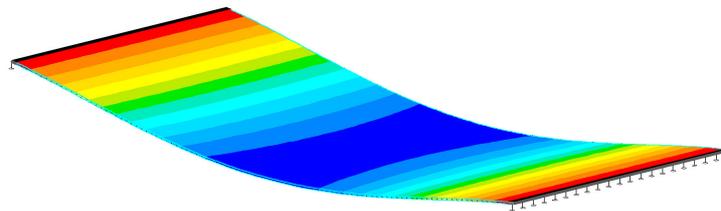


BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL



ZUR AKTIVIERUNG DES VERBUNDTRAGVERHALTENS VON
GLASLAMINATEN



DEM
FACHBEREICH ARCHITEKTUR, BAUINGENIEURWESEN,
MASCHINENBAU, SICHERHEITSTECHNIK VORGELEGT ALS DISSERTATION
IM FACH ARCHITEKTUR ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN
GRADES EINES DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

VON HANNO SASTRÉ

DISSERTATION 2007

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20080012

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20080012>]

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Lehrgebiet für Tragwerklehre und Baukonstruktion an der Bergischen Universität Wuppertal und am Institut für Tragwerksentwurf an der TU-Graz.

Für die hervorragende Unterstützung und Förderung bei der Forschung und in der Lehre, während meiner Zeit im Lehrgebiet und darüber hinaus, danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.- Karl Schwalbenhofer. Seine Diskussionsbereitschaft und wertvollen Anregungen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Führer danke ich für seine Unterstützung und die motivierenden Gespräche sowie die Übernahme des Koreferates.

Frau Dipl.-Ing. Sigrid Prehm, meiner Kollegin am Lehrstuhl für Tragwerklehre, danke für ihre stete Hilfsbereitschaft und die vielen kollegialen und motivierenden Ratschläge. Darüber hinaus danke ich meinen Kollegen in Wuppertal und am Institut für Tragwerksentwurf der TU Graz für die Unterstützung, sowie Peter Meys für die Durchsicht dieser Arbeit.

Vor allem aber danke ich meiner Mutter.

Hanno Sastré, im März 2007

Diese Dissertation wurde dem Fachbereich Architektur, Kunst, Design zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften im Fach Architektur im März 2007 vorgelegt. Nach der Gründung des Fachbereiches Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau, Sicherheitstechnik fand die Disputation am 12.12.2007 in der Bergischen Universität Wuppertal im Hörsaal HD 35 um 16.00 Uhr statt.

Den Vorsitz der Prüfungskommission hatte Univ.-Prof.Dr.-Ing. Guido Spars und beratendes Mitglied aus den Reihen der wissenschaftlichen Mitarbeiter war Dr.-Ing. Daniel Schulten. An dieser Stelle möchte ich Herrn Univ.-Prof.Dr.-Ing. Guido Spars und Herrn Dr.-Ing. Daniel Schulten für die bereitwillige Übernahme dieser Aufgaben danken.

Hanno Sastré, im Dezember 2007

ABSTRACT

A sound knowledge about the building materials is a prerequisite for every constructively planned action. Owing to the complexity of the material behaviour, this applies especially to glass. This treatise, thus, deals with the raw material glass, the basics for a flawless fitting of glass as well as the behaviour of its fitting constituents. The most important method - the gluing of glass - is mostly determined by the visco-elastic characteristics and those depending on the temperature of the utilised glue materials. For laminated glass panes, this dependency means that the lamination must not be taken into consideration and the panes, therefore, become seemingly heavier and attain a minor span.

According to the idea of developing a constructive and, therefore, calculable lamination, the characteristics of glass panes with a coupling on the edges will be analysed experimentally and by applying the finite element method. This paper will be showing that the lamination edge compound offers good chances for realisation as the local voltage level in the glass does not vary greatly from the voltage level in comparable lamination glass panes. With a primal calculation of comparison, it could be observed that a glass saving of 15-30% can be realised. On the basis of constructive contemplation about the implementation of the lamination edge compound, further approaches to the constructive glass construction will be developed, which will be offering plastic independently solutions as well.

KURZFASSUNG

Für jedes konstruktiv planerische Handeln ist ein fundiertes Wissen über die Baustoffe primäre Voraussetzung. Das trifft für Glas, auf Grund der Komplexität des Materialverhaltens, im besonderen Maße zu. Diese Arbeit beschäftigt sich deshalb zunächst mit dem Werkstoff Glas, den Grundlagen zum schadensfreien Fügen von Glas sowie dem Verhalten seiner Fügepartner. Die wichtigste Methode, das Kleben von Glas, wird im Wesentlichen durch die viskoelastischen und temperaturabhängigen Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe bestimmt. Für Verbundglasscheiben bedeutet diese Abhängigkeit, dass der Verbund bei einer Bemessung nicht berücksichtigt werden darf und die Scheiben deshalb deutlich schwerer werden bzw. eine geringere Spannweite erreichen.

Von der Idee ausgehend, einen konstruktiven und damit sicher kalkulierbaren Verbund zu entwickeln, werden die Eigenschaften von Glasscheiben mit einer am Rand bzw. an den Kanten angebrachten Kopplung experimentell und mit der Finiten Element Methode analysiert. Mit dieser Arbeit wird gezeigt, dass der „Kantenschubverbund“ gute Realisierungschancen aufweist, da das lokale Spannungsniveau im Glas an den Kopplungselementen nicht wesentlich vom Spannungsniveau in vergleichbaren Verbundglasscheiben abweicht. Bei einer ersten Vergleichsbemessung konnte festgestellt werden, dass eine Glaserparnis von 15-30 % realisierbar ist. Auf Grundlage der konstruktiven Überlegungen zur Umsetzung des Kantenschubverbundes, werden weitere Ansätze für den konstruktiven Glasbau entwickelt, welche Lösungen offerieren, die vom zeitabhängigen viskoelastischen Materialverhalten von Kunststoffen nicht beeinflusst sind.

ABRÉGÉ

Un savoir fondé sur le matériau est pour chaque action constructive planifiée une condition primaire. Cela s'applique particulièrement pour le verre, à cause de la complexité du comportement du matériel. Cet œuvre s'occupe par conséquent d'abord avec la matière de verre, les bases pour ajouter le verre indemne ainsi le comportement de ses partenaires d'adjonction. La méthode la plus importante, coller du verre, est déterminée essentiellement par les qualités viscoélastiques et indépendantes des températures des colles utilisées. Pour des glaces de verre, cette dépendance signifie que le groupe ne doit pas être pris en considération quand mesuré et par conséquent, les glaces deviennent clairement plus lourdes et/ou atteignent une envergure plus faible.

De l'idée de développer un groupe constructif et donc sûrement calculable, les qualités des vitres avec un couplage fixé sur le bord sont analysées expérimentalement et avec la méthode des éléments. On montre avec cet œuvre que le "groupe des poussées d'affilages" a de bonnes chances d'être réalisé puisque le niveau de tension local dans le verre sur les éléments de couplage ne dévie pas largement du niveau de tension dans les pare-brise feuilletés comparables. Lors d'une première mesure de comparaison, on pouvait constaté qu'une économie en verre de 15-30% est réalisable. Sur la base des réflexions constructives au réalisation du groupe des poussées d'affilages, des approches vastes pour la construction en verre constructive seront développées, quelles offrent aussi des solutions indépendantes de la matière plastique.

INHALTSANGABE

1	<u>EINLEITUNG</u>	10
1.A	<u>Methoden</u>	15
1.B	<u>Ziele</u>	16
1.B	<u>Zur Gliederung</u>	16
2	<u>GLAS</u>	19
2.A	<u>Glasherstellung</u>	20
2.A.1.	Floatglas	22
2.A.2.	Fensterglas	24
2.A.3.	Gussglas	25
2.B	<u>Mechanische Eigenschaften</u>	25
2.B.1.	Bruchmechanik	27
2.B.2.	Glasfestigkeit	32
2.C	<u>Glasveredelung</u>	37
2.C.1.	Mechanische Methode	37
2.C.2.	Laser	39
2.C.3.	Kanten nach DIN 1249 Teil 11	42
2.C.4.	Vorgespanntes Glas	43
2.C.5.	Prüfung der Glasbiegefestigkeit	44
2.D	<u>Grundlagen zum Fügen von Glas</u>	46
2.D.1.	Schweißen und Löten	47
2.D.2.	Reibverbindungen	48
2.D.3.	Kleben	49
2.D.3.A	Adhäsion	50
2.D.3.B	Kohäsion	52
2.D.3.C	Klebstoffe	53
2.D.3.D	Belastungsarten und Prüfmethode	56
2.E	<u>Glaslamine</u>	63

2.E.1.	Verbundglas	63
2.E.1.A	SentryGlass Plus Interlayer	63
2.E.1.B	Verbundglas mit Gießharz (Beispiel Leichtglas)	64
2.E.2.	Verbundsicherheitsglas	65
3	GLASPLATTEN	68
3.A	Fügen von Glasplatten	68
3.B	Tragverhalten liniengelagerter Glasplatten	72
3.B.1.	Zum Tragverhalten vierseitig gelagerte Platten	72
3.B.2.	Zum Tragverhalten zweiseitig gelagerter Platten	76
3.B.3.	Zum Tragverhalten von Glaslaminaten	77
3.C	Bemessung und Berechnung von Glasplatten	81
3.D	FE- Basismodelle	87
3.D.1.	Berechnungsmodell für zweiseitig gelagerte Glasplatten	87
3.D.2.	Berechnungsmodell für vierseitig gelagerte Glasplatten	89
3.D.3.	Verifizierung durch Vergleichsberechnungen	90
3.D.3.A	Zweiseitig gelagerte Platten	91
3.D.3.B	Vierseitig gelagerte Platten	93
3.E	Berechnungsmodell für Glaslaminat	95
3.E.1.	Berechnungsmodell für zweiseitig gelagerte Glaslaminat	96
3.E.2.	Berechnungsmodell für vierseitig gelagerte Glaslaminat	97
3.E.3.	Verifizierung durch Vergleichsberechnungen	98
3.E.3.A	Zweiseitig gelagerte Glaslaminat	99
3.E.3.B	Vierseitig gelagerte Glaslaminat	100
4	KANTENSCHUBVERBUND	103
4.A	Konstruktive Varianten	104
4.B	Tragverhalten von zweiseitig gelagerten KS-Platten	106
4.B.1.	Prüfkörper	107

4.B.2.	Berechnungsmodell für die Prüfkörper	109
4.B.3.	charakteristisches Tragverhalten zweiseitig gelagerter KS-Platten	111
4.B.4.	Experimente	116
4.B.5.	Auswertung der Experimente	117
4.B.6.	Zweiseitige gelagerte KS-Platten mit umlaufender Randkopplung	121
4.C	Tragverhalten vierseitig gelagerter KS-Platten	124
4.C.1.	Modellbildung	125
4.C.2.	Auswertung	126
4.D	Kraftgrößen in KS-Elementen	133
4.D.1.	Modellbildung	135
4.D.2.	qualitative Auswertung	137
4.D.3.	Schubmodul der KSE	141
4.E	Zum Potenzial von KS-Glas	137
4.E.1.	KS-Glas als Verbundglas	145
4.E.2.	KS-Glas als Verbundsicherheitsglas	151
5	VERWENDUNGSCHANCEN	155
5.A	Kaltes Krümmen	155
5.A.1.	Versuchskörper	157
5.A.2.	Modellbildung	157
5.A.3.	Experiment und Auswertung / Nachbruchverhalten	158
5.A.4.	Verwendungskonzept	163
5.B	neue Fügungen	166
6	RESÜMEE UND AUSBLICK	173
7	LITERATURLISTE	177
8	ABKÜRZUNGEN	183
9	NORMEN ZUM GLAS	185

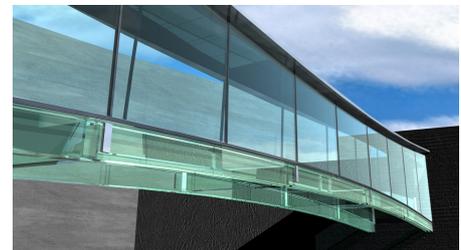
Die Entwicklung der Glaslamine begann vor etwa 100 Jahren mit einer zerbrochenen Glasflasche. Dem französischen Chemiker Edouard Benedictus fiel sie im Jahre 1903 von seinem Laborregal. Die Flasche zerbrach, jedoch ohne in ihre Bruchstücke zu zerfallen. Als er sie untersuchte, stellte er fest, dass sich Nitrocellulose darin befunden hatte. Diese Substanz hatte nach dem Verdunsten an den Gefäßrändern einen dünnen Film erzeugt, durch welchen die Scherben der Flasche fixiert wurden. Als er kurz darauf einen Autounfall beobachtete, bei dem eine Frau durch eine zerbrochene Windschutzscheibe lebensgefährliche Schnittverletzungen erlitt, erinnerte er sich an diese Flasche und entwickelte in den folgenden Jahren das erste splitterbindende Glaslaminat. Im Jahre 1910 ließ er das flächige Verkleben zweier Scheiben mittels des damals verfügbaren Polymers "Celluloid" patentieren. Er legte mit seinem "Triplex" genannten Laminat den Grundstein für die Herstellung von Verbundsicherheitsglas. Das anfangs verwendete Celluloid vergilbt jedoch und bildet Blasen. Mit den nach dem zweiten Weltkrieg entwickelten Kunststoffen konnte man schließlich Klebefolien herstellen, die elastische, splitterbindende und dauerhaft transparente Verbindungen ergeben. Die fortlaufende Entwicklung von synthetischen Polymeren führte zu den heute bekannten Klebfolien aus PVB (Polyvinylbutyral), EVA (Ethylvinylacetat) oder TPU (Thermoplastische Polyurethane). Diese Folien bewirken nicht nur die Splitterbindung, sondern auch eine gewisse Resttragfähigkeit der zerbrochenen Scheiben. Nur Scheibenstapel mit beiden Eigenschaften, Splitterbindung und Resttragverhalten, werden als Verbundsicherheitsglas bezeichnet. Neben dem Folienmaterial werden auch Gießharze als Zwischenschicht verwendet, welche jedoch kein anerkanntes Resttragverhalten besitzen. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Glaslamine mit Schall- oder Brandschutzeigenschaften.

Die Geschichte der „modernen Glasarchitektur“ beginnt etwa 200 Jahre vor Edouard Benedictus mit den Orangerien und Gewächshäusern des 17. und 18. Jahrhunderts. Sie findet einen Höhepunkt mit dem von Paxton zur Weltausstellung 1851 in London erbauten Kristallpalast. Etwa 70 Jahre später nimmt Mies van der Rohe mit seinen Visionen von vollständig verglasten Hochhäusern das Erscheinungsbild heutiger Glasfassaden vorweg. Die damaligen Entwürfe wären jedoch technisch nicht realisierbar gewesen. Weder war das Verbundsicherheitsglas noch die heutige Glasqualität entwickelt.

Erst in den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurde durch das von Pilkington entwickelte Floatglasverfahren Glas in der planeparallelen Qualität und Menge, wie wir es heute kennen, verfügbar. Die konstruktive Entwicklungen der letzten Jahrzehnte basieren auf diesen beiden Erfindungen und führen seit etwa 20 Jahren zu einem Glasboom in der Architektur und dazu, dass sich viele Architekten und Ingenieure wieder intensiv mit den Grenzen von Glas befassen. Sie gehen wieder visionär mit diesem „wichtigsten Material in der Architektur“, wie Le Corbusier es bezeichnete, um. Abb. 1.1. stellt zwei Brückenentwürfe dar, welche in dieser Form an der Grenze der Realisierbarkeit anzusiedeln sind.



Glasbrücke für Florida aus (1)



Glasbrücke (2)

Abb. 1.1; Brückenvisionen im Grenzbereich des Machbaren

In der Architektur wird Glas weiterhin selbsttragend in Fenstern bzw. Fassaden eingesetzt. Jedoch findet es immer häufiger auch als tragender Baustoff Verwendung. Die zu bevorzugende Füge-technologie für Glas ist das Kleben, da auf diese Weise Spannungsspitzen in dem sprödbrechenden Material vermieden werden können.



Abb. 1.2; Treppensteg in Arnheim aus (1)



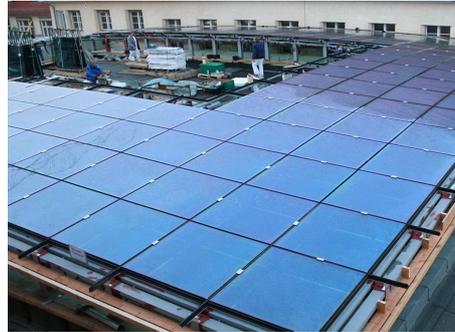
Glastreppe aus (1)

Die Klebstoffe im konstruktiven Glasbau befinden sich jedoch erst in den „Kinderschuhen“, sodass ausschließlich für zwei Silikonklebstoffe eine allgemeine bau-

aufsichtliche Zulassung erteilt wurde. Heute werden Ganzglastreppen, Glasstege und -brücken, Abb. 1.2, Glasstützen und Träger bis hin zu biegesteifen Gitterrosten als tragende Konstruktionen mit geklebten oder auch mit mechanischen Verbindungen umgesetzt, Abb. 1.3.



Prüfung der Glasbauteile aus (81)



Montage aus (3)

Abb. 1.3; Dach der Mensa in Dresden

Glaskonstruktionen können die meisten bauphysikalischen, konstruktiven und architektonischen Aufgaben erfüllen. Dem architektonischen Traum, sich von jeglicher Stofflichkeit zu lösen und die gebaute Umwelt in völliger Transparenz aufzulösen, stehen neben sicherheitstechnischen Anforderungen auch die physikalischen sowie die mechanischen Eigenschaften von Glas und insbesondere die von Glaslaminaten gegenüber. Neben der Eigenfarbe des Materials sowie der Lichtbrechung und Spiegelung ist der Anteil des Befestigungssystems oder des Rahmens an der Gesamtfläche entscheidend für die Umsetzung transparenter Konstruktionen. Die zulässige Scheibengröße ist deshalb ein wesentlicher Faktor für das Streben nach mehr Transparenz, da größere Scheiben schließlich weniger Fügepunkte benötigen. Welche Bedeutung die Scheibengröße an dem Erscheinungsbild haben kann, zeigt die vergleichende Darstellung zweier Dachsegmente in Abb. 1.4.

