 2006) vorgestellt.

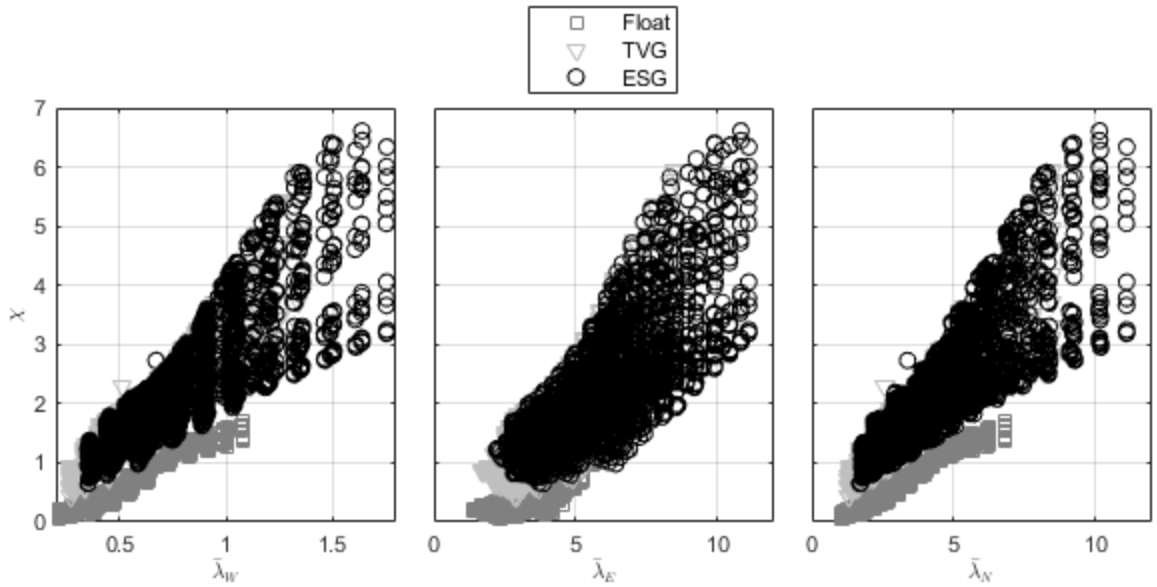


Abbildung 57: Darstellung der Modifikationsfaktoren χ bezogen auf die bezogene Schlankheit nach Wellershoff $\bar{\lambda}_W$, Englhardt $\bar{\lambda}_E$ und Neumer $\bar{\lambda}_N$

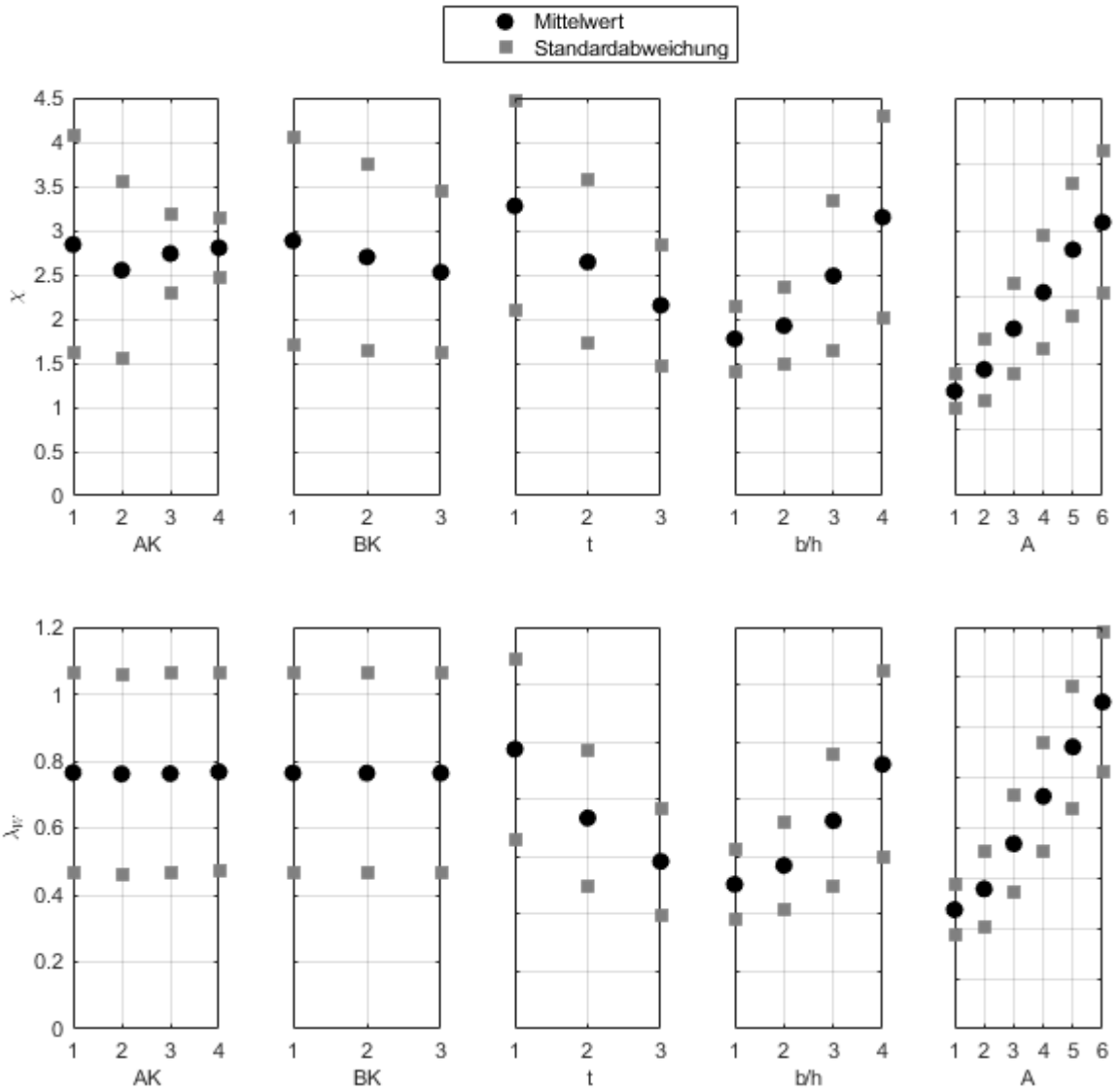


Abbildung 58: Einfluss verschiedener Eingangsgrößen auf den Modifikationsfaktor χ und die bezogene Schlankheit nach Wellershoff $\bar{\lambda}_W$

Tabelle 25: Bezeichnungsschlüssel für Abbildung 58

Parameter	Kennzahl	Wert
AK	1	1mm
	2	50mm
	3	100mm
	4	150mm
BK	1	50mm
	2	100mm
	3	150mm
t	1	5,8mm
	2	7,7mm
	3	9,7mm
b/h	1	≥0,33 bis ≤0,415
	2	>0,415 bis ≤0,50
	3	>0,50 bis ≤0,75
	4	>0,75 bis ≤1,0
A	1	≥1,0m² bis ≤1,5m²
	2	>1,5m² bis ≤3,0m²
	3	>3,0m² bis ≤4,5m²
	4	>4,5m² bis ≤6,0m²
	5	>6,0m² bis ≤7,5m²
	6	>7,5m² bis ≤9,0m²

Auf Grundlage der Ergebnisse aus Abbildung 58 wird die bezogene Schlankheit nach Neumer $\bar{\lambda}_N$ entsprechend Gleichung (74) entwickelt und für die Ermittlung der Modifikationsfunktionen angewendet. Ein Vergleich der bezogenen Schlankheiten nach Wellershoff, Englhardt und Neumer erfolgt in Abbildung 57. Dieser zeigt Ähnlichkeiten der bezogenen Schlankheiten nach Wellershoff und Neumer. Die bezogene Schlankheit nach Englhardt weist hingegen einen deutlich größeren Streubereich zu den anderen auf.

$$\bar{\lambda}_N = \sqrt{\frac{f_k \cdot \sqrt{A} \cdot \frac{Min(b;h)}{Max(b;h)} \cdot t}{P_{Krit}}} \tag{74}$$

mit:

f_k	Charakteristischer Wert der Biegezugfestigkeit
A	Fläche der Scheibe
b	Breite der Scheibe
h	Höhe der Scheibe
t	Dicke der Scheibe
P_{Krit}	Verzweigungslast

Auf der sicheren Seite liegend werden Modifikationsfunktionen für die Gesamtheit der Berechnungsergebnisse (Randbedingungen nach Tabelle 15) erstellt. Dabei handelt es sich um die untere Einhüllende aller Datenpunkte ohne statistischen Anspruch (vgl. Abbildung 59; Gleichungen (75) bis (77)).

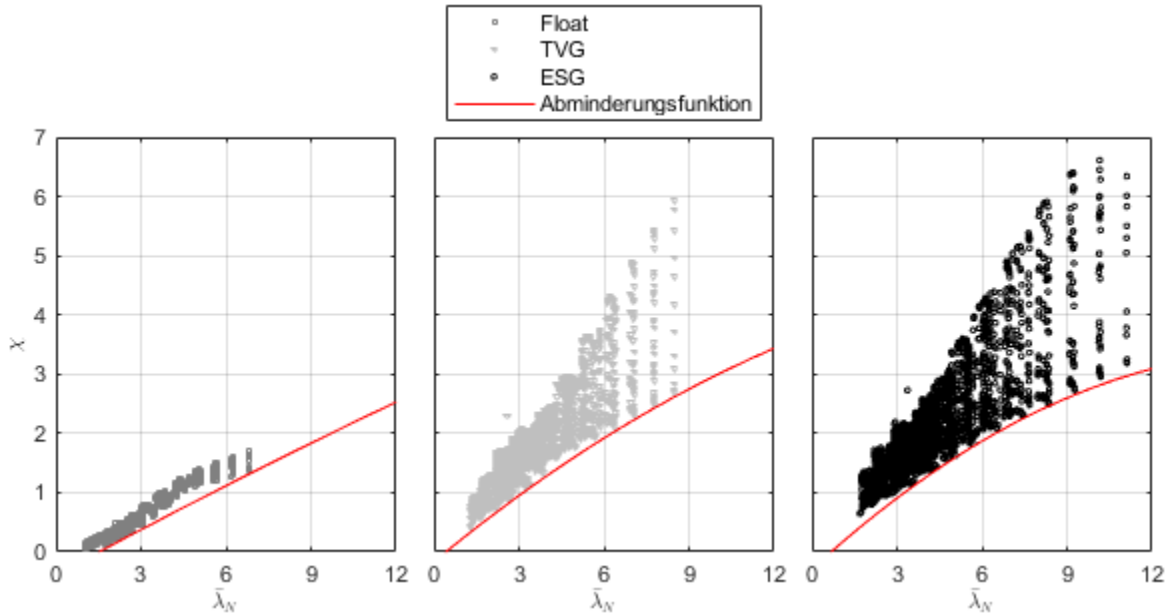


Abbildung 59: Modifikationsfunktionen für Glasarten auf Basis der Randbedingungen nach Tabelle 15

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}0; 6{,}8] \qquad \chi_{Float} = -0{,}0013\,\bar{\lambda}^2 + 0{,}2591\,\bar{\lambda} - 0{,}3911 \tag{75}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}3; 8{,}5] \qquad \chi_{TVG} = -0{,}0079\,\bar{\lambda}^2 + 0{,}3947\,\bar{\lambda} - 0{,}1639 \tag{76}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}7; 11{,}1] \qquad \chi_{ESG} = -0{,}0130\,\bar{\lambda}^2 + 0{,}4381\,\bar{\lambda} - 0{,}2905 \tag{77}$$

Für die Erstellung von Modifikationsfunktionen eignet sich eine Unterteilung entsprechend der Lagerbedingungen AK und BK (Randbedingungen nach Tabelle 13) wie Abbildung 60 für die Lagerung AK = 50mm & BK = 100mm mit den dazugehörigen Modifikationsfunktionen nach Gleichung (78) bis (80) zeigt.

Die Ermittlung dieser Modifikationsfunktionen erfolgt jeweils durch den Fit einer Kurve, der die Datenpunkte zunächst mit der geringsten Abweichung im quadratischen Mittel abbildet. Auf Basis der erzeugten Kurve wird dann die Vorhersage einer Kurve auf Basis der Student T Verteilung generiert, die 99,99% aller Datenpunkte einschließt. Die Vorstellung weiterer Modifikationsfunktionen erfolgt im Anhang.

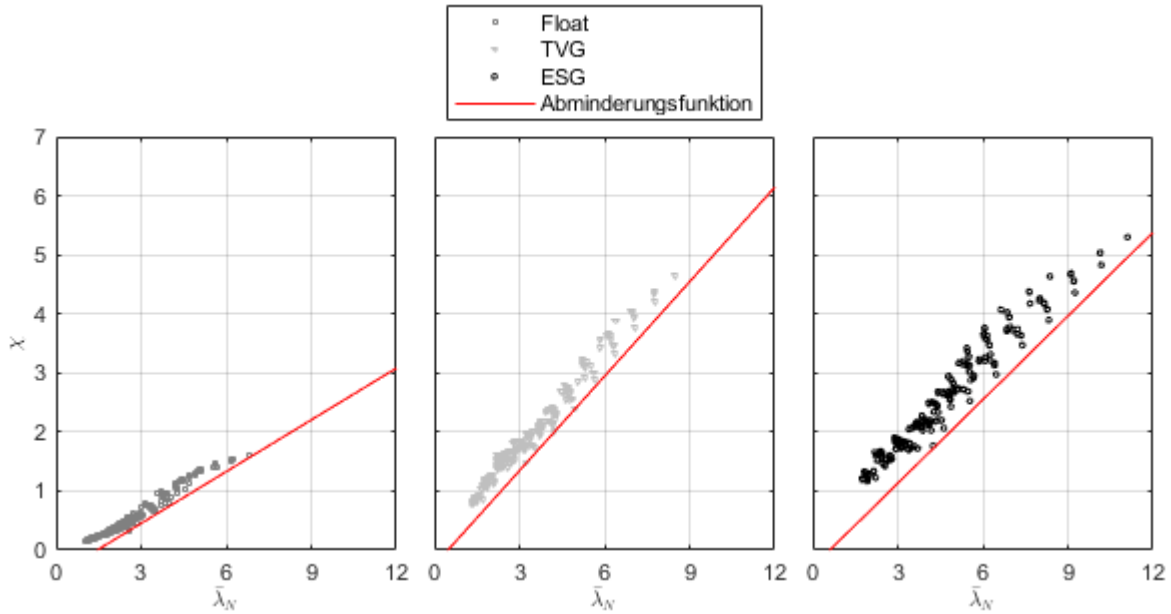


Abbildung 60: Modifikationsfunktionen für Glasarten für AK = 50mm & BK = 100mm

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}0; 6{,}8] \qquad \chi_{Float} = 0{,}2920\,\bar{\lambda} - 0{,}4234 \tag{78}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}3; 8{,}5] \qquad \chi_{TVG} = 0{,}4722\,\bar{\lambda} - 0{,}2859 \tag{79}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}7; 11{,}1] \qquad \chi_{ESG} = 0{,}5332\,\bar{\lambda} - 0{,}2552 \tag{80}$$

Der Nachweis gilt als erfüllt wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$P_d \leq P_{R,d} \tag{81}$$

$$P_{R,d} = P_{Krit}\ \chi \tag{82}$$

mit:

P_d	Diagonal resultierende Druckkraft (Designwert)
P_{Krit}	Verzweigungslast
χ	Modifikationsfaktor entsprechend Glasart und Lagerbedingungen

Ursachen für die Abweichungen in der Bemessung im Vergleich zu den Methoden nach Englhardt und Wellershoff liegen zum einen an den dort angesetzten Vorverformungen. Englhardt setzt Imperfektionen von L/2000 der kürzeren Scheibenkante an und Wellershoff ein konstantes Stichmaß von 3,5mm. Zum anderen weicht das in (Wellershoff, 2006) beschriebene System deutlich von dem hier behandelten ab (abweichende Randbedingungen der Lagerung).

8.3.2.2 Finite Element Methode

In Anlehnung an DIN EN 1993-1 Teil 5 und 6 (2010-12) kann eine Bemessung mittels der FEM erfolgen. Bei der Durchführung ist entsprechend Kapitel 2.3.4 und 5.2 vorzugehen. Dabei ist im Besonderen auf die Wahl einer geeigneten Vorverformung zu achten. Für die Amplitude der Imperfektion wird L/333 der längeren Scheibenkante gemäß den Produktnormen von TVG und ESG empfohlen (vgl. Kapitel 3.4). Bei genauerer Kenntnis der Imperfektion, z.B. durch Vermessung der Verglasung, kann diese in der FEA eingesetzt und entsprechende Widerstandswerte ermittelt werden. Des Weiteren ist sicherzustellen, dass das Modell das System hinreichend abbildet (Randbedingungen, Netzqualität etc.). Weiter dürfen für die Ermittlung des Widerstandes örtliche Spannungswerte die Grenzspannungen nicht überschreiten. (vgl. (DIN EN 1993-1-5, 2010) & (DIN EN 1993-1-6, 2010))

8.3.3 Interaktion

Die Beurteilung des Systems (vgl. Kapitel 3) bei gleichzeitiger Scheiben- und Plattenbeanspruchung erfolgt durch ein Interaktionsdiagramm (Abbildung 61) auf Basis der Ergebnisse aus Kapitel 5.2.6. In diesem Diagramm beschreiben die Koordinatenachsen das Verhältnis (bezogener Wert) von aufgebrachter zu maximaler Belastung (Scheibenbeanspruchung = x-Achse; Plattenbeanspruchung = y-Achse). Die Grenzspannungen für Floatglas, TVG sowie ESG entsprechen Kapitel 8.2.

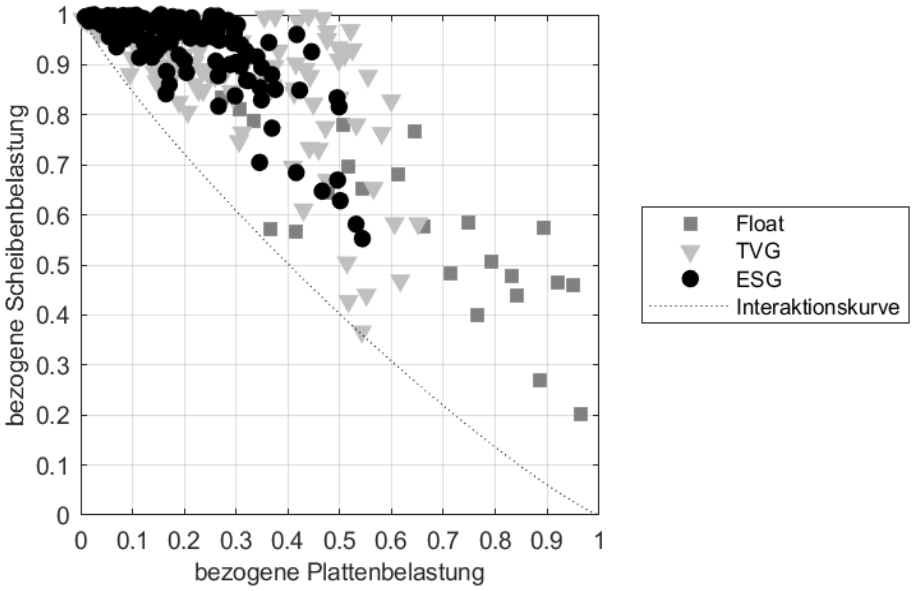


Abbildung 61: Interaktionsdiagramm bei gleichzeitiger Scheiben- und Plattenbeanspruchung

Anhand des Diagramms lässt sich eine Interaktionskurve mit allgemeiner Gültigkeit ableiten. Es ist zu erkennen, dass die Kurve leicht unterlinear verläuft. Die Bemessung des Systems unter kombinierter Beanspruchung aus Scheiben- und Plattenbelastung kann durch Gleichung (83) erfolgen.

$$\left(\frac{P_{E_d,Scheibe}}{P_{R_d,Scheibe}}\right)^{1,15} + \left(\frac{q_{E_d,Platte}}{q_{R_d,Platte}}\right)^{1,15} \leq 1 \tag{83}$$

mit:

$P_{E_d,Scheibe}$ Bemessungswert Scheibenbeanspruchung

$P_{R_d,Scheibe}$ maximale Beanspruchbarkeit in Scheibenebene

$q_{E_d,Platte}$ Bemessungswert Plattenbeanspruchung

$q_{R_d,Platte}$ maximale Beanspruchbarkeit senkrecht zur Scheibenebene

8.4 Mehrscheibenisolierglas

Das Bauprodukt Mehrscheibenisolierglas wird in der Normenreihe DIN EN 1279 geregelt. Für den Umgang mit Mehrscheibenisolierglas existiert eine Richtlinie des Bundesverbands Flachglas (BF-Merkblatt 002/2008). Die Bemessung von Isolierverglasungen erfolgt nach DIN

18008 Teil 1 und 2 (2010-12). Dort sind die anzusetzenden Lasten und Lastfallkombinationen definiert. So darf beim Nachweis von intaktem Mehrscheibenisolierglas die günstige Wirkung der Kopplung der Scheiben über das im Scheibenzwischenraum, ggf. in mehreren Scheibenzwischenräumen, eingeschlossene Gasvolumen berücksichtigt werden. Ungünstige Wirkungen der Kopplung der Scheiben müssen berücksichtigt werden.

Für den Einsatz von Mehrscheibenisolierglas in aussteifender Funktion (vgl. Kapitel 3.2) wird an dieser Stelle eine mehrstufige Bemessung vorgeschlagen. Demnach ist eine Mehrscheibenisolierverglasung wie bislang nach DIN 18008 Teil 1 und 2 (2010-12) gefordert zu bemessen. Die belastete Verglasung der Isolierglaseinheit muss zusätzlich als Monoscheibe unter Berücksichtigung der vollen Windbelastung nachgewiesen werden. Dieser Ansatz erscheint sinnvoll, da durch Scheibenbruch einzelner Gläser der Isolierverglasung die Windbelastung in vollem Umfang auf die zur Aussteifung angesetzte Verglasung einwirken kann. Dies gilt insbesondere, da der Bruch einzelner Scheiben einer Isolierglaseinheit zunächst keine massive Beeinträchtigung der Behaglichkeit darstellt und aus diesem Grund unter Umständen auch über längere Zeiträume besteht. Bei der Bemessung einer intakten Isolierglaseinheit liegt dieser Ansatz zudem auf der sicheren Seite. Eine Überlagerung der Bemessungsvarianten wird nicht erforderlich, da die maximalen Beanspruchungen aus der Klimabelastung gegenüber denen aus einer aussteifenden Anwendung gering sind und an verschiedenen Positionen auf der Glasoberfläche auftreten.

In einem zurzeit laufenden Monitoring-Projekt im HUF-Haus-Dorf in Hartenfels wird der Einsatz des in Kapitel 3 beschriebenen Systems messtechnisch überwacht. Auf Grundlage der dabei erhobenen Daten können nach einem ausreichenden Beobachtungszeitraum möglicherweise Bemessungsansätze mit höherer Ausnutzung abgeleitet werden.

8.5 Gebrauchstauglichkeit

Im Bauwesen beschreibt die Gebrauchstauglichkeit das Attribut eines Systems, dass dieses für den beabsichtigten Einsatz uneingeschränkt nutzbar ist. Aus diesem Grund werden für das in dieser Arbeit untersuchte System die nachfolgend angeführten Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit eingehalten.

Die Verformung des Verbundelementes (Verglasung, Konnektor und Rahmen) ist in Scheibenebene zu beschränken. In Anlehnung an (DIN EN 1995-1-1/NA, 2013) wird deshalb eine Begrenzung der horizontalen Verformung in der Ebene von L/100 gefordert.

Verformungen orthogonal zur Scheibenebene sind analog nach (DIN 18008-2, 2010) zu beschränken. Demnach muss infolge Sehnenverkürzung eine Mindestauflagerbreite von 5mm verbleiben, selbst wenn die gesamte Sehnenverkürzung auf nur ein Auflager angesetzt wird. Höhere Anforderungen der Isolierglashersteller an die Durchbiegungsbegrenzung sind einzuhalten.

8.6 Ausfall einer Verglasung

Für das vorliegende System muss aufgrund des spröden Materialverhaltens von Glas mit einem plötzlichen Versagen der ausfachenden Verglasung gerechnet werden. Besonders im Einsatz als Primärtragwerk gilt es daher ein Sicherheitskonzept zu entwerfen, welches einen Kollaps des Gesamttragwerks verhindert. Nachfolgend werden zwei Varianten vorgestellt, die dies sicherstellen.

Variante 1 sieht vor, die Steifigkeit des Rahmens ohne Verglasung anzusetzen. Je nach dessen Ausführung besitzt der Rahmen unter Umständen einen ausreichenden Widerstand gegen die in diesem Fall anzusetzende (reduzierte) Einwirkung. Dies ist allerdings in erster Linie nur für massive Rahmenkonstruktionen anwendbar, die durch den Ansatz der Verglasung als aussteifendes Element nicht zwingend erforderlich sind.

Die zweite Variante sieht ein redundantes Konzept für das Gesamttragwerk vor. In der Technik wird mit Redundanz die zusätzliche Existenz einer funktional gleichen beziehungsweise vergleichbaren Ressource eines Systems bezeichnet. Im Fall eines störungsfreien Betriebs ist diese prinzipiell nicht nötig. Sie kann zur Erhöhung der Ausfallssicherheit dienen. Für das hier vorgestellte System bedeutet das, dass beispielsweise anstatt der notwendigen drei aussteifenden Wände (Verbundelement) und Deckenscheibe für ein Wohnhaus, vier aussteifende Wände und Deckenscheibe angeordnet werden. Dabei gilt, dass sich die Ebenen der Wände nicht in einem Punkt schneiden oder parallel verlaufen (Grundregeln für die Aussteifung im Bauwesen müssen Beachtung finden, wie zum Beispiel kraftschlüssiger Verbund zwischen Wandscheiben und Deckenscheibe). Bei dem Ausfall eines Elementes besteht dann keine Gefahr eines Kollapses, solange die verbleibenden Elemente einen ausreichenden Widerstand gegen die in diesem Fall anzusetzende (reduzierte) Einwirkung besitzen.

An dieser Stelle muss festgehalten werden, dass zur Bemessung beider Ausfallszenarien der Ansatz der außergewöhnlichen Bemessungssituation nach DIN EN 1990 (2010-12) gilt. Denn

die dort angeführte Definition lautet: *„Außergewöhnliche Bemessungssituation: Eine Bemessungssituation, die außergewöhnliche Bedingungen für das Tragwerk einbezieht; z. B. Brand, Explosion, Anprall oder örtliches Versagen.“* Durch den Ausfall eines gesamten Verbundelements liegt eine außergewöhnliche Bedingung durch örtliches Versagen vor, da eine ausreichende Tragfähigkeit durch die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Nachweise sichergestellt ist und es unter Einhaltung der hier vorgestellten Sicherheitskonzepte nicht zum Kollaps des Gesamttragwerks kommt. Grundsätzlich ist die beschädigte Komponente unverzüglich Instand zu setzen oder durch entsprechende Maßnahmen zu sichern.

Im Massivbau existiert ein vergleichbares Sicherheitskonzept. Durch den Einsatz eines über den Umfang verlaufenden Ringankers darf angenommen werden, dass der zufällige Ausfall eines einzelnen Traggliedes nicht zum Versagen des Gesamttragwerks führt.

Für die Anwendung der außergewöhnlichen Bemessungssituation beim Ausfall eines Glaselementes wird ebenfalls auf DIN 18008-4 (2013-07) verwiesen. Dort erfolgt die Forderung des Lastabtrages (Holmlast; Kategorie B) durch benachbarte Elemente beim Ausfall einer Glasbrüstung. Dieses Ereignis darf laut Norm als außergewöhnliche Einwirkung behandelt werden. Überdies ist auch nach DIN 18008-5 (2013-07) der Ansatz der Einwirkungen nach der außergewöhnlichen Bemessungssituation zulässig. Hier gilt die Bemessungssituation allerdings für die verbleibenden Scheiben bei einem Ausfall der obersten Scheibe einer begehbaren Verglasung.