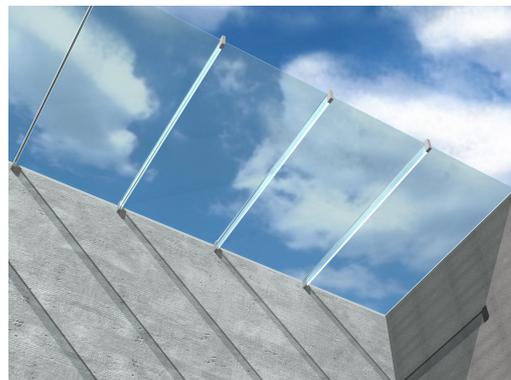
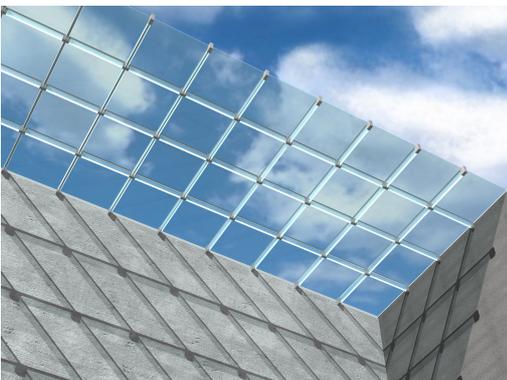


Abb 1.4; Konstruktionsanteil verschiedener Glasspannweiten (Dachsegmente)

Links wird eine Ganzglaskonstruktion mit einem üblichen Raster von 1.55 m dargestellt und im Vergleich dazu wird rechts die größtmögliche Glasscheibe mit etwa 3.1m * 6.00m dargestellt. Derart große horizontale verbaute und serienproduzierte Scheiben sind jedoch gegenwärtig nicht möglich. Im Überkopfbereich werden Scheibenspannweiten von etwa bis zu 2.40m realisiert. Diese Einschränkung resultiert neben montagetechnischen Erwägungen auch aus der begrenzten Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsgläsern im Bruchzustand. Auf Grund der relativ großen Dehnung der Verbundfolie können größere Scheiben aus den Auflagern rutschen. In dieser Arbeit werden vorwiegend liniengelagerte Glasplatten mit einem relativ großen Konstruktionsanteil an der Gesamtfläche untersucht.

Wie hoch der Schwierigkeitsgrad im Umgang mit dem Baustoff Glas ist, dokumentiert auch die Tatsache, dass es bis heute noch nicht gelungen ist, eine allseits akzeptierte „Bemessungsnorm“ zu formulieren. Es gelten weiterhin die technischen Regeln für liniengelagerte Glasplatten (TRLV, 2000), (56) des Deutschen Instituts für Bautechnik. Demnach darf ein sich positiv auswirkender Verbund bei der Bemessung von Verbundglasscheiben nicht berücksichtigt werden, sodass ausschließlich die Einzelscheiben ohne Schubverbund berechnet werden. Entscheidend ist die Schubfestigkeit der Zwischenschicht. Für längere Belastungen bzw. für höhere Temperaturen erfasst die Regelung der TRAV (68) das tatsächliche Tragverhalten der Laminare korrekt, da die Folien und Harze über ein deutliches Kriechverhalten verfügen, welches schließlich zum vollständigen Verlust des Schubverbundes führt. Bei niedrigen Temperaturen oder kurzzeitigen Lasten verfügt die Folie jedoch über eine hohe Steifigkeit, welche einen annähernd vollen Verbund erzeugt.

Wie in dieser Arbeit genauer untersucht wird, ist das Membrantragverhalten für liniengelagerte dünne Platten von besonderer Bedeutung für die Spannungs- und Verformungsentwicklung des Laminates. Bei einer geringen Durchbiegung spielt das Vorhandensein eines Schubverbundes eine weitaus bedeutendere Rolle als bei großen Verformungen mit ausgeprägtem Membrantragverhalten. Die Art der Lagerung, also eine zwei- oder vierseitige Lagerung hat darüber hinaus einen deutlichen Einfluss auf den Membraneffekt. Manfred Kutterer hat hierzu in seiner Arbeit: „Verbundglasplatten“ (4) grundlegende Studien durchgeführt. Im Anschluss an ein an der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführtes Forschungsprojekt zum Schubverbund von Sandwichglasplatten (5;6) wurde

nach einer von den viskoelastischen Zwischenschichten unabhängigen Lösung zur Aktivierung einer dauerhaften und temperaturunabhängigen Schubverbundwirkung gesucht. In Zusammenarbeit mit Karl Schwalbenhofer, dem Leiter des Lehrgebietes für Baukonstruktion und Tragwerklehre, konnte ein neuer Ansatz für einen konstruktiven Schubverbund entwickelt werden. Der Grundgedanke besteht darin, Glaslamine **ausschließlich am Rand**, also in einem z.B. vom Fensterrahmen zu überdeckenden Bereich, aneinander zu koppeln, Abb. 1.5. Eine derartige konstruktive Kopplung der Glaskanten bedeutet, dass das Glaslaminat ein mittleres von der Klebeschicht unabhängiges Verbundtragverhalten erfährt. Diese Scheiben können deutlich leichter gewählt werden, oder vergleichsweise große Spannweiten erreichen.

Wir bezeichnen diese Konstruktion als **KantenSchubverbundGlas** oder kurz: **KSG**. Diese Bezeichnung erscheint uns unter Berücksichtigung der Begriffe VSG oder auch ESG als angebracht.



Abb. 1.5, Prinzip der **KantenSchubverbundGlas**konstruktion

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Werkstoff Glas und den Grundlagen zum Fügen von Glas und Glaslaminaten sowie mit ihrem Tragverhalten als plattenförmiges Tragwerk. Diese Studien dienen als Grundlage zur Untersuchung des KS-Glases. Für Verbundsicherheitsgläser ist die Spannweite eventuell durch das Resttragverhalten beschränkt. Abgesehen davon ermöglicht eine höhere Steifigkeit nicht nur eine größere Spannweite, sondern alternativ dazu dünnere Platten und damit ein geringeres Gewicht sowie ein Einsparpotenzial in der tragenden Unterkonstruktion. Da durch den Kantenschubverbund auch Krümmungen in die Scheibe eingefügt werden können und diese kalt gekrümmten Scheiben eine erhebliche höhere Tragfähigkeit aufweisen, werden auch diese Effekte und daraus folgende Verwendungschancen umrissen. Außerdem wurde während der Untersuchungen zu möglichen Randkoppelungen eine neue Methode zur Kraftübertragung in Verbundglasscheiben entwickelt, welche abschließend diskutiert wird.

Das Tragverhalten der KS-Glasscheiben ist von der Steifigkeit bzw. dem Schubmodul der Verbundkonstruktion abhängig (7, 8). Es wird unter der Annahme eines steifen Kantenverbundes mittels **exakt diskretisierter und verifizierter Modelle** beschrieben. Hierzu wird zunächst ein **exemplarisches Basismodell** konzipiert, welches mit numerischen Vergleichsberechnungen auf Grundlage der nichtlinearen Plattentheorie bzw. den Berechnungsformeln nach preEN 13474 verifiziert wird. Diese Arbeitsweise stellt die exakte und übliche Ingenieurmethode zur statischen Analyse eines konstruktiven Problems dar, ohne aufwendige eigene Versuchsreihen durchzuführen. Durch die Vergleichsberechnung werden die eigenen FE-Modelle also im Wesentlichen gegen externe Versuchsreihen abgesichert.

Es werden jedoch auch FE-Modelle konzipiert, welche durch **exemplarische Versuche** nachvollzogen wurden. Da es sich hierbei um Einzelversuche handelte, haben sie jedoch nur einen „**proof of principle**“-Charakter und geben einen ersten Hinweis auf das grundsätzliche Tragverhalten.

Um Aussagen über die Schubelemente selbst treffen zu können, wird eine **qualitative Analyse** und Bewertung verschiedener konstruktiver Varianten mit der FEM durchgeführt. Dabei wird davon ausgegangen, dass FE-Modelle mit denselben Randbedingungen wie Lastgröße, Netzdichte und Auflagerbedingungen sowie einer ähnlichen Geometrie auch ähnliche Ergebnisse liefern. Berücksichtigt werden muss jedoch, dass es gerade im Bereich von Verklebungen zu extremen Spannungskonzentrationen kommen kann, welche bei der vergleichenden Analyse ausgeschlossen werden müssen. Das tatsächliche Spannungsniveau ist dabei unerheblich und wird nur insofern betrachtet, als dass die Belastungsgrößen aus den exakten Modellen abgeleitet werden und deshalb die ermittelten Spannungswerte als Hinweis auf das Niveau selbst verstanden werden können. Die Proportionen des Spannungsniveaus der Konstruktionen untereinander werden jedoch als hinreichend genau angesehen, um eine Klassifizierung der Konstruktionsvarianten vorzunehmen. Abschließend werden zur Abschätzung des Potenzials von KS-Glaskonstruktionen einige **quantitative und exemplarische Studien** durchgeführt.

Zunächst steht die Beschreibung des **charakteristischen Tragverhaltens der KS-Glasscheiben** im Zentrum dieser Arbeit. Hierbei geht es nicht um die Entwicklung von Bemessungsmethoden, wie sie in vielen Dissertationen von Ingenieuren zu finden sind, sondern um eine exemplarische Darstellung der Phänomene, wie sie sich auf Grund des Kantenschubverbundes z.B. in der Spannungsentwicklung der Scheiben bzw. dem Gesamttragverhalten ergeben. Diese Arbeit soll auch zur Vorbereitung künftiger Forschungsprojekte dienen und stellt somit einen **Beitrag zur Recherchephase** dar. Sie bietet darüber hinaus nützliche, da verifizierte Hinweise zur Diskretisierung geeigneter Modelle und zeigt anwendbare Berechnungsmethoden auf. Es ist auch beabsichtigt, erste Erkenntnisse über das **Potenzial von KS-Glasscheiben** zu sammeln. Neben der auch als Experiment zu verstehenden Anwendung der quantitativen **Analyse konstruktiver Varianten** mittels der FEM sollen mögliche Anwendungen von Varianten und weiterführende Konstruktionen, welche sich aus der Auseinandersetzung mit konstruktiven Lösungen zum Schubverbund ergeben haben, zur Diskussion gestellt und **Chancen zur Verwendung** von KS-Glas bzw. Realisierung aufgezeigt werden.

Diese Arbeit wurde in sechs Kapitel unterteilt. Nach der Einleitung werden im **zweiten Kapitel** die **Grundlagen** zum Fügen und zur Verwendung von Glas allgemein und die Problematik des Verbundtragverhaltens von Glaslaminaten im Besonderen dargestellt. Zunächst wird die **Herstellung** von Glas und schließlich die **mechanischen Eigenschaften** dargestellt. Die damit umrissene Bruchmechanik und das für den Baustoff Glas relevante „Ermüdungsverhalten“ ist das Basiswissen zum schadensfreien Fügen und Bemessen von Glas. Nachdem die **Bearbeitungsmethoden** bzw. die **Kantenqualität** in Beziehung zur Bruchfestigkeit diskutiert wurden, werden die **Prüfverfahren zur Biegefestigkeit** erläutert. Darüber hinaus werden die für diese Arbeit relevanten **Grundlagen zum Fügen**, wie die Reibverbindung und insbesondere das Kleben von Glas, aufgezeigt und die Methoden zum **Fügen von Glaslaminaten** vorgestellt.

Im **dritten Kapitel** werden zunächst **baukonstruktive Fügungen** in ihrer Funktion als Auflager diskutiert. Im Anschluß daran wird das Tragverhalten von **Glasplatten** und insbesondere von **Glaslaminaten** unter Verwendung eigener Modelle vorgestellt und analysiert. Es stellt damit den **Ausgangspunkt** für diese Arbeit dar. Anschließend werden **FE-Basismodelle** für die folgenden Studien zu Glasplatten und Laminaten entwickelt und mittels Vergleichsberechnungen verifiziert und quantitativ ausgewertet.

Im **vierten Kapitel** wird der Kantenschubverbund als Lösungsansatz zur Ertüchtigung des Verbundtragverhaltens von Glaslaminaten vorgestellt. Ziel ist es, das charakteristische Gesamttragverhalten dieser Konstruktion mittels der Finiten Element Methode und durch experimenteller Studien zu beschreiben. Nachdem einige **konstruktive Varianten** (Elemente) vorgestellt wurden, werden experimentelle Untersuchungen an **zweiseitig gelagerten Scheiben** ausgewertet. Im Anschluss wird das charakteristische Tragverhalten von **zweiseitig** und **vierseitig gelagerten Scheiben** mit konstruktivem Schubverbund umrissen. Darüber hinaus werden ausgesuchte **konstruktive Varianten qualitativ** mittels der Finiten Element Methode verglichen und bewertet. Abschließend wird das **Schubmodul der KS-Elemente** in Beziehung zum Tragverhalten analysiert und Vergleichsberechnungen durchgeführt, um erste Aussagen über das mögliche **Einsparpotenzial** durch KS-Glaskonstruktionen treffen zu können.

Im **fünften Kapitel** werden weiterführende Chancen für den konstruktiven Glasbau, welche sich aus den entwickelten konstruktiven Varianten ergeben, diskutiert. Zunächst wird die Möglichkeit des **kalten Krümmens** von Glasscheiben durch den konstruktiven Schubverbund vorgestellt. Diese Methode wird experimentell und mittels der FE-Methode analysiert und ein **Verwendungskonzept** für kalt gekrümmte Scheiben beschrieben. Anschließend werden weitere Überlegungen zu **neuen Fügungen für den konstruktiven Glasbau** auf der Grundlage der konstruktiven Varianten unternommen.

2

GLAS

Glas ist im eigentlichen Sinne kein Stoff, sondern ein Zustand. In (9) wird Glas als „Sammelbegriff für eine unüberschaubare Anzahl von Stoffen verschiedenster Zusammensetzung, die sich in glasigem Zustand befinden“ beschrieben. Etwas weiter ist im selben Text eine präzisere Definition, welche sich auf alle anorganischen Verbindungen bezieht, zu finden:

„Als Glas bezeichnet man alle Stoffe, die strukturmäßig einer Flüssigkeit ähneln, bei Umgebungstemperaturen auf Kraffteinwirkungen rein elastisch reagieren und daher als fester Körper anzusprechen sind“.

Aufgeschmolzene anorganische Gemenge tendieren in der Regel dazu, beim Abkühlen zu kristallisieren, d.h., dass die Moleküle ein regelmäßiges Gitternetz ausbilden. Dieser Prozess ist im Wesentlichen abhängig von der Abkühlungsgeschwindigkeit und dem vorherrschenden Druck (10). Glas dagegen kristallisiert ungeordnet und ist deshalb im mineralogischen Sinne amorph (gestaltlos), d.h., dass die Moleküle kein regelmäßiges Kristallgitter ausbilden. In Abb. 2.1 ist der Vergleich des amorphen und des kristallinen Zustands dargestellt.

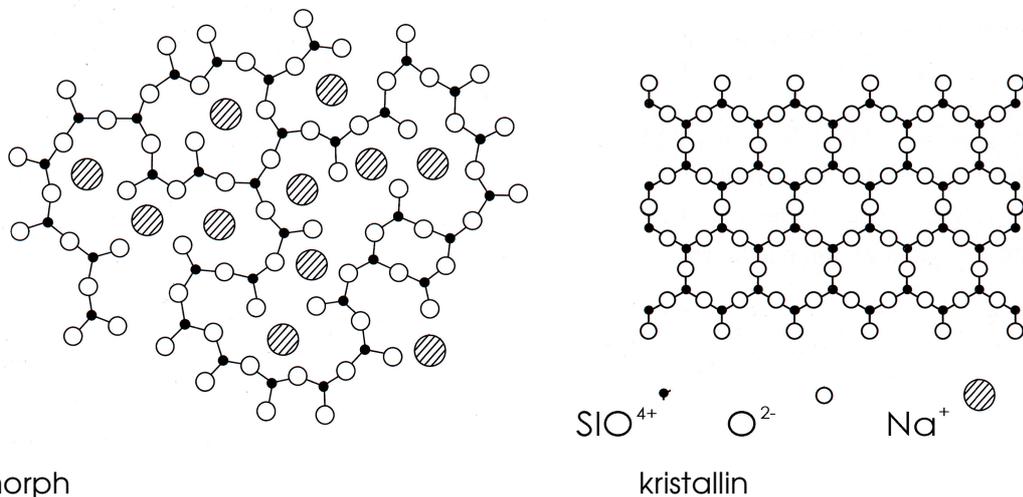


Abb. 2.1, Kristallstrukturen aus (15)

Das im Bauwesen am häufigsten verwendete Glas ist Kalk-Natronglas. Es besteht aus einem unregelmäßigen dreidimensional verketteten Netzwerk aus Siliziumoxid, SiO_4 -Tetraedern, in dessen Lücken oxidische Kationen eingelagert sind (11). In der Regel werden Gläser nach diesen oxidischen Zusatzstoffen benannt. Quarzglas z.B. bildet eine Ausnahme, da es ausschließlich aus SiO_4 besteht. Neben

Kalk-Natronsilikatglas wird Borosilikatglas im Bauwesen - wegen seiner guten chemischen Beständigkeit und besseren Temperaturwechselbeständigkeit als Kalk-natronsilikatglas - meist als Brandschutzverglasung eingesetzt (12). Tabelle 2.1 zeigt die Hauptbestandteile dieser beiden Gläser.

Bestandteile	Kalk-Natronsilikatglas	Borosilikatglas
SiO ₂	69 % - 74 %	70 % - 87 %
CaO	5 % - 12 %	-
B ₂ O ₃	-	7 % - 15 %
Na ₂ O / K ₂ O	12 % - 16 %	0 % - 16 %
MgO	0 % - 6 %	-
Al ₂ O ₃	0 % - 3 %	0 % - 8 %

Tabelle 2.1; Bauglasbestandteile aus (9)

2.A GLASHERSTELLUNG

Glas ist isotrop und besitzt demnach in allen Richtungen die gleichen physikalischen Eigenschaften. Beim Glasschmelzen bleibt die Kristallisation aus, weil die SiO₄-Tetraeder bereits in der Schmelze räumlich untereinander vernetzt sind und diese Bindungen erst aufgebrochen werden müssten. Diese so genannte „Entglasung“ lässt sich nicht nur durch die Abkühlungsgeschwindigkeit, sondern auch durch Beimengungen beeinflussen (9). Glas besitzt, obwohl es in einem flüssigkeitsähnlichen Zustand ist, eine sehr hohe Viskosität. Die nachfolgende Tabelle 2.2 nach (13) zeigt die Viskosität von Glas bei verschiedenen Temperaturen und im Vergleich mit einigen anderen Stoffen.

Stoff	Temperatur	Viskosität η in Pa s
Wasser	20 °C	10 ⁻³
Speiseöl	20 °C	10
Honig	20 °C	10 ³
Glas	ca. 700 °C	1-10
Glas	ca. 500 °C	10 ¹²
Glas	20 °C	10 ¹⁸

Tabelle 2.2; Viskosität aus (13)

Glas besitzt keinen Schmelzpunkt, sondern geht bei steigender Temperatur von einem „Erstarrungszustand“ über einen viskosen in einen flüssigen Zustand über. Dieses Materialverhalten ermöglicht erst die meisten Herstellungsverfahren von Glaserzeugnissen. In Abb. 2.2 nach (14) wird das temperaturabhängige Glasverhalten möglichen Herstellungsverfahren zugeordnet.