Aufgrund der Normen für die Bemessung von Glas im konstruktiven Ingenieurbau (DIN 18008) und der Definition nach DIN EN 1990 (2010-12) für die außergewöhnliche Bemessungssituation, kann die Ermittlung der Einwirkungen für den Ausfall eines Elementes deshalb nach Gleichung (84) (vgl. DIN EN 1990/NA:2010-12 Gleichung 6.11c) erfolgen.

$$E_{dA} = \sum_{J\geq 1} \gamma_{GA,J}\ E_{Gk,J} + E_{Pk} + E_{Ad} + \gamma_{QA,1}\,\psi_{1,1}\,E_{Qk,1} + \sum_{L>1} \gamma_{QA,L}\ \psi_{2,L}\,E_{Qk,L} \tag{84}$$

Die Teilsicherheitsbeiwerte γ sind DIN EN 1990/NA:2010-12 Tabelle NA.A.1.2(B) und die ψ-Werte DIN EN 1990/NA:2010-12 Tabelle NA.A.1.1 zu entnehmen.

8.7 Ableitung äußerer Horizontalkräfte auf einzelne Wandscheiben

Die auf einzelne Scheiben entfallenden Horizontalkräfte können analog zum Massiv-, Holz und Mauerwerksbau ermittelt werden. Die Lastverteilung ist aufgrund der Anordnung der aussteifenden Elemente im Grundriss und in Abhängigkeit ihrer Steifigkeit infolge des Lastangriffs (in der Regel stellt Wind die maßgebende Einwirkung dar) zu berechnen. Unter dem Ansatz von vereinfachten Annahmen bzw. Näherungen (z.B. Torsionssteifigkeit von Einzelscheiben entfällt) kann dies durch statisch bestimmte Systeme hinreichend genau erfolgen. Grundsätzlich wird dabei zwischen Bauwerken unterschieden, die nur Verschiebungen in Richtung der Hauptachsen erfahren und solche, bei denen eine Verdrehung durch seitliche Torsion möglich ist. In jedem Falle ist für die aussteifenden Bauteile eine ausreichende Steifigkeit nachzuweisen.

8.8 Berücksichtigung von vertikalen Schiefstellungen

Die Auswirkungen von vertikalen Schiefstellungen der Rahmenkonstruktion in Scheibenebene sind bei einer Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu berücksichtigen. Infolge dieser Imperfektionen resultieren zusätzliche horizontale Beanspruchungen aus vertikalen Lasten. Da die Glasscheibe lediglich als ausfachendes Element in einer Rahmenkonstruktion angeordnet wird, erfolgt an dieser Stelle ein Verweis auf die anzusetzenden Schiefstellungen entsprechend den bautechnischen Regelungen des Rahmenwerkstoffes.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Wesentliche Teile dieser Arbeit entstanden im Rahmen des Forschungsprojektes „Holz-Glas-Fachwerk“ (Projektpartner: HUF HAUS GmbH und Co. KG und Glas Schneider GmbH und Co. KG), das von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert wurde (Förderprogramm: Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand; *kurz* ZIM).

Aufgrund der vorgestellten Ergebnisse kann die Nutzung von Glas als aussteifendes Element zufolge einer konzentrierten Lasteinleitung im Eckbereich nachgewiesen werden. Das entwickelte System besticht dabei durch seine einfache, schnelle und kostengünstige Umsetzung.

In einem ersten Schritt wurde die Belastbarkeit der Glaskante experimentell und numerisch untersucht. Als Einflussgrößen auf die Belastbarkeit konnten verschiedene Parameter identifiziert werden. Neben geometrischen Eigenschaften der Verglasung zählen darunter die Oberflächenbeschaffenheit der Kantenbearbeitung, der Werkstoff der Lagerung (Konnektor) sowie die Position (Randabstand) und geometrischen Abmessungen (Länge des Konnektors) der Lagerung.

Die verwendete Lagerung der Verglasung entspricht der in der Baupraxis gängigen Variante für eine geklotzte Festverglasung. Demnach wird die Verglasung in den vier Scheibenecken jeweils durch zwei Klötze gelagert. Für die Lagerung kommt der Werkstoff POM-C zum Einsatz. Für dieses teilkristalline Polymer wurden Zeit-Temperartur-Beziehungen ermittelt.

Es wurde ein Konnektor entwickelt, der in der Lage ist, als Bindeglied zwischen Verglasung und Rahmenkonstruktion eine kraftschlüssige Verbindung zu gewährleisten und Toleranzen ausgleichen kann.

Unter Verwendung der zuvor beschriebenen Lagerung erfolgte in einem weiteren Schritt die experimentelle und numerische Untersuchung des Stabilitätsproblems der Verglasung. Ergänzend wird die Herleitung einer analytischen Näherungslösung für das Scheibenproblem entwickelt. Zur Abschätzung der Verzweigungslast erfolgt zusätzlich die Ableitung einer Gleichung aus den Ergebnissen der numerischen Untersuchung.

Durch die Ausbildung einer Druckdiagonalen wird die in einem Rahmen angeordnete ausfachende Verglasung zur Aussteifung des Systems aktiviert. Für das im Zuge des Forschungsprojektes entwickelte „Verbundsystem“ erfolgt der Einsatz des Werkstoffs Holz für den Rahmen. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten von Holz und Glas weisen eine geringe Abweichung voneinander auf. Daher eignet sich die Kombination dieser Werkstoffe hervorragend um Zwangsspannungen infolge unterschiedlicher Temperaturausdehnung zu minimieren. Die Verbindungen der Rahmenkonstruktion wurden den Anforderungen entsprechend ertüchtigt, um die Lasteinleitung in die Verglasung und den Lastabtrag in den Grund sicherzustellen.

In einem letzten Schritt wurden ein Bemessungskonzept für die Nutzung von Glas als Primärtragwerk im Einsatz als aussteifendes Element entwickelt und auf der sicheren Seite liegende Ansätze für ein redundantes Sicherheitskonzept vorgestellt.

Im Falle des Ausfalls eines aussteifenden Elementes gewährleistet das redundante Sicherheitskonzept die Standsicherheit, ohne dass ein Kollaps des Gesamttragwerks eintritt.

Das Bemessungskonzept beruht auf dem Ansatz von Teilsicherheitsbeiwerten analog zu den aktuell im Bauwesen gültigen Bemessungskonzepten DIN 18008 und EC 0. Für die kombinierte Beanspruchung in (Scheibe) und orthogonal (Platte) zur Scheibenebene wird eine Interaktionskurve vorgestellt. Für das Versagen infolge Beulen werden Modifikationsfunktionen für die Verzweigungslast eingeführt. Diese Modifikationsfunktionen basieren auf der Beulschlankheit infolge der geometrischen Randbedingungen.

9.2 Ausblick

Im Zuge des begleitenden Forschungsprojektes wurde ein Monitoring-Projekt im HUF-Dorf in Hartenfels realisiert. Bei diesem Objekt erfolgt die Aussteifung ausschließlich über Verglasungen in der Fassade (Abmessungen (b x h) jeweils 2280mm x 2180mm). Eine von insgesamt acht angeordneten aussteifenden Verglasungen wird mittels Messtechnik überwacht um Informationen über die sich einstellenden Lastpfade durch Windereignisse zu sammeln. Zusätzlich zeichnen Sensoren den Temperaturverlauf auf um den Einfluss des Energieeintrages durch Absorption in die Mittelscheibe der Dreifachisolierverglasung zu berücksichtigen. Bezogen auf bundesweiten Einsatz für das entwickelte System ist die Tragfähigkeit flächiger Bauteile aus Glas unter Erdbebenbelastung zu untersuchen. Durch eine mehraxiale dynamische Einwir-

kung können unter Umständen Resonanzfälle eintreten bei denen die Verglasung deutlich früher versagen würde. In diesem Zusammenhang ist besonders die dämpfende Wirkung des Scheibenzwischenraums beim Einsatz von Mehrisolierglasscheiben zu untersuchen.

Abbildung 62: Richtfest des Monitoring-Projektes im HUF-Dorf in Hartenfels

Allem voran wird weiterer Forschungsbedarf in der Ausarbeitung redundanter Sicherheitskonzepte gesehen. Da die Verglasung beim Einsatz als aussteifendes Element die Funktion des Primärtragwerks einnimmt, muss grundsätzlich eine ausreichende Sicherheit gegen einen Kollaps des Gesamtsystems gewährleistet sein. Dazu bedarf es eines (Sicherheits-) Konzepts, das bauaufsichtliche Anforderungen erfüllt und technisch sowie wirtschaftlich umsetzbar bleibt. Maßgebend ist hierbei das ausschließlich elastische Werkstoffverhalten von Glas, welches keine plastischen Verformungen erlaubt und ohne Vorankündigung versagt.

Wenn alternative als die hier untersuchten Lasteinleitungen Verwendung finden sollen, müssen weitere experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, anhand denen wiederum numerische Modelle verifiziert oder validiert werden können. Die in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen können hierbei als Grundlage herangezogen werden.

Grundsätzlich besitzt die Übertragung der in dieser Arbeit untersuchten Lagerung auf andere Scheibengeometrien, wie ein Trapez oder beliebige Vierecke, Potential für die Aussteifung von Strukturen.

Abschließend wird ein möglicher Anwendungstransfer des Systems angeführt. Demnach könnten verglaste Brücken, die immer häufiger als Verbindungselement zwischen Gebäuden angeordnet werden, mit Hilfe eines Glasfachwerks ausgebildet werden. Dabei wäre das ohnehin vorhandene Glas in der Fassade zum Lastabtrag anzusetzen. Bei einer solchen Nutzung von Glas als Primärtragwerk sind allerdings schärfere Forderungen hinsichtlich des Ausfalls eines Elementes zu stellen. Im Vergleich zur Aussteifung von Gebäuden können sich bei einer Brücke keine redundanten Lastpfade ausbilden.

Literaturverzeichnis

Belis, J., Mocibob, D., Luible, A. & Vandebroeck, M., 2011. *On the size and shape of initial out-of-plane curvatures in structural glass components.* Construction and Building Materials - Volume 25, Issue 5: Elsevier.

Brendiek, J., 2016. *Experimentelle Ermittlung von Reibwerten an ausgewählten Werkstoffen.* Bachelorarbeit: Universität der Bundeswehr München.

Bucak, Ö., 1999. *Glas im konstruktiven Ingenieurbau.* S.515 - 643 Hrsg. Stahlbaukalender: Ernst und Sohn.

Buddenberg, S., Hof, P., Beyer Jörg & Oechsner, M., 2015. *Dauerhaftigkeit und Dimensionierung des Randverbundes von Mehrscheibenisolierglas in Abhängigkeit der Klimalast bei Zweifach- und Dreifachisolierglas - DuraSeal.* s.l.:Schlussbericht zu IGF-Vorhaben .

Bundesinnungsverband des Glaserhandwerks Hrsg., 2009. *Technische Richtlinien des Glaserhandwerks Nr.3 - Glaserarbeiten - Klotzung von Verglasungseinheiten.* 7. Hrsg. s.l.:Verlagsanstalt Handwerk.

CAMPUS(R), 2017. *CAMPUSplastics.* [Online] Available at: http://www.campusplastics.com/ [Zugriff am 22 03 2017].

Czichos, H. & Habig, K.-H., 2015. *Tribologie-Handbuch.* 4. Hrsg. s.l.:Springer Vieweg.

Deutsches Institut für Bautechnik, 2017. *Informationen zu den neuen Bescheidtypen.* s.l.:s.n.

DIN 1249-10, 1990. *Flachglas im Bauwesen – Chemische und physikalische Eigenschaften.* s.l.:s.n.

DIN 1249-11, 1986. *Flachglas im Bauwesen - Glaskanten - Begriff, Kantenformen und Ausführung.* s.l.:s.n.

DIN 18008-1, 2010. *Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen.* s.l.:s.n.

DIN 18008-2, 2010. *Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen.* s.l.:s.n.

DIN EN 12150-1, 2015. *Glas im Bauwesen – Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas – Teil 1: Definition und Beschreibung.* s.l.:s.n.

DIN EN 12488, 2016. *Glas im Bauwesen - Empfehlungen für die Verglasung - Verglasungsgrundlagen für vertikale und geneigte Verglasung.* s.l.:s.n.

DIN EN 12512, 2005. *Holzbauwerke – Prüfverfahren – Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln.* s.l.:s.n.

DIN EN 1288-3, 2000. *Glas im Bauwesen - Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Teil 3: Prüfung von Proben bei zweiseitiger Auflagerung (Vierschneiden-Verfahren).* s.l.:s.n.

DIN EN 1863-1, 2012. *Glas im Bauwesen – Teilvorgespanntes Kalknatronglas – Teil 1: Definition und Beschreibung.* s.l.:s.n.

DIN EN 1991-1-4, 2010. *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten.* s.l.:s.n.

DIN EN 1993-1-5, 2010. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile.* s.l.:s.n.

DIN EN 1993-1-6, 2010. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen.* s.l.:s.n.

DIN EN 1995-1-1/NA, 2013. *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.* s.l.:s.n.

DIN EN 1995-1-1, 2010. *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.* s.l.:s.n.

DIN EN 1995-2 , 2010. *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken.* s.l.:s.n.

DIN EN 572-1, 2012. *Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas – Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften.* s.l.:s.n.

DIN EN 572-2, 2012. *Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas – Teil 2: Floatglas.* s.l.:s.n.

DIN EN 572-8, 2012. *Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas – Teil 8: Liefermaße und Festmaße.* s.l.:s.n.

DIN EN ISO 12543-5, 2011. *Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 5: Maße und Kantenbearbeitung.* s.l.:s.n.

DIN EN ISO 14439, 2007. *Glas im Bauwesen - Anforderungen für die Verglasung - Verglasungsklötze.* s.l.:s.n.

DIN EN ISO 6721-1, 2011. *Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundlagen.* s.l.:s.n.

DIN EN ISO 899-1, 2015. *Kunststoffe - Bestimmung des Kriechverhaltens - Teil 1: Zeitstand-Zugversuch.* s.l.:s.n.

Ebert, J., 2014. *Einleitung hoher Lasten in Glaskanten - Ein Beitrag zum Einsatz von Kunststoffen als Klotzungsmaterial.* Dissertation: Technische Universität Dresden.

Ehrenstein, G. W. & Pongratz, S., 2007. *Beständigkeit von Kunststoffen.* Hanser Verlag: s.n.

Eichhorn, N., 2017. *Lagerung der Glaskante - Einfluss von Kantenausbildung und Position der Lasteinleitung auf die Spannungsverteilung.* Bachelorarbeit: Universität der Bundeswehr München.

Englhardt, O., 2007. *Flächentragwerke aus Glas - Tragverhalten und Stabilität.* Dissertation: Universität für Bodenkultur Wien.

Erhard, G., 2008. *Konstruieren mit Kunststoffen.* 4. Hrsg. s.l.:Hanser Verlag.

Feldmann, M. et al., 2014. *JRS Scientific and Policy Reports - Guidance for European Structural Design of Glass Components.* s.l.:Joint Research Centre.

Feldmeier, F., 2012. *Bemessung von Dreifach-Isolierglas.* S.75-80 Hrsg. Stahlbau: Ernst und Sohn.

Feldmeier, F., Skora, T., Nöske, F. & Wallersheim, L., 2008. *Holzbau der Zukunft - Teilprojekt 05 - Leichte Vorhangfassaden aus Holz Konstruktionsgrundlagen für eine definierte Feuchteabfuhr.* s.l.:Schlussbericht Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst im Rahmen der High Tech Offensive Bayern.

Gilbert, M., 2017. *Brydson's Plastics Materials.* 8. Hrsg. s.l.:Elsevier Verlag.

Girkmann, K., 1986. *Flächentragwerke - Einführung in die Elastostatik der Scheiben, Platten, Schalen und Faltwerke.* 6. Hrsg. s.l.:Springer Verlag.

Grellmann, W. & Seidler, S., 2015. *Kunststoffprüfung.* 3. Hrsg. s.l.:Hanser Verlag.

Haese, A., 2013. *Beitrag zur Bemessung scheibenbeanspruchter Stahl-Glas-Elemente.* Dissertation: Universität der Bundeswehr München.

Hemschenherm, S., 2015. *Versuchstechnische und numerische Bestimmung und Validierung der Materialparameter von Klotzungsmaterialien.* Masterarbeit: Universität der Bundeswehr.

Hiltscher, R. & Florin, G., 1963. Spalt- und Abrisszugspannungen in rechteckigen Scheiben, die durch eine Last in verschiedenem Abstand von ihrer Scheibenecke belastet sind. In: *Bautechnik 40 (12).* s.l.:Ernst & Sohn, pp. 401-408.

Huveners, E. M., 2009. *Circumferentially Adhesive Bonded Glass Panes for Bracing Steel Frames in Facades.* Dissertation: University of Technology Eindhoven.

Kaiser, W., 2006. *Kunststoffchemie für Ingenieure.* 1. Hrsg. s.l.:Hanser Verlag.

Klingmüller, O. & Bourgund, U., 1992. *Sicherheit und Risiko im konstruktiven Ingenieurbau.* 1. Hrsg. s.l.:Vieweg & Sohn Verlag.

Klompen, E. T. J., 2005. *Mechanical properties of solid polymers.* Dissertation: Technische Universiteit Eindhoven.

Knothe, K. & Wessels, H., 2008. *Finite Elemente - Eine Einführung für Ingenieure.* 4. Hrsg. s.l.:Springer Verlag.

Kraus, M. & Niederwald, M., 2017. *Generalized collocation method using stiffness matrices in the context of the theory of viscoelasticity (GUSTL).* Heft 372017: Technische Mechanik.

Lion, A., 2007. *Beiträge zur Materialtheorie - Einführung in die lineare Viskoelastizität.* s.l.:Universität der Bundeswehr München.

Lohmeyer, G. C., Bergmann, H. & Post, M., 2005. *Praktische Bauphysik - Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen.* 5. Hrsg. s.l.:Teubner Verlag.

Luible, A., 2004. *Stabilität von Tragelementen aus Glas.* Dissertation: École polytechnique Fédérale de Lausanne.

Marques, S. P. C. & Creus, G. J., 2012. *Computational Viscoelasticity.* s.l.:Springer Verlag.

Mitutoyo, 2003. *SJ-201P Oberflächen-Rauheitsprüfgerät.* Bedienungsanleitung: Mitutoyo.

Mocibob, D., 2008. *Glass Panel under Shear Loading - Use of Glass Envelopes in Building Stabilisation.* Dissertation: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Neumer, D., 2015. *Versuchsprotokoll Aluminiumplatte - Druckversuche an verschiedenenHolzkonnektoren mit verschiedenen Kantengeometrien.* s.l.:ZIM Projekt; Holz-Glas-Fachwerk.

Neumer, D., 2015. *Versuchsprotokoll Modellscheiben - Druckversuche an verschiedenen Kantenbearbeitungen und Lagermaterialien.* s.l.:ZIM Projekt; Holz-Glas-Fachwerk.

Neumer, D., 2015. *Versuchsprotokoll Rahmenecken.* s.l.:ZIM Projekt; Holz-Glas-Fachwerk.

Neumer, D., 2016. *Versuchsprotokoll Großbauteilversuche.* s.l.:ZIM Projekt; Holz-Glas-Fachwerk.

Neumer, D., 2017. *Versuchsprotokoll Konnektor.* s.l.:ZIM Projekt; Holz-Glas-Fachwerk.

Neumer, D. & Siebert, G., 2014. *The influence of the edge design of glass on the edge strength.* s.l., IABSE Madrid.

Neumer, D. & Siebert, G., 2015. *Influence of Edge Design and Location of Load Introduction on the Loadbearing Capacity of Glass.* s.l., IABSE Nara.

Neumer, D. & Siebert, G., 2016. *Timber-glass composite shear wall.* s.l., engineered transparancy Düsseldorf.

Petersen, C., 1982. *Statik und Stabilität der Baukonstruktionen.* 2. Hrsg. s.l.:Vieweg und Sohn Verlag.

Petersen, C., 2013. *Stahlbau.* 4. Hrsg. s.l.:Springer Vieweg Verlag.

Rust, W., 2011. *Nichtlineare Finite Elemente Berechnungen.* 2. Hrsg. s.l.:Vieweg Teubner Verlag.

Schmid, J., Schwarz, B. & Stiller, M., 2009. *Holzbau der Zukunft - Teilprojekt 19 - Konstruktionsgrundlagen für Fenster, Türen und Fassadenelemente aus Verbundwerkstoffen und Holz.* s.l.:Schlussbericht Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst im Rahmen der High Tech Offensive Bayern.

Siebert, G., 1999. *Beitrag zum Einsatz von Glas als tragendes Bauteil im konstruktiven Ingenieurbau.* Dissertation: Technische Universität München.

Siebert, G. & Maniatis, I., 2012. *Tragende Bauteile aus Glas.* 2. Hrsg. s.l.:Ernst und Sohn Verlag.

Siebertz, K., van Bebber, D. & Hochkirchen, T., 2010. *Statistische Versuchsplanung.* 1. Hrsg. s.l.:Springer Verlag.

Timoshenko, S. P. & Woinowski-Krieger, S., 1959. *Theory of Plates and Shells.* 2. Hrsg. s.l.:McGraw-Hill Book Company.

Volk, R., 2013. *Rauheitsmessung Theorie und Praxis.* 2. Hrsg. s.l.:Beuth Verlag.

Wellershoff, F., 2006. *Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebäudehüllen.* Dissertation: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

Westerkamp-Freitag, C., 2013. *Ein Beitrag zur Verwendung von Glas zur Aussteifung von Gebäuden.* Dissertation: Technische Universität Darmstadt.

Wolmir, A. S., 1962. *Biegsame Schalen und Platten.* 1. Hrsg. s.l.:Verlag für Bauwesen Berlin.

Anhang zu Kapitel 4

4.1 Lasteinleitung

4.1.2 Glaskantenform und Konnektormaterial

Tabelle 26: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zur Glaskantenform und Konnektormaterial

Werk-stoff	Glas_ Kante	max. Kraft elastisch [kN]		max. Kraft [kN]		Kriterium Versagen	Bruch Glas	Bemerkung
		Mittel-wert	Stdabw	Mittel-wert	Stdabw			
POM	F_S	20,0	17,3	47,3	32,8	Glas	ja	
	F_C	30,0	0,0	63,3	0,8	Konnetor	nein	
	F_KG	30,0	0,0	65,7	1,8	Konnetor	nein	
	F_KP	30,0	0,0	58,2	0,8	Konnetor	nein	
	E_C	30,0	0,0	63,5	0,3	Konnetor	nein	
	E_KG	30,0	0,0	63,2	0,2	Konnetor	nein	
	E_KP	30,0	0,0	59,8	0,3	Konnetor	nein	
HIT HY 70	F_S	24,0	3,0	34,3	3,5	Konnektor & Glas	ja	
	F_C	20,0	6,2	31,7	1,9	Konnektor	nein	
	F_KG	24,0	5,2	36,5	6,6	Konnektor	nein	
	F_KP	22,0	3,5	29,4	1,9	Konnektor	nein	
	E_C	24,0	4,2	35,1	0,8	Konnektor	nein	
	E_KG	23,0	6,9	29,1	4,4	Konnektor	nein	
	E_KP	19,0	1,7	25,1	2,4	Konnektor	nein	
Buche	F_S	30,0	0,0	45,8	0,4	Konnektor	nein	Muschelbrüche an LE
	F_C	30,0	0,0	41,3	2,0	Konnektor	nein	
	F_KG	30,0	0,0	45,0	1,6	Konnektor	nein	
	F_KP	30,0	0,0	44,0	1,1	Konnektor	nein	
	E_C	30,0	0,0	44,3	1,9	Konnektor	nein	
	E_KG	30,0	0,0	46,6	1,1	Konnektor	nein	
	E_KP	30,0	0,0	43,4	2,6	Konnektor	nein	
S235	F_C	3,0	0,0	>90,0		-	ja	
	F_KG	14,0	9,2	73,5	32,4	Glas	ja	
	F_KP	24,0	5,2	59,4	11,0	- Glas	ja	
	E_C	30,0	0,0	>90,0		-	ja	Risse an LE
	E_KG	30,0	0,0	>90,0		-	nein	
	E_KP	30,0	0,0	>90,0		-	nein	

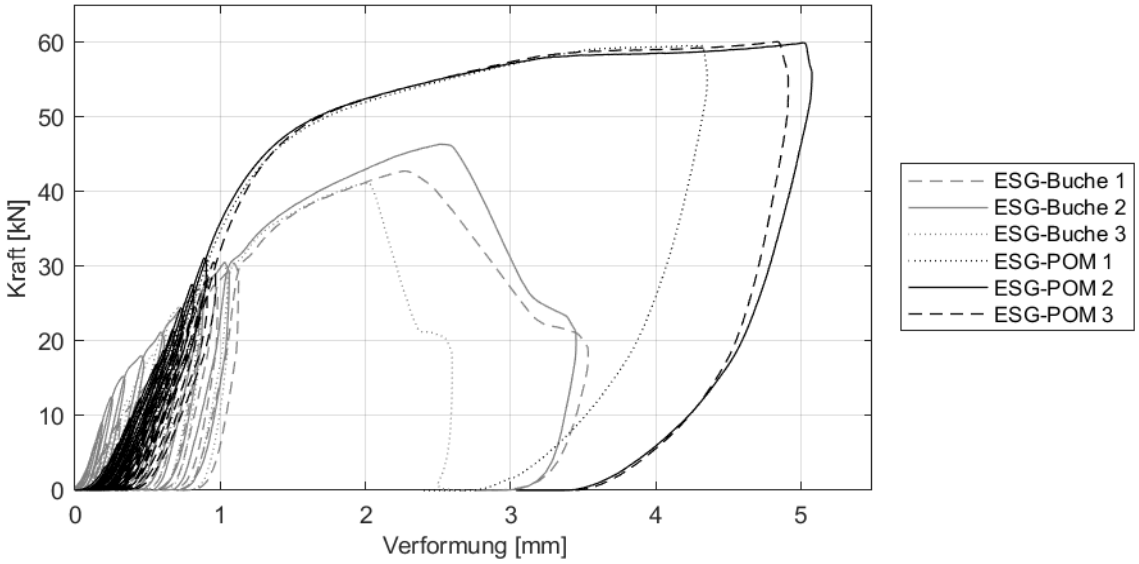


Abbildung 63: Exemplarischer Vergleich der Versuchskurven bei Belastung durch polierte Kante (ESG) und den Konnektormaterialien aus POM und Buche)

4.1.3 Laststellung

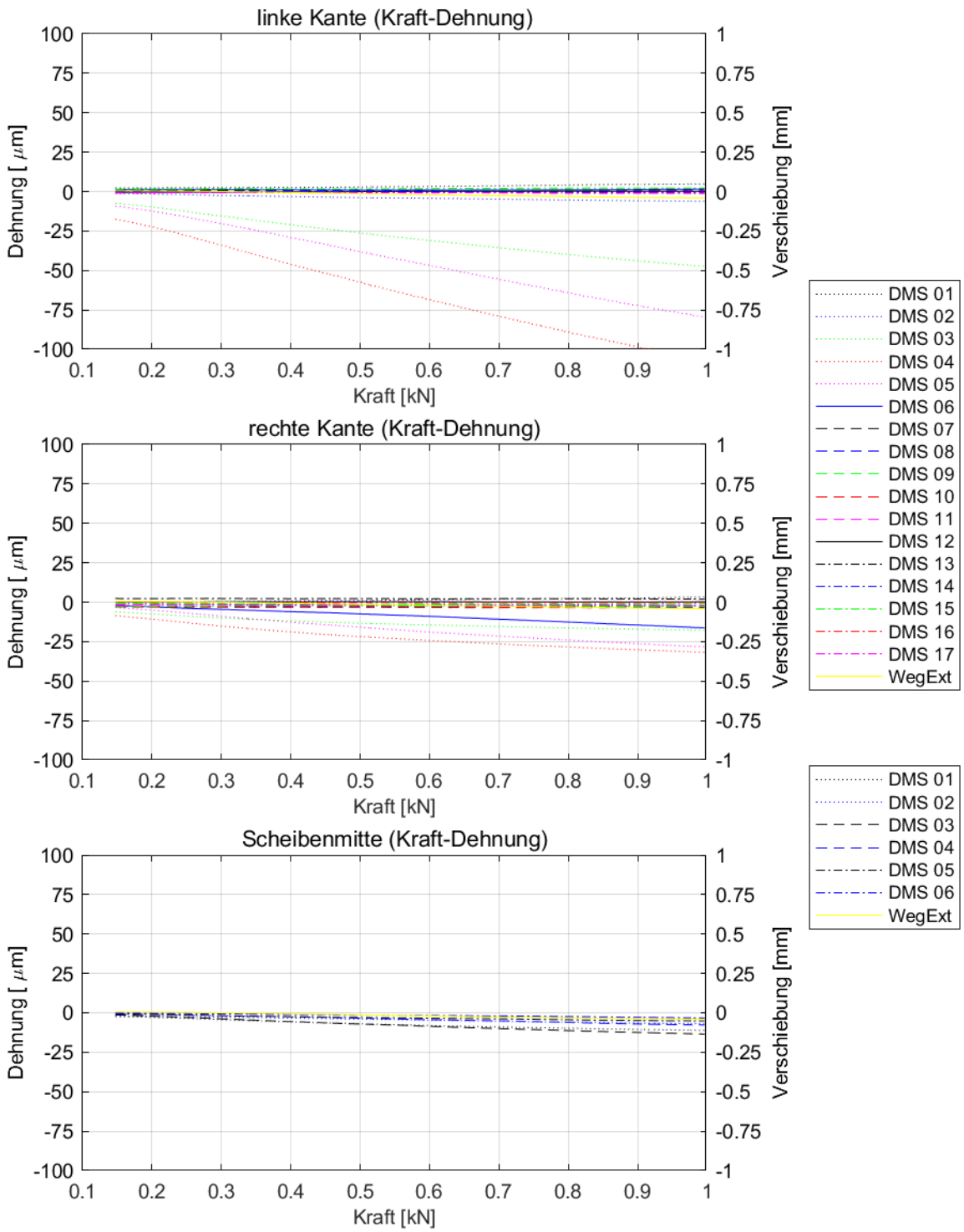


Abbildung 64: Dehnungsverläufe für die Kombination von Stahlkonnektor und C-Schliff (Neigung 0 Grad; AK: 100mm/100mm)

4.1.4 Materialeigenschaften von POM-C

4.1.4.3 Dauerstandfestigkeit

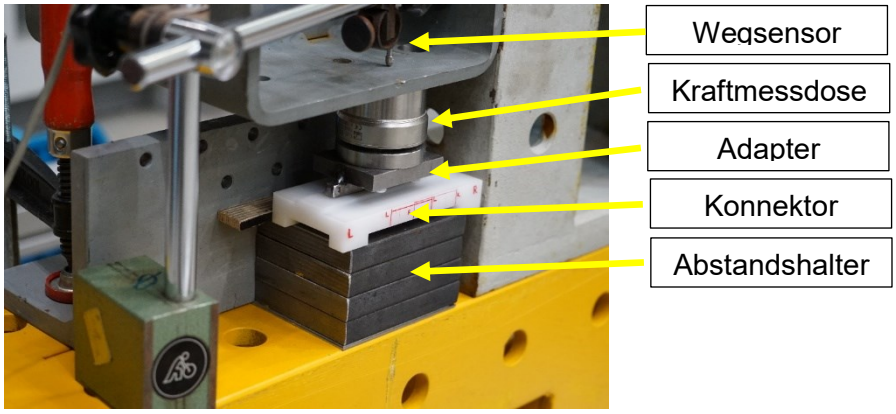


Abbildung 65: Versuchsaufbau der Relaxationsversuche

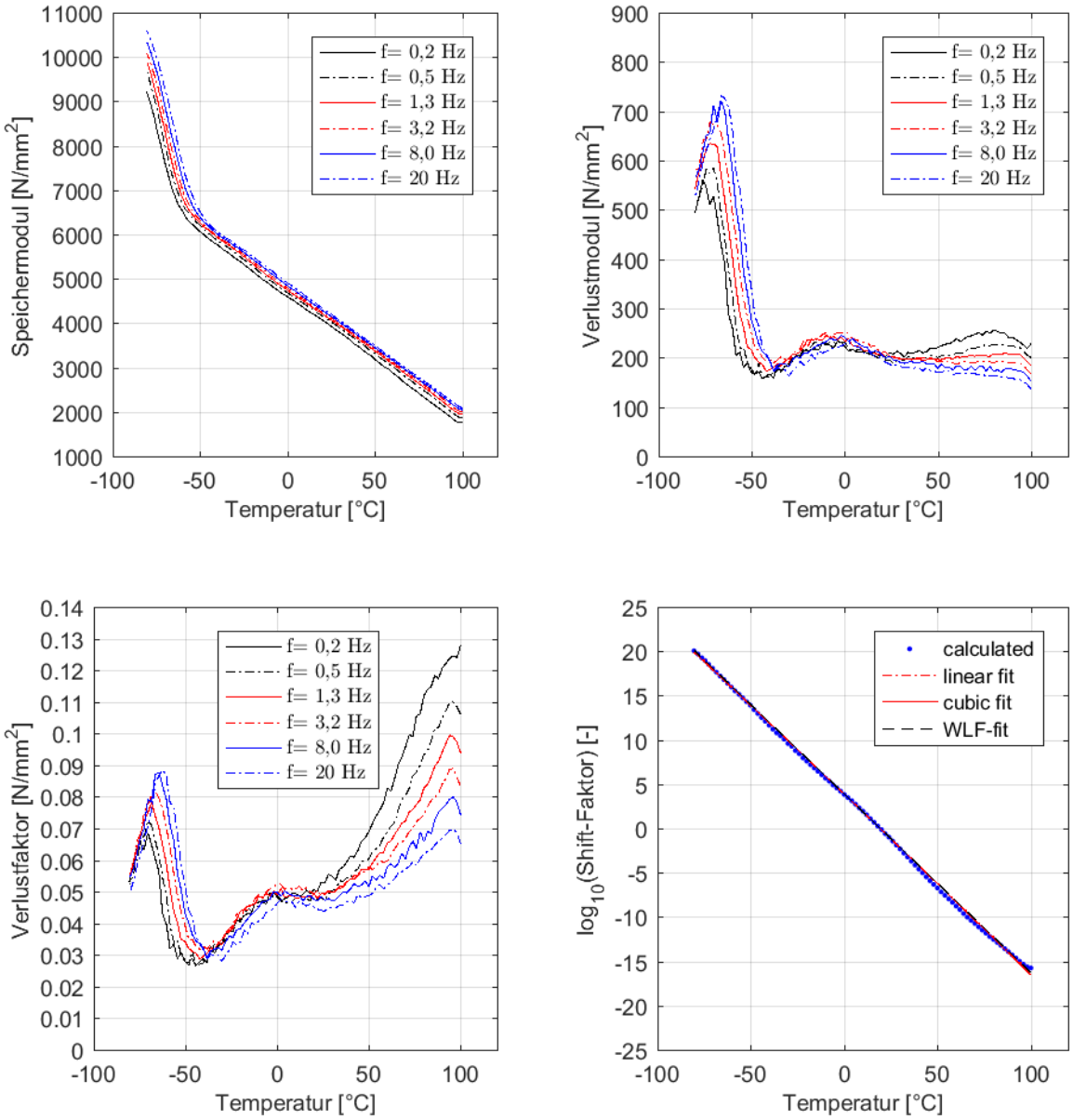


Abbildung 66: Kennwerte über die Temperatur (DMTA Hersteller 1; Prüfstarttemperatur +100°C; Endtemperatur -80°C)

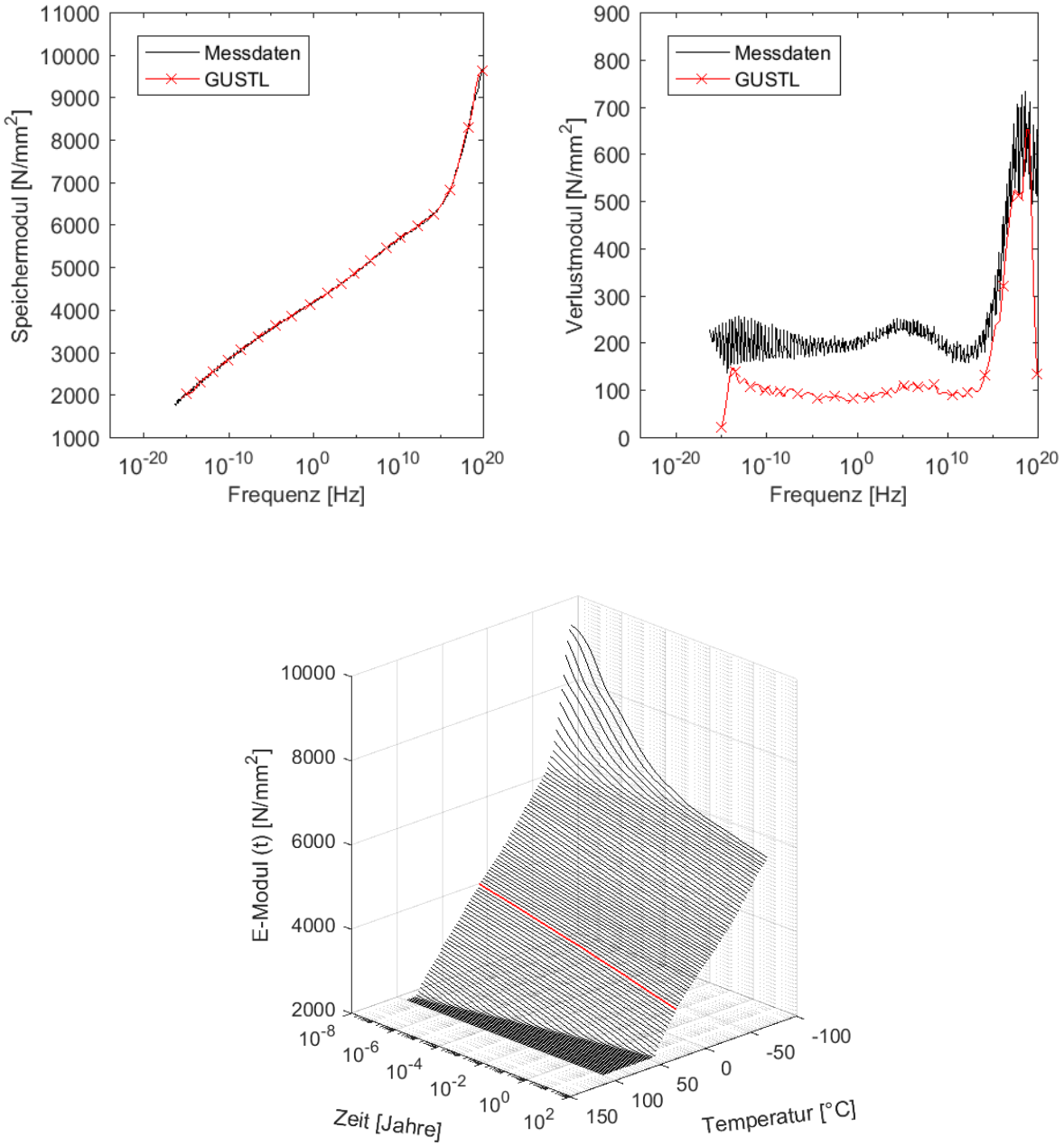


Abbildung 67: Masterkurve über die Frequenz (oben) und Prognose des E-Moduls über die Zeit in Abhängigkeit der Temperatur (unten) (DMTA Hersteller 1; Prüfstarttemperatur +100°C; Endtemperatur -80°C)

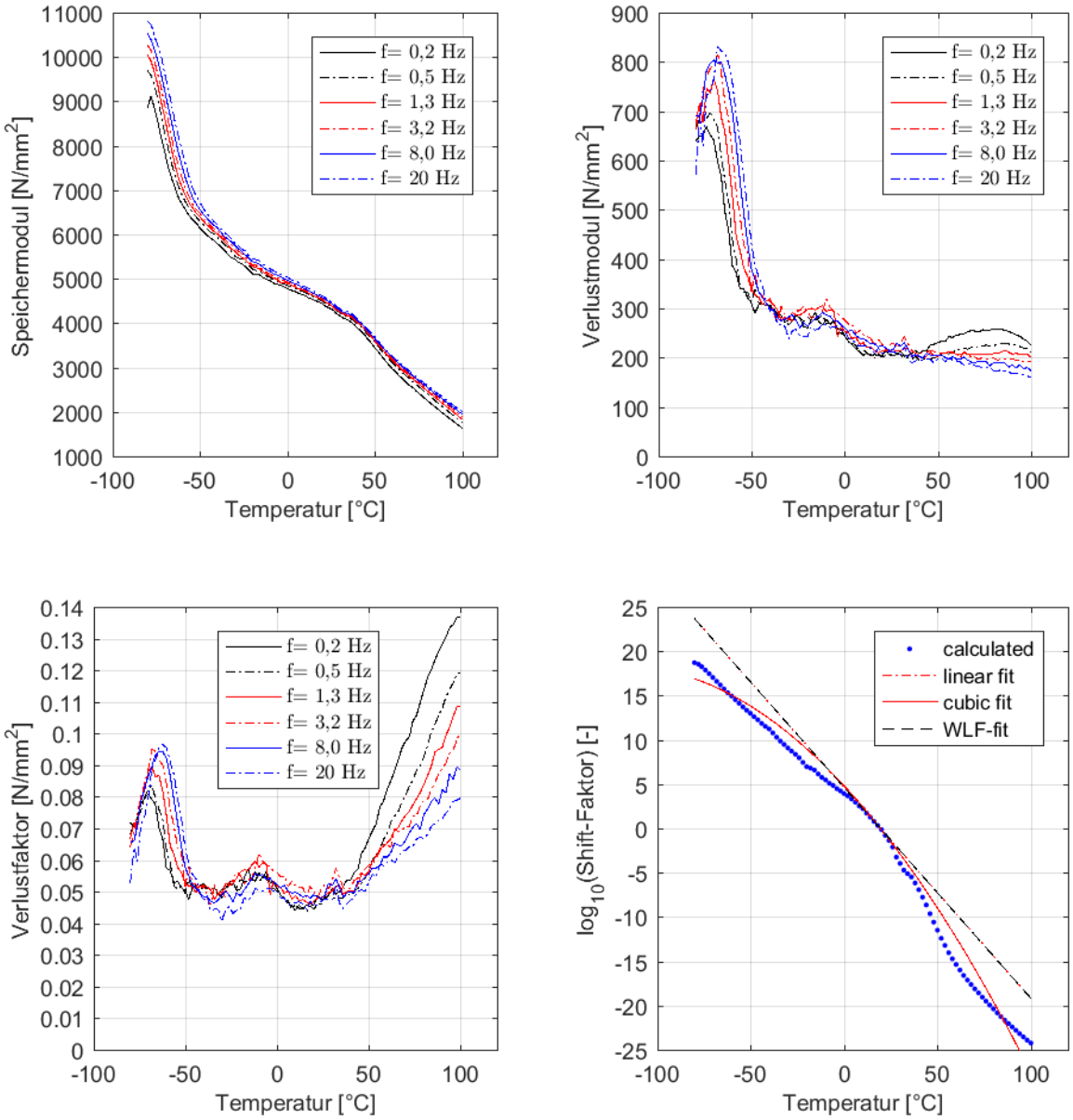


Abbildung 68: Kennwerte über die Temperatur (DMTA Hersteller 1; Prüfstarttemperatur -80°C; Endtemperatur +100°C)

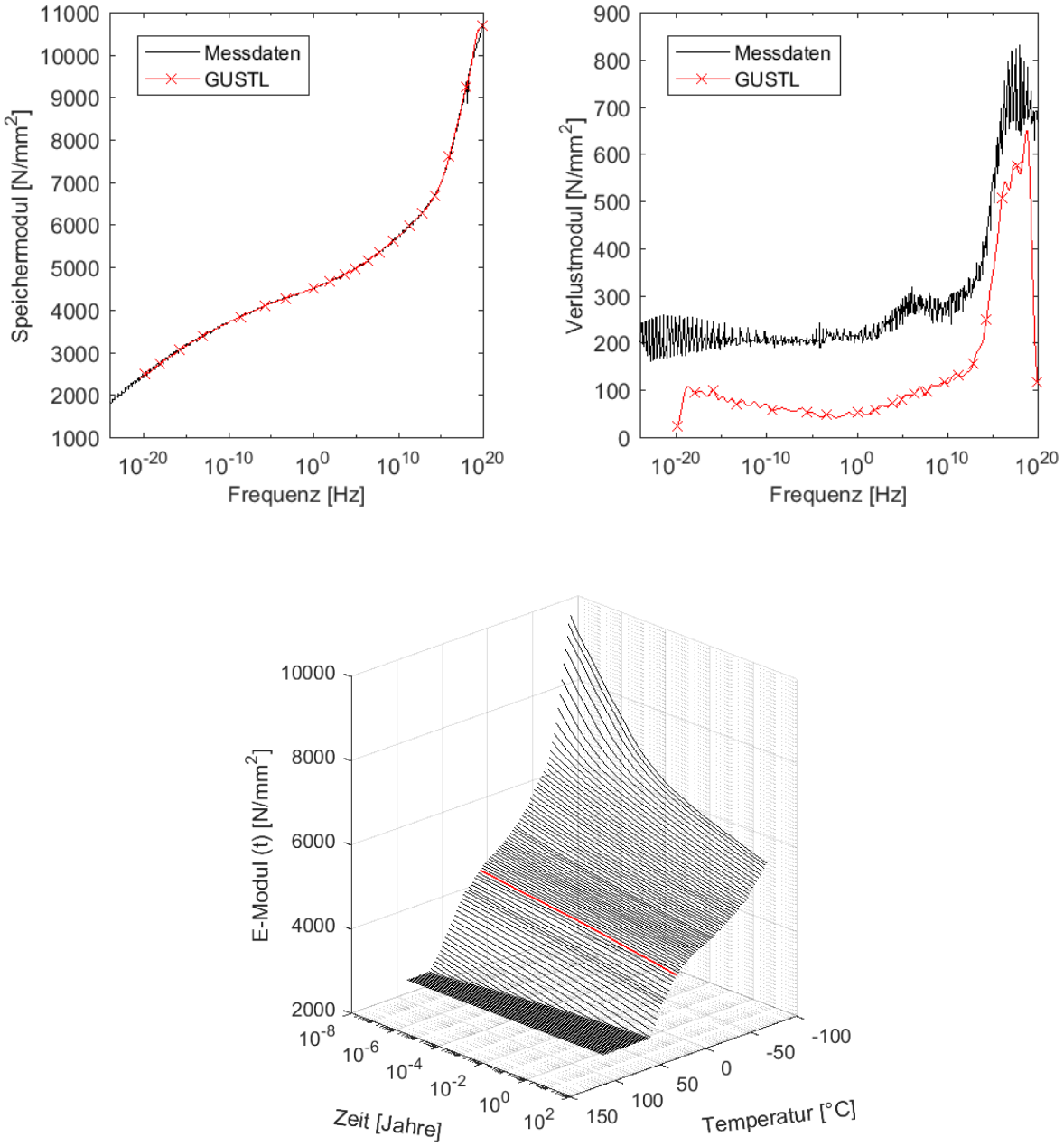


Abbildung 69: Masterkurve über die Frequenz (oben) und Prognose des E-Moduls über die Zeit in Abhängigkeit der Temperatur (unten) (DMTA Hersteller 1; Prüfstarttemperatur -80°C; Endtemperatur +100°C)

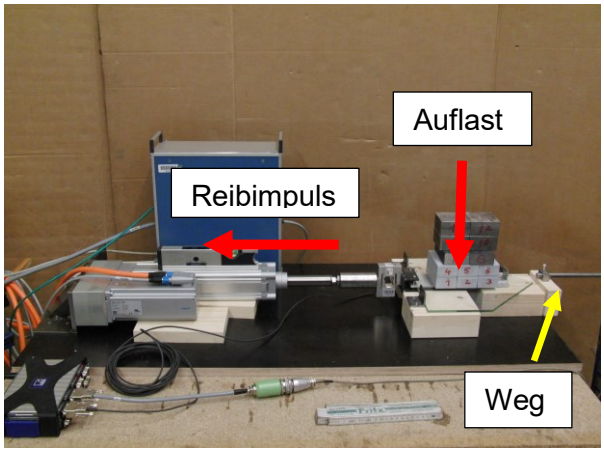
4.1.5 Ermittlung Reibkoeffizient

Nachfolgend werden die Randbedingungen und Versuchsparameter der in Kapitel 4.1.5 beschriebenen Versuche angeführt.

Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung des Reibungskoeffizienten erfolgte bei 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 20% bis 35%. Der Gleitschlitten aus dem Reibpartner hatte eine rechteckige Grundfläche von 160 cm². Die variablen Parameter waren Flächenpressung (P), Gleitgeschwindigkeit (v) und Oberflächenrauigkeit (R_z).

Die Überprüfung der Oberflächenrauigkeit erfolgte vor und nach 25 Versuchen sowie am Ende jeder Versuchsanordnung an insgesamt vier Messpunkten. Die Messungen zeigten konstante Oberflächenkennwerte aller Reibpaare über die gesamte Versuchsdauer. Die Messungen wurden mit dem Oberflächen-Rauheitsprüfgerät Mitutoyo SJ-201 P / 0,75mN durchgeführt.

Tabelle 27 zeigt den Versuchsplan (VP) und in Tabelle 28 werden die Ergebnisse dieser angeführt. Angaben zur Oberflächenrauigkeit der Gleitpaare werden in Tabelle 29 (Mittelwert von vier Messpunkten) angegeben. Für den Gleitpartner Fichte liegen keine Kennwerte der Oberflächenrauigkeit vor.



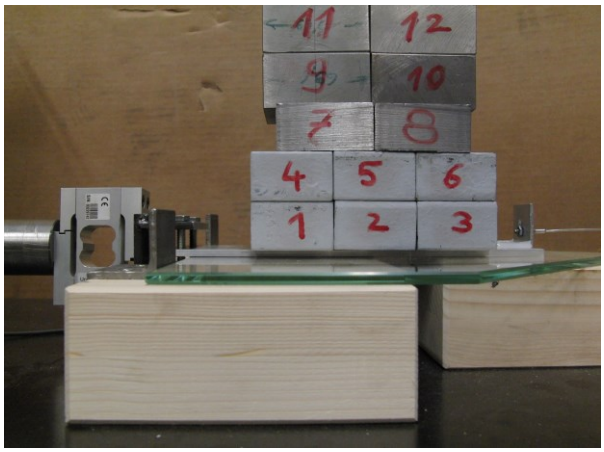


Abbildung 70: Versuchsaufbau Reibversuche

Tabelle 27: Versuchsplan Ermittlung Reibkoeffizient

Reibpartner	VP 1	VP 2	VP 3
Aluminium	P = 0,006 MPa v = 1 mm/s	P = 0,009 MPa v = 1 mm/s	P = 0,009 MPa v = 2 mm/s
Stahl (R_{Z1})	P = 0,006 MPa v = 1 mm/s	P = 0,009 MPa v = 1 mm/s	P = 0,009 MPa v = 2 mm/s
Stahl (R_{Z2})	P = 0,006 MPa v = 1 mm/s	P = 0,009 MPa v = 1 mm/s	P = 0,009 MPa v = 2 mm/s
POM-C	P = 0,006 MPa v = 1 mm/s	P = 0,009 MPa v = 1 mm/s	P = 0,009 MPa v = 2 mm/s
Fichte	P = 0,006 MPa v = 1 mm/s	P = 0,009 MPa v = 1 mm/s	P = 0,009 MPa v = 2 mm/s

Tabelle 28: Reibkoeffizienten μ für Glas und verschiedene Reibpartner aller Versuche

		Gleitreibkoeffizient		Haftreibkoeffizient	
		Mittelwert	Stdabw	Mittelwert	Stdabw
Glas & Aluminium	VP 1	0,14	0,008	0,19	0,007
	VP 2	0,12	0,006	0,16	0,008
	VP 3	0,14	0,007	0,18	0,008
Glas & Stahl (R_{Z1})	VP 1	0,17	0,008	0,21	0,010
	VP 2	0,12	0,005	0,14	0,003
	VP 3	0,13	0,004	0,16	0,005
Glas & Stahl (R_{Z2})	VP 1	0,15	0,006	0,18	0,005
	VP 2	0,13	0,007	0,16	0,013
	VP 3	0,13	0,003	0,17	0,004
Glas & POM-C	VP 1	0,12	0,004	0,18	0,011
	VP 2	0,09	0,004	0,13	0,009
	VP 3	0,10	0,004	0,16	0,010
Glas & Fichte	VP 1	0,18	0,004	0,27	0,018
	VP 2	0,16	0,004	0,22	0,014
	VP 3	0,17	0,003	0,23	0,012

Tabelle 29: Oberflächenrauigkeit R_Z der Kontaktflächen

	R_Z [μm]	
	Zugrichtung	Quer zur Zugrichtung
Glas	0,01	0,06
Aluminium	2,35	1,30
Stahl (RZ1)	8,55	5,60
Stahl (RZ2)	4,31	1,89
POM-C	0,26	0,63

4.1.6 Rahmenecke

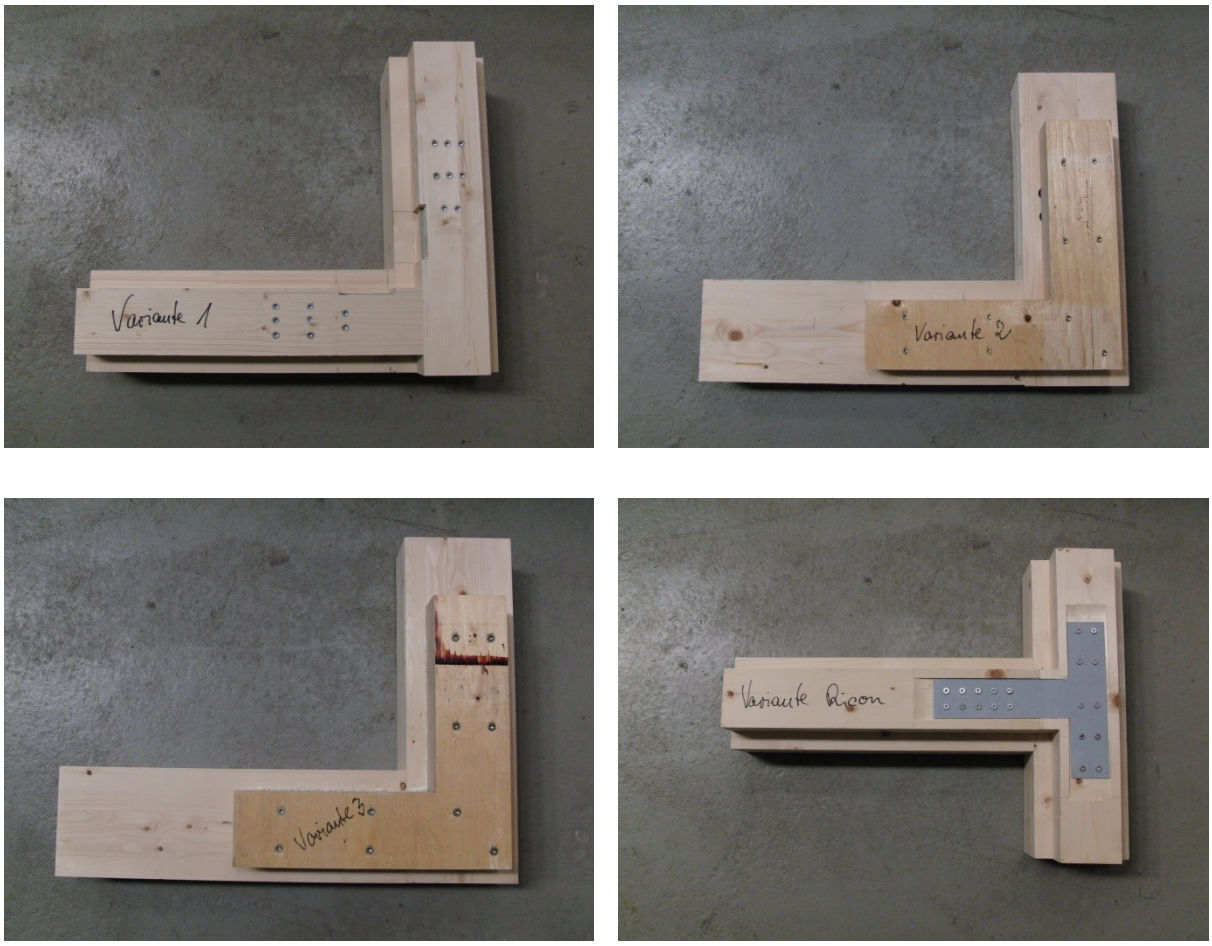


Abbildung 71: Übersicht der untersuchten Rahmeneckverbindungen (Neumer, 2015)