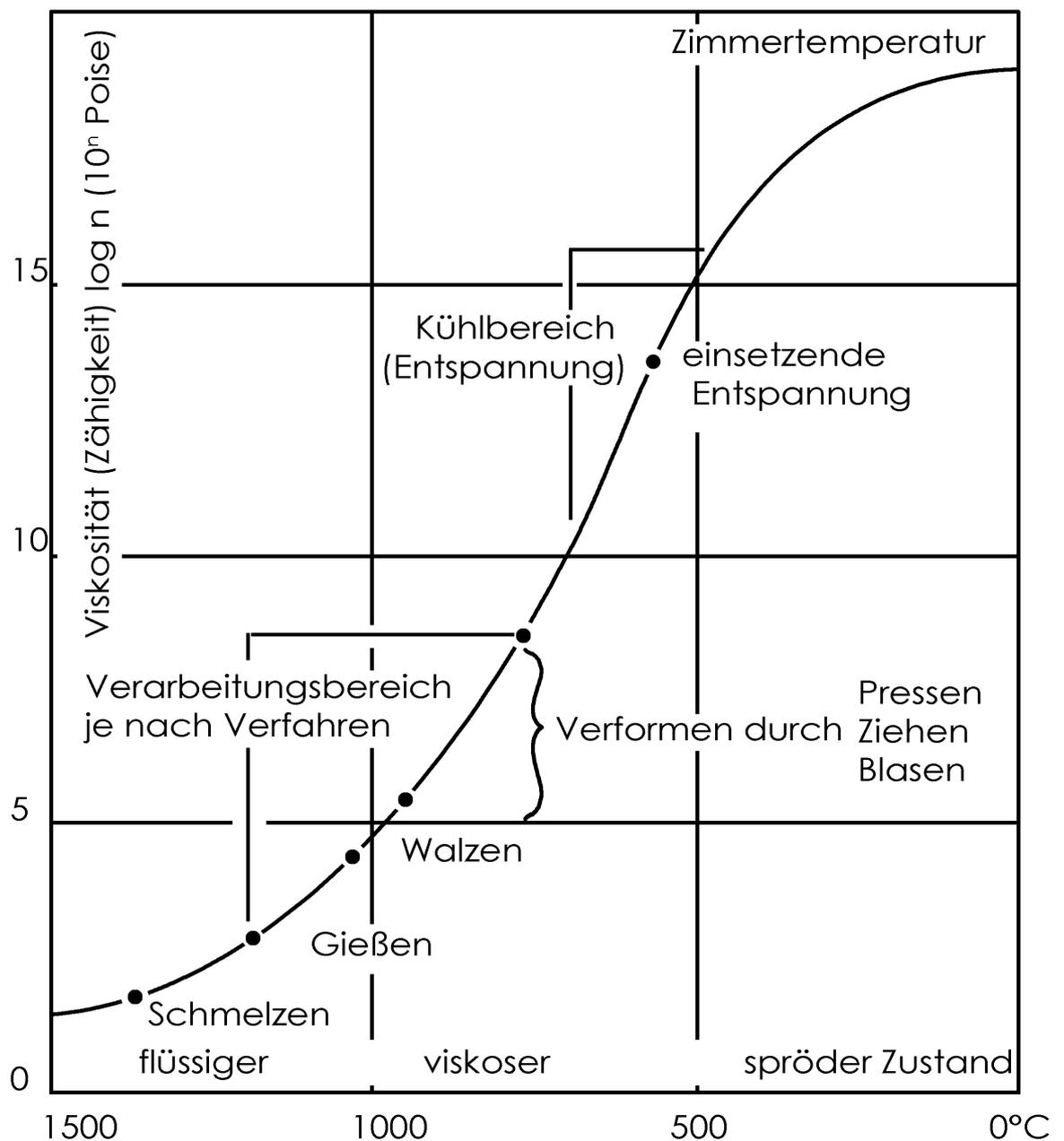


Abb. 2.2; Herstellungsverfahren in Abhängigkeit zur Glastemperatur aus (14)

Das gegenwärtig vorherrschende und wirtschaftlichste Herstellungsverfahren für Flachglas ist das erstmals 1959 von der Firma Pilkington Brothers Ltd. aus Lancashire in Großbritannien vorgestellte Floatglasverfahren (9). Abb. 2.3 zeigt die schematische Darstellung dieser Flachglasherstellung (Interpane Handbuch). Das Verfahren nutzt die physikalische Eigenschaft des Auftriebs leichter Materie. Die Glasschmelze fließt über einen Lippenstein auf eine mit flüssigem Zinn gefüllte Wanne.

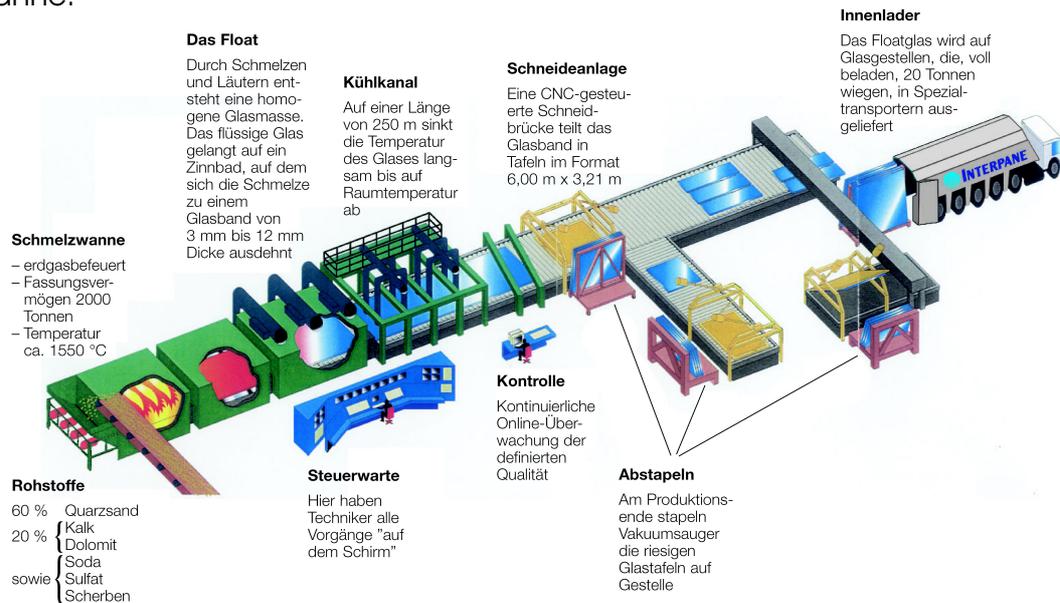


Abb. 2.3; Floatglasanlage aus Interpane Handbuch

Die leichtere Glasschmelze schwimmt (floats) auf und breitet sich auf der Zinnoberfläche aus. Die Schmelztemperatur von Zinn beträgt 232°C und befindet sich damit unterhalb des Erstarrungsbereiches von Glas. Mittels der Winkeleinstellung von am Rand in das weiche Glasband eingreifenden gezahnten Rädchen (Toproller), Abb. 2.4, lässt sich die Glasdicke steuern. Werden Staubalken (Carbon Fender) eingesetzt, lässt sich das Ausbreiten der Glasschmelze zusätzlich beeinflussen.

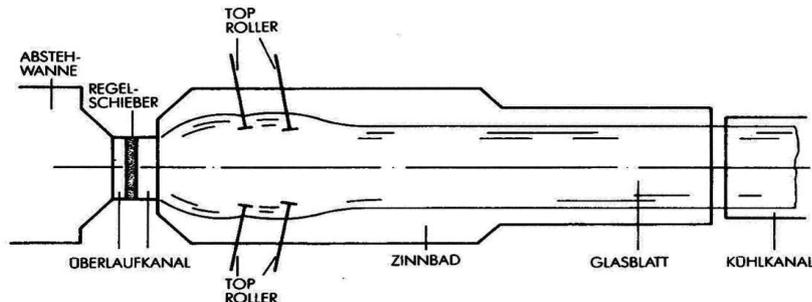


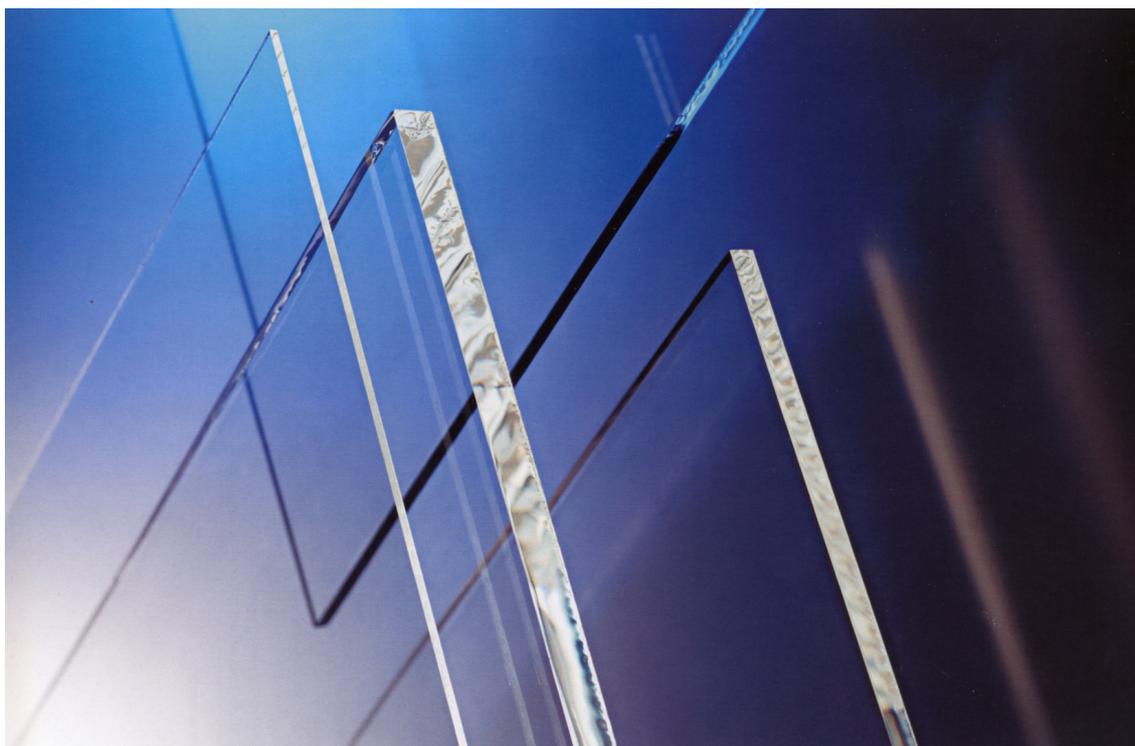
Abb. 2.4; Steuerung der Glasdicke durch Toproller aus (14)

Mit diesem Verfahren können Gläser von einer Dicke von 2 mm (11) bis zu 28 mm (15) hergestellt werden. Tabelle 2.3 zeigt die normierten Glasdicken und ihre zulässige Dickentoleranzen nach (16).

Nennstärke in mm	Grenzabweichung ± mm	Nennstärke in mm	Grenzabweichung ± mm
2	0,2	10	0,3
3	0,2	12	0,3
4	0,2	15	0,5
5	0,2	19	1,0
6	0,2	25	1,0
8	0,3		

Tabelle 2.3; Glasdicken aus preEN 572

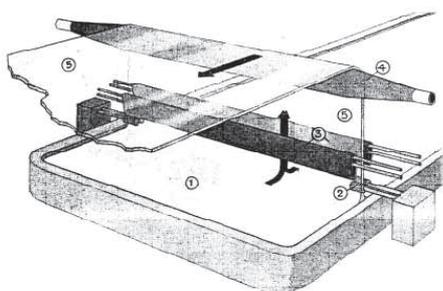
Beim „Floating“ entstehen Glasscheibenseiten mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften. Auf der Zinn- oder Badseite lagern sich in Abhängigkeit von der Verweildauer bzw. von der Glasdicke zweiwertige Zinnionen Sn^{2+} ein, welche z.B. auf die hydrolytische Beständigkeit einen positiven Einfluss haben. Auf der Atmosphärenseite verarmt die Oberfläche an Na^+ , Ca^+ und Mg^+ . Die dadurch entstehende Kieselsäureanreicherung an der Glasoberfläche führt zu einer Veredelung der Atmosphärenseite. Von Seiten der Hersteller wird die Lage der Bad- und Atmosphärenseite nicht eindeutig beschrieben. Die Scheiben können zur Identifikation mit einfachen UV-Lampen, wie sie zur Erkennung von Geldscheinen Verwendung finden, untersucht werden. Eine weiß-bläuliche Fluoreszenz der Glasoberfläche zeigt die zinnhaltige Badseite an. Im weiteren Verlauf des Floatprozesses erhält das Glas die sogenannte Feuerpolitur und kühlt langsam auf dem Zinnbad ab. Es wird bei etwa 600° C auf Rollen gehoben und in einem Kühltunnel einer kontrollierten Abkühlung - zur Verhinderung von thermischen Spannungen - zugeführt. Um Deformationen und andere Randeinflüsse möglichst auszuschließen, wird das Glas anschließend auf das maximale Bandmaß von 3210 x 6000 mm geschnitten und abschließend abgestapelt. Der Begriff Floatglas wird in der Europäischen Norm EN 572-2 (17) geregelt. Außerdem wird mit diesem Verfahren hergestelltes Kalk-Natronglas wegen seiner planparallelen und verzerrungsfreien Oberfläche nach DIN 1249-3 (18) als „Spiegelglas“ bezeichnet.



Floatglas aus (19)

2.A.2 FENSTERGLAS

In Abgrenzung zum bisher beschriebenen Spiegel- oder Floatglas versteht man unter Fensterglas das nach dem Verfahren von Libbey-Owens hergestellte Flachglas. Dabei wird aus der Glasschmelze ein Glasband vertikal herausgezogen, welches über gekühlte Umlenkrollen in die Horizontale gedreht und einer kontrollierten Kühlung zugeführt wird (19). Fensterglas weist herstellungsbedingt in Ziehrichtung verlaufende Wellen auf. Zur Herstellung von sehr dünnen bis maximal 12 mm dicken Tafeln gibt es heute noch vereinzelt Produktionsanlagen, wobei moderne Floatglasanlagen inzwischen ebenso dünne Gläser herstellen können, Abb. 2.5 .



Libbey-Owens verfahren aus (19)

Abb. 2.5



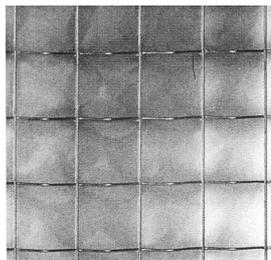
Gussglasstrasse aus (9)

2.A.3 GUSSGLAS

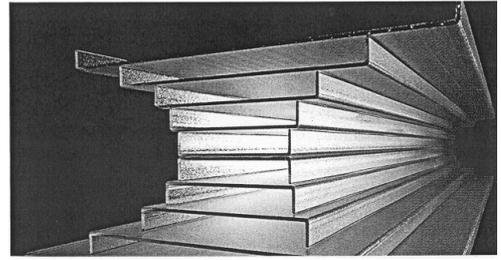
Unter Gussgläsern versteht man Glasprodukte, bei denen die Glasschmelze direkt über Walzen gezogen und dadurch auch geformt werden kann und anschließend kontrolliert gekühlt und konfektioniert wird, Abb. 2.5 rechts. Dabei können die unterschiedlichsten Produkte wie z.B. Ornamentglas, Drahtglas oder auch Profilbauglas hergestellt werden.



Ornamentglas



Drahtornamentglas



Profilbauglas

Alle Abbildungen aus (41)

2.B MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

In der eingangs aufgestellten Definition für Glas wurde als zweites Kriterium das „rein elastische Verhalten zur Folge einer Krafteinwirkung bei Umgebungstemperatur“ benannt. Dieses Verhalten kann auch als rein lineares Materialgesetz verstanden werden. In Abb. 2.6 sind die Materialgesetze von Glas und Stahl gegenübergestellt. Während sich Stahl anfangs linear elastisch verhält und ab einer gewissen Spannung zu fließen beginnt, d.h. plastische Verformungen zulässt, kommt es beim Glas ohne vorherige Ankündigung zum spontanen Bruch.

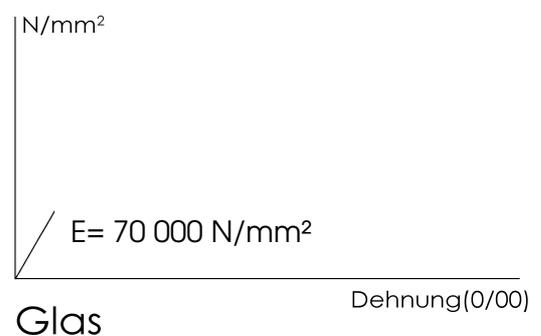
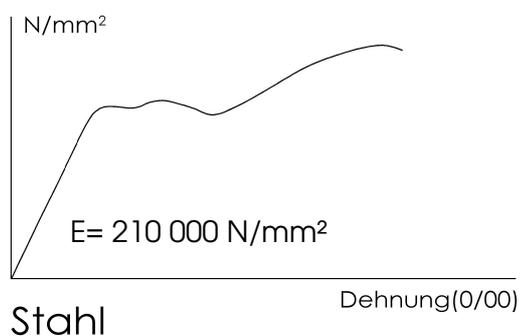


Abb. 2.6; Materialgesetze aus (11)

Da Glas nicht plastizieren kann, und es somit nicht zu Spannungsumlagerungen innerhalb des Querschnitts kommt, versagt es in der Regel auf Grund vorhandener Störungen an der Glasoberfläche. Störungen oder Risse treten schon durch den Herstellungsprozess des Floatglases mit einer Tiefe von etwa 10 µm über den gesamten Glaskörper verteilt auf. Schwerwiegendere Fehler in der Oberfläche werden durch die weitere Handhabung der Glasscheiben in die Fläche und in die Kanten der Scheiben eingebracht. Für gewöhnlich handelt es sich dabei um Kratzer oder Ausbrüche im Glas, welche durch den Kontakt mit härteren Materialien in einer Größenordnung von etwa 100 µm auftreten. Wie später genauer beschrieben wird, können schon Störungen von einigen wenigen Mikrons Tiefe den Glasbruch auslösen. Gewöhnliche Luftströmungen transportieren eine Vielzahl von mikroskopisch kleinen Partikeln wie zum Beispiel Quarz (SiO₂), welche hart genug sind, um in die Glasoberfläche einzudringen. Werden diese Staubpartikel zwischen zwei Oberflächen „gezwängt“, wird die kritische Kontaktspannung, bei der es zu splitterigen Ausbrüchen aus der Glasoberfläche kommt, schnell erreicht. Zum Beispiel wird in (20) eine Druckkraft von nur 0,5 N angegeben, um ein Quarzpartikel mit 1 mm Radius in das Glas eindringen zu lassen. Kommt es zu direktem Kontakt zwischen Glas und z.B. einem Metallrahmen, verursacht meistens nicht das Metall selbst Einkerbungen in der Scheibe, sondern die mikroskopisch kleinen Staubpartikel aus der Umgebungsluft. Zur Veranschaulichung wird in Anlehnung an (21) in Abb. 2.7 die Abhängigkeit der Versagensspannung bei kurzzeitigen Belastungen von der Risslänge dargestellt.