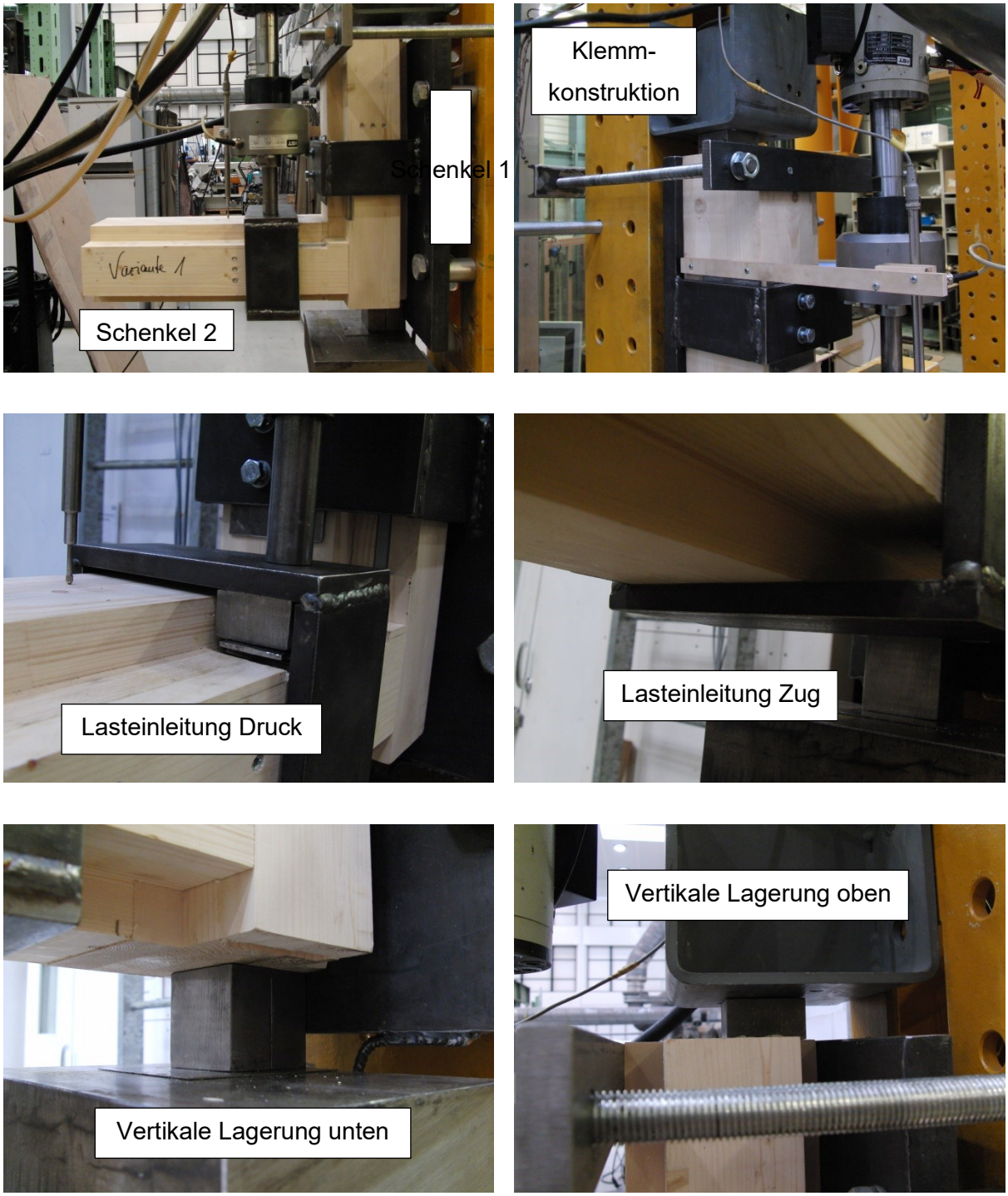


Abbildung 72: Prinzip des Versuchsaufbaus (Neumer, 2015)

Tabelle 30: Versuchsauswertung für Rahmenecke Variante 1 Probekörper 3 (Neumer, 2015)

	Kraft Druck [kN]	Weg (Kraft max) Druck [mm]	Verschiebe-modul Druck [kN/mm]	Duktilitäts-index Druck [-]	Festigkeits-minderung Druck [mm]	Energie-dissipation Druck [kNmm]	Dreh-steifigkeit Druck [kNm/°]
Zyklus_1	5,1	2,2	2,4	5,3	-	249,3	2,0
Zyklus_2	5,2	2,2	2,4	5,2	-	239,4	2,0
Zyklus_3	7,5	2,8	2,7	4,2	-0,1	789,2	2,3
Zyklus_4	10,2	3,4	3,0	3,4	-	2607,6	2,5
Zyklus_5	11,5	3,7	3,1	3,1	-	3377,9	2,6
Zyklus_6	10,6	3,6	2,9	3,2	0,2	2540,2	2,5
Zyklus_7	14,1	4,5	3,1	2,5	-	7833,8	2,6
Zyklus_8	14,7	4,8	3,1	2,4	-	8651,9	2,6
Zyklus_9	15,3	5,1	3,0	2,3	0,5	9874,3	2,5
Zyklus_10	20,2	6,5	3,1	1,8	-	31323,1	2,6
Zyklus_11	20,3	6,8	3,0	1,7	-	29652,3	2,5
Zyklus_12	20,2	6,8	3,0	1,7	0,3	28930,2	2,5
Zyklus_13	25,2	8,3	3,0	1,4	-	75245,9	2,6
Zyklus_14	25,2	8,6	2,9	1,3	-	73499,8	2,5
Zyklus_15	25,2	8,7	2,9	1,3	0,4	72111,0	2,4
Zyklus_16	30,2	10,6	2,9	1,1	-	172948,7	2,4
Zyklus_17	30,1	11,1	2,7	1,0	-	170528,9	2,3
Zyklus_18	30,2	11,5	2,6	1,0	-0,2	175342,1	2,2

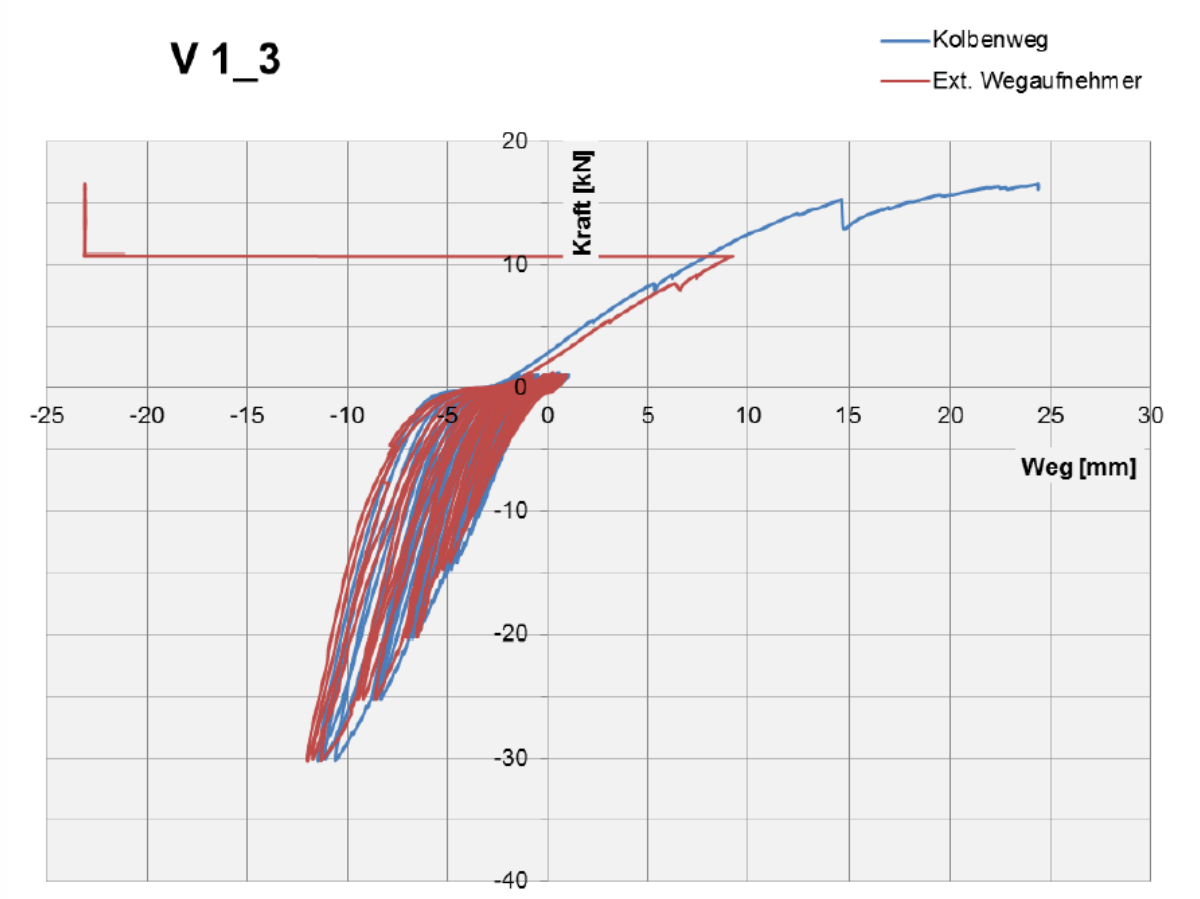


Abbildung 73: Kraft-Verformungsdiagramm für Rahmenecke Variante 1 Probekörper 3 (Neumer, 2015)

4.2 Verbundelement

4.2.3 Holzrahmen

Abbildung 74: Lagerung bzw. Anschluss des Verbundelementes am Prüfgerüst (Neumer, 2016)

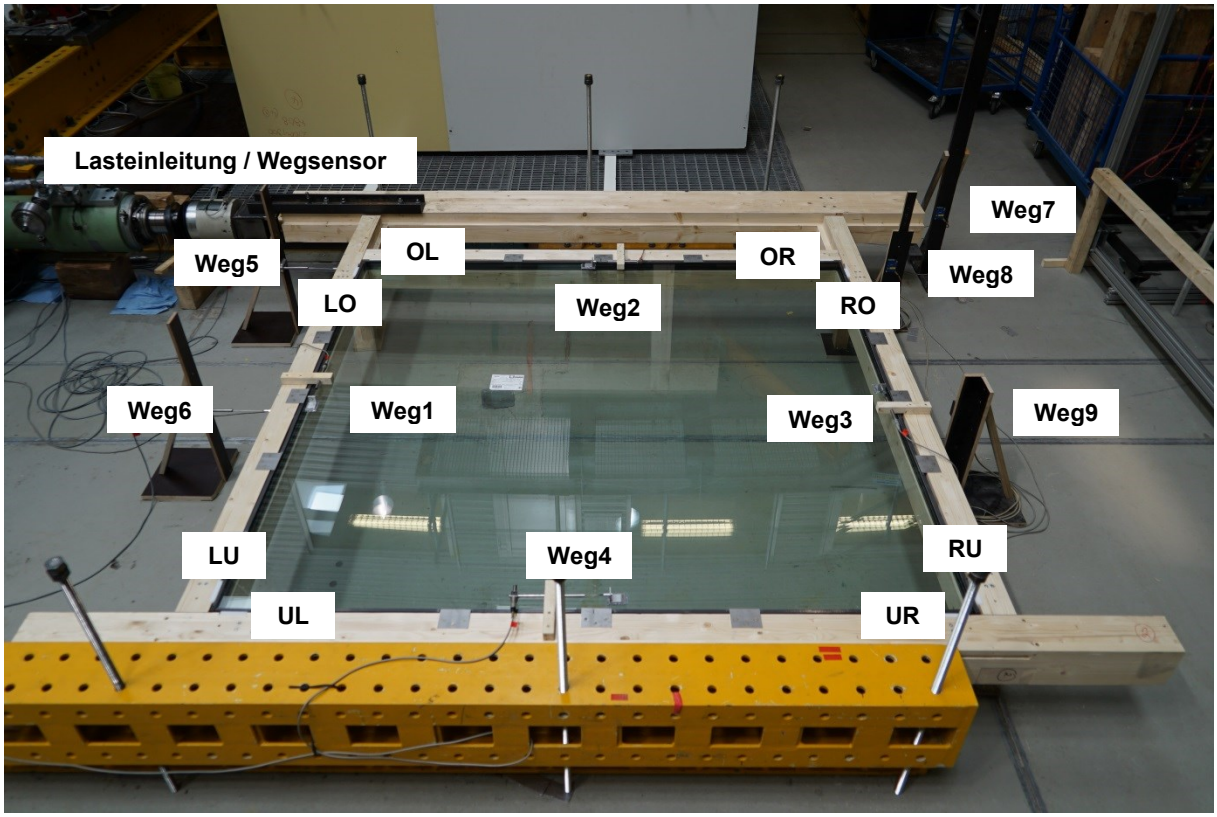


Abbildung 75: Anordnung Messtechnik & Bezeichnung Klötze (Neumer, 2016)

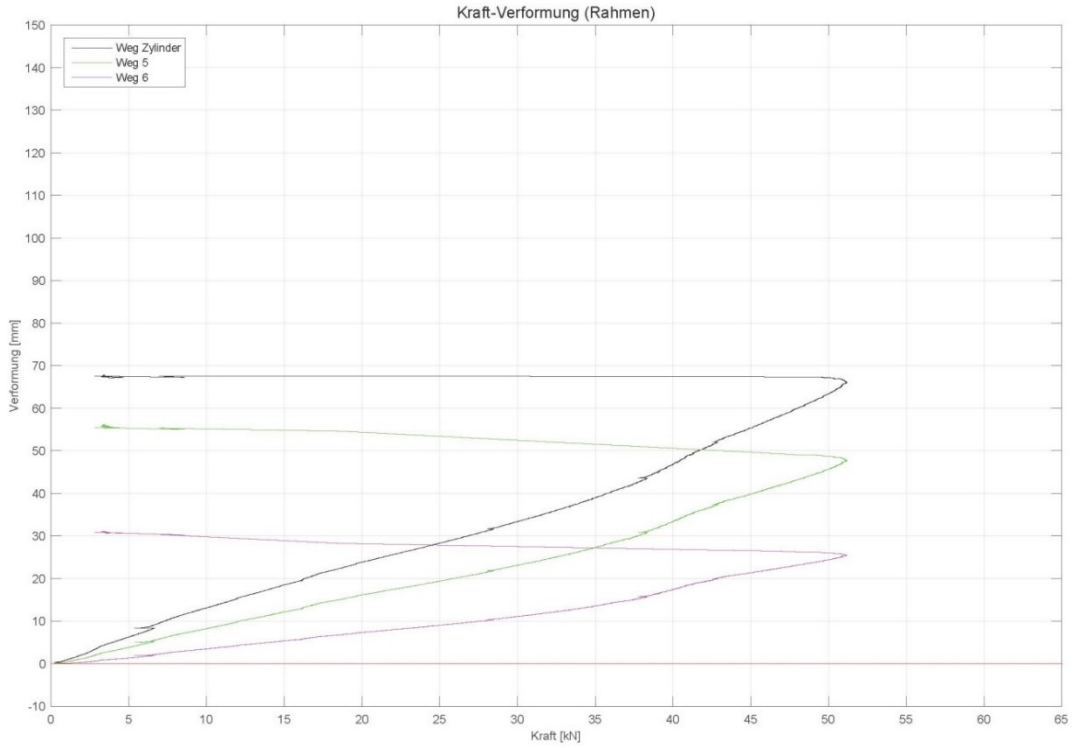


Abbildung 76: Kraft- Verformungs-Diagramm Versuch 1 (Tragfähigkeitsversuch) (Neumer, 2016)

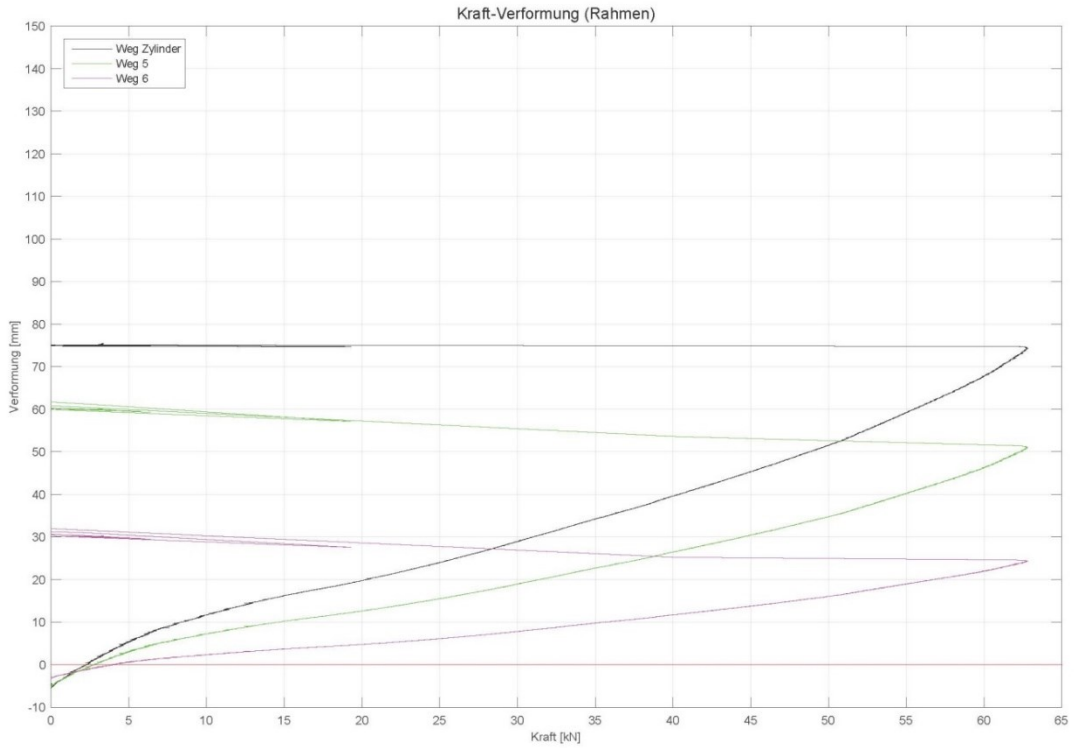


Abbildung 77: Kraft- Verformungs-Diagramm Versuch 2 (Tragfähigkeitsversuch) (Neumer, 2016)

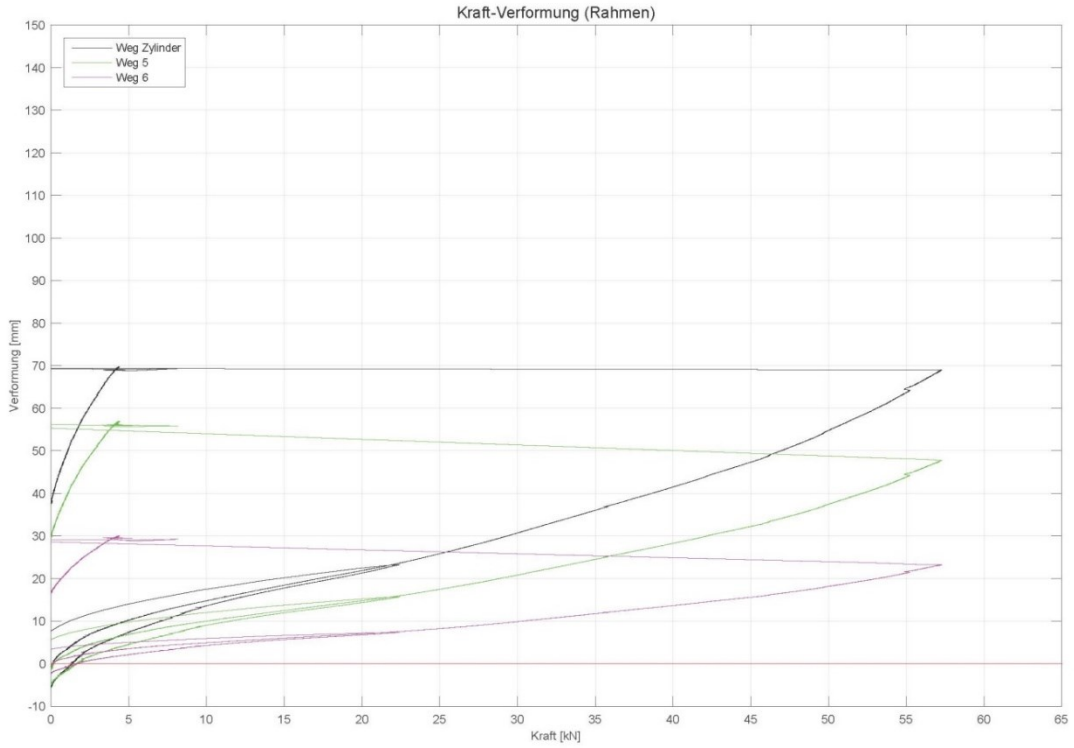


Abbildung 78: Kraft- Verformungs-Diagramm Versuch 3 (Tragfähigkeitsversuch) (Neumer, 2016)

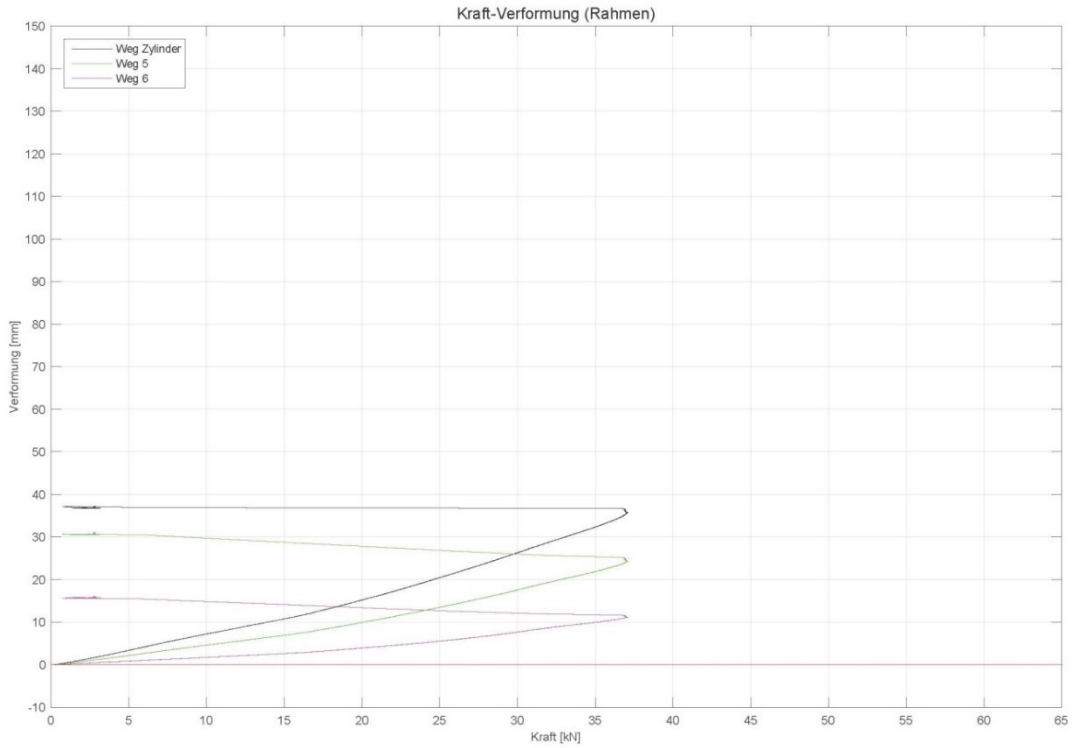


Abbildung 79: Kraft- Verformungs-Diagramm Versuch 4 (Tragfähigkeitsversuch) (Neumer, 2016)

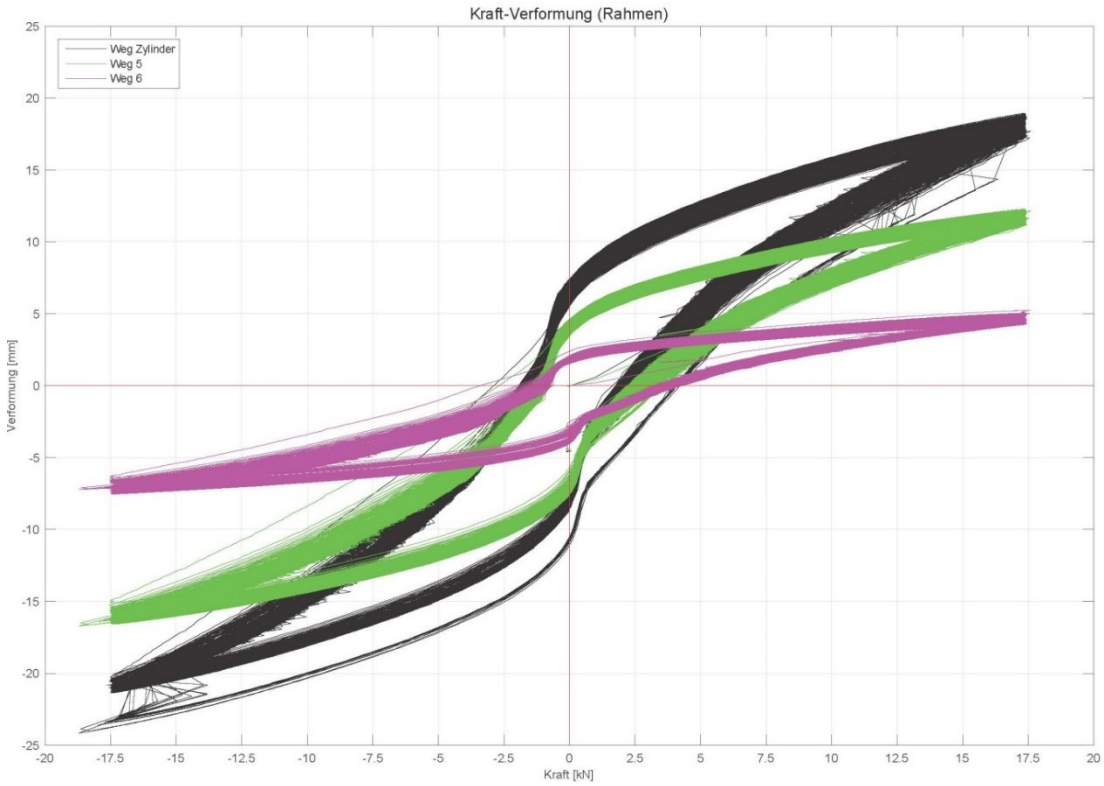


Abbildung 80: Kraft- Verformungs-Diagramm Versuch 2 (Ermüdungsversuch) (Neumer, 2016)

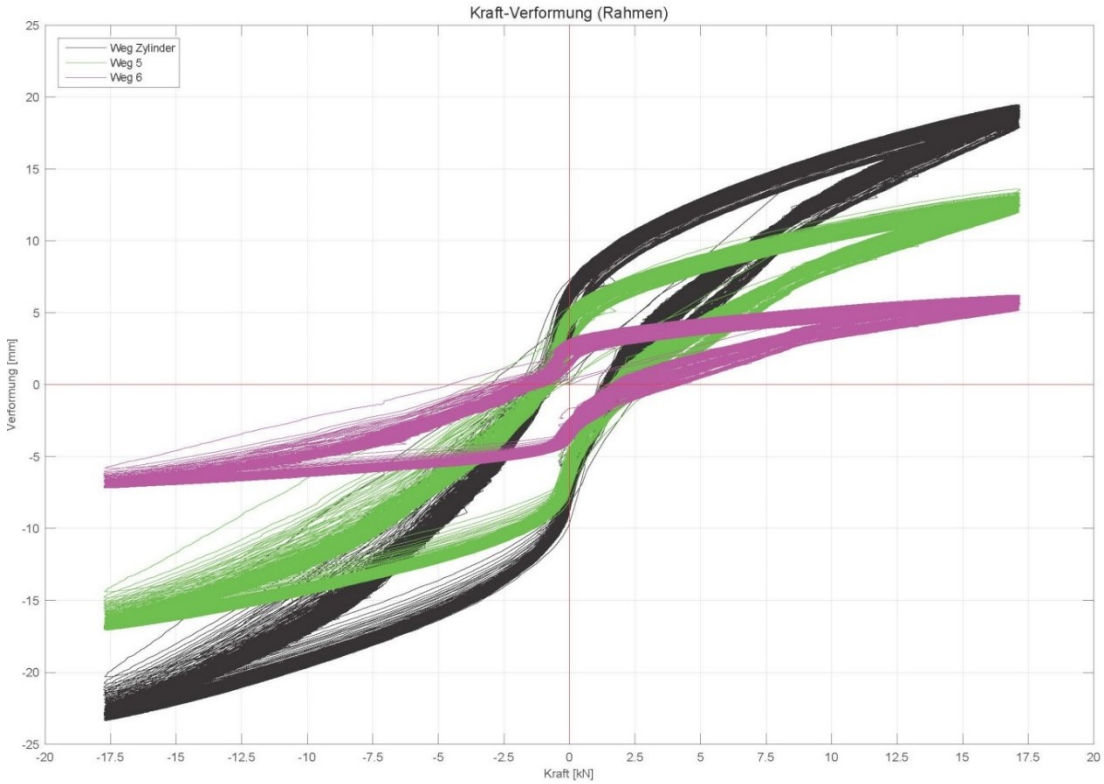


Abbildung 81: Kraft- Verformungs-Diagramm Versuch 3 (Ermüdungsversuch) (Neumer, 2016)