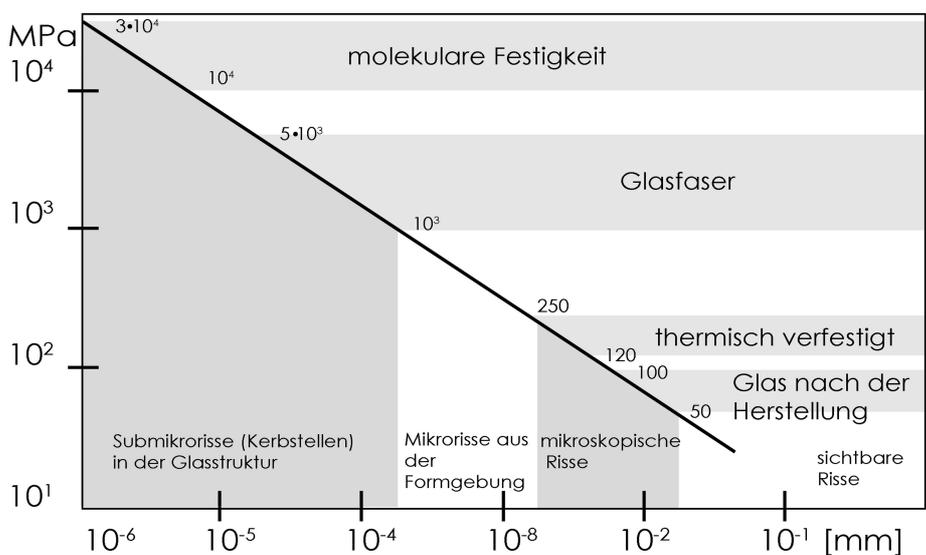


Abb. 2.7; Bruchspannung im Verhältnis zur Risslänge aus (58)

Dieser Umstand ist der Grund für die relativ komplexen Anforderungen an das Fügen von Glas. Die Tiefe, Geometrie und Lage der Störung zur Spannungsrichtung entscheiden über die Spannungsintensität am Rissursprung. Die theoretische oder auch molekulare Festigkeit des Baustoffs ist abhängig von den Bindungskräften zwischen seinen Atomen und Molekülen. Die theoretische Festigkeit oder maximale Spannung, welche die Bindung zwischen zwei Atomen aufzubrechen vermag, kann nach (22) mit folgender Formel abgeschätzt werden:

$$\sigma_{th} \approx E/10$$

Bei einem anzunehmenden E-Modul von 70000 N/mm² bis 80000 N/mm² wird die theoretische Festigkeit von Alkalisilikatglas in einer Größenordnung von ca. 7000 N/mm² bis 8000 N/mm² angenommen.

2.B.1 BRUCHMECHANIK

Die Zugspannung konzentriert sich an der Störungs- oder Risspitze und erreicht somit leichter die tatsächliche Zugfestigkeit des Glasgemenges. Abb. 2.8 zeigt die Spannungsverteilung innerhalb einer ungeschädigten und einer eingekerbten Glasprobe unter Zugbelastung.

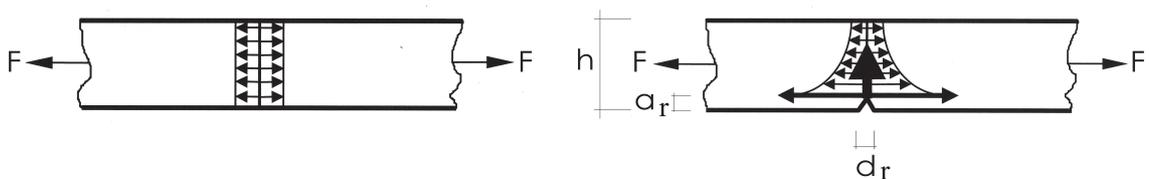


Abb. 2.8; Druck und Zugspannungsentwicklung am Rissufer aus (13)

Mit der Bruchmechanik wird eine Modellvorstellung vorgelegt, welche nach (23) zur Beschreibung und zur Vorhersage der Versagensmechanismen von Glas für die ingenieurmäßige Bemessung hinreichend genau ist, auch wenn damit die Risswachstumsmechanismen nicht vollständig und exakt, sondern nur annäherungsweise beschrieben werden können. Mit dieser Theorie wird es möglich, die Spannungskonzentration an der Spitze eines Risses quantitativ zu beschreiben. Unter der Voraussetzung, dass die Risttiefe a_r sehr viel kleiner ist als die Bauteilabmessung h und die Rissbreite d_r , besteht nach dem Griffithschen Bruchkriterium im Moment des einsetzenden Risswachstums eine Gleichgewichts-

beziehung zwischen der Risswiderstandskraft G_c und der Rissausbreitungskraft G_t .

$$G_c = G_t$$

Durch die Einführung des Intensitätsfaktors K_I kann die Berechnung des Spannungsanstieges im Bereich der Risspitze beschrieben werden. Hierbei ist σ_t die Spannung, welche ohne Riss vorhanden wäre, a_r die Risttiefe und f ein Faktor, der die Rissgeometrie beschreibt.

$$K_I = \sigma_t \cdot \sqrt{a_r} \cdot f$$

In Abhängigkeit von der Vorschädigung, also der Lage und Geometrie der Störung, wurden nach (24) Geometriefaktoren f experimentell ermittelt, welche in der folgenden Tabelle 2.4 dargestellt sind.

Schwächungsart	Geometriefaktor f
Reibungsschwächung Glas auf Glas	1,00
Vickerseindruck	1,18
Schleifpapierschwächung	1,77
Einfacher makroskopischer Oberflächenriss	1,99

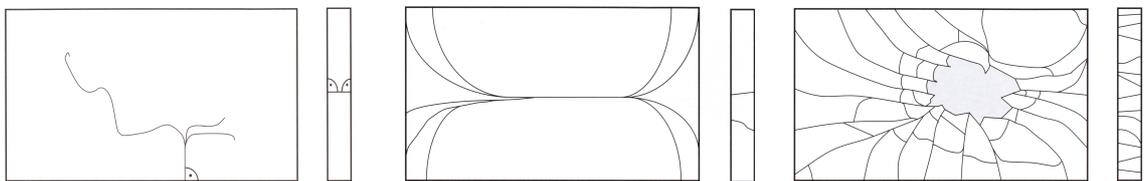
Tabelle 2.4; Geometriefaktor aus (24)

Danach darf bei einem langen geraden Riss von geringer Tiefe sowohl für eine reine Zug- als auch für eine Biegezugbelastung mit einem Wert von $f = 1,99$ gerechnet werden. Physikalisch betrachtet wird der Widerstand eines Stoffes gegen Aufreißen als Zähigkeit bezeichnet. In diesem Sinne ist die kritische dem Bruch entsprechende Spannungsintensität als Bruchzähigkeit K_{IC} zu bezeichnen.

$$K_{IC} = \sigma_c \cdot \sqrt{a_r} \cdot f$$

Sobald die Bruchzähigkeit erreicht ist, kommt es zum schlagartigen oder überkritischen Risswachstum mit einer Rissgeschwindigkeit in Kalk-Natriumsilikatglas von bis zu 1520m/sec. Die Bruchzähigkeit muss in chemisch nicht reaktionsfähiger Umgebung experimentell bestimmt werden, da sie durch die Umgebungsbedingungen wie Luftfeuchtigkeit und Temperatur beeinflusst wird.

Eine Versagensursache ist der thermisch induzierte Sprung in Floatglasscheiben. Glas dehnt sich bei Erwärmung aus. Bei höheren Temperaturen überproportional, jedoch bei niedrigeren Temperaturen, wie sie im Hochbau vorkommen, annähernd linear. Der Ausdehnungskoeffizient wird mit dem Buchstaben α gekennzeichnet und in der Einheit K^{-1} angegeben. Das Konstruieren mit Glas wird im Wesentlichen durch die Verhinderung thermisch induzierter Spannungen bestimmt. In Abb. 2.9 aus (13) ist das charakteristische Bruchbild eines thermisch induzierten Spontanbruches einigen anderen Bruchbildern von Floatglasscheiben gegenübergestellt.



thermischer Bruch

Flächendrucksbruch

Berstbruch „Explosion“

Abb. 2.9; Bruchbilder aus (13)

Zur Abschätzung der Größenordnungen thermischer Dehnungen werden in Tabelle 2.5 die Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Materialien im Vergleich dargestellt.

Material	Ausdehnungskoeffizient α in (K^{-1})
Floatglas	$9,0 \cdot 10^{-6}$
Borosilikatglas	$3,3 \cdot 10^{-6}$
Holz	ca. $5,4 \cdot 10^{-6}$
Eisen und Stahl	$12,2 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	$18,5 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$23,8 \cdot 10^{-6}$
PVC hart	$78 \cdot 10^{-6}$
Stahl rostbeständig	$16 \cdot 10^{-6}$
Wolfram	$4,6 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 2.5; thermische Dehnungskoeffizienten aus (13)

Wird eine Glasfläche lediglich partiell erwärmt, dehnt sich nur dieser Bereich aus und erzeugt Druck- und Zugspannungen in der Scheibenfläche. Da die Wärme-

leitfähigkeit und das E-Modul von Glas konstant sind, hängt die Bruchspannung nach (13) ebenfalls im Wesentlichen von der Vorschädigung bzw. der Risttiefe a_r ab.

$$\sigma_c = \frac{E}{a_r \cdot \Delta \vartheta}$$

So kann es bereits bei einer Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta$ von 30 bis 60 °C (Temperaturwechselbeständigkeit) zum Bruch kommen. In Tabelle 2.6 nach (13) werden einige Risttiefen a_r den zugehörigen Bruchspannungen und Temperaturdifferenzen zugeordnet.

$\Delta \vartheta$ [°C]	σ_c [N/mm ²]	a_r [mm]
7,5	4,5	1,36
10	6,1	0,68
20	12,2	0,17
30	18,2	0,08
40	24,4	0,04
50	30,5	0,03
60	36,6	0,02
70	42,7	0,01
80	48,8	0,01

Tabelle 2.6; Bruchauslösende Temperaturdifferenzen aus (13)

Neben dem bisher betrachteten überkritischen Risswachstum, also dem spontanen Bruch mit extrem hoher Bruchgeschwindigkeit, ist für die Abschätzung der Lebensdauer von Glas das unterkritische oder auch subkritische Risswachstum unterhalb von K_{Ic} von Bedeutung. Dabei führen chemische Prozesse (Diffusion) an der Risspitze zum Aufbruch der Silizium-Sauerstoff-Bindungen. Die chemische Reaktion von Silikatglas mit Wasser kann als Absorption von Wasser in die Glasoberfläche verstanden werden, wobei jedoch keinerlei Materie von der Oberfläche gelöst wird. Dabei kommt es zu einer Reaktion des Wasserstoffs mit dem Sauerstoff des Siliziumoxyds, Abb. 2.10. Das Resultat sind freie Wasserstoffenden, welche am Rissgrund den Spalt weiter öffnen. Unter Zugspannung rückt der Riss jetzt zum nächsten Molekül vor.

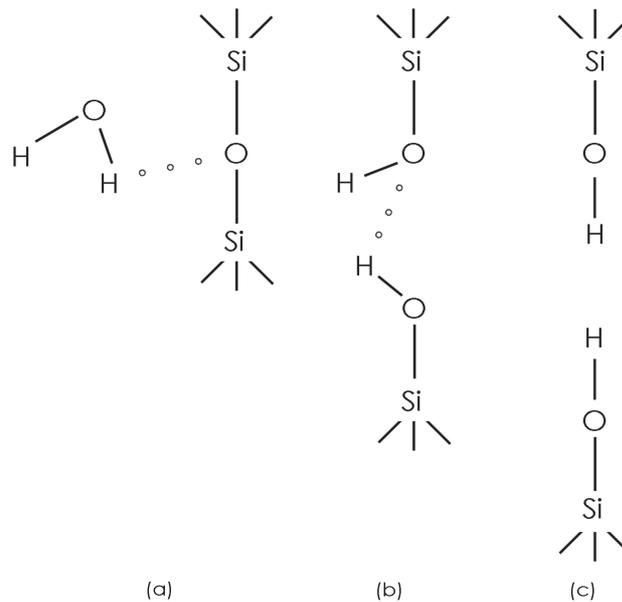


Abb. 2.10; dissoziative Chemisorption in der Glasoberfläche aus (71)

Im Gegensatz zu diesem Alterungsmechanismus, der auch als dissoziative Chemisorption bezeichnet wird, zeichnet sich Glas durch eine große Beständigkeit gegenüber den meisten Stoffen aus. Nur Flusssäure und alkalische Schmelzen vermögen Glas aufzulösen. Zwischen Glasplatten eingelagerte Feuchtigkeit kann jedoch innerhalb relativ kurzer Zeit (wenige Wochen) zum "Blindwerden" des Glases führen. Dabei werden die Alkalien aus der Glasoberfläche herausgelöst. Eine Behebung dieses Mangels ist praktisch nicht möglich. Eine sehr anschauliche Darstellung der Korrosionsprozesse auf Glasoberflächen findet sich in (25). Die hydrolytische Widerstandsfähigkeit von Gläsern ist nach (26) in fünf hydrolytische Klassen, Tabelle 2.7 eingeteilt.

Klasse:	Verbrauch an 0,01 N NHCl in $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$	Alkaliabgabe als Na_2O in $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$
1	$\leq 0,1$	≤ 31
2	$> 0,1 - 0,2$	$> 31 - 62$
3	$> 0,2 - 0,85$	$> 62 - 264$
4	$> 0,85 - 2,0$	$> 264 - 620$
5	$> 2,0 - 3,5$	$> 620 - 1085$
H_2O - löslich	$> 3,5$	

Tabelle 2.7; hydrolytische Widerstandsfähigkeit von Gläsern aus DIN 12111

Zur Verringerung der Wasserlöslichkeit von Glas können Gläser mit spezieller Zusammensetzung erzeugt werden oder die Glasoberflächen beschichtet werden. Das Verkleben von Gläsern wird durch die Wassereinlagerungen an der Oberfläche von Glasscheiben deutlich beeinflusst, siehe 2.D.3. Unter normalen Umgebungsbedingungen bewegt sich das durch dissoziative Chemisorption erzeugte subkritische Risswachstum in zugbeanspruchten Gläsern in einer Größenordnung von 10^{-10} bis 10^{-2} m/s. Dieses Phänomen wird häufig auch als statische Ermüdung bezeichnet und ist die Ursache für das verzögerte Versagen von Glas unter ständiger Belastung. In Abb. 2.11 ist die Glasfestigkeit in Abhängigkeit von einer Belastungsdauer von bis zu 50 Jahren dargestellt.

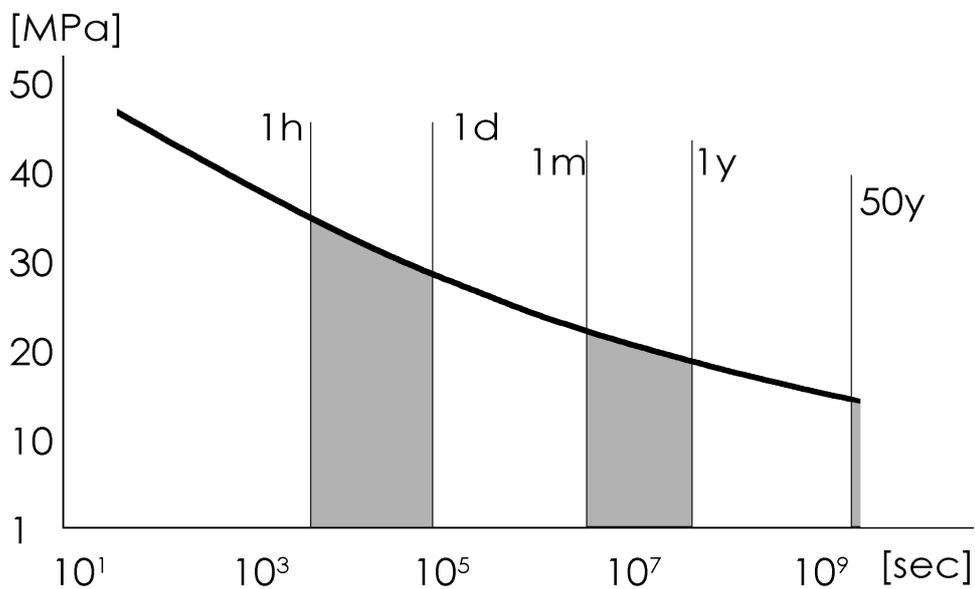


Abb. 2.11; Glasfestigkeit in Abhängigkeit von der Belastungsdauer aus (11)

Dagegen haben jedoch nach (27) stoßartige und nach (28) dynamische Lasten keinen Einfluss auf die Glasfestigkeit. Die kurzzeitig aufgebrachte Belastung ist auf Grund der niedrigen Reaktionsgeschwindigkeit der Atome nicht in der Lage, die Risstiefe zu verändern.

Der Prozess des Glasbruches wird in Abb. 2.12 in Anlehnung an (29) für Gläser mit „normalen Umgebungsbedingungen“, d.h. bei 50 % r. F. und durchschnittlicher Raumtemperatur, in drei Bereiche eingeteilt. Dabei wird eine übliche Oberflächenstörung vorausgesetzt, welche durch den Produktionsprozess oder durch die weitere Verwendung der Scheiben verursacht wurde.

Bereich I - Unterkritisches Risswachstum

Die aufgetragenen Zugspannungen führen zu einem von der Umgebungsbedingung abhängigen Anstieg des Spannungsintensitätsfaktors $K_I > K_{I0}$ und damit zu subkritischem Risswachstum bis die Sättigungsgrenze der Diffusion erreicht ist. (Wobei K_{I0} den Grenzbereich-Intensitätsfaktor, unterhalb dessen es kein subkritisches Risswachstum mehr gibt, darstellt)

Bereich II - Übergangsbereich

Nachdem das Sättigungsmaximum überschritten wurde, ergibt sich unter normalen Umgebungsbedingungen ein annähernd kontinuierliches Risswachstum bei steigendem K_I .

Bereich III - Überkritisches Risswachstum

Sobald die Spannungsintensität K_I die Größe von K_{IC} erreicht hat, kommt es zu einer extrem schnellen Zunahme des Risswachstums. Die Rissgeschwindigkeit ist abhängig von der gespeicherten Energiemenge in der Glasscheibe und führt bei dem Erreichen des Maximums zum Aufspalten der Rissfront in mehrere Verästelungen mit geringerer Geschwindigkeit, vgl. Abb. 2.9.

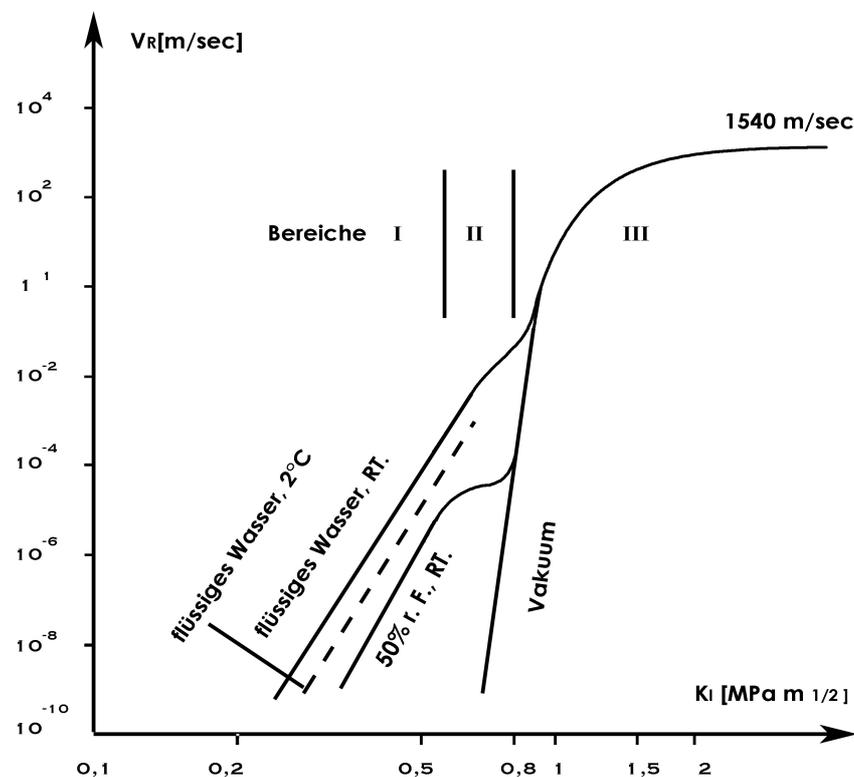


Abb. 2.12; Glasbruchprozess aus (29)

Bemerkenswert ist auch die Abhängigkeit von Bruchgeschwindigkeit und Spannungsintensität in verschiedenen Medien und bei unterschiedlichen Temperaturen. Der Stressintensitätsfaktor kann darüber hinaus, in direkter Folge zur Lasteinleitung, die kritische Größe $K_{Ic} = K_{Ic}$, ohne vorheriges subkritisches Risswachstum erreichen. Dadurch kommt es, wie weiter oben beschrieben wurde, zum spontanen Glasbruch. Neben diesem vorwiegend feuchtigkeits-, druck-, und auch temperaturabhängigen subkritischen Risswachstum ist nach (36) ein teilweises Ausheilen von Rissen in Zeiten der verminderten Zugbeanspruchungen bekannt, welches zu einem Gleichgewichtszustand zwischen Rissausbreitung und Rissheilung führen kann.

Die Zeit spielt bei der Definition der Festigkeit neben der „statischen Ermüdung“ von Glas noch eine weitere Rolle. Ältere Gläser weisen vermehrt „Gebrauchsverletzungen“ auf, welche die Festigkeit negativ beeinflussen. Somit steigt mit zunehmendem Gebrauchsalter und zusätzlich mit der Größe der Scheibe die Wahrscheinlichkeit, dass eine örtliche Spannung auf eine kritische Risstiefe, oder allgemein ausgedrückt, auf eine Vorschädigung trifft. Die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins eines tiefen bruchauslösenden Risses wächst demnach proportional mit dem Alter und der Größe der Scheibe an. In Abb. 2.13 nach (11) ist die Verteilung der Oberflächenschäden bei a. neuem b. gealtertem und c. vorgeschädigtem Glas in Beziehung zur Glasfestigkeit dargestellt.

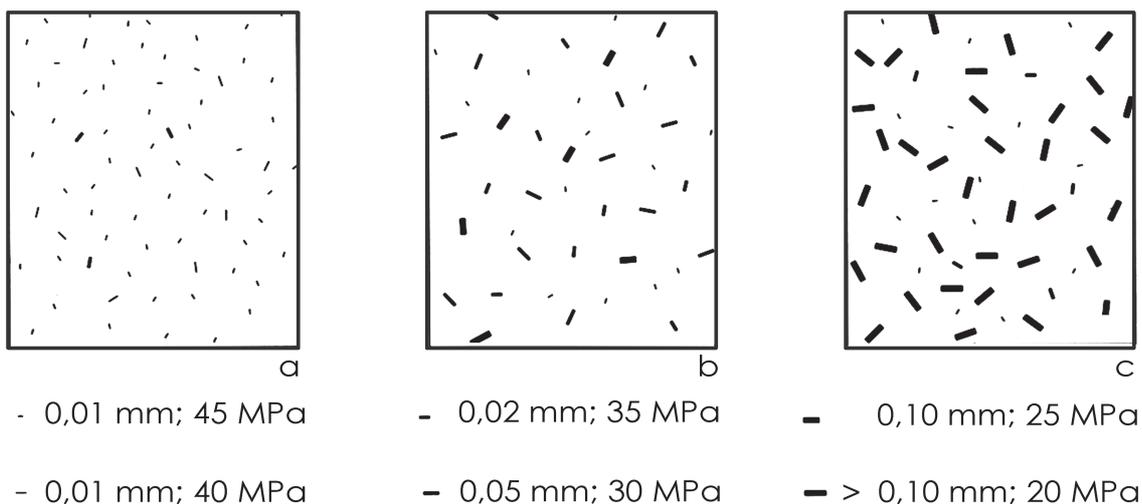


Abb. 2.13; Oberflächenschädigung und Bruchfestigkeit aus (11)

Die Glasfestigkeit ist eine wahrscheinliche bzw. statistisch zu ermittelnde Festigkeit in Abhängigkeit von der Größe der Glasfläche und insbesondere vom Alter,

und stellt keine Materialfestigkeit im eigentlichen Sinne dar. Um die Festigkeit eines Glasbauteils bei einer Lebenszeit von etwa 50 Jahren experimentell zu bestimmen, bietet es sich an, entsprechend vorgeschädigte Gläser zu verwenden, um damit den Alterungsprozess nachzuahmen. Vorgeschädigte Gläser haben neben der Realitätsnähe den Vorteil, weitaus weniger in der Festigkeit zu streuen. Zur Veranschaulichung sind die Mittelwertverteilungen einer Versuchsreihe, welche den oben vorgestellten Gläser a., b. und c. entsprechen würde, in Abb. 2.14 nach (11) dargestellt.

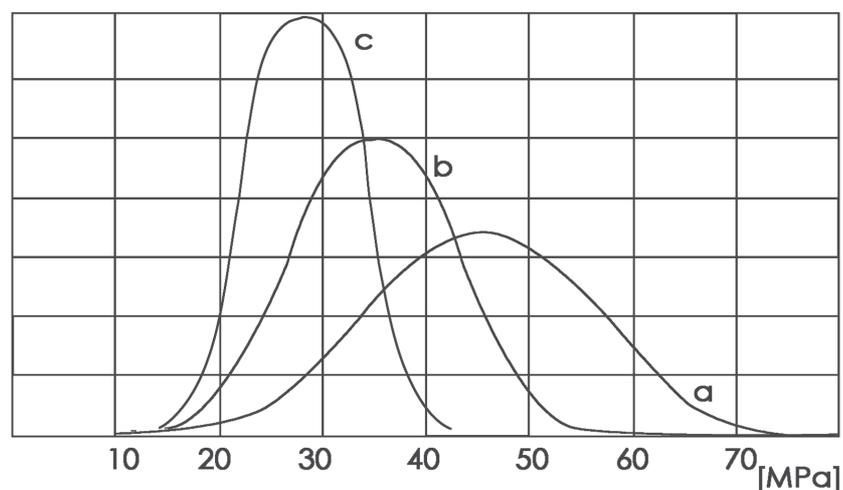


Abb. 2.14; Mittelwertverteilung der Oberflächenschädigung aus (11)

Für Glas stellt jedoch die Weibull-Verteilung die vorteilhaftere mathematische Form für die Auswertung von Versuchen zur Glasfestigkeit dar. Im Vergleich zur Gauß-Verteilung stellt sie die angemessenere Methode bzw. das dem Glasverhalten näherkommende Prinzip des schwächsten Gliedes einer Kette, „forth the size effect on failure of solids“, dar, (30). Während Floatglas, wie oben dargestellt, empfindlich auf Zugspannungen reagiert, können relativ hohe Druckkräfte eingeleitet werden. Nach DIN 1249-10 (30) wird die Druckfestigkeit mit etwa 700 bis 900 N/mm² angegeben. In (19) werden Untersuchungen nach DIN 1249-10 vorgelegt, wonach auch eine Druckdauerbelastung zum Auslöser eines subkritischen Risswachstums führen kann. Wird eine Lebensdauer von etwa 50 Jahren angestrebt, ist danach auch bei druckbeanspruchten Bauteilen aus Glas mit einer Festigkeitsminderung um den Faktor drei gegenüber der Prüffestigkeit zu rechnen. Damit kann bei einer ungünstigen Bauteilgeometrie von einer charakteristischen Druckfestigkeit von etwa 250 N/mm² ausgegangen werden.

Abb. 2.15 zeigt das Rissbild von Glaszylindern unter konstanter Druckbelastung.

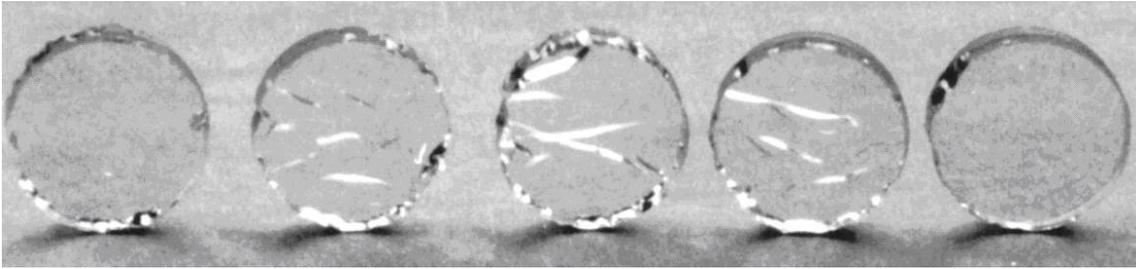


Abb. 2.15; Rissbilder von Glaszylindern nach Druckversuchen aus (58)

Abschließend werden die besprochenen mechanischen Eigenschaften von Silikatglas in Tabelle 2.8 zusammengefasst und durch weitere Angaben ergänzt.

Eigenschaft	Einheit	Floatglas	TVG	ESG
Spezifische Dichte	g/cm ³	2,5	2,5	2,5
Brechungsindex		1,52	1,52	1,52
Poisson-Zahl		0,23	0,23	0,23
Biegefestigkeit (Messwert)	N/mm ²	ca. 100	ca. 120	ca. 150
Druckfestigkeit	N/mm ²	700-900	700-900	700-900
E-Modul	N/mm ²	7,3 e ¹⁰	7,3 e ¹⁰	7,3 e ¹⁰
Ritzhärte nach	Mohs	5-6	5-6	5-6
Linearer Längenausdehnungs- koeffizient bei -20°C bis + 200°C	K ⁻¹	9,0 e ⁻⁶	9,0 e ⁻⁶	9,0 e ⁻⁶
Wärmeleitfähigkeitskoeffizient	W/mK	0,8	0,8	0,8
Maximale Gebrauchstemperatur kurzzeitig	°C	120	200	250
Maximale Gebrauchstemperatur dauerhaft	°C	80	120	200
Lichttransmissionsgrad für 4mm Dicke		0,87	0,87	0,87
Gesamtenergietransmissionsgrad für 4mm Dicke		0,80	0,80	0,80
Schallgeschwindigkeit	m/s	5000	5000	5000
Bearbeitung nach Herstellung möglich		ja	nein	nein

Tabelle 2.8; Glaseigenschaften aus (13)

2.C GLASVEREDELUNG

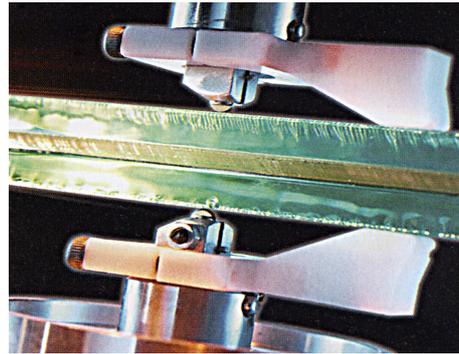
Unter Veredelung versteht man im Glasbau z.B. eine Ertüchtigung der Prüffestigkeit mit einhergehender Veränderung des Bruchbildes durch Vorspannen der Glasscheiben. Darunter werden aber auch die Verbesserung und Gestaltung der Kantenqualität bzw. Kantengeometrie als sichtbares Bauteil verstanden. Außerdem spricht man bei kunsthandwerklichem Arbeiten mit Glas ebenfalls von Veredelung. Betriebe, welche sich als Glasveredler bezeichnen, konfektionieren und verarbeiten Glas zu höherwertigen Produkten bis hin zu Isolierglaseinheiten für Fenster. Hier geht es jedoch zunächst um die Erhöhung der Festigkeit durch geeignete Maßnahmen für den Umgang mit und bei der Verwendung von Bauglas allgemein. Die meisten Floatglastafeln für das Bauwesen werden zu Fenstern weiterverarbeitet und müssen dazu meist auf relativ kleinteilige Fenstermaße konfektioniert werden. Hierzu gibt es eine Reihe bewährter aber auch neue Methoden.

2.C.1 MECHANISCHE METHODEN

Die wohl gängigste Methode zur Konfektionierung von Glasplatten ist das Ritzen und anschließende Brechen. Beim Ritzen wird die Sprödeheit des Glases genutzt, indem mit einem Material, das härter als Glas ist (Glasschneider mit Diamant oder Schneiderädchen aus Stahl bzw. Hartmetall), an der Oberfläche eine linienförmige Störung eingebracht wird. Dabei splittert die Rissspur auf, und es entsteht Glasstaub. Dieser Staub fällt zum Teil in den Spalt, wodurch dieser sich nicht mehr schließen kann. Er bleibt durch den Glasstaub aufgekeilt und steht so unter Spannung. Die Spannung reicht sehr tief in das Glas hinein und bewirkt das glatte Durchbrechen des Schnittes, sobald eine zusätzliche Zugspannung an der Rissfront durch Biegung induziert wird (79). Schnittöle erleichtern das Schneiden und Brechen. Verbundglas wird geschnitten, indem auf beiden Seiten das Rädchen gleichzeitig über das Glas geführt wird. Anschließend wird der Bruchbereich erhitzt, sodass die Klebeschicht erweicht und der Scheibenstapel beabstandet und mittels eines Schneidwerkzeugs der gedehnte Klebstoff durchtrennt werden kann, Abb. 2.16 links. Ritzen mit dem Schneiderädchen ist heute so weit entwickelt, dass Konfektioniertische mit einer Schnittgeschwindigkeit von bis zu 250 m pro Minute ritzen können. Nachteilig bei diesem Verfahren ist die mit muscheligem Ausbrüchen verbleibende Kante, welche ein hohes Verletzungsrisiko birgt, Abb. 2.16 rechts. Außerdem müssen die Scheiben nach dem Schnitt vom Schnittöl in Waschanlagen gereinigt werden. Die Konfektionierung vor allem von dicken



aufschmelzen der PVB-Folie



Doppelrädchen aus (8)

Fa. Glaston

Abb. 2.16; Verbund(sicherheits)glaskonfektionierung

Gläsern durch Glassägemaschinen mit Trennscheiben aus Silizium-Kohlenstoff bzw. Diamant ist vergleichbar mit dem Bearbeiten von Stahl mit einem Winkelschneider. Die Sägeblätter tragen das Glas durch Schleifen ab. Durch die Verringerung der Körnung bzw. durch das Verwenden spezieller Schleifpasten kann Glas bis zu optisch völlig fehlerfreien Oberflächen poliert werden. Glas kann jedoch nur nass geschliffen werden, da das Glas bei einem Trockenschliff heiß werden und springen könnte. Schleifprozesse müssen deshalb grundsätzlich gekühlt werden, sonst können thermisch induzierte Spannungen im Glas verbleiben.

Zur Kühlung wird meistens Wasser eingesetzt. Mit Wasser kann jedoch auch geschnitten werden. Dabei wird das Wasser auf einen Druck von bis zu 4000 bar komprimiert und mittels einer Düse mit einem Durchmesser von ca. 0,1 mm zu einem feinen Strahl gebündelt, der dadurch auf bis zu 1000 m/s beschleunigt wird (bei Reduzierung des Wasserdrucks ist auch eine Kerbung möglich).

Die konzentrierte Einwirkung des energiereichen Hochgeschwindigkeitsstrahls führt zur Mikrozerspannung des zu schneidenden Materials. Der Vorteil gegenüber dem Ritzen liegt darin, beliebige Konturschnitte bis zu einer Dicke von 8 cm durchführen zu können. Außerdem ist es einfacher möglich, Verbundglas zu schneiden. Der Vorteil gegenüber dem Trennen ist, dass sofort im Vollmaterial angestochen werden kann. Durch eine reduzierte Schnittspalte kommt es zu weniger Materialverlust, und eine höhere Schnittgeschwindigkeit ermöglicht einen schnelleren Arbeitsfortschritt (79).

Glas lässt sich auch bohren. Im Unterschied zu Bohrarbeiten in Metall und Holz wird das Material nicht in Spänen abgehoben, sondern in vielen kleinen Splittern losgerissen. Eine ausreichende Kühlung ist die wesentliche Voraussetzung beim Bohren, weil Wärmespannungen zu sofortigem Bruch führen können.

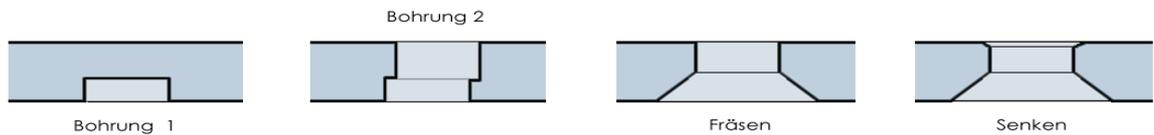


Abb. 2.17 Arbeitsschritte einer Glasbohrung

Man kühlt mit Bohröl oder auch mit Wasser. Gummibohrringe, welche am Glas haften, halten die Kühlflüssigkeit wie in einem Becher zusammen. Um ein Bohrloch mit sauberen Kanten zu erzielen, muss von beiden Seiten gegeneinander gebohrt werden; Abb. 2.17. Wird von einer Seite versucht ganz durch die Scheibe zu bohren bricht das Bohrloch auf der Gegenseite trichterförmig aus. Überwiegend werden Rohrbohrer zum Bohren verwendet. Für größere Bohrlochdurchmesser finden Rohrbohrer bis zu einem Durchmesser von 200 mm Verwendung. Gebohrt wird mit Schmirgelbrei, der von einem Gummiring am Bohrloch zusammengehalten und von den Schlitzen im Rohrbohrer unter die Bohrerante gebracht wird.