Anhang zu Kapitel 5

5.1 Lasteinleitung

5.1.2 Modellscheibe 2D

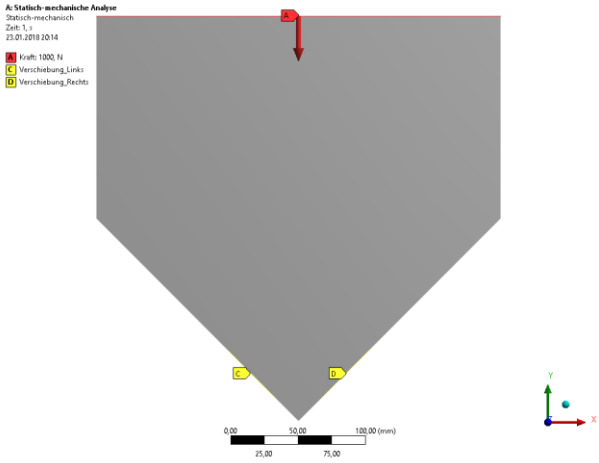


Abbildung 82: Modellscheibe 2D Randbedingungen

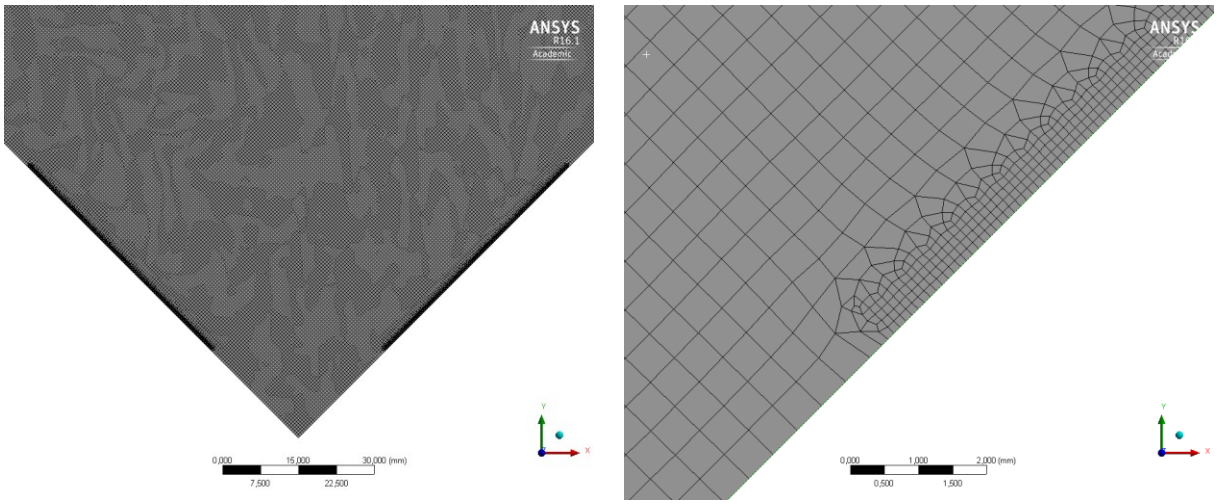


Abbildung 83: FE-Netz Modellscheibe 2D

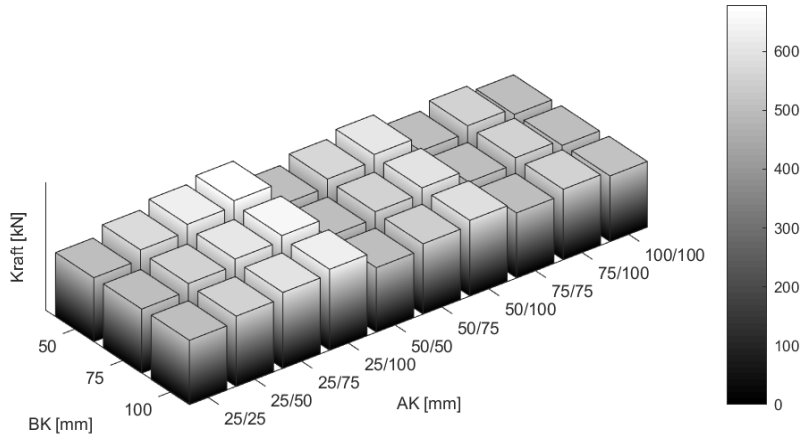


Abbildung 84: Kraftresultierende (Konnektor links; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

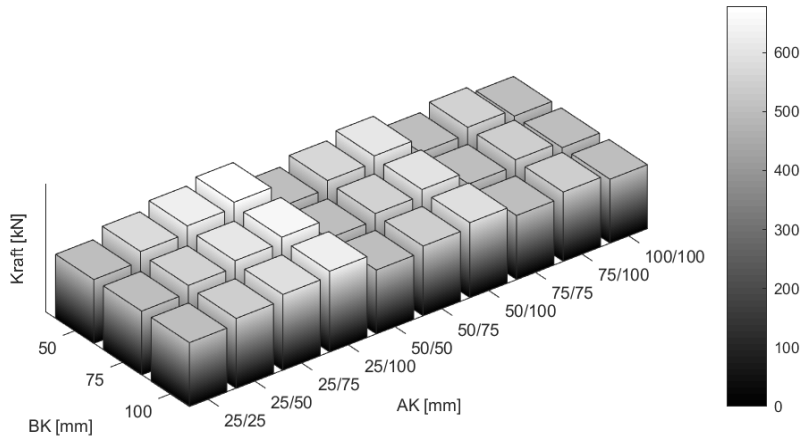


Abbildung 85: Kraftresultierende in y-Achse (Konnektor links; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

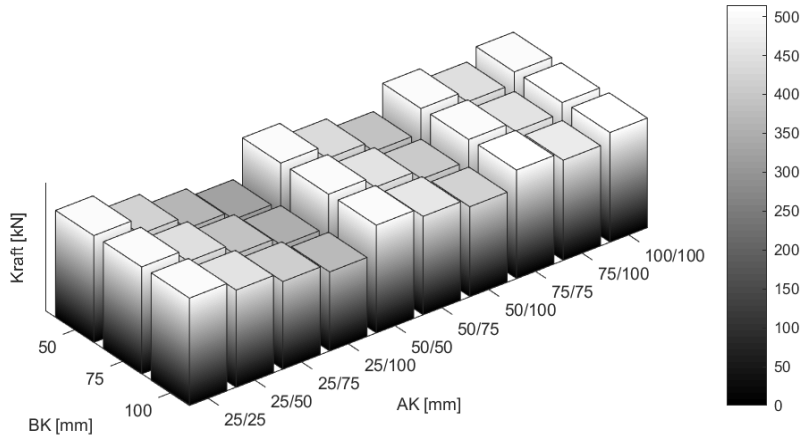


Abbildung 86: Kraftresultierende (Konnektor rechts; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

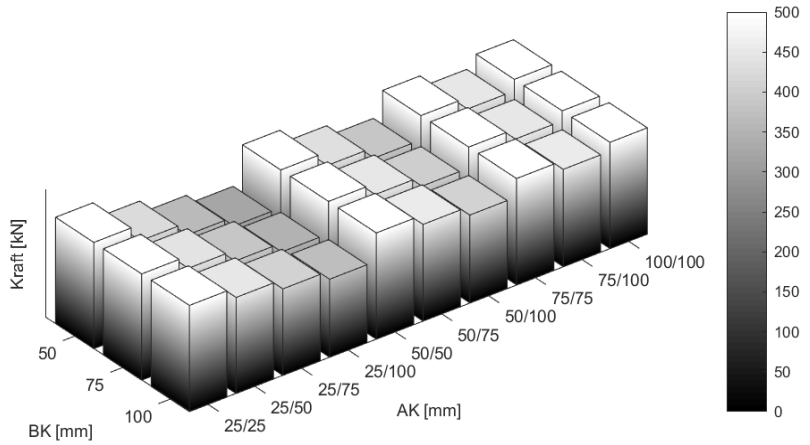


Abbildung 87: Kraftresultierende in y-Achse (Konnektor rechts; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

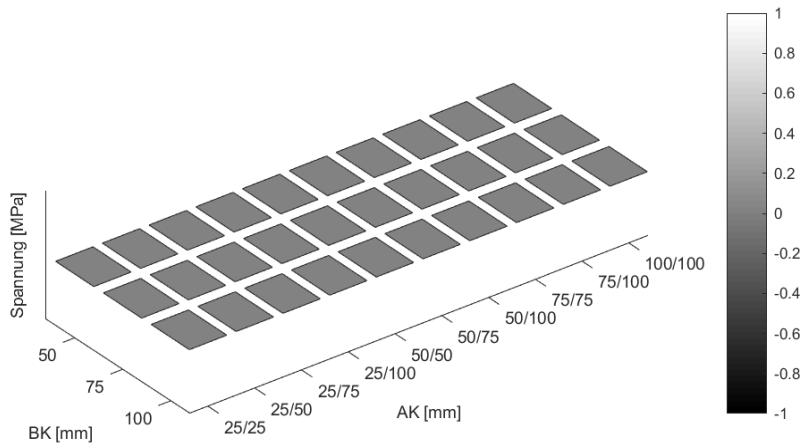


Abbildung 88: Hauptzugspannung (oberes Ende Konnektor links; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

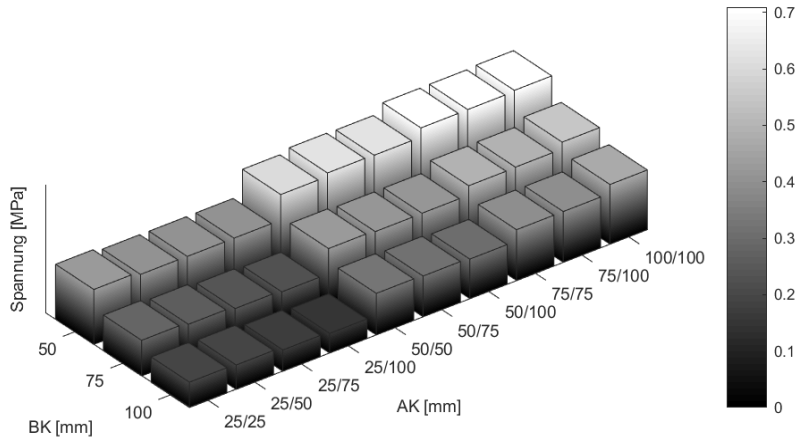


Abbildung 89: Hauptzugspannung (unteres Ende Konnektor links; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

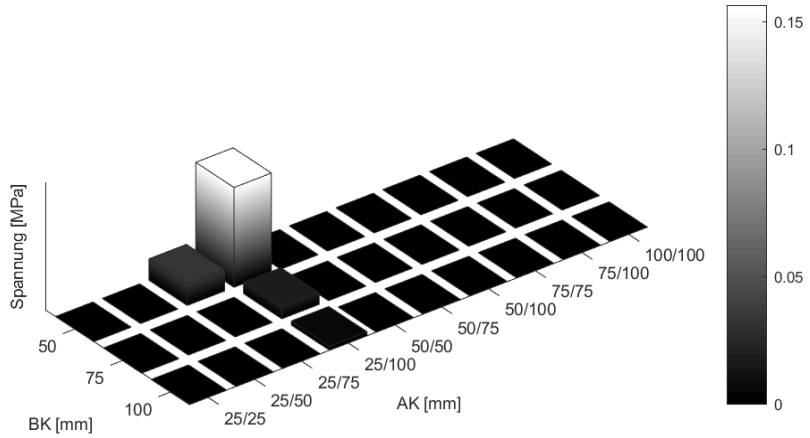


Abbildung 90: Hauptzugspannung (oberes Ende Konnektor rechts; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

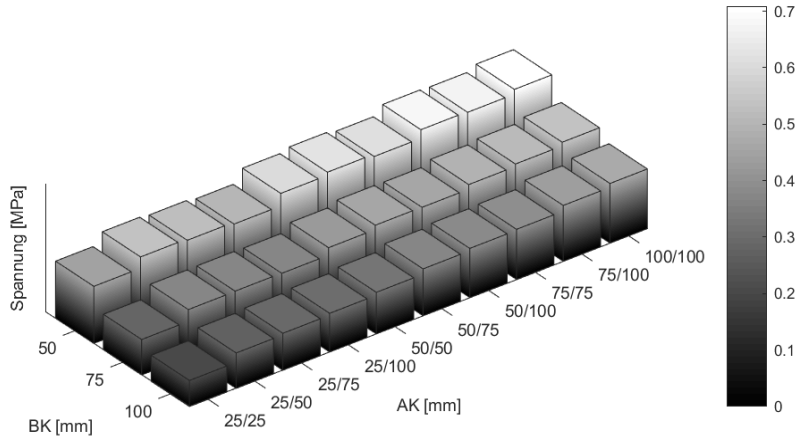


Abbildung 91: Hauptzugspannung (unteres Ende Konnektor rechts; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

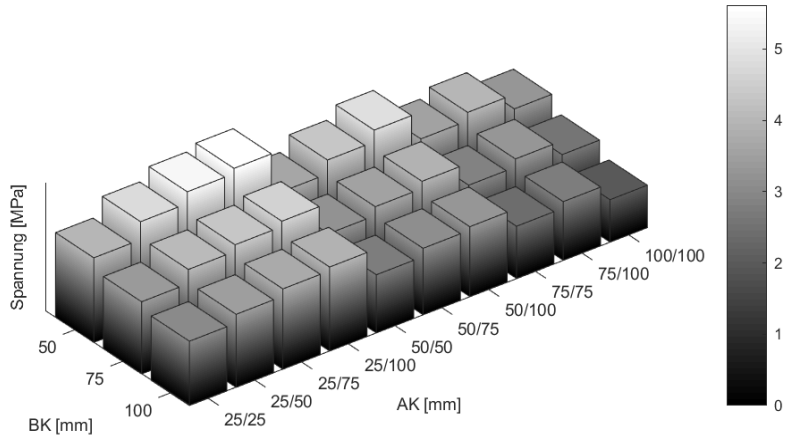


Abbildung 92: Hauptdruckspannung (oberes Ende Konnektor links; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

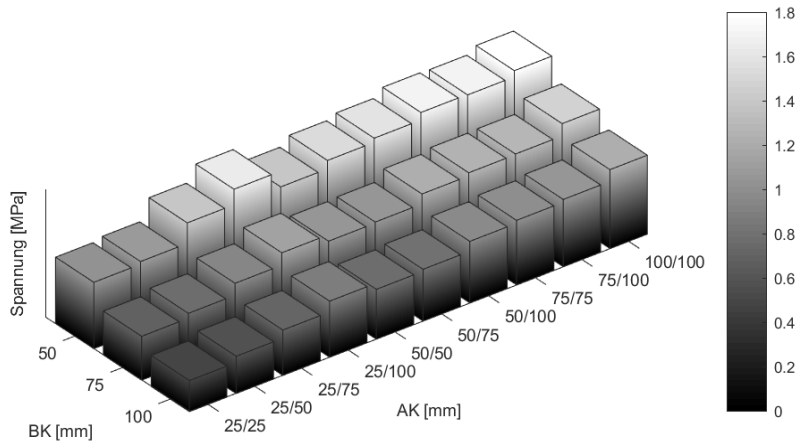


Abbildung 93: Hauptdruckspannung (unteres Ende Konnektor links; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

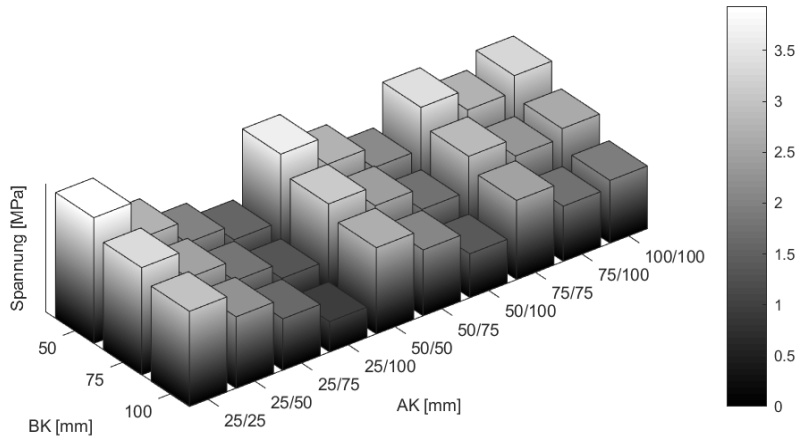


Abbildung 94: Hauptdruckspannung (oberes Ende Konnektor rechts; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

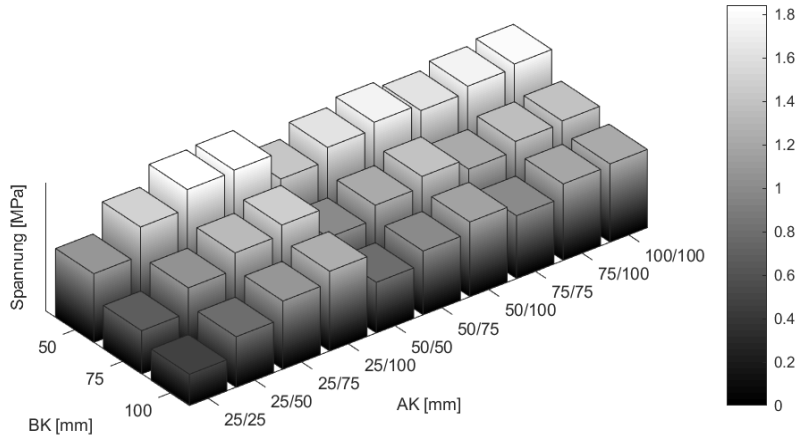


Abbildung 95: Hauptdruckspannung (unteres Ende Konnektor rechts; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

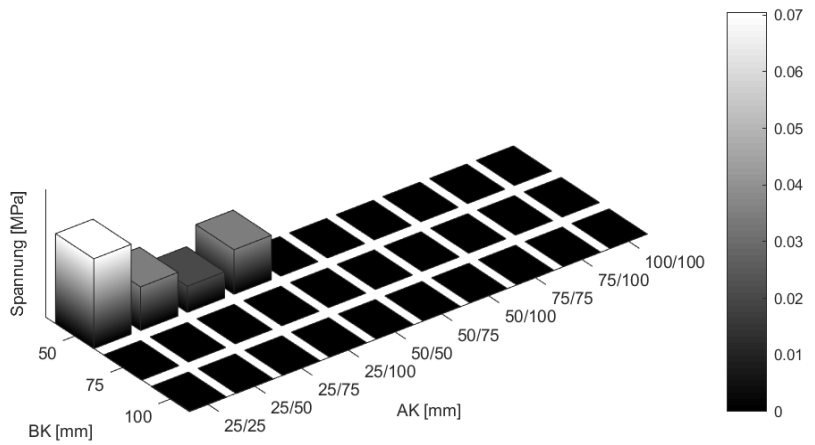


Abbildung 96: Hauptzugspannung (Scheibenmitte 1/2; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

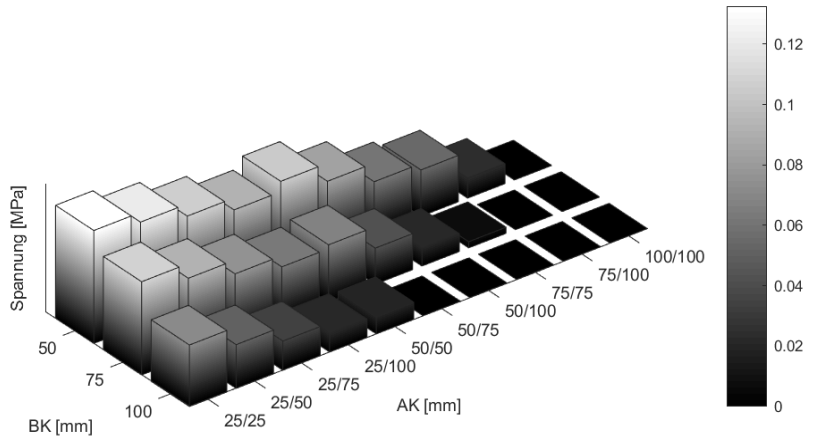


Abbildung 97: Hauptzugspannung (Scheibenmitte 3/4; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

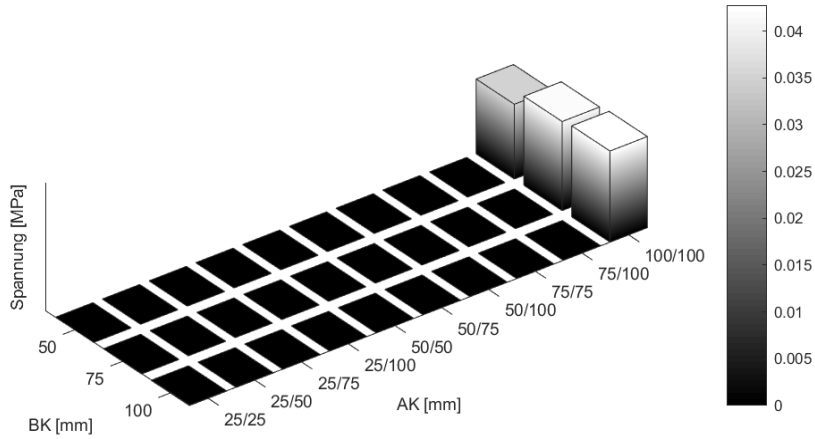


Abbildung 98: Hauptzugspannung (Scheibenmitte 5/6; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

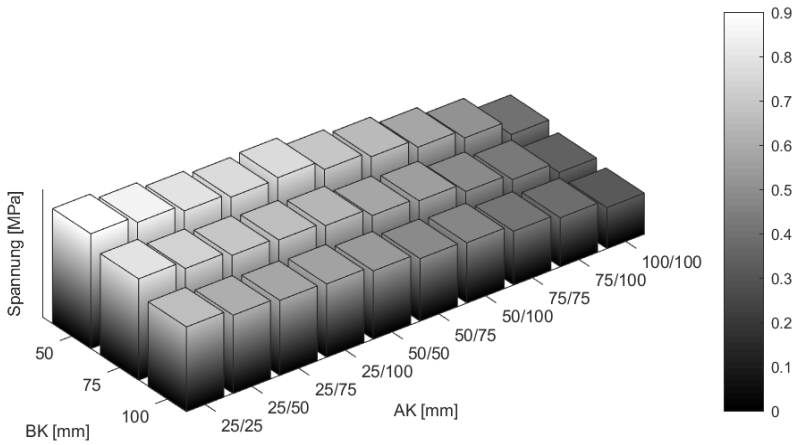


Abbildung 99: Hauptdruckspannung (Scheibenmitte 1/2; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

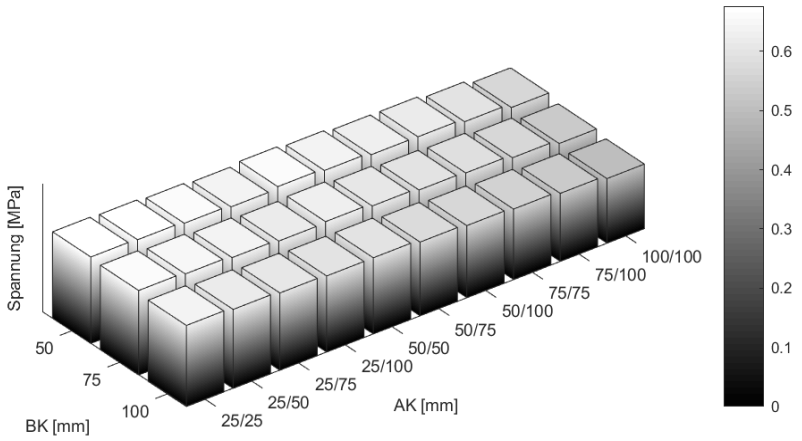


Abbildung 100: Hauptdruckspannung (Scheibenmitte 3/4; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

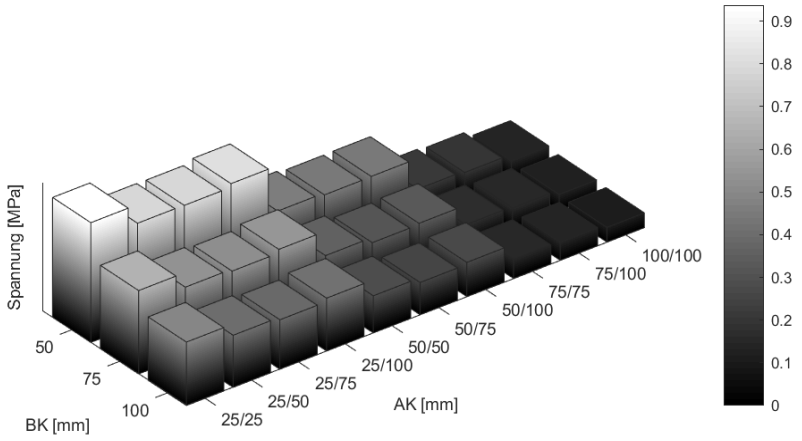


Abbildung 101: Hauptdruckspannung (Scheibenmitte 5/6; $AK_{Links} \leq AK_{Rechts}$)

5.1.3 Modellscheibe 3D

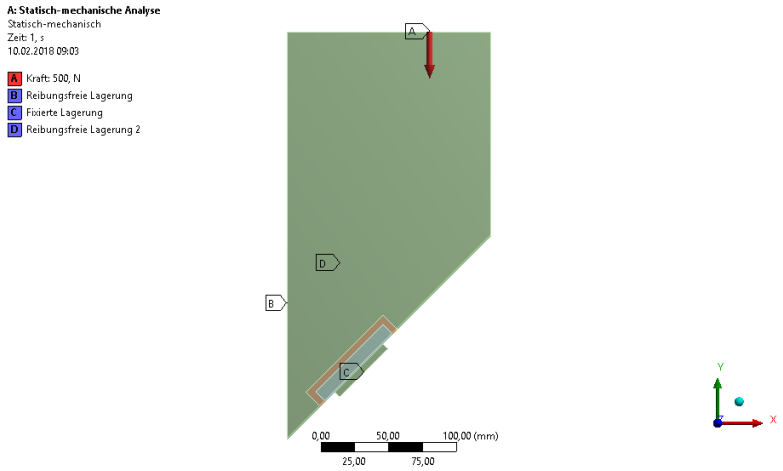


Abbildung 102: Modellscheibe 3D Randbedingungen

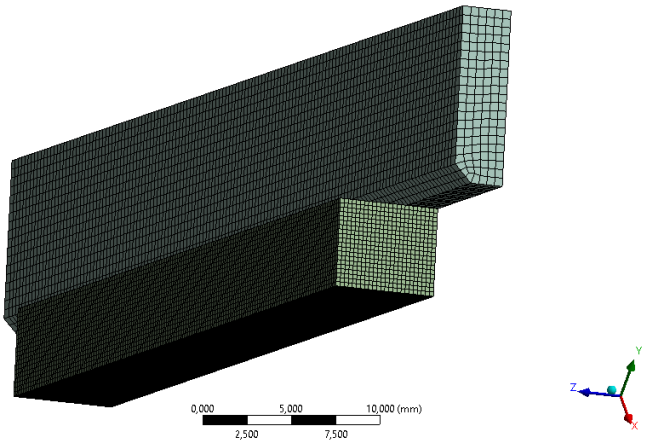


Abbildung 103: FE-Netz Modellscheibe 3D

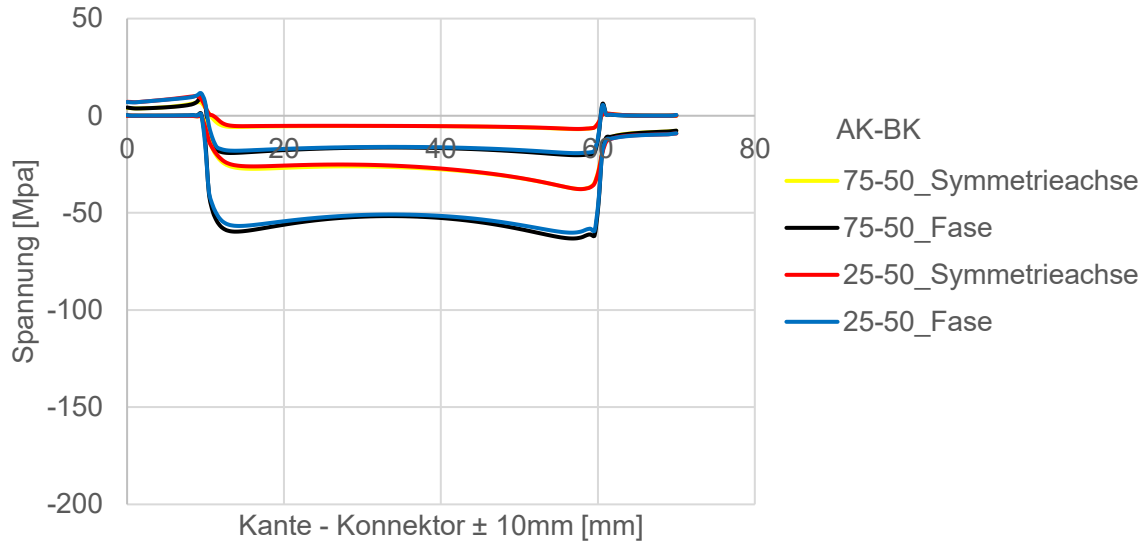


Abbildung 104: Exemplarische Darstellung der Extremwertverläufe der Spannung an der Glaskante im Bereich der Lagerung (Konnektor ± 10mm) für ausgewählte Lagerbedingungen

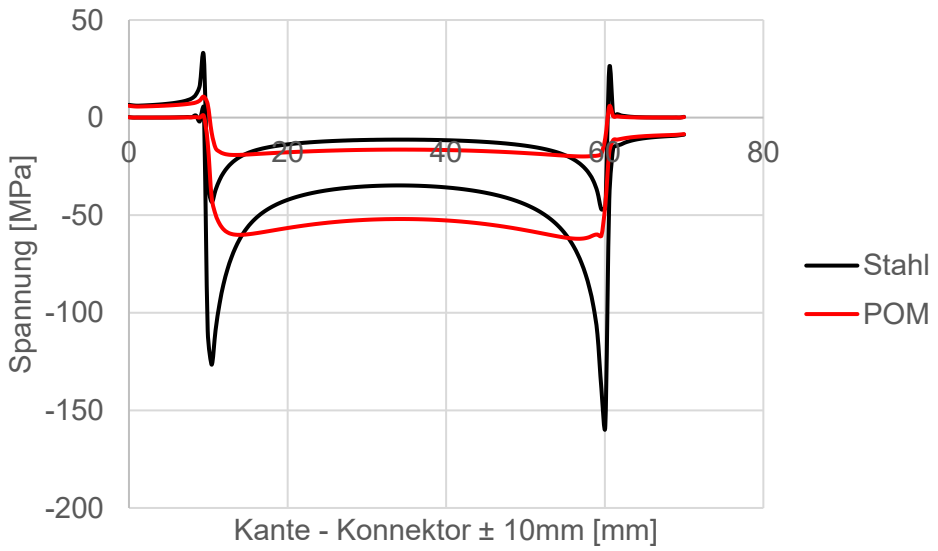


Abbildung 105: Exemplarische Darstellung der Extremwertverläufe der Spannung an der Glaskante im Bereich der Lagerung (Konnektor ± 10mm) für die Konnektorwerkstoffe Stahl und POM (Lagerbedingung AK = 50mm & BK = 50mm)

5.2 Verglasung

5.2.3 Allgemein

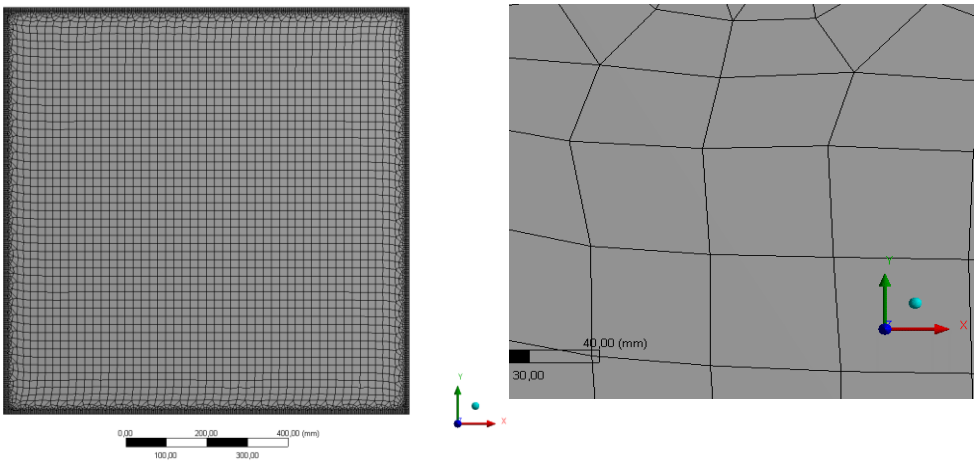


Abbildung 106: FE-Netz Glasscheiben (Scheibengröße 1m x 1m)

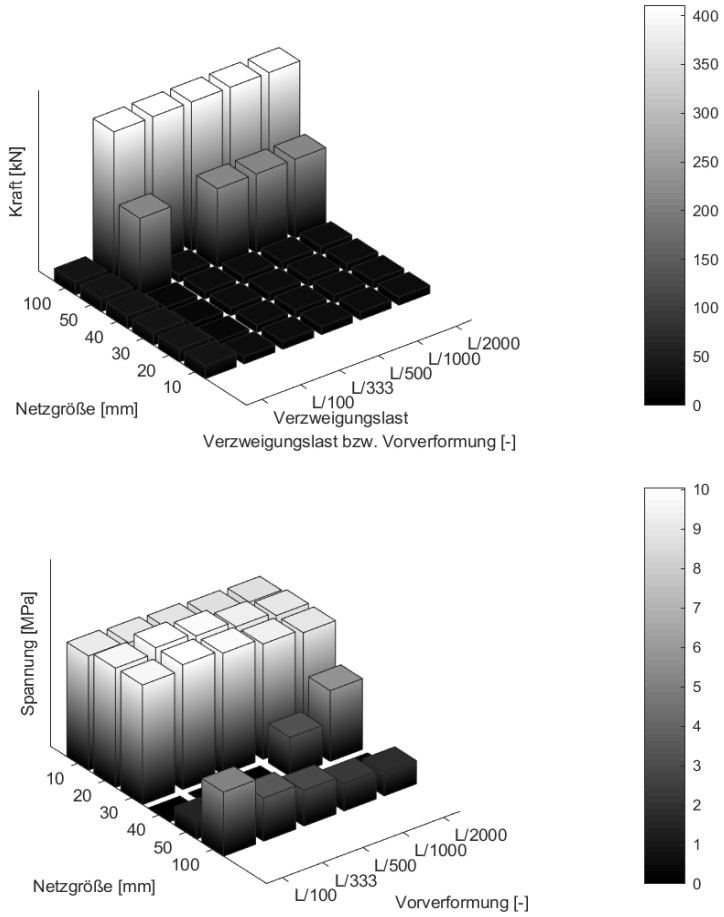


Abbildung 107: Netzstudie an Glasscheiben (oben: Kraft in x-Richtung; unten: Hauptdruckspannung in Scheibenmitte; Scheibengröße 1m x 1m)

5.2.3 Vorverformung

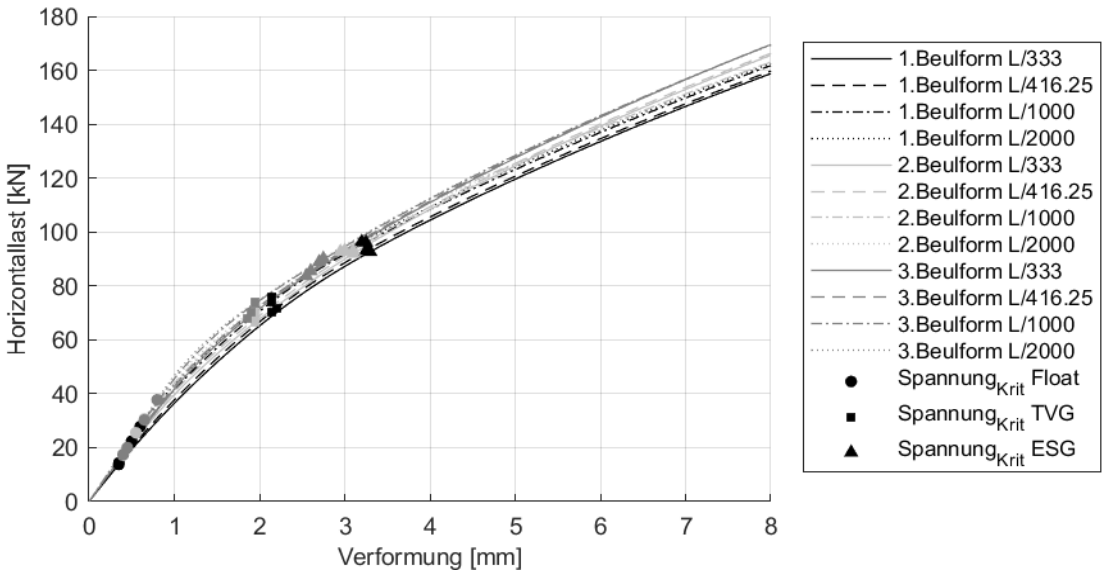


Abbildung 108: Kraft-Weg Plot in Scheibenebene für die Abmessung (b x h) 2000mm x 1000mm(AK =1mm; BK =50mm)

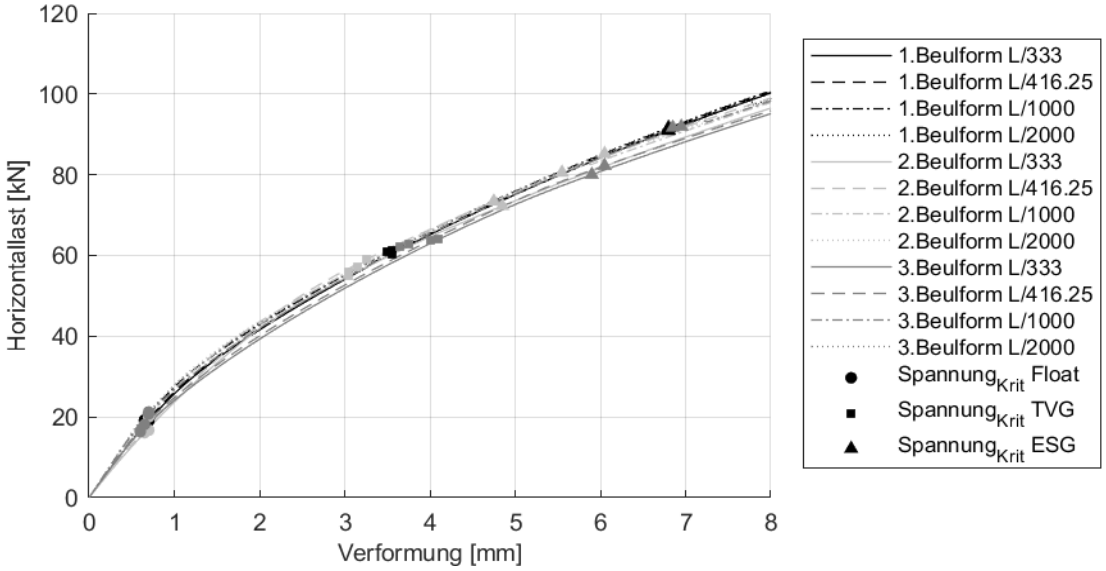


Abbildung 109: Kraft-Weg Plot in Scheibenebene für die Abmessung (b x h) 2000mm x 2000mm(AK =1mm; BK =50mm)

5.2.4 Nichtlineare Beulanalyse

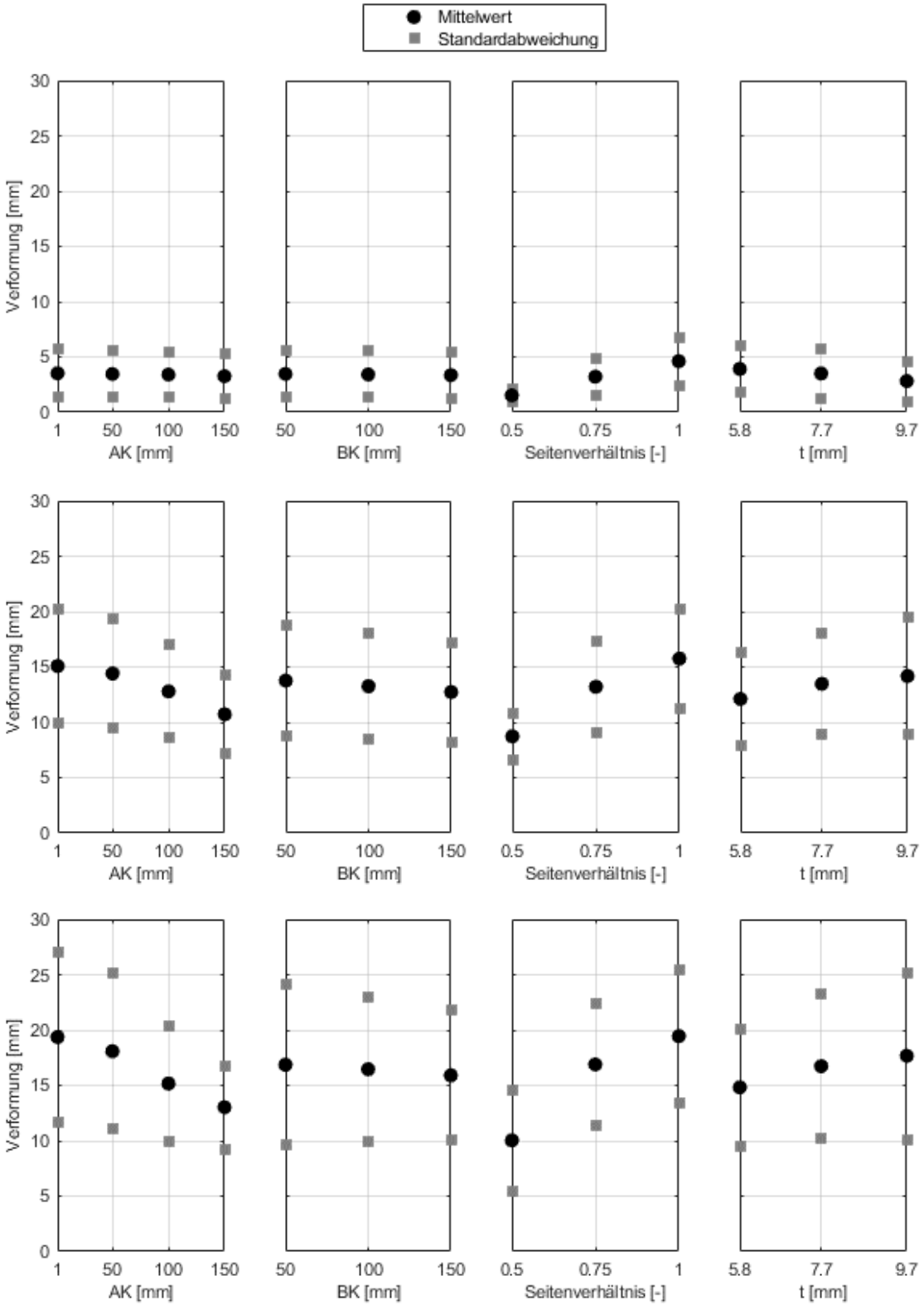


Abbildung 110: Maximale Verformung orthogonal zur Scheibenebene bei kritischer Belastung bezogen auf Eingangsgrößen (GNIA) (oben: Float; mitte: TVG; unten: ESG)

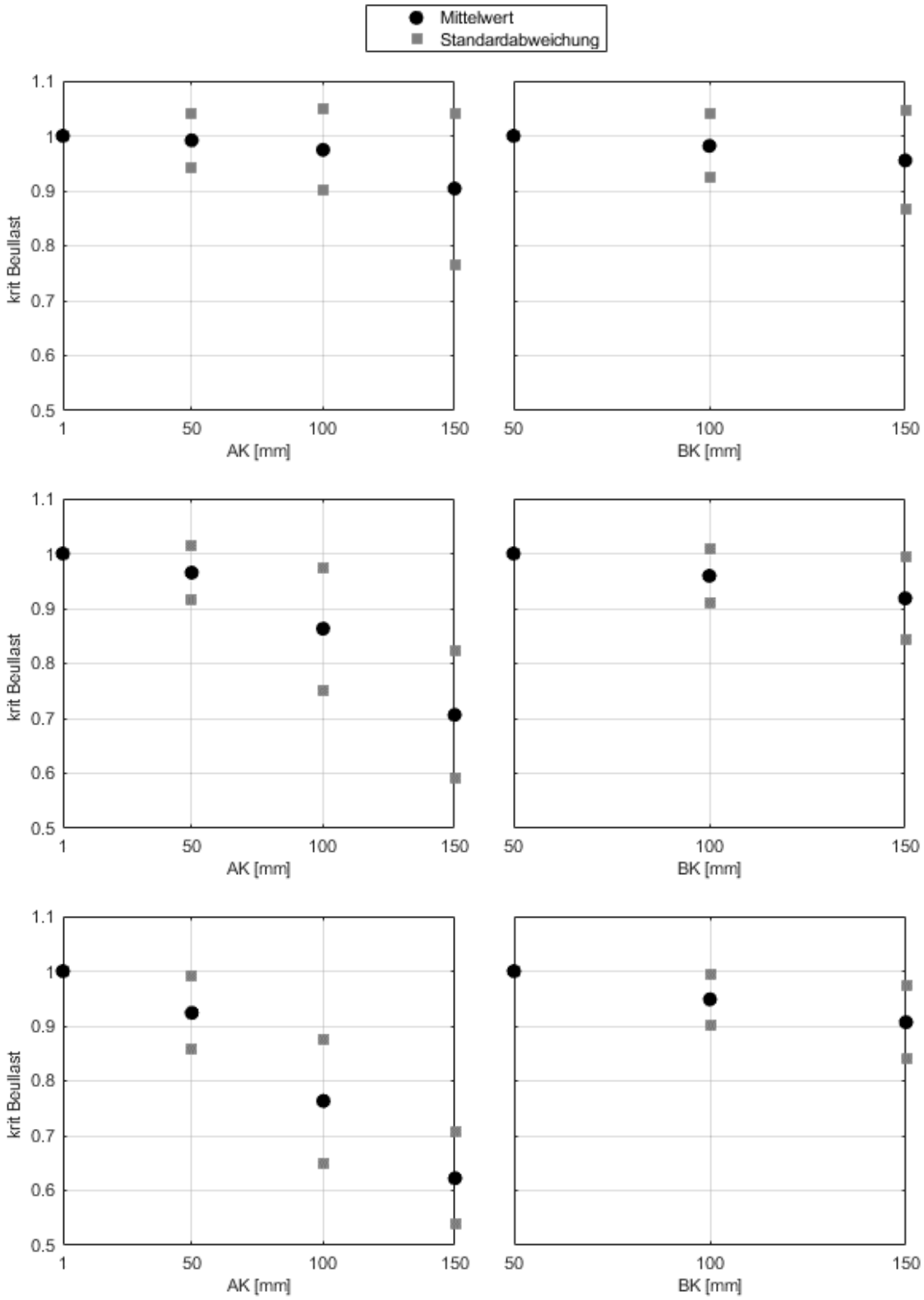
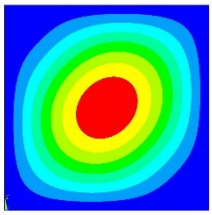
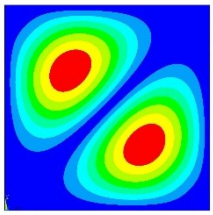
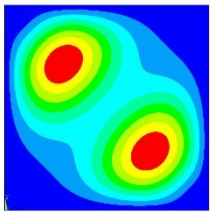
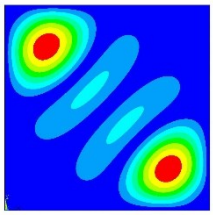
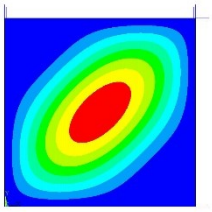
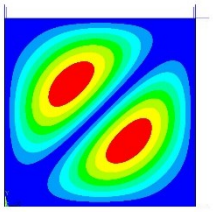
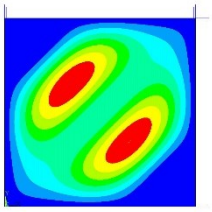
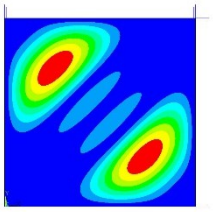


Abbildung 111: Verhältnis der kritischen Beullast je Scheibenabmessung und -dicke bezogen auf die Eingangsgrößen AK und BK (GNIA) (oben: Float; mitte: TVG; unten: ESG)

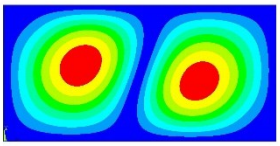
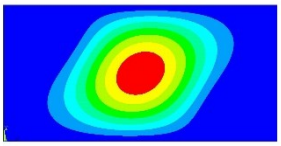
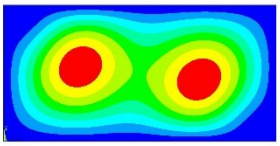
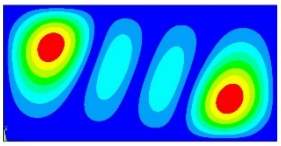
5.2.7 Vergleich mit Schubfeld unter Schubbeanspruchung

1. Beuleigenform	2. Beuleigenform	3. Beuleigenform	4. Beuleigenform
			
F_{Krit} = 50,6 kN	F_{Krit} = 69,4 kN	F_{Krit} = 106,9 kN	F_{Krit} =122,6 kN

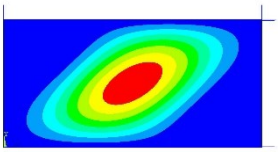
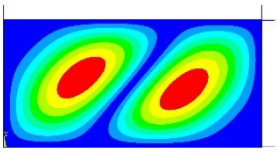
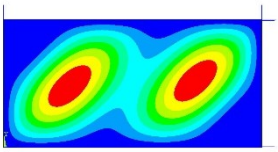
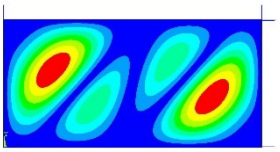
(b x h) =1000mm x 1000mm; AK = 1mm; BK = 50mm; t = 5,8mm

			
F_{Krit} = 110,0 kN	F_{Krit} = 136,6 kN	F_{Krit} = 293,1 kN	F_{Krit} = 316,5 kN

(b x h) =1000mm x 1000mm; Schubbeanspruchung; t = 5,8mm

			
F_{Krit} = 47,2 kN	F_{Krit} = 52,5 kN	F_{Krit} = 66,4 kN	F_{Krit} = 74,5 kN

(b x h) =2000mm x 1000mm; AK = 1mm; BK = 50mm; t = 5,8mm

			
F_{Krit} = 155,0 kN	F_{Krit} = 155,5 kN	F_{Krit} = 234,6 kN	F_{Krit} = 267,8 kN

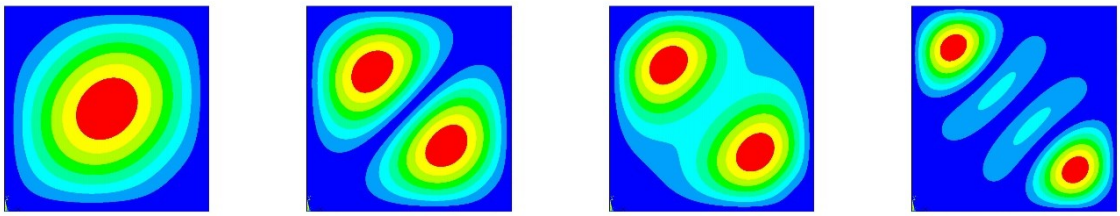
(b x h) =2000mm x 1000mm; Schubbeanspruchung; t = 5,8mm

F_{Krit} = 46,8 kN F_{Krit} = 52,5 kN F_{Krit} = 65,8 kN F_{Krit} = 73,8 kN

(b x h) =1000mm x 2000mm; AK = 1mm; BK = 50mm; t = 5,8mm

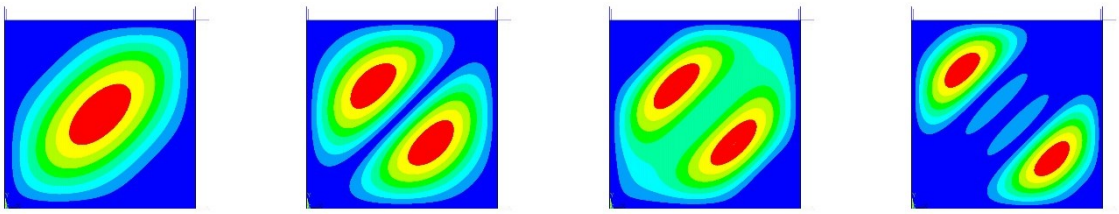
F_{Krit} = 77,5 kN F_{Krit} = 77,74 kN F_{Krit} = 117,3 kN F_{Krit} = 133,9 kN

(b x h) =1000mm x 2000mm; Schubbeanspruchung; t = 5,8mm



F_{Krit} = 25,3 kN F_{Krit} = 34,7 kN F_{Krit} = 53,4 kN F_{Krit} = 61,4 kN

(b x h) =2000mm x 2000mm; AK = 1mm; BK = 50mm; t = 5,8mm



F_{Krit} = 55,2 kN F_{Krit} = 68,4 kN F_{Krit} = 146,9 kN F_{Krit} = 158,6 kN

(b x h) =2000mm x 2000mm; Schubbeanspruchung; t = 5,8mm

Abbildung 112: Exemplarische Vorstellung von Beulfiguren und Verzweigungslasten für verschiedene Scheibenformate

5.3 Parameterstudie am Gesamtsystem

5.3.2 Parameterstudie unter Berücksichtigung aller Eingangsgrößen

Tabelle 31: Eingangsgrößen und -werte für die Parameterstudie am Gesamtsystem (Kapitel 5.3.2)

Parameter	Einheit	Wert	Bemerkung
b	mm	2280	Glasscheibenabmessung (Breite)
h	mm	2100	Glasscheibenabmessung (Höhe)
t	mm	5,8	minimale Scheibendicke nach Toleranzabzug (DIN EN 572-8, 2012)
		6,0	Nenndicke
		6,2	maximale Scheibendicke nach Toleranzabzug (DIN EN 572-8, 2012)
E_{Glas}	MPa	67.000	gewählt
		70.000	E-Modul nach (DIN 18008-1, 2010)
		73.000	E-Modul für Float nach (DIN 1249-10, 1990)
ν_{Glas}	-	0,20	Querdehnzahl nach (DIN EN 572-1, 2012)
		0,23	Querdehnzahl nach (DIN 18008-1, 2010)
		0,26	gewählt
E_{Rahmen}	MPa	11.600	E-Modul (parallel) Holz (GL24h)
		70.000	E-Modul Aluminium
		210.000	E-Modul Stahl
I_{Rahmen}	cm^4	21,3	gewählt (Querschnitt b x h 40mm x 40mm)
		833,3	gewählt (Querschnitt b x h 100mm x 100mm)
		5.461,3	gewählt (Querschnitt b x h 160mm x 160mm)
AK	mm	50	gewählt
		100	gewählt
		150	gewählt
		200	gewählt
BK	mm	50	gewählt
		100	gewählt
		150	gewählt

$c_{F,Konnektor}$	Nmm	50.000 1.000.000 15.000.000	Abschätzungen durch Vorversuche und Kapitel 4.1.4.3 (von POM bei erhöhter Temperatur bis Stahl)
$c_{V,Konnektor}$	Nmm	100 1.000 10.000	gewählt gewählt gewählt
$c_{\varphi,Glas}$	Nmm/°	1 5.000 50.000	Verweis auf (Buddenberg, et al., 2015) (von gelenkig bis hohe Drehfedersteifigkeit)
$c_{\varphi,Rahmen}$ (oben)	Nmm/°	1 1.500.000 3.000.000	Abschätzungen durch Vorversuche Kapitel 4.1.6 (von gelenkig bis hohe Drehfedersteifigkeit)
$c_{\varphi,Rahmen}$ (unten)	Nmm/°	1 5.000.000 10.000.000	Abschätzungen durch Vorversuche Kapitel 4.1.6 (von gelenkig bis biegesteif)
u	mm	10	Vorgegebene Horizontalverformung an der oberen Rahmenecke (weggesteuerte Berechnung)
q	N/mm²	0,00015 0,001 0,00264	entspricht Eigengewicht gewählt entspricht maximaler Windlast (Küste)