2.C.2 LASER

„Die Bearbeitung von Glaswerkstoffen mit Laserstrahlung kann in Abhängigkeit von Glasart und Werkstoffeigenschaften mit Lasern unterschiedlicher Wellenlängen und Verfahren durchgeführt werden. Im UV-Bereich werden die einfallenden Photonen von den Elektronen absorbiert, und diese dadurch zu Schwingungen angeregt. Die Elektronen geben ihre Energie an die Atome ab, sodass die Energie der Strahlung in Gitterschwingungen und damit in Wärme umgewandelt wird. Im Bereich der IR-Strahlung (Infrarot) bedingen die Si-O-Gitterschwingungen eine vollständige Absorption der Laserstrahlung in Silikatgläsern“ (32).

Laser schneiden bedeutet, unter Ausnutzung des Temperatúrausdehnungsverhaltens von Glas, gezielt Spannungen zu erzeugen und kontrolliert als „Antriebskräfte“ zum Trennen zu nutzen.

Der CO₂-Laser ist erst seit kurzem bis zur Serienreife für die Flachglaskonfektionierung umgesetzt und wurde in dem Forschungsprojekt LIST (Laser induziertes Spannungs-Trennverfahren für Flachglas) entwickelt. Er ersetzt im Wesentlichen das Rädchen des Ritzverfahrens durch einen Laser, welcher an der Oberfläche thermisch einen Ritz unter Gegenkühlung einprägt, Abb. 2.18 aus (33). Durch eine eingebrachte Biegespannung wird eine plane Bruchkante erzeugt. Die erzeugte Kante ist extrem glatt und nahezu störungsfrei, bisher wurden Schnittgeschwindigkeiten bis zu 50 m/Minute realisiert.

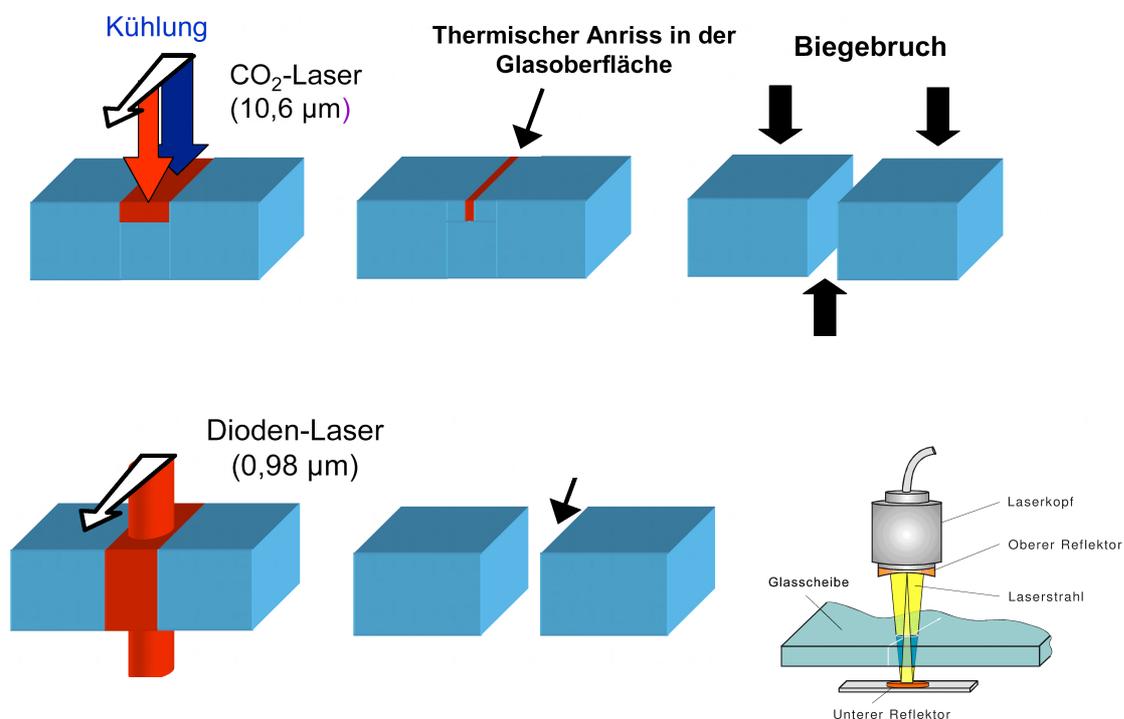


Abb. 2.18; Lasertrennverfahren aus (33)

„Die Wärmeentwicklung unter Einwirkung von NIR- Strahlung (Nah-Infrarot) wird durch niederenergetische Elektronenübergänge im Glaswerkstoff befindlicher Elemente wie z.B. Fe verursacht“. Die weiterentwickelte Variante des NRI-Lasersystems ist der MLBA-Laser (Multiple-Laser-Beam-Absorption). „Die Laserstrahlung wird dabei im Gegensatz zur üblichen CO₂-Laserstrahlung über die gesamte Materialdicke des Glases absorbiert, wobei ein überwiegender Anteil der Strahlung das Glas beim ersten Strahldurchgang transmittiert. Durch ein speziell entwickeltes Reflektorsystem wird eine Mehrfachabsorption der Strahlung im Glas (d. h. Multiple Absorption) erreicht, Abb. 2.18 unten rechts aus (32).

Der Anteil der in Wärmeenergie umgewandelten Strahlung erhöht sich, sodass das Glas durch eine thermisch induzierte Spannung, ausgehend von einem Initialriss, in einem Arbeitsgang getrennt werden kann, Abb. 2.18 unten links (33). Dieses neue Verfahren benötigt keine Kühlmedien für den Trennprozess“. Mit diesem Verfahren lassen sich auch Lamine trennen, wobei die Zwischenschicht weiterhin konventionell durch Aufheizen, Dehnen und Schneiden durchtrennt werden muss (32). Die maximale Schnittgeschwindigkeit beträgt gegenwärtig 8 m/Minute. Erforscht wird zur Zeit die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit durch mechanisch eingeprägte Zugspannungen normal zum Strahl. Mit keinem dieser Verfahren ist es möglich, Löcher in die Scheibe einzubringen. Das Schneiden von Löchern ist das gegenwärtig anvisierte Forschungsziel für den MLBA-Laser. Durch Lasertrennverfahren wird wegen der deutlich verbesserten Kantenqualität eine Verringerung der Prozessschritte möglich. Die möglichen positiven Auswirkungen auf die Prozesskette werden aus Abb. 2.19 deutlich.

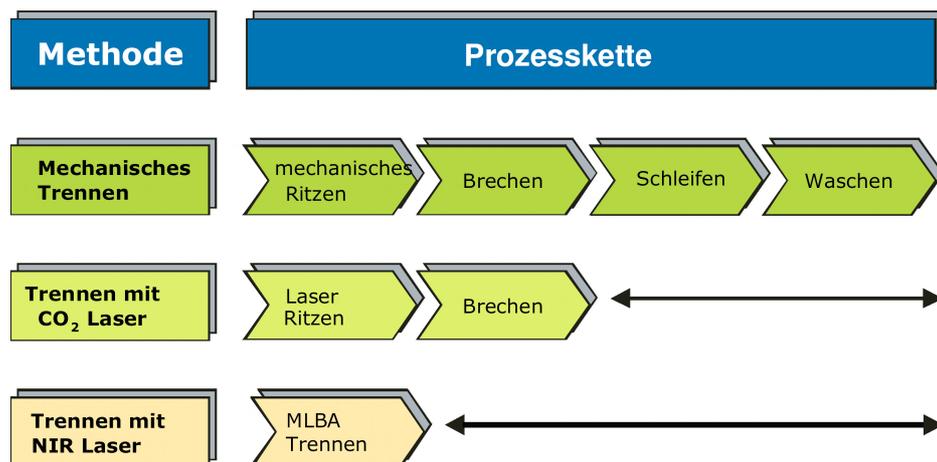
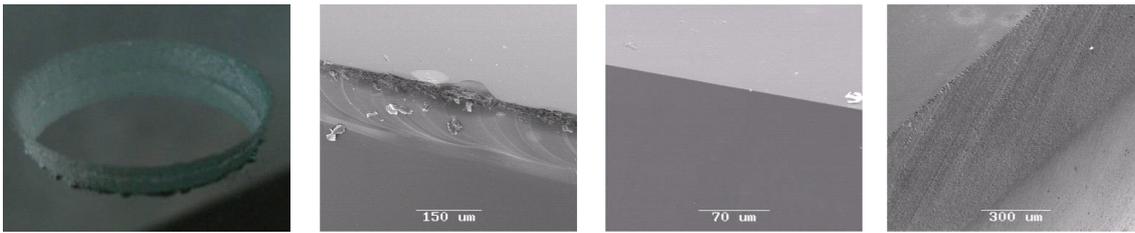


Abb. 2.19; Prozesskette zur Glaskonfektionierung aus (32)

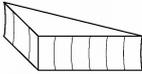
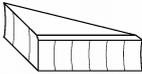
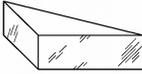
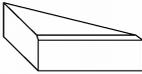
Die Kantenbearbeitung beeinflusst auch die Biegefestigkeit des Flachglases, da die Kanten durch Risse und Kerben frühzeitig versagen. Durch eine Bearbeitung kann dieser Effekt vermindert werden. Generell gilt: Je höher der Grad der Kantenbearbeitung ist, desto geringer ist ihr Einfluss auf die Festigkeit des Glases. In Abb. 2.20 sind verschiedene Kantenqualitäten gegenübergestellt. Da die Bruchfestigkeit des Glases von der Risttiefe abhängt, wird deutlich, dass nur lasergeschnittene Kanten ähnliche Festigkeiten aufweisen können wie die Floatseite der Tafeln. Wird auch nur die kleinste Störung eingebracht, sinkt diese Festigkeit wieder deutlich ab. Wie die Kantenqualität über die gesamte Lebensdauer einer Glasscheibe gesichert werden kann, wird ebenfalls gegenwärtig erforscht.



Wasserstrahlschnitt Rädchenschnitt MLBA- Lasercut Poliert

Abb. 2.20 ; Glasschnittkanten aus (33)

2.C.3 KANTEN NACH DIN 1249 TEIL 11(34)

Benennung	Kurzzeichen	Beschreibung	Skizze
Geschnitten	KG	Die geschnittene, unbearbeitete Glaskante mit scharfkantigen Rändern. Quer zu den Rändern weist die Kante leichte Wellenlinien (Wallnerlinien) auf.	
Gesäumt	KGS	Schnittkante, deren Ränder mit einem Schleifwerkzeug gebrochen bzw. gefast sind.	
Maßgeschliffen (Justiert)	KMG	Die Glasscheibe wird durch Schleifen der Kantenoberfläche auf das erforderliche Maß gebracht. Die Kante kann sowohl geschnitten als auch gesäumt sein.	
Geschliffen (Feinjustiert)	KGN	Die Kantenoberfläche ist durch Schleifen ganzflächig bearbeitet. Die Kante kann sowohl geschnitten als auch gesäumt sein.	
Poliert	KPO	Die polierte Kante ist eine durch Überpolieren verfeinerte geschliffene Kante. Polierspuren in gewissem Umfang sind zulässig.	

Eine Methode dem Verletzungsrisiko bei herkömmlich geschnittenen Scheiben oder durch scharfkantige Glassplitter im Bruchfall entgegenzuwirken, ist das Vorspannen von Glas. Für die Baupraxis von geringer Bedeutung sind chemisch vorgespannte Gläser, bei denen durch Ionenaustausch in einem Tauchbad die Oberfläche eine extrem hohe Druckvorspannung erhält. Bei der thermischen Methode wird die Floatglasscheibe bis zum Transformationspunkt (640 °C) erhitzt. Wenn die gesamte Glasmasse diese Temperatur erreicht hat, wird sie schlagartig mit kalter Luft angeblasen. Die spezifische Wärmeleitfähigkeit des Glases bewirkt ein unterschiedliches Abkühlen der äußeren und der inneren Bereiche der Scheibe. Die Oberfläche überschreitet rasch den Erstarrungsbereich, wohingegen sich der innen liegende Scheibenkern langsamer abkühlt. Dabei werden Spannungen über den gesamten Querschnitt in der Art aufgebaut, dass der sich abkühlende und dabei zusammenziehende Kern Druckspannungen (-) in den äußeren Bereich einprägt und selber ausgleichende Zugspannungen (+) aufbaut. In Abb. 2.21 sind die verschiedenen Vorspannzustände über den Scheibenquerschnitt aufgetragen.

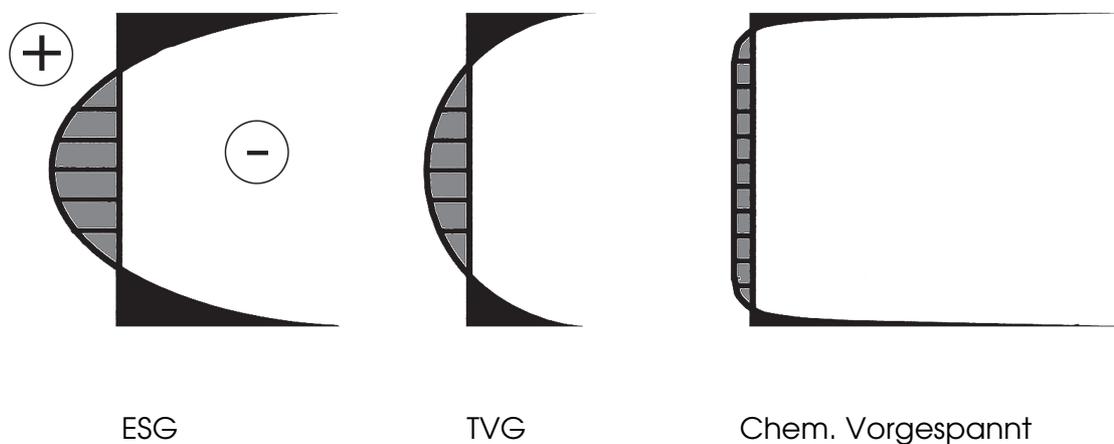


Abb. 2.21; Vorspannzustände von Glas

Über die Abkühlungsgeschwindigkeit lässt sich die Größe der eingepprägten Spannung beeinflussen. Durch rasches Abkühlen bzw. bei einer hohen eingepprägten Spannung entsteht im Falle der Zerstörung des Glases ein engmaschiges Netz von kleinen, meist stumpfkantigen Glaskrümeln. Wird der Abkühlungsprozess langsamer induziert, vergrößern sich die Bruchstücke. Glas versagt auf Grund von Zugspannung an der Oberfläche. Da durch den Abkühlungsprozess Druckspannungen in der Oberfläche eingeppräg sind, müssen diese erst „überzogen“

werden, damit es zum Risswachstum kommen kann, was zu einer höheren Bruchfestigkeit führt. Das vorgespannte Glas wird nach DIN 1249-12 (prEN 120150) (35) als Sicherheitsglas oder Einscheibensicherheitsglas (ESG) bezeichnet, wenn eine genügend kleinteilige Splitterbildung vorhanden ist. Eine ausführliche Beschreibung zum thermischen Vorspannzustand findet sich in (36). Glas mit geringerer Vorspannung, so genanntes teilvorgespanntes Glas (TVG), galt bisher als unregelter Baustoff. Da das Bruchbild von TVG dem einfachen Floatglas ähnelt, gilt es nicht als Sicherheitsglas. Es wird aber neuerdings durch die prEN 1863 (37) als Baustoff geregelt. ESG ist im Gegensatz dazu leicht an seinem krümeligen Bruchbild erkennbar, Abb. 2.22.

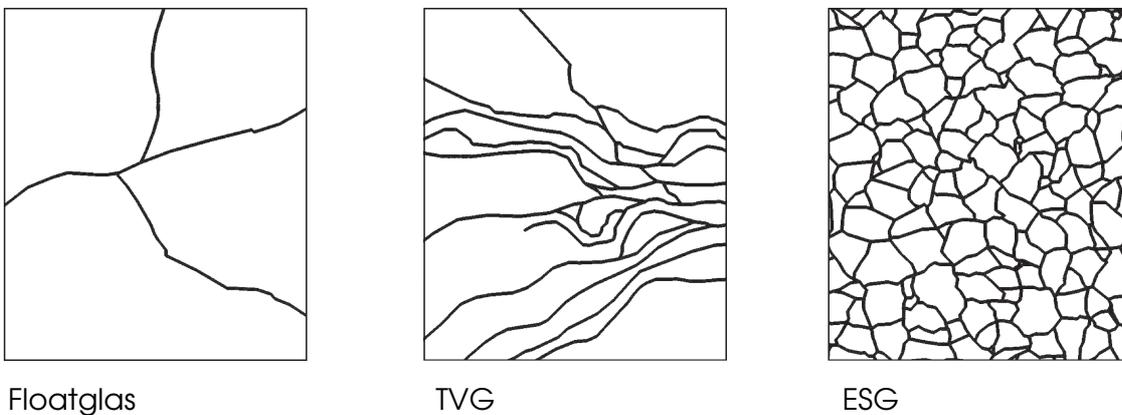


Abb. 2.22; Bruchbilder in Abhängigkeit vom Vorspannzustand aus (11)

Im Versagensfall von ESG kann es zur Ablösung größerer zusammenhängender krümeliger Bruchschollen kommen, welche zu gefährlichen Verletzungen oder Sachschäden führen können. So ergeben sich für Verglasungen z.B. im Überkopfbereich, darunter werden nach (56) Gläser mit einer Neigung über 10° gegenüber der Vertikalen verstanden, erhöhte Sicherheitsanforderungen.

2.C.5 PRÜFUNG DER GLASBIEGEFESTIGKEIT

Die Festigkeit des Glases hängt vom Zustand der Oberfläche ab, wobei die Kantenqualität ebenfalls ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung von Glas darstellen kann. Dieser Zusammenhang findet sich in den Normen zur Bestimmung der Glasfestigkeit wieder. Mit dem Doppelringversuch, Abb. 2.23 (36), nach DIN 52292-2 (38) bzw. DIN 1288-2 (39) wird versucht, den Einfluss der Kante zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Glasproben weitestgehend auszuschließen.

Hierbei wird auch sichergestellt, dass eine möglichst große Fläche mit einer kontinuierlichen Zugspannung beaufschlagt wird, um dem in 2.B beschriebenen Verhalten von Glas Rechnung zu tragen.