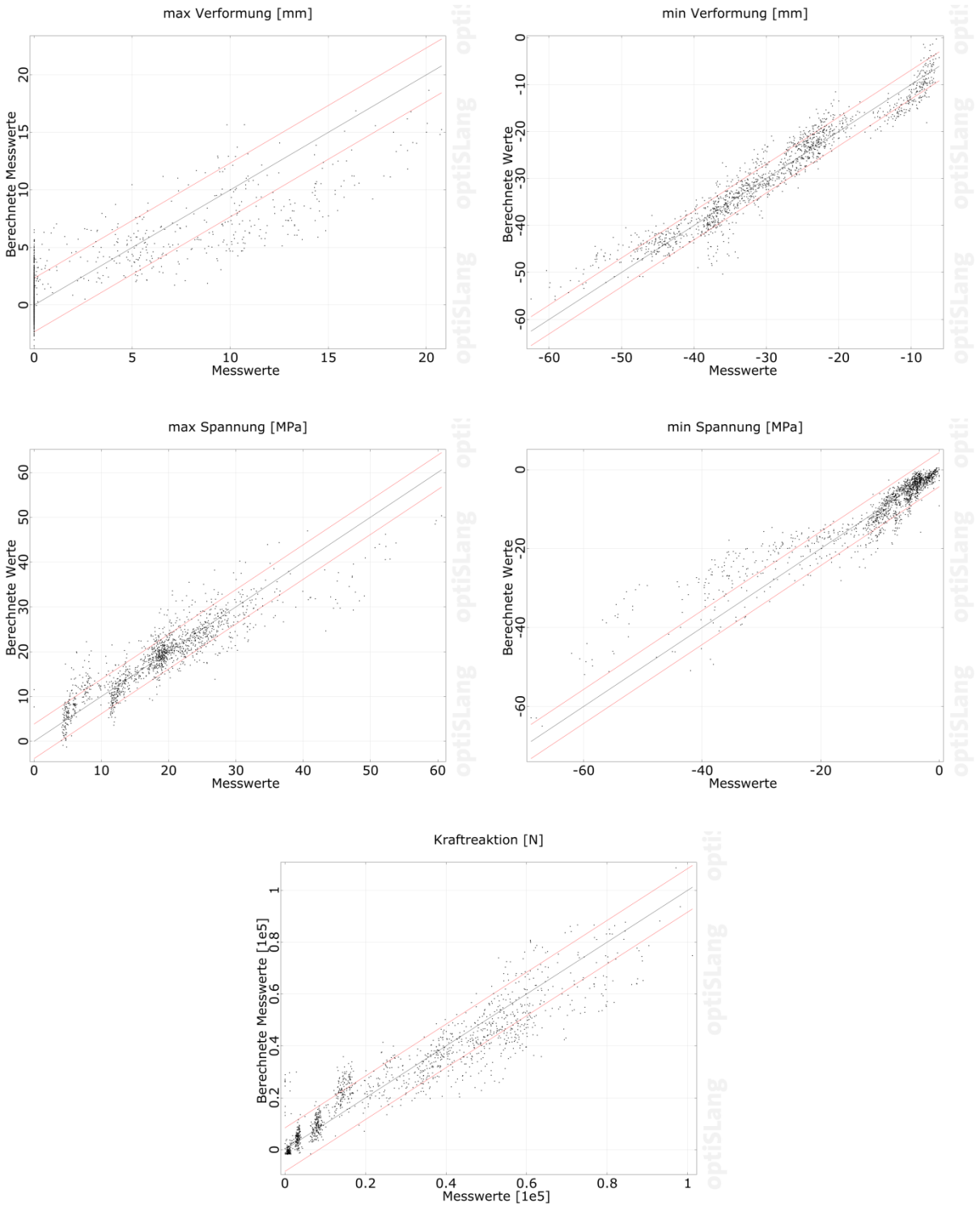


Abbildung 113: Residuendiagramme der Ausgangsgrößen (Parameterstudie Kapitel 5.3.2; Konfidenzintervall ± 3 σ)

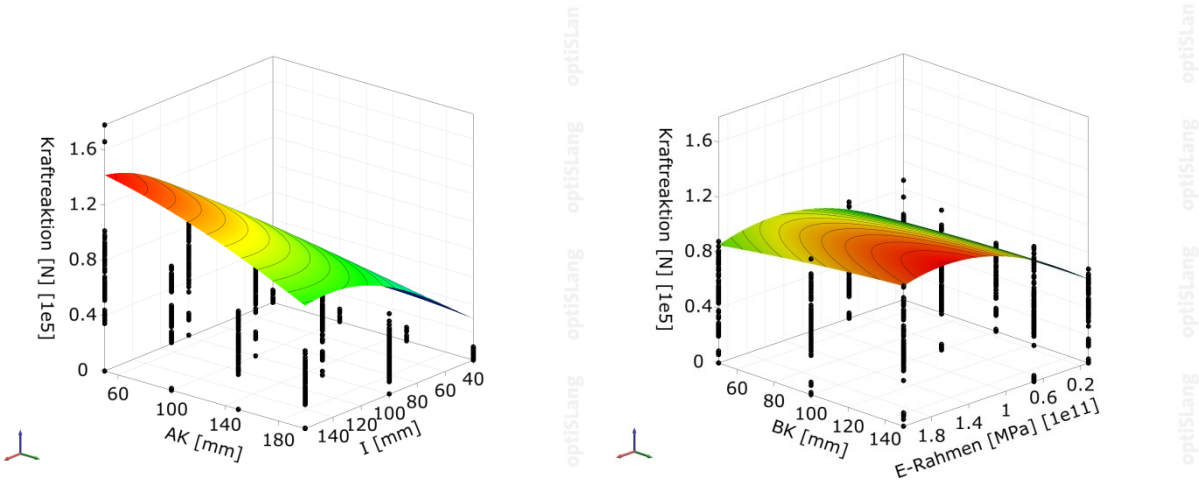


Abbildung 114: 3D-Plot der Antwortfläche für die Ausgangsgröße Kraftreaktion für vier ausgewählte Eingangsgrößen (Kapitel 5.3.2)

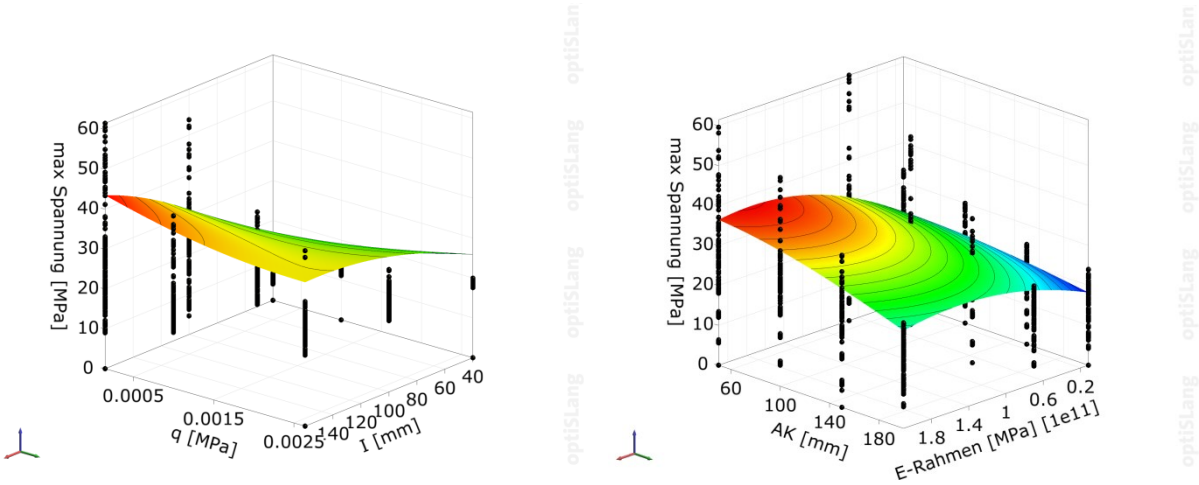


Abbildung 115: 3D-Plot der Antwortfläche für die Ausgangsgröße max Spannung für vier ausgewählte Eingangsgrößen (Kapitel 5.3.2)

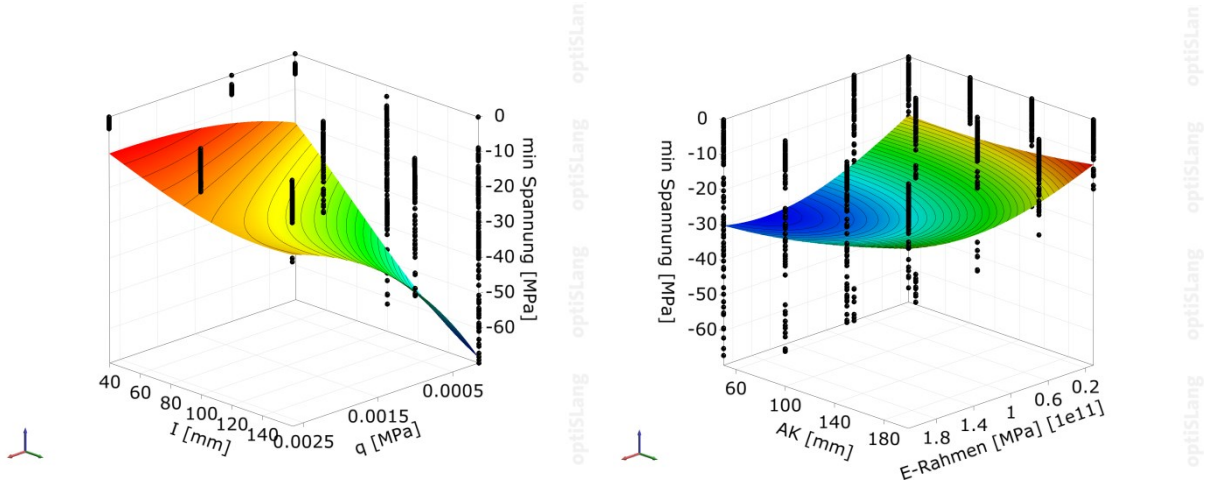


Abbildung 116: 3D-Plot der Antwortfläche für die Ausgangsgröße min Spannung für vier ausgewählte Eingangsgrößen (Kapitel 5.3.2)

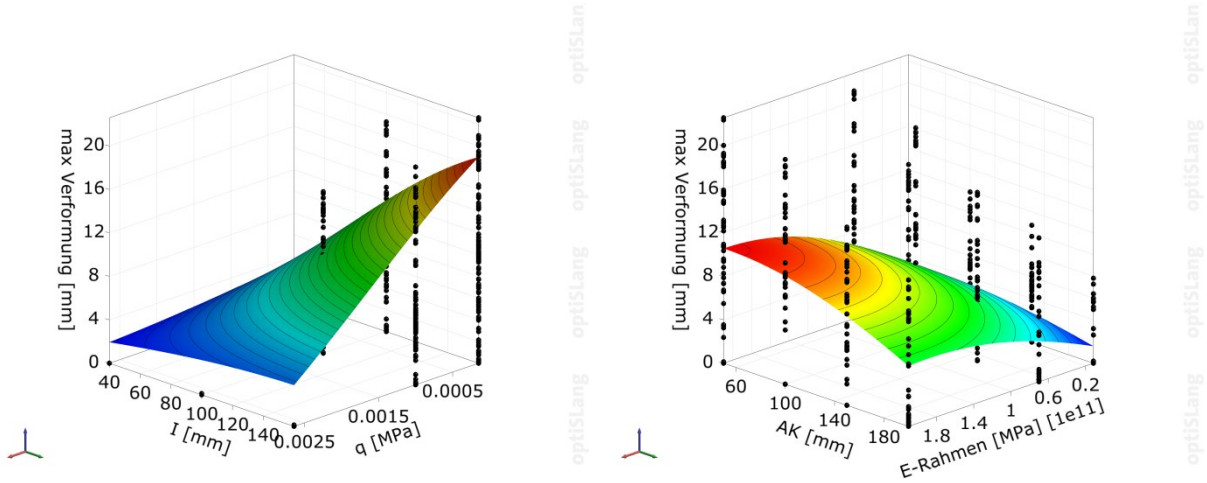


Abbildung 117: 3D-Plot der Antwortfläche für die Ausgangsgröße max Verformung für vier ausgewählte Eingangsgrößen (Kapitel 5.3.2)

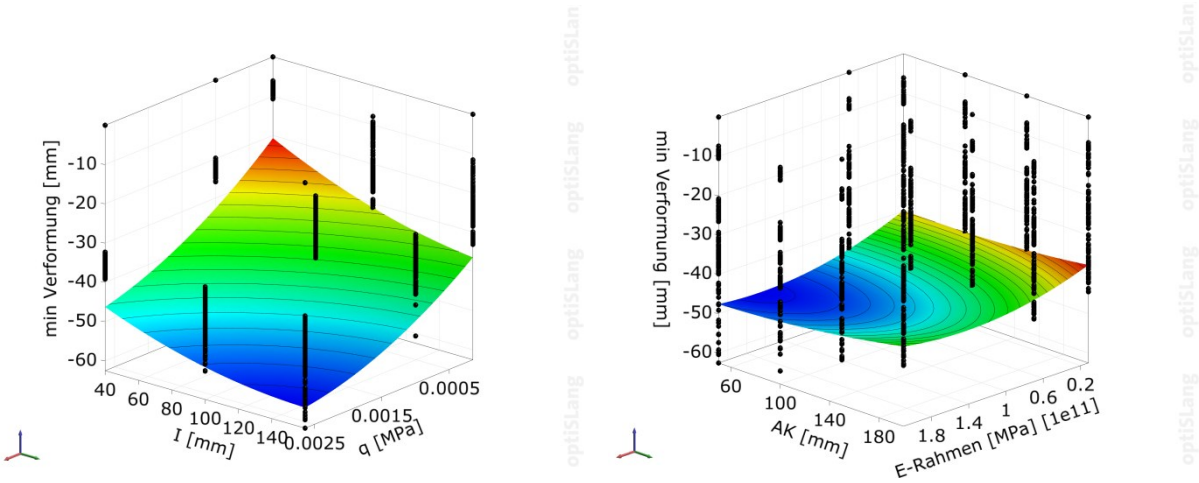


Abbildung 118: 3D-Plot der Antwortfläche für die Ausgangsgröße min Verformung für vier ausgewählte Eingangsgrößen (Kapitel 5.3.2)

5.3.3 Parameterstudie mit reduzierten Eingangsgrößen

Tabelle 32: Eingangsgrößen und -werte für die Parameterstudie am Gesamtsystem (Kapitel 5.3.3)

Parameter	Einheit	Wert	Bemerkung
b	mm	2280	Glasscheibenabmessung (Breite)
h	mm	2100	Glasscheibenabmessung (Höhe)
t	mm	5,8	minimale Scheibendicke nach Toleranzabzug (DIN EN 572-8, 2012)
E_{Glas}	MPa	70.000	E-Modul nach (DIN 18008-1, 2010)
ν_{Glas}	-	0,23	Querdehnzahl nach (DIN 18008-1, 2010)
E_{Rahmen}	MPa	11.600	E-Modul (parallel) Holz (GL24h)
I_{Rahmen}	cm^4	5.461,3	gewählt (Querschnitt b x h 160mm x 160mm)
AK	mm	25 bis 200	gewählt
BK	mm	25 bis 200	gewählt
$c_{F,Konnektor}$	Nmm	50.000 bis 15.000.000	Abschätzungen durch Vorversuche und Kapitel 4.1.4.3 (von POM bei erhöhter Temperatur bis Stahl)
$c_{V,Konnektor}$	Nmm	100 bis 10.000	gewählt
F	kN	25	Vorgegebene Horizontalbelastung an der oberen Rahmenecke (kraftgesteuerte Berechnung)
q	N/mm²	0,00015	entspricht Eigengewicht

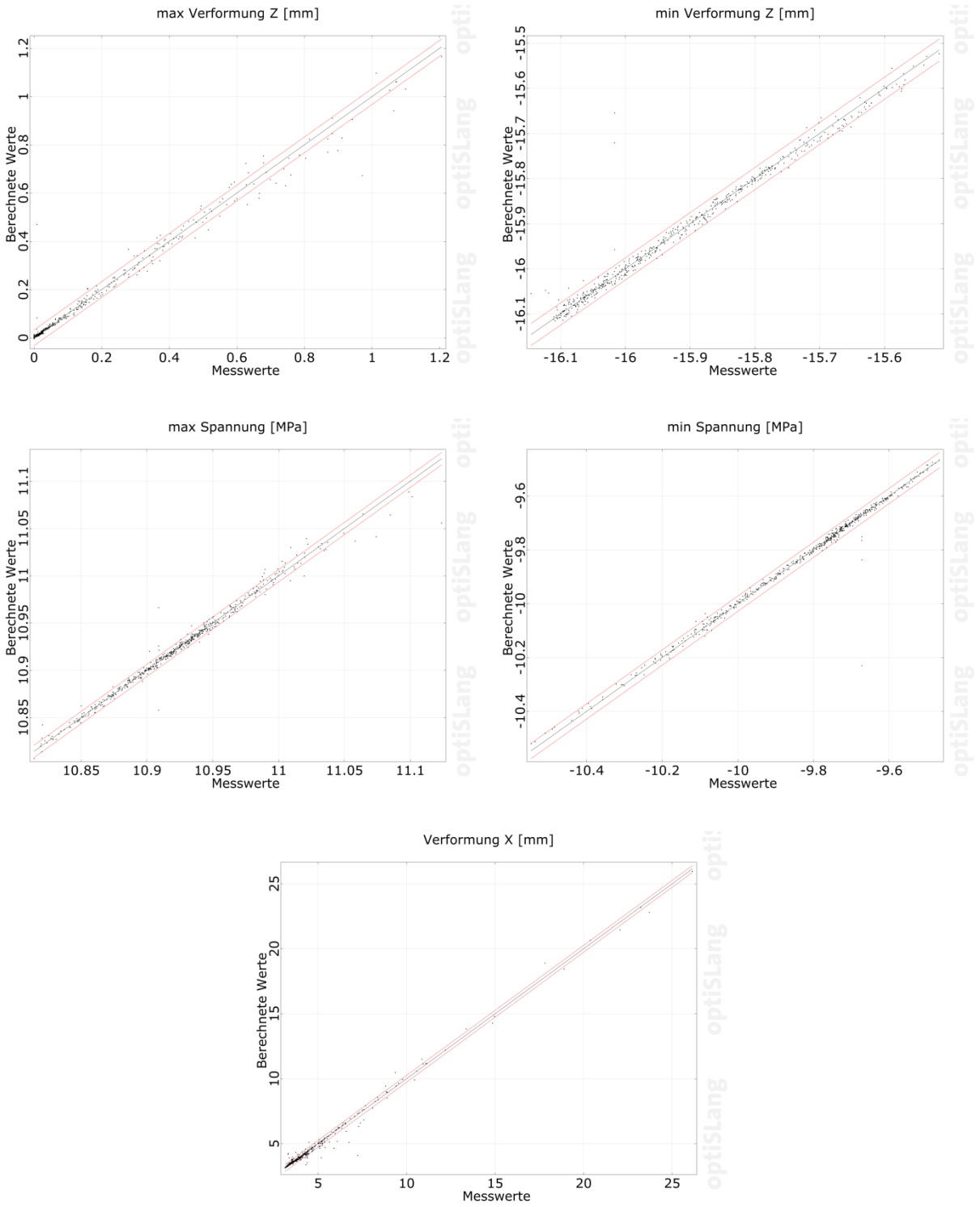


Abbildung 119: Residuendiagramme der Ausgangsgrößen (σ = 1) (Parameterstudie Kapitel 5.3.3; Konfidenzintervall ± 3 σ)

Zur Visualisierung des Einflusses jedes Eingangsparameters auf die Verformung in Scheibenebene erfolgt zusätzlich eine statistische Auswertung mit dem Programm MATLAB R2016b der Firma MathWorks. Die Ergebnisse werden in Abbildung 120 gezeigt. Die Eingangswerte, deren Verteilung in optiSlang mit dem Advanced Latin Hypercube Sampling ermittelt wird, sind für die Auswertung in Klassen nach Tabelle 33 zusammengefasst.

Tabelle 33: Einteilung in Klassen der Eingangsgrößen (Parameterstudie Kapitel 5.3.3)

AK und BK [mm]		**c_F [Nmm] x 10^3**		**c_V [Nmm] x 10^3**	
Klasse	Wertebereich	Klasse	Wertebereich	Klasse	Wertebereich
40	25 < x ≤ 40	3	0,05 < x ≤ 3	-10	-10 < x ≤ -8
80	40 < x ≤ 80	6	3 < x ≤ 6	-8	-8 < x ≤ -6
120	80 < x ≤ 120	9	6 < x ≤ 9	-6	-6 < x ≤ -4
160	120 < x ≤ 160	12	9 < x ≤ 12	-4	-4 < x ≤ -2
200	160 < x ≤ 200	15	12 < x ≤ 15	-2	-2 < x ≤ -0,1

Ein Einfluss der Geometriegrößen AK und BK auf das Verformungsverhalten lässt sich deutlich erkennen, während eine Tendenz für die Parameter Vorspannung (c_v) und Federsteifigkeit (c_F) nicht angegeben werden kann.

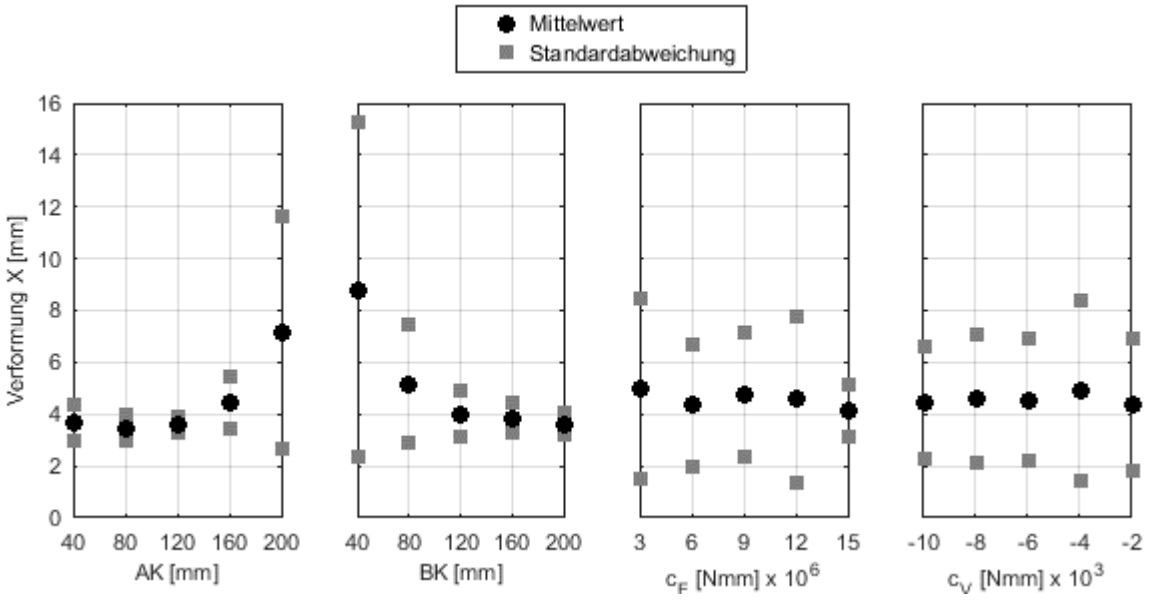


Abbildung 120: Antwortverhalten der Eingangsparameter auf die Verformung in Scheibenebene (Parameterstudie Kapitel 5.3.3)

Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu (Westerkamp-Freitag, 2013), die die Ausbildung von Druckdiagonalen durch die Vorspannung der Klotzung und einen daraus resultierenden steigenden Widerstand des Systems gegen die Belastung in Scheibenebene beschreibt. Aus diesem Grund erfolgen zusätzliche Untersuchungen deren Ergebnisse nachfolgend erläutert werden.

Die Ergebnisse bestätigen den steigenden Widerstand des Systems gegen die Belastung in Scheibenebene mit zunehmender Vorspannung. Allerdings besitzen die geometrischen Parameter AK und BK einen deutlich größeren Einfluss. Dies liegt darin begründet, dass in den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen die Ausbildung von Druckdiagonalen durch Vorspannen der Konnektoren wie in (Westerkamp-Freitag, 2013) beschrieben, nicht bestätigt werden kann. Vielmehr bildet sich eine Druckzone in den Scheibenecken zwischen den dort angeordneten Konnektoren aus, wie in Abbildung 121 anhand des Verlaufs der Spannungstrajektorien verdeutlicht wird. Durch die Vorspannung der Klötze ändern sich die Spannungswerte in der Druckdiagonalen nur geringfügig. Dies lässt den Schluss zu, dass das Aufbringen der Vorspannung durch die Konnektoren lediglich die Rahmenecken aussteift und dadurch den Widerstand des Systems gegen die Belastung in Scheibenebene erhöht.