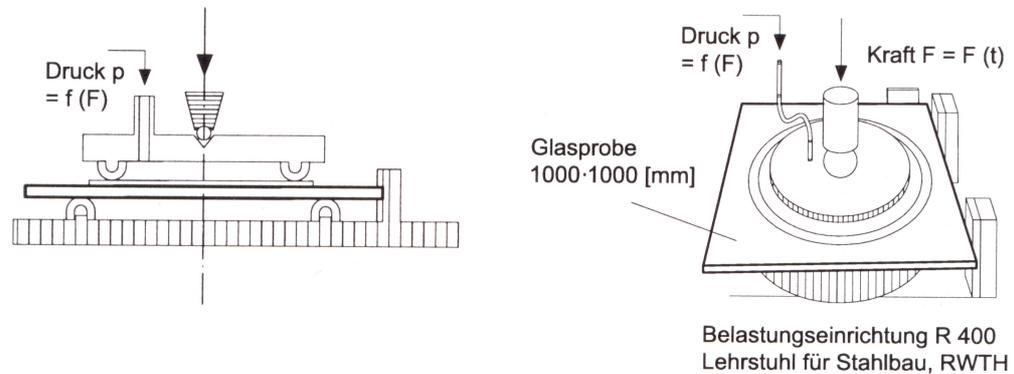


Abb. 2.23; Doppelringversuch aus (36)

Analog zum Doppelringversuch wird mit dem Vierschneiden-Versuch nach DIN 52303 (40) bzw. DIN 1288-3 (39) über die beiden lasteinprägenden Rollen ein kontinuierliches Moment in den Prüfkörper eingepägt. Da es hierbei zu relativ großen Verformungen kommt, muss das nichtlineare Tragverhalten berücksichtigt werden, was zur erhöhten Kantenspannung führt.

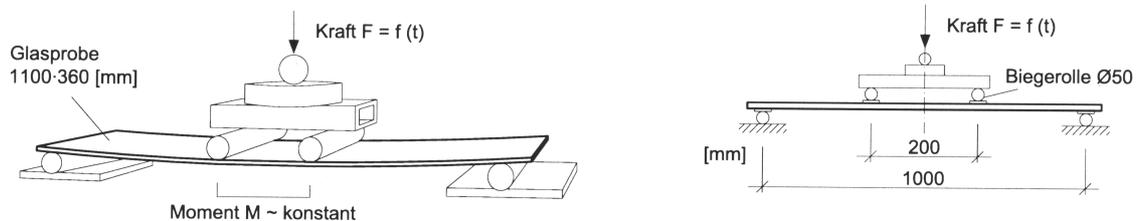


Abb. 2.24; Vierschneiden-Versuch aus(36)

Untersuchungen an verschiedenen Schnittkanten ergeben eine deutliche Abhängigkeit der Biegefestigkeit von Glastafeln von der Kantenqualität. In (33) werden Versuchsergebnisse dargestellt, wonach die Kantenfestigkeit durch Laserschnitt um das Dreifache verbessert wurde, Abb. 2.25-a. Eigene Nachberechnungen von Versuchen der FA. H2B-Photonics Hannover an mit einem MLBA-Laser geschnittenen Glasproben ergab eine Festigkeitssteigerung von ebenfalls etwa 260 - 300 %, Abb. 2.25-b. Die Festigkeit ist eventuell auch abhängig von der Lagerzeit der Prüfkörper nach dem Schnitt. Gesicherte Erkenntnisse zur Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit von der Kantenqualität liegen jedoch nicht vor.

Kantenspannung zur Durchbiegung, H2B Versuch - 2mm Platte (500x200mm), L= 435mm

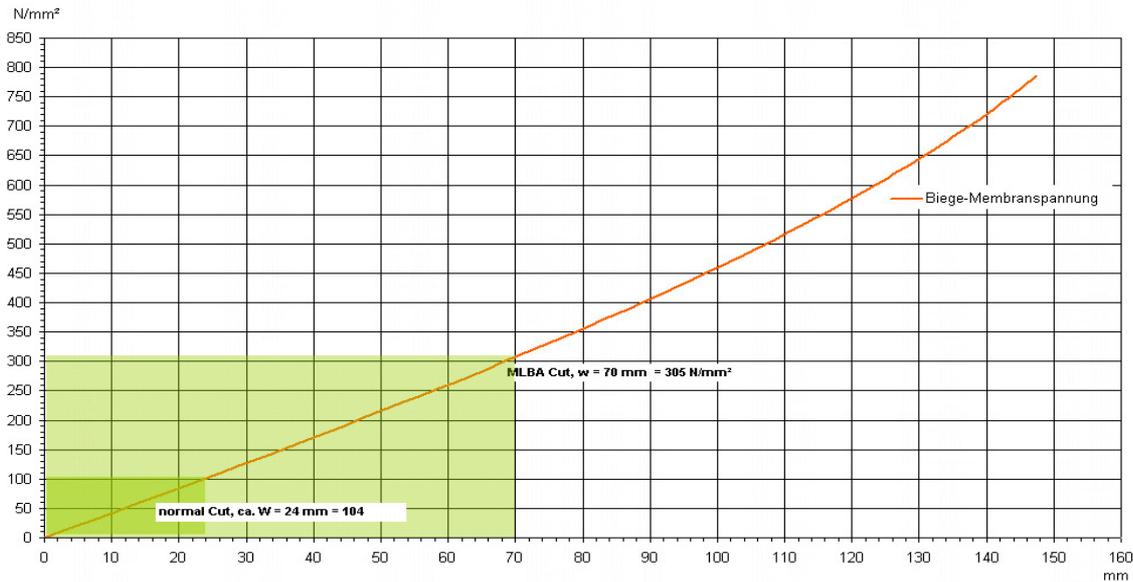


Abb. 2.25-a; Bruchfestigkeit mit lasergeschnittenen Kanten MLBA-cut, H2B-Laser

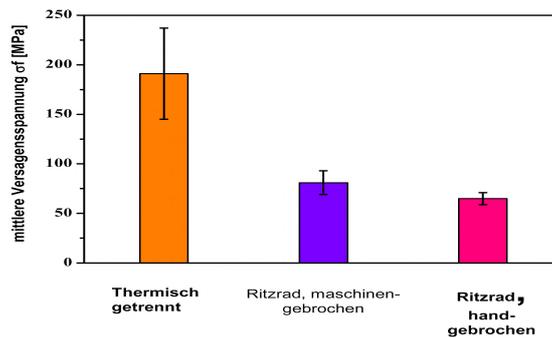


Abb. 2.25-b; Bruchfestigkeit mit lasergeschnittenen Kanten aus(33)

2.D GRUNDLAGEN ZUM FÜGEN VON GLAS

Gute Grundkenntnisse der physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Baustoffs und im Besonderen seine Wechselwirkung mit ihm eventuell berührenden Materialien sind die Voraussetzung, um schadensfrei baukonstruktive Fügungen zu entwickeln. Fügen bedeutet im Wesentlichen die Ausbildung von Fugen.

Die beste Fügung ist die, welche die Eigenschaften der zu fügenden Bauteile ununterbrochen weiterführt. Da dieser Anspruch in der Praxis nicht erreicht werden kann, stellen Fügungen immer eine Schwachstelle dar. Das gilt insbesondere für spröde brechende Baustoffe wie Glas. Die im Folgenden vorgestellten Füge-techniken wurden ausgewählt, da sie für die späteren Analysen relevant erscheinen. Ausführliche Beschreibungen diverser anderer Möglichkeiten und Varianten zum Fügen von Glas findet sich z.B. in (11,19,56,58,52,41,42,43). Grundsätzlich kann Glas ähnlich wie Stahl geschweißt werden. Schweißen stellt sicherlich die beste Methode zur Herstellung gasdichter Verbindungen dar.

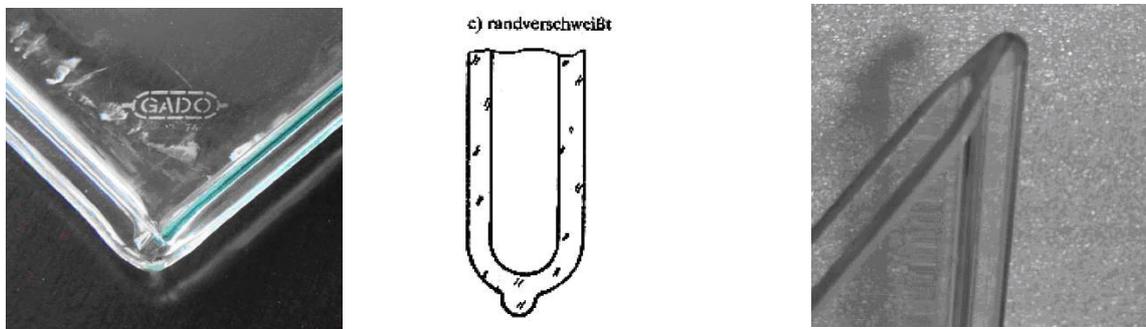


Abb. 2.26, randverschweißte Isolierglaseinheiten aus (79)

Das in Abb. 2.26 links dargestellte Isolierglas wurde am Rand erwärmt und zusammen geschweißt (Glas und Glas), (79). Die randverschweißten und zusätzlich gelöteten Isoliergläser, Abb. 2.26 rechts, haben in den letzten Jahren völlig an Marktbedeutung verloren. Durchgesetzt hat sich das geklebte Isolierglas. Die wesentlichen Ursachen hierfür sind Vorteile gegenüber der Schweißtechnik wie z.B. eine relativ einfache Fertigungstechnologie bei geringem Investitionsaufwand sowie keine patentrechtlichen Einschränkungen.

Die heute hauptsächlich „geklebten“ Isoliergläser, werden überwiegend mit doppelt gedichtetem Randverbund hergestellt. Das Verschweißen von Glasscheiben kann darüber hinaus Zugspannungsfelder in den Glaskörper induzieren und damit wegen des beschriebenen Sprödebruchverhaltens die tatsächliche Bruchfestigkeit deutlich reduzieren. Diese ungleichmäßigen Spannungen können zum spontanen Bruch des Glaskörpers führen. Deshalb werden gegenwärtig im Glasbau keine Schweiß- oder Löttechniken zum Fügen von Glas eingesetzt.

Reibverbindungen gelten im Stahlbau als hochfeste Verbindung, indem Stahlplatten durch hochfeste Verschraubungen gegeneinander verpresst werden. Die übertragbare Reibungskraft F_R hängt direkt von der aufgebrauchten Normalkraft F_N und der Haftreibungszahl μ_H ab.

$$F_R = F_N \cdot \mu_H$$

Reibverbindungen kommen im Wesentlichen nur bei Einfachverglasungen zum Einsatz und hier meist im Innenbereich. Abb. 2.27 links zeigt eine in einer Klemmverbindung befindliche hängende Scheibe. Analog zum Stahl können weitgehend spannungsspitzenfreie Fügepunkte mit Reibverbindungen oder Klemmleisten ausgeführt werden.

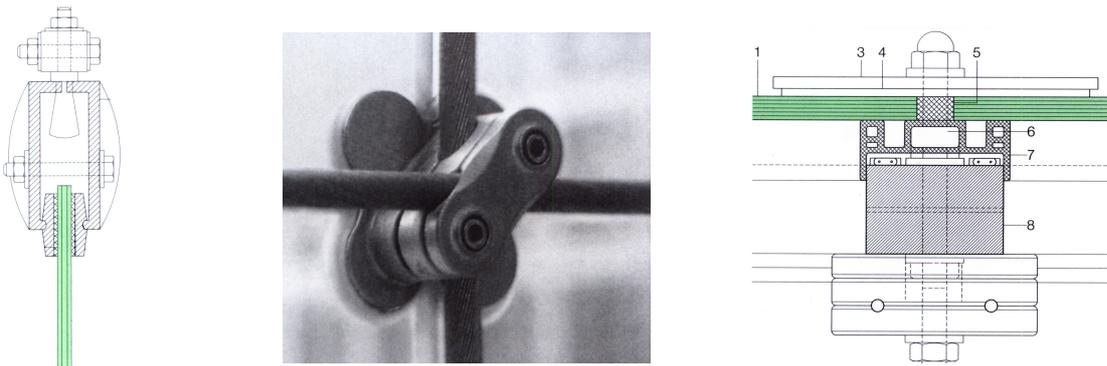


Abb. 2.27; Klemmverbindungen aus (11)

In der praktischen Umsetzung müssen Randbedingungen wie die Oberflächenqualität der Reibflächen, Kriech Eigenschaften von Trennschichten und weitere Bedingungen wie Feuchtigkeit, Verschmutzung und Temperatur beachtet werden (11). Klemmhalter können eine Variante der Punktlagerung darstellen, indem die Ecken der Glastafeln gegen ein Elastomer gepresst werden und entweder auf einer Unterkonstruktion aufliegen oder vom Klemmhalter, Abb. 2.27 rechts, in allen Richtungen gehalten werden. Bei diesen Konstruktionen ist die freie Verdrehbarkeit der Scheiben in den Lagern besonders zu beachten.

Neue Methoden, die Rauigkeit von Glasoberflächen zu erhöhen und so eine verbesserte Haftreibung zu erzielen, wurden durch Freytag 2002 (45) untersucht.

Hierbei wird auf die Glasoberfläche von ESG vor dem thermischen Vorspannen der üblicherweise zum Einbrennen von Markierungen verwendete weiße wasserlösliche Emaillack als Träger von Korund verwendet. So kann die Glasoberfläche ohne die Verwendung von organischen Klebern eine raue Sandbeschichtung erhalten.

2.D.3 KLEBEN

Klebeverbindungen stehen im Stahl- wie im Glasbau denselben oder zumindest verwandten Problemen gegenüber. Der verwendete Klebstoff muss eine ausreichende und vor allem beständige Haftung gewährleisten und gleichzeitig eine dauerhafte Steifigkeit besitzen. Bei Glas ist es besonders wichtig, dass er annähernd oder am Besten den gleichen Temperaturexpansionskoeffizienten besitzt wie das Glas selbst. So können eventuell bruchrelevante Spannungsspitzen vermieden werden. Verklebungen stellen für das Fügen von Glas wohl die geeignetste Methode dar, da durch die relativ flächigen Verklebungen Spannungsspitzen, wie sie z.B. bei Lochleibungsverbindungen auftreten, vermieden werden können, und gleichzeitig ein Dämpfungs- bzw. Dichtungsvermögen durch die Verklebung gewährleistet werden kann.

Eine Verklebung kann in drei Bereiche eingeteilt werden, Abb. 2.28 links: die Kontaktfläche oder Grenzfläche zwischen dem Klebstoff und einem der Fügepartner, Z3, eine Übergangszone im Klebstoff, Z1, und der Klebstoff selbst, Z2. Jede dieser Zonen ist am Kleben unmittelbar beteiligt. In Abhängigkeit von den Eigenschaften der Klebefläche und des Klebstoffs bildet sich eine Übergangszone aus, in welcher der Klebstoff abweichende, in der Regel steifere Materialeigenschaften, (46) aufweist, Abb. 2.28 rechts.

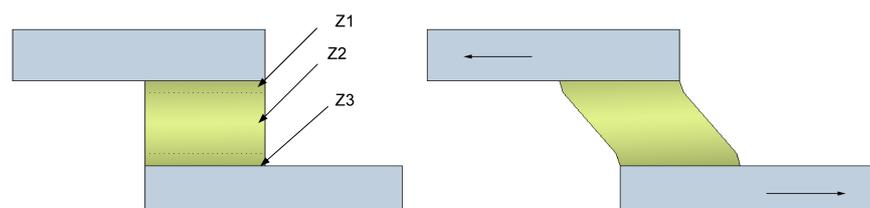


Abb. 2.28; Übergangszonen in schubbelasteten Verklebungen

Extrem glatte, sich berührende Oberflächen haften aneinander, indem zwischen den Molekülen (ca. 0.5 nm) Anziehungskräfte, sogenannte „Van der Waals Kräfte“ wirken. Durch die Kräfte zwischen den Molekülen haften die Grenzflächen verschiedener Materialien aneinander an, was als Adhäsion bezeichnet wird.

Die Größe dieser Kräfte ist von dem Energieniveau der Oberflächen respektive der Moleküle abhängig. Hierbei handelt es sich nicht um chemische bzw. reaktive Bindungen, sondern im Wesentlichen um polare Anziehungskräfte. Ähnlich einem Magneten ziehen sich polare Moleküle an und beeinflussen damit die Festigkeit.

Ein Maß für die Polarität ist die Benetzbarkeit, welche in dyn/cm gemessen wird. Wird ein flüssiger Stoff zwischen zwei Flächen eingebracht, hat dieser Stoff die Möglichkeit, in Unebenheiten der Oberfläche „einzufließen“ und den Effekt der Adhäsion noch zu erhöhen. Die dafür notwendigen Bindungskräfte können darüber hinaus durch Druck zusätzlich gesteigert werden, indem sich die Abstände zwischen den Molekülen des Stoffes oder Klebstoffes und der Oberflächen verringern.

Wie in 2.A.1 dargestellt wurde, bildet sich an der Glasoberfläche auf Grund von Wassereinlagerungen eine Schicht aus freien Wasserstoffenden aus. Diese Schicht kann für einige Klebstoffe bereits zu einer bedeutenden Beeinträchtigung der Adhäsion führen. Darüber hinaus können Feuchtigkeit oder andere Substanzen, welche in die Klebefuge eindringen, eine Schädigung der Adhäsion verursachen. Zur Erhöhung der Adhäsion können so genannte Primer (Haftvermittler) eingesetzt werden, mit denen neben den physikalischen Kräften auch chemische Bindungen herangezogen werden.

Mit einem Primer, z.B. aus Siliziumwasserstoff (Silane), kann die Adhäsion für eine Vielzahl von verschiedenen Materialien verbessert werden. Für die in der Verarbeitung hoch viskosen Klebstoffe ist eine glatte Oberfläche geeigneter, da sie eine gute Benetzung ermöglicht, und so eine maximale Kontaktfläche erzeugt werden kann. Für weniger viskose Klebstoffe ist eine raue Oberfläche geeigneter, da sich der Klebstoff neben der Adhäsion ähnlich einem Reißverschluss mit der Oberfläche verhaken kann.