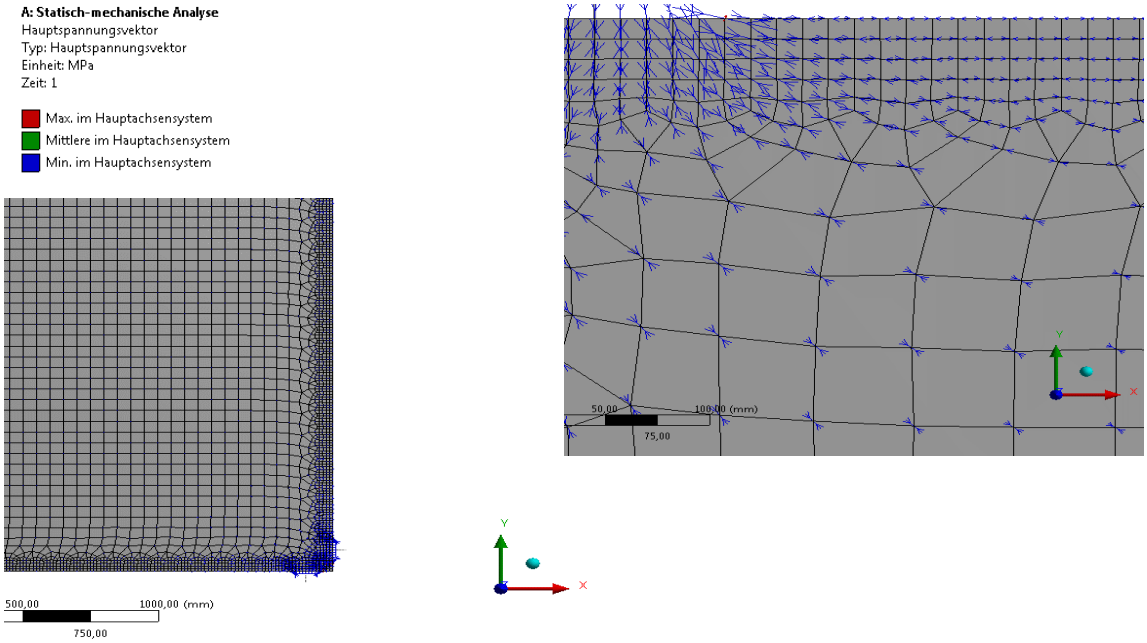


Abbildung 121: Verlauf der Spannungstrajektorien durch Vorspannen der Konnektoren

5.3.4 Parameterstudie zur Berücksichtigung von Abweichungen der Lagerung

Tabelle 34: Eingangsgrößen und -werte für die Parameterstudie am Gesamtsystem (Kapitel 5.3.4)

Parameter	Einheit	Wert	Bemerkung
b	mm	2280	Glasscheibenabmessung (Breite)
h	mm	2100	Glasscheibenabmessung (Höhe)
t	mm	5,8	minimale Scheibendicke nach Toleranzabzug (DIN EN 572-8, 2012)
E_{Glas}	MPa	70.000	E-Modul nach (DIN 18008-1, 2010)
ν_{Glas}	-	0,23	Querdehnzahl nach (DIN 18008-1, 2010)
E_{Rahmen}	MPa	11.600	E-Modul (parallel) Holz (GL24h)
I_{Rahmen}	cm^4	5.461,3	gewählt (Querschnitt b x h 160mm x 160mm)
AK	mm	90 bis 110	gewählt
BK	mm	90 bis 110	gewählt
$c_{F,Konnektor}$	Nmm	50.000	Abschätzungen durch Vorversuche und Kapitel 4.1.4.3 (POM bei erhöhter Temperatur)
$c_{V,Konnektor}$	Nmm	100	gewählt
F	kN	25	Vorgegebene Horizontalbelastung an der oberen Rahmenecke (kraftgesteuerte Berechnung)

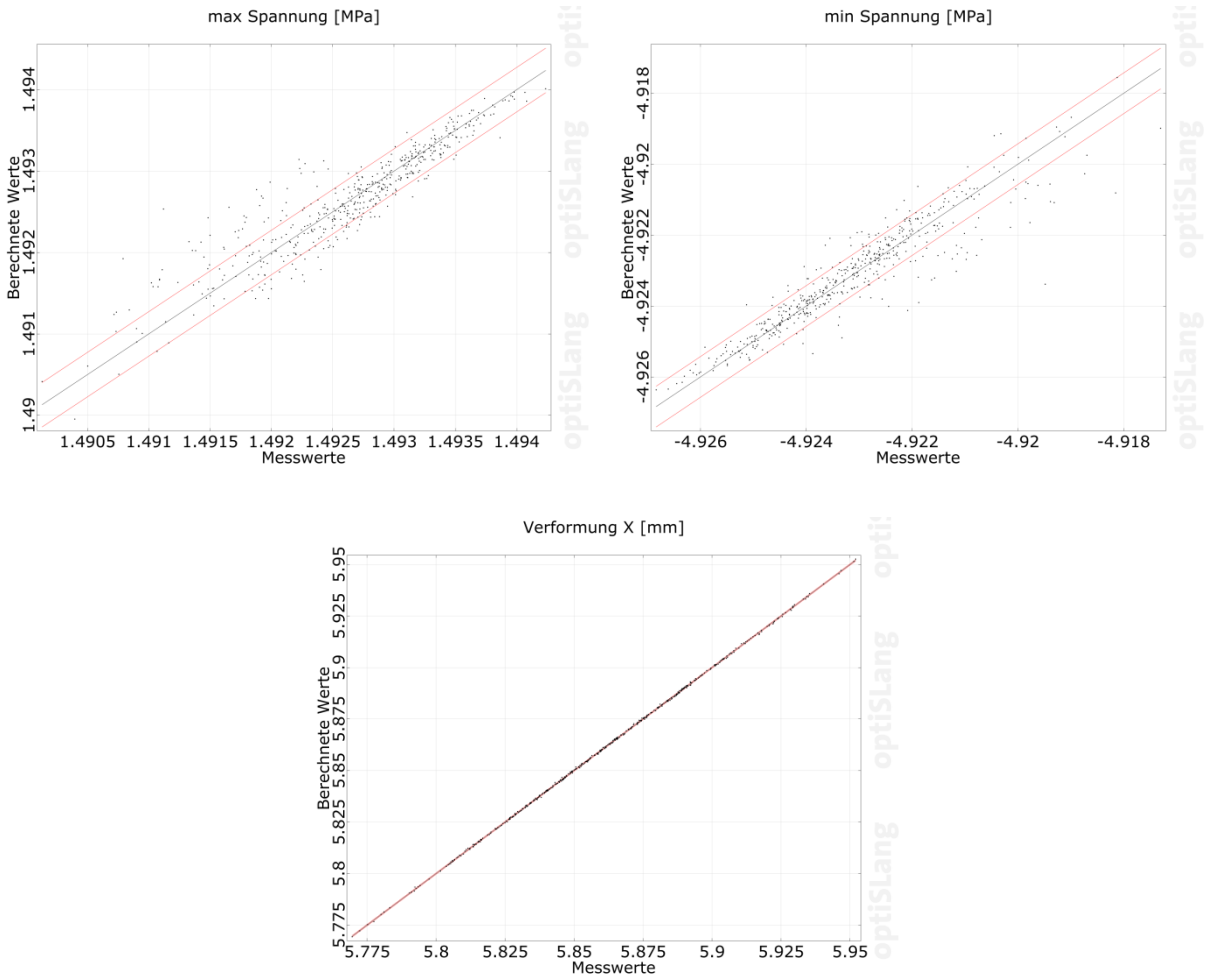


Abbildung 122: Residuendiagramme der Ausgangsgrößen (Parameterstudie Kapitel 5.3.4; Konfidenzintervall ± 3 σ)

5.3.5 Zusätzliches Element in Reihe

Tabelle 35: Eingangsgrößen und -werte der Untersuchung für ein zusätzliches Element in Reihe

Parameter	Einheit	Wert	Bemerkung
b	mm	2280	Glasscheibenabmessung (Breite)
h	mm	2100	Glasscheibenabmessung (Höhe)
t	mm	5,8	minimale Scheibendicke nach Toleranzabzug (DIN EN 572-8, 2012)
E_{Glas}	MPa	70.000	E-Modul nach (DIN 18008-1, 2010)
ν_{Glas}	-	0,23	Querdehnzahl nach (DIN 18008-1, 2010)
E_{Rahmen}	MPa	11.600	E-Modul (parallel) Holz (GL24h)
I_{Rahmen}	cm^4	5.461,3	gewählt entsprechend Forschungsprojekt (Rechteckquerschnitt b x h 160mm x 160mm)
AK	mm	100	gewählt
BK	mm	100	gewählt
$c_{F,Konnektor}$	Nmm	50.000	Abschätzungen durch Vorversuche und Kapitel 4.1.4.3 (POM bei erhöhter Temperatur)
$c_{V,Konnektor}$	Nmm	100	gewählt
u	mm	10	Vorgegebene Horizontalverschiebung an der oberen Rahmenecke (weggesteuerte Berechnung)
q	N/mm²	0,0005	Halbe Referenzflächenlast
		0,001	Referenzflächenlast
		0,002	Doppelte Referenzflächenlast

Tabelle 36: Ergebnisse der Untersuchung für ein zusätzliches Element in Reihe

Parameter	Einzel-element	Zwei Elemente in Reihe									
		Vergleich 1		Vergleich 2		Vergleich 3		Vergleich 4		Vergleich 5	
		erstes	zweites	erstes	zweites	erstes	zweites	erstes	zweites	erstes	zweites
Flächenlast [MPa]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,0005	0,001	0,001	0,0005
Kraftreaktion [kN]	37,8	87,2		83,7		83,8		87,0		86,8	
Min Verschiebungs-komponente in z [mm]	-31,8	-33,0	-33,1	-32,9	-41,4	-41,2	-33,1	-26,4	-33,1	-33,0	-26,5
Max Verschiebungs-komponente in z [mm]	0	0	0	0	0	0	0	3,1	0	0	3,5
Min Haupt-zugspannung in Scheibenmitte [MPa]	-8,1	-8,9	-9,0	-8,8	-5,7	-5,7	-8,9	-11,1	-9,0	-8,9	-11,8
Max Haupt-zugspannung in Scheibenmitte [MPa]	17,4	18,3	18,4	18,3	21,6	21,5	18,4	17,4	18,4	18,3	17,8

Anhang zu Kapitel 7

7.1 Validierung des FEM Modells gegen Versuchsergebnisse

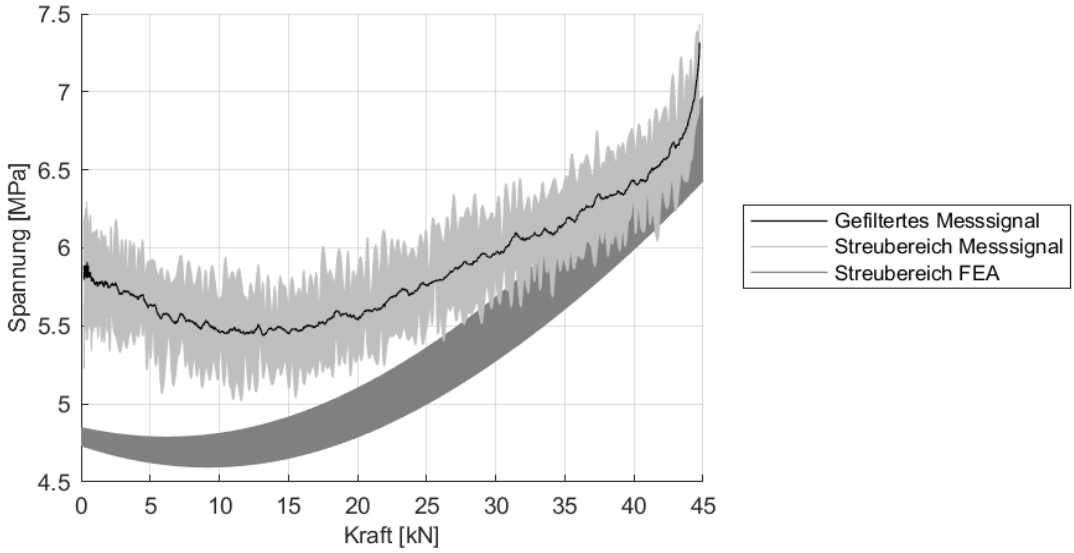


Abbildung 123: Spannungs-Kraft Verlauf Punkt M; Richtung Druck (Scheibenunterkante)

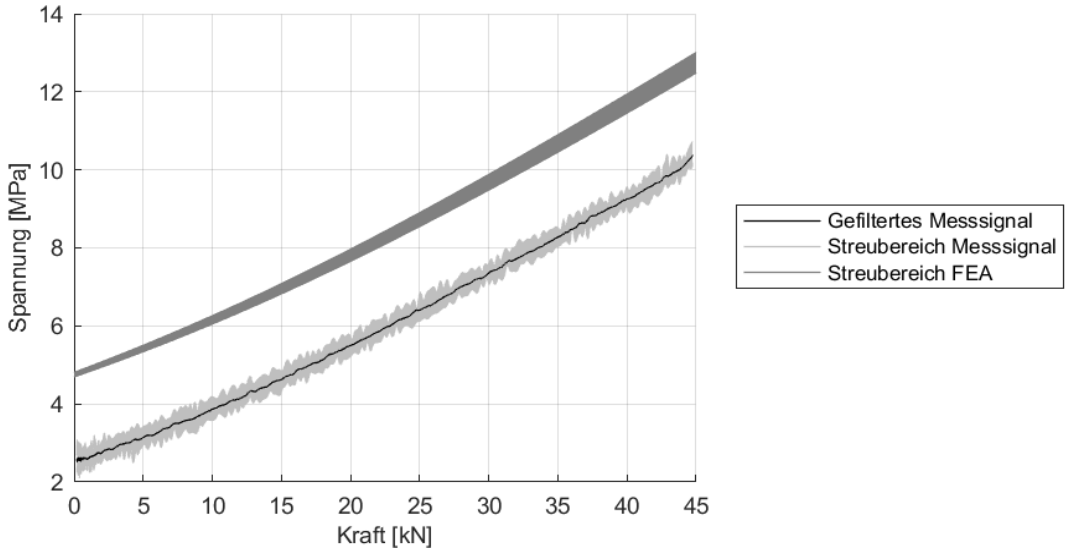


Abbildung 124: Spannungs-Kraft Verlauf Punkt M; Richtung Zug (Scheibenunterkante)

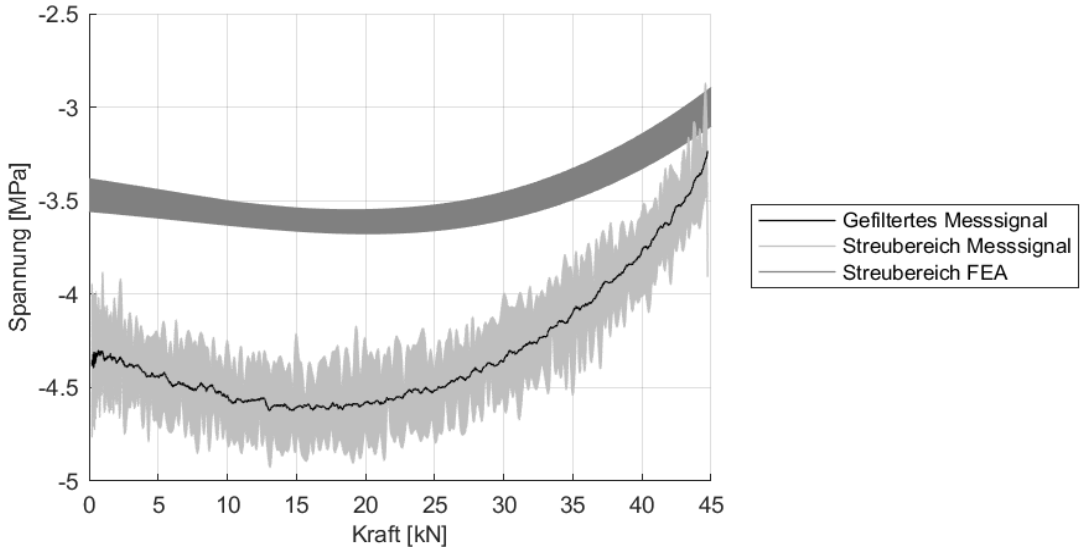


Abbildung 125: Spannungs-Kraft Verlauf Punkt M; Richtung Zug (Scheibenoberkante)

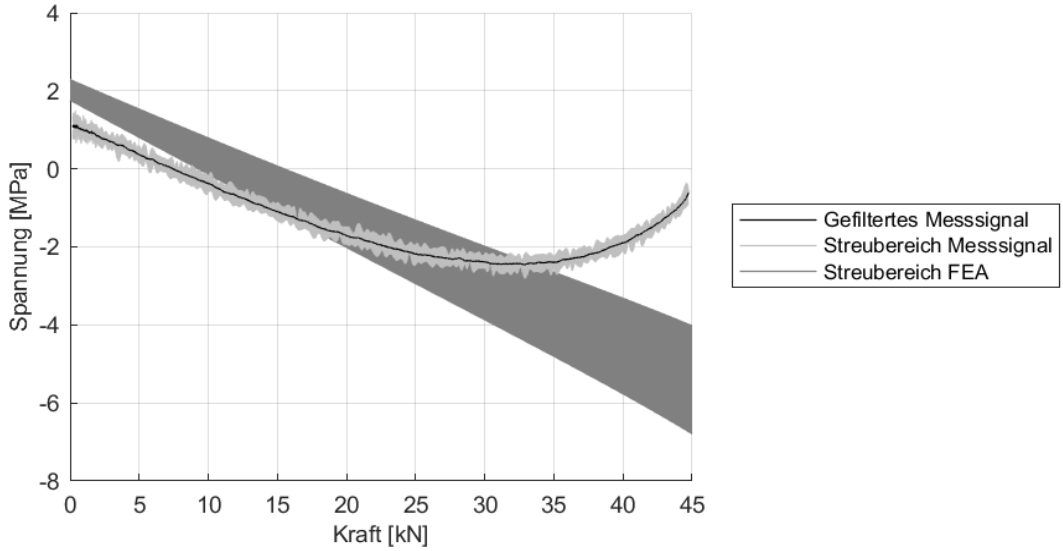


Abbildung 126: Spannungs-Kraft Verlauf Punkt 1; Richtung Druck (Scheibenunterkante)

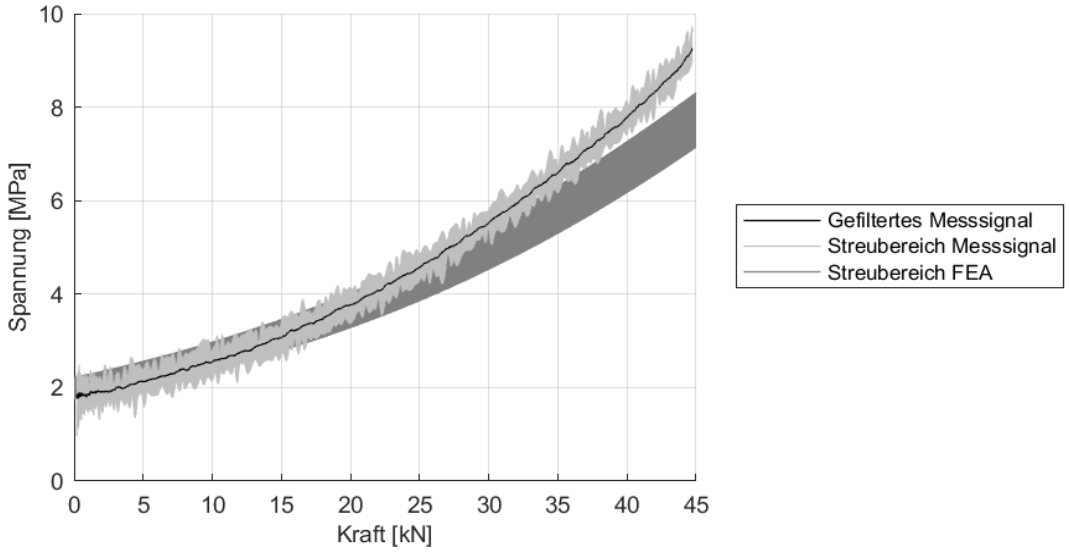


Abbildung 127: Spannungs-Kraft Verlauf Punkt 2; Richtung Zug (Scheibenunterkante)

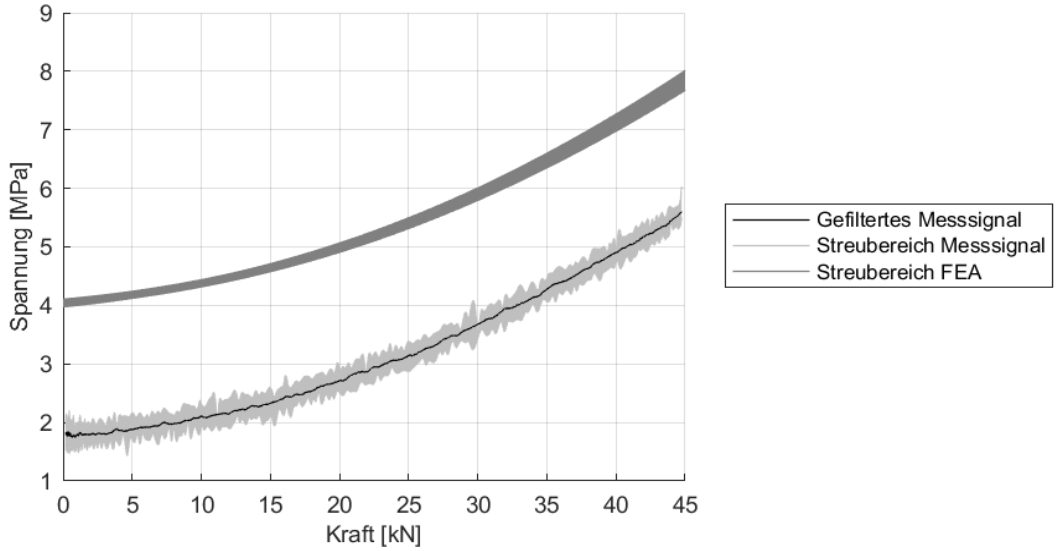


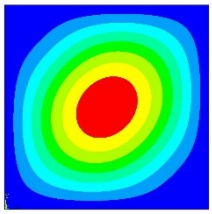
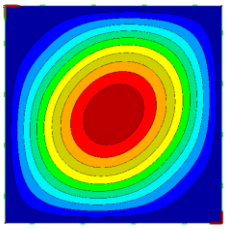
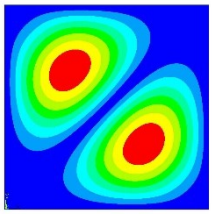
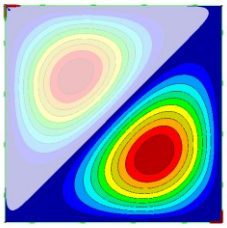
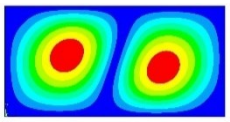
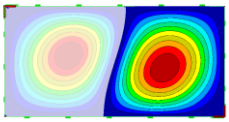
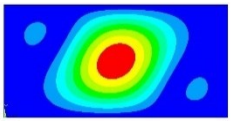
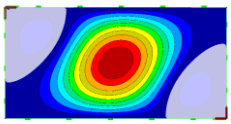
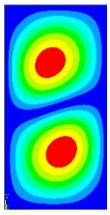
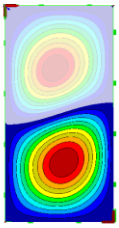
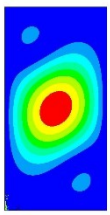
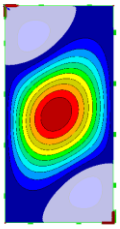
Abbildung 128: Spannungs-Kraft Verlauf Punkt 3; Richtung Druck (Scheibenunterkante)

7.2 Validierung des ANSYS Ergebnisses gegen Dlubal Ergebnisse

Tabelle 37: Vergleich ausgewählter Verzweigungslasten ermittelt mit der FE-Berechnungssoftware von ANSYS und Dlubal (horizontaler Lastanteil)

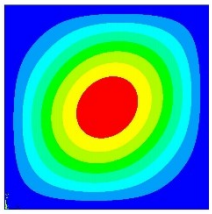
Geometrie [mm]	Ordnungszahl Beuleigenform [-]	Verzweigungslast Horizontale Belastung [kN]		Abweichung [%]
		ANSYS	RFEM	
(bxh) 2000 x 2000	1	83,770	83,918	0,18%
AK = 50	2	114,651	114,776	0,11%
BK = 50	3	176,308	176,626	0,18%
t = 9,7	4	201,774	202,143	0,18%
(bxh) 2000 x 1000	1	201,723	202,257	0,26%
AK = 50	2	224,626	225,081	0,20%
BK = 50	3	285,381	286,168	0,28%
t = 9,7	4	313,923	314,642	0,23%
(bxh) 1000 x 2000	1	92,796	93,044	0,27%
AK = 50	2	103,274	103,486	0,21%
BK = 50	3	131,064	131,425	0,28%
t = 9,7	4	144,541	144,877	0,23%
(bxh) 2000 x 2000	1	17,686	17,705	0,11%
AK = 150	2	22,692	22,698	0,03%
BK = 150	3	30,015	30,016	0,00%
t = 5,8	4	32,091	32,127	0,11%
(bxh) 2000 x 1000	1	39,220	39,254	0,09%
AK = 150	2	43,101	43,141	0,09%
BK = 150	3	53,086	53,174	0,17%
t = 5,8	4	63,550	63,590	0,06%
(bxh) 1000 x 2000	1	15,546	15,566	0,13%
AK = 150	2	17,670	17,698	0,16%
BK = 150	3	21,532	21,578	0,21%
t = 5,8	4	23,606	23,626	0,08%

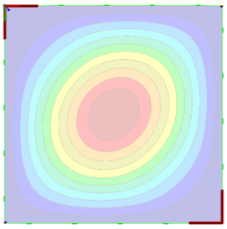
Tabelle 38: Vergleich ausgewählter Beulfiguren ermittelt mit der FE-Berechnungssoftware von ANSYS und Dlubal

Geometrie [mm]	Ordnungszahl Beuleigenform	Verzeigungslast Horizontale Belastung	
		ANSYS	RFEM
(bxh) 2000 x 2000 AK = 50 BK = 50 t = 9,7	1		
	2		
(bxh) 2000 x 1000 AK = 50 BK = 50 t = 9,7	1		
	2		
(bxh) 1000 x 2000 AK = 50 BK = 50 t = 9,7	1		
	2		

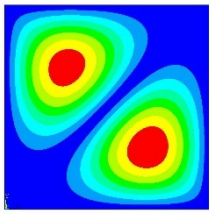
(bxh) 2000 x 2000
AK = 150
BK = 150
t = 5,8

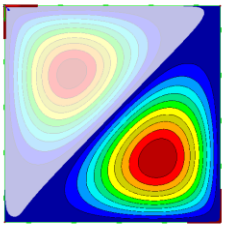
1





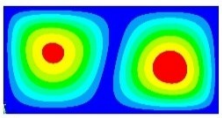
2

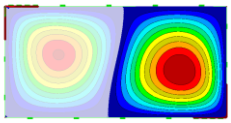




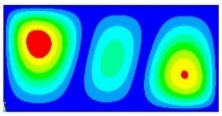
(bxh) 2000 x 1000
AK = 150
BK = 150
t = 5,8

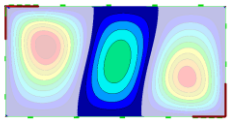
1





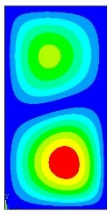
2

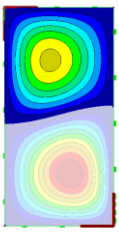




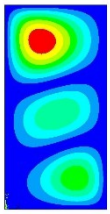
(bxh) 1000 x 2000
AK = 150
BK = 150
t = 5,8

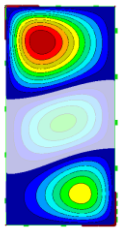
1





2





Anhang zu Kapitel 8

8.3 Beulen

8.3.2 Beulnachweise

8.3.2.1 Modifikationsbeiwert

AK1 BK50

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}0; 6{,}8] \qquad \chi_{Float} = 0{,}3015\,\bar{\lambda} - 0{,}4366 \tag{85}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}3; 8{,}5] \qquad \chi_{TVG} = 0{,}6899\,\bar{\lambda} - 0{,}8969 \tag{86}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}7; 10{,}4] \qquad \chi_{ESG} = 0{,}6535\,\bar{\lambda} - 0{,}6344 \tag{87}$$

AK1 BK100

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}0; 6{,}8] \qquad \chi_{Float} = 0{,}2969\,\bar{\lambda} - 0{,}4292 \tag{88}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}3; 8{,}5] \qquad \chi_{TVG} = 0{,}6445\,\bar{\lambda} - 0{,}8331 \tag{89}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}7; 10{,}4] \qquad \chi_{ESG} = 0{,}6494\,\bar{\lambda} - 0{,}6313 \tag{90}$$

AK1 BK150

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}0; 6{,}8] \qquad \chi_{Float} = 0{,}2931\,\bar{\lambda} - 0{,}4110 \tag{91}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}3; 8{,}5] \qquad \chi_{TVG} = 0{,}5493\,\bar{\lambda} - 0{,}4233 \tag{92}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}7; 11{,}1] \qquad \chi_{ESG} = 0{,}5730\,\bar{\lambda} - 0{,}3359 \tag{93}$$

AK50 BK50

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}0; 6{,}8] \qquad \chi_{Float} = 0{,}2978\,\bar{\lambda} - 0{,}4301 \tag{94}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}3; 8{,}5] \qquad \chi_{TVG} = 0{,}5916\,\bar{\lambda} - 0{,}6910 \tag{95}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}7; 10{,}4] \qquad \chi_{ESG} = 0{,}6392\,\bar{\lambda} - 0{,}6210 \tag{96}$$

AK50 BK100

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}0; 6{,}8] \qquad \chi_{Float} = 0{,}2920\,\bar{\lambda} - 0{,}4234 \tag{97}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}3; 8{,}5] \qquad \chi_{TVG} = 0{,}4722\,\bar{\lambda} - 0{,}2859 \tag{98}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}7; 11{,}1] \qquad \chi_{ESG} = 0{,}5332\,\bar{\lambda} - 0{,}2552 \tag{99}$$

AK50 BK150

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}1; 6{,}8] \qquad \chi_{Float} = 0{,}2869\,\bar{\lambda} - 0{,}4012 \tag{100}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}3; 8{,}5] \qquad \chi_{TVG} = 0{,}4287\,\bar{\lambda} - 0{,}1019 \tag{101}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [1{,}7; 11{,}1] \qquad \chi_{ESG} = 0{,}4661\,\bar{\lambda} - 0{,}1271 \tag{102}$$

AK100 BK50

$$W_{\bar{\lambda}} = [2{,}4; 6{,}8] \qquad \chi_{Float} = 0{,}2944\,\bar{\lambda} - 0{,}4726 \tag{103}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [3{,}1; 8{,}5] \qquad \chi_{TVG} = 0{,}2308\,\bar{\lambda} + 0{,}7503 \tag{104}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [4{,}0; 11{,}1] \qquad \chi_{ESG} = 0{,}3389\,\bar{\lambda} + 0{,}2765 \tag{105}$$

AK100 BK100

$$W_{\bar{\lambda}} = [2{,}4; 6{,}8] \qquad \chi_{Float} = 0{,}2791\,\bar{\lambda} - 0{,}4280 \tag{106}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [3{,}1; 8{,}5] \qquad \chi_{TVG} = 0{,}6902\,\bar{\lambda} + 0{,}5070 \tag{107}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [4{,}0; 11{,}1] \qquad \chi_{ESG} = 0{,}6540\,\bar{\lambda} + 0{,}6888 \tag{108}$$

AK100 BK150

$$W_{\bar{\lambda}} = [2{,}4; 6{,}8] \qquad \chi_{Float} = 0{,}2724\,\bar{\lambda} - 0{,}4281 \tag{109}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [3{,}1; 8{,}5] \qquad \chi_{TVG} = 0{,}2501\,\bar{\lambda} + 0{,}6168 \tag{110}$$

$$W_{\bar{\lambda}} = [4{,}0; 11{,}1] \qquad \chi_{ESG} = 0{,}2726\,\bar{\lambda} + 0{,}5337 \tag{111}$$