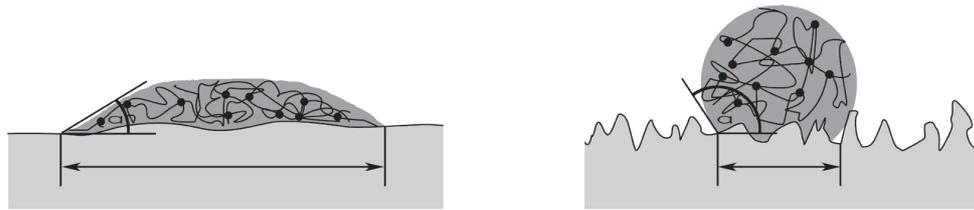


Abb. 2.29; Adhäsion und Viskosität aus (48)

Die Schichtdicke des Klebstoffs ist von der Viskosität im nicht ausgehärteten Zustand abhängig. So betragen übliche Klebstoffdicken bei Duromeren (niedrigviskos) ca. 0,05 bis 1 mm; bei Elastomeren (hochviskos) ca. 4 bis 8 mm, bei Thermoplasten wie der Verbundfolie (PVB) 0,38 oder 0,76 bis 2,3 mm. Aus der Schichtdicke lassen sich wiederum generelle Wirkmechanismen ableiten, wobei - wie in Tabelle 2.9 nach (48) dargestellt - die Klebstoffdicke ungefähr die Rauigkeitstiefe des Fügeteils betragen soll.

Einfluss der Klebstoffdicke	Kleberschicht	
	dünn	dick
Steifigkeit der Verbindung	größer	kleiner
Einfluss unterschiedlicher Temperaturdehnungen auf die Klebeschicht	groß	kleiner
Spannungsverteilung innerhalb der Klebeschicht	schlechter	besser

Tabelle 2.9; Einfluss der Klebstoffdicke aus(48)

Da Floatglas, wie in 2.A. 1 dargestellt wurde, herstellungsbedingt über eine Zinnbad- und eine Atmosphärenseite verfügt, besitzen die Glasseiten grundsätzlich differente energetische Zustände. Der Einfluss von Bad- und Atmosphärenseite wurde z.B. in (46) Abb. 2.30, für einen UV-aushärtenden Kleber an verschiedenen Materialkombinationen mittels eines Zugversuches untersucht. Mit diesem Versuch konnte gezeigt werden, dass die Atmosphärenseite für den verwendeten UV-härtenden Acrylatkleber auch nach einem Haltbarkeitstest bessere Ergebnisse als die Zinnbadseite liefert. Im Gegensatz dazu fordert der Hersteller von SentryGlas® Plus (SGP), wegen der besseren Haftung am Glas, SGP ausschließ-

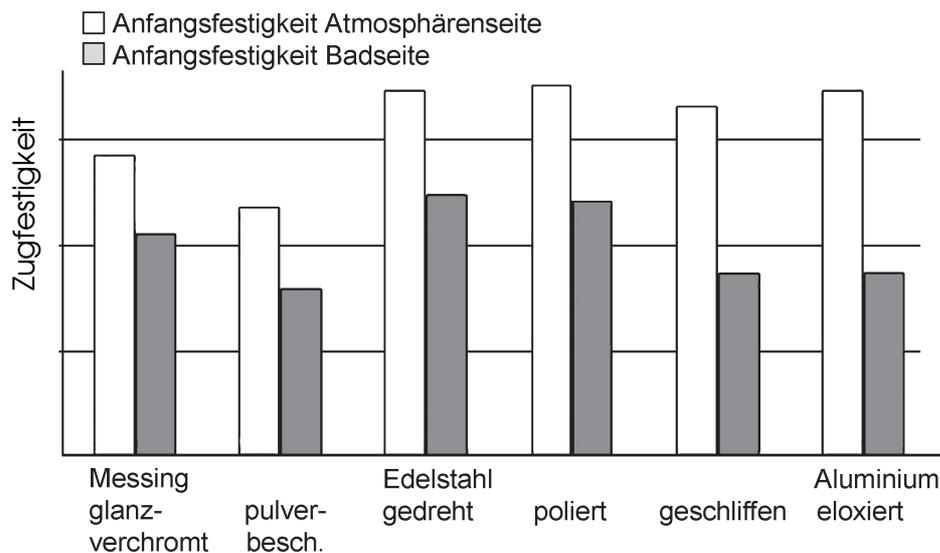
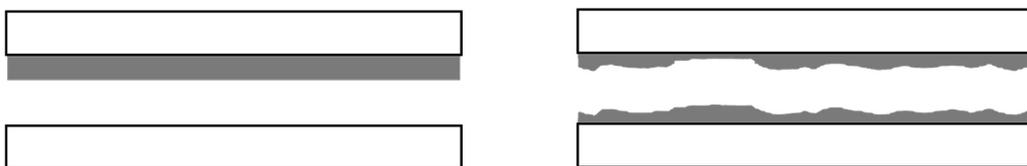


Abb. 2.30; Zugversuche aus (46)

lich mit der Zinnbadseite zu laminieren. Das Adhäsionsverhalten der verwendeten Klebstoffe zur Glasfläche muss demnach in Versuchen untersucht werden.

2.D.3.B KOHÄSION

Das Versagen der Adhäsion (Adhäsionsbruch) bedeutet ein Ablösen des Klebstoffs von seinem Klebpartner. Versagt der Kleber auf Grund zu geringer innerer Festigkeit vor dem Adhäsionsbruch, wird diese Versagensform als Kohäsionsversagen bezeichnet. Abb. 2.31 stellt den Adhäsionsbruch dem Kohäsionsversagen gegenüber. Die innere Festigkeit eines Klebstoffs wird dementsprechend als Kohäsion bezeichnet.



Adhäsionsbruch

Kohäsionsbruch

Abb. 2.3, aus (46)

Nach ETAG 002 (47) stellt das Kohäsionsversagen für silikonverklebte Glas-konstruktionen das gewünschte und damit „planbare“ Versagensverhalten dar. Anzustreben ist ein 90%-iges Kohäsionsbruchversagen einer Versuchsreihe. Die

zulässigen Spannungen dieser Silikone sind in der folgenden Tabelle nach EOTA ETAG Nr. 002 gegenüber gestellt, wobei die zulässigen Dehnungen mit 12,5% angegeben werden.

zulässige Spannung	dynamische Last	statische Last
σ_{zul}	0,12 N/mm ²	0,012 N/mm ²
τ_{zul}	0,07 N/mm ²	0,007 N/mm ²

Tabelle 2.10; Silikonfestigkeiten nach ETAG 002

2.D.3.C KLEBSTOFFE

Klebstofftyp	Polymerart	Anwendung im Glasbau, Eigenschaften	Wesentliche Materialgesetzmäßigkeiten
Polyvinylbutural (PVB)	Thermoplast: lange untereinander nicht verbundene Kettenmoleküle	Verbundschicht in Verbundgläsern, schmelzbar, schweißbar, quellbar bauaufsichtlich für Verbundglas geregelt	linear-elastisches Verhalten, bei Normaltemperatur, kleine Dehnungen bei Temperaturen über ca. 30 °C, Erweichung unter Verlust der Verbundwirkung
Polysulfid Polyethylene Polyurethane	Elastomer: kneuelartig untereinander physikalisch und chemisch schwach vernetzte ungeordnete Kettenmoleküle	elastische Klebstoffe, Versiegelungen von Wetterfugen und Isolierglasrandverbund, unlöslich, quellbar	Gummielastisches Verhalten, große Dehnungen möglich, Hyperelastische Materialgesetze, Eigenschaften deutlich temperaturabhängig
Silikone		Isolierglasrandverbund, tragende Verklebungen im Glasbau, unlöslich, sehr gering quellbar, bauaufsichtlich über Europäische Zulassungen geregelt	große Dehnungen möglich, Hyperelastische Materialgesetze, gleichbleibende Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich
Polyesterharze Polyurethane Silikonharze	Duromer: Kettenmoleküle stark untereinander vernetzt	Anwendung für geklebte Konstruktionen in der Erforschung nicht schmelzbar, schweißbar, unlöslich, quellbar	linear-elastisches Verhalten, kleine Dehnungen,
Acrylate		Anwendung von Klebungen bei Trennwänden in Gebäuden	teilweise deutliches Schrumpfen bei Erhärtung, hohe thermische Ausdehnung
Epoxidharze		Verbundschicht bei Verbundgläsern mit speziellen Anforderungen	

Tabelle 2.11; Einteilung der Klebstoffe aus (48)

Klebstoffe bestehen in der Regel zunächst aus Monomeren oder Präpolymeren. Diese werden durch chemische Reaktionen zu Polymeren verbunden, welche untereinander Bindungen eingehen und ein elastisches und festes Netz ausbilden. Die Art der inneren Vernetzung bestimmt die Kohäsion des Klebstoffes. Die Klebstoffe lassen sich, in Anlehnung an (48), nach ihrer inneren Vernetzung bzw. nach Polymergruppen, wie sie in Tabelle 2.11 dargestellt sind, einordnen.

Bei allen Kunststoffen beeinflussen die auftretenden Temperaturveränderungen die Materialfestigkeit. In der DIN 7724 (49) werden die hochpolymeren Werkstoffe auf Grund der Temperaturabhängigkeit ihres mechanischen Verhaltens in die schon oben eingeführten drei Hauptgruppen eingeteilt.

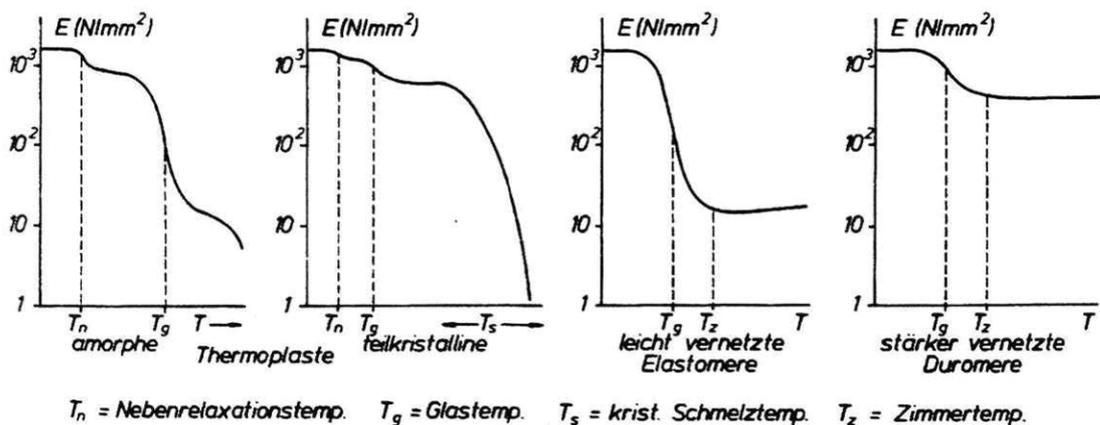


Abb. 2.32; mechanische Verhalten hochpolymerer Werkstoffe aus(49)

Bei hohen Temperaturen liegt das Polymer als Schmelze vor. Sie ist mit einem Fluid vergleichbar und besitzt temperaturabhängig „Leerstellen“ zwischen den Molekülen. Bei einer abkühlenden polymeren Schmelze werden die Molekülketten dichter gepackt und verlieren zunehmend an Beweglichkeit, bis die Einfrier- oder Glastemperatur T_g erreicht ist. Beim Abkühlen verringert sich die Anzahl der Leerstellen, was gleichbedeutend mit einer Volumenabnahme ist.

In Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit verbleibt eine Anzahl von Leerstellen im Polymer, darum stellt der Glaszustand keinen Gleichgewichtszustand dar. Im Gegensatz zu einer amorphen Struktur ändert sich nach (50) bei einem kristallisationsfähigen Stoff das Volumen mit beginnender „Ordnung“ sprunghaft auf ein niedrigeres Volumen. Hierin liegt die temperaturabhängige Festig-

keit von der inneren Struktur der Polymere begründet. Oberhalb der Glas-temperatur fließen die Kunststoffe wie eine Flüssigkeit, unterhalb der Glas-temperatur verhalten sie sich viskoelastisch.

Das Tragverhalten der einzelnen Polymergruppen wurde beispielhaft für ein Du-romer, ein Thermoplast und ein Elastomer in Vorbereitung eines Forschungs-projektes in der FHM (Fachhochschule München) nach (48) mittels Zugsversuch untersucht. Bei linearem Kurvenverlauf kann das E-Modul durch das in Abb. 2.33 dargestellte Last-Wegdiagramm abgeschätzt werden.

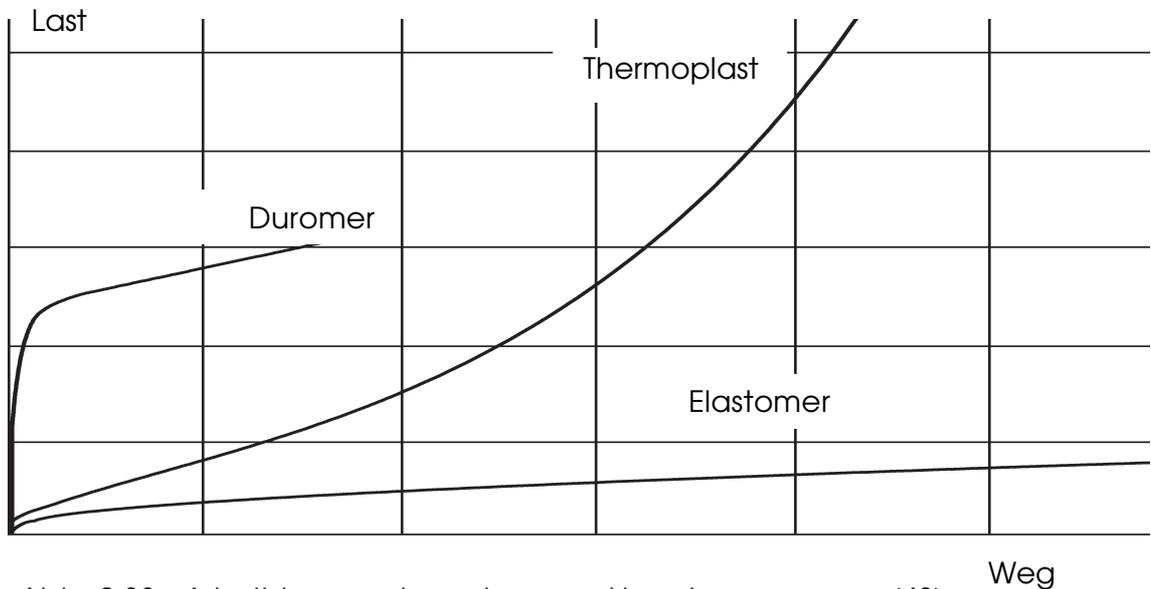


Abb. 2.33; Arbeitskurven der polymeren Hauptgruppen aus (48)

Eine weitere Unterteilung der Klebstoffe kann nach Ihren Erhärtungsmechanismen getroffen werden. In Tabelle 2.12 werden nach (48) einige Klebstoffe hierzu auf-gelistet.

Klebstoff	Erhärtung mit/durch	Erhärtungszeit
Cyanacrylat	Luftfeuchtigkeit	Sekunden
Photoinitiert härtende Klebstoffe	UV oder sichtbares Licht	Sekunden
Epoxidharze	Luftfeuchtigkeit	einige Stunden
1K-Polyurethane und Silikone	Luftfeuchtigkeit	mehrere Stunden
2K-Silikone	chemische Reaktion	24 Stunden

Tabelle 2.12; Erhärtungsmechanismen aus (48)

Einige Hersteller geben zu ihren Klebstoffen Datenblätter heraus, auf denen die wichtigsten mechanischen Daten enthalten sind. Da Klebstoffe bis auf die bereits erwähnten Ausnahmen zu den nicht geregelten Baustoffen gehören, müssen ihre kohäsiven oder besser mechanischen Eigenschaften experimentell erfasst werden. Hierzu bestehen in der Bundesrepublik Deutschland zahlreiche Forschungsvorhaben, von denen einige bereits durch Veröffentlichungen bekannt sind, z.B. (46, 48). Ziel ist es u.a. die Materialgesetze dieser Kleber sicher zu bestimmen und geeignete Berechnungsmethoden bzw. FE-Modelle zu entwickeln. Auf Grund der verschiedenen Klebegeometrien im Zusammenhang mit der beabsichtigten konstruktiven Verwendung des Klebstoffs werden für experimentelle Untersuchungen Prüfmethoden erprobt und auf die jeweiligen Belastungsarten abgestimmt. Im Folgenden werden dazu einige Beispiele vorgestellt.

2.D.3.D.1 KOMPRESSION

Bei der Ermittlung der Druckfestigkeit von Klebstoffen ist ein Ausknicken (Stabilitätsversagen) zu vermeiden, weshalb gedrungene Querschnitte zu bevorzugen sind. Die Haftreibung des Probekörpers an den Lasteinleitungsflächen hat auf die Messergebnisse einen deutlichen Einfluss (48). In (48) ist auch ein Druckversuch beschrieben, bei dem die Prüfkörper in handelsüblichen Kunststoffkartuschen mit einem Innendurchmesser von 46,3 mm und mit einer Höhe von 20 mm gefertigt wurden, Abb. 2.34 links. Dabei wurde der Versuchskörper zwischen Teflonscheiben in der Prüfmaschine eingespannt, um eine möglichst reibungsfreie Lagerung zu erreichen. Für den Versuchskörper können zwei maximale Lagerzustände

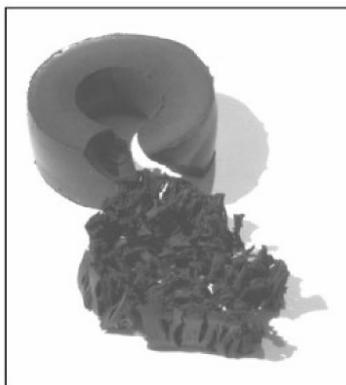


Bild 14. Zerstörter Druckprüfkörper, Bruchlast 153 kN
 Fig. 14. Failed specimen for compression test, 153 kN

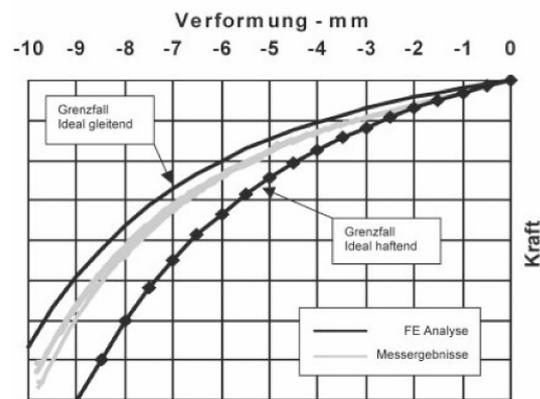


Bild 25. Nachrechnung Druckversuch Material 1, Teflon-Lagerung, Hagl
 Fig. 25. Analysis compression test material 1, teflon support, Hagl

Abb. 2.34; aus (48)

angenommen werden; entweder ist die Berührungsfläche völlig frei von Haftreibung, was einem freien Gleiten entsprechen würde, oder der Versuchskörper verfügt über eine vollständige Haftung an der Teflonscheibe. Bei einer numerischen Analyse wurde festgestellt, dass die Versuchsergebnisse zwischen diesen beiden Extrema eingeschlossen sind, Abb. 2.34 rechts.

Der Grenzfall „ideal haftend“ führt zu einem steiferen Verhalten, was in der Behinderung der Querkontraktion des Kunststoffes am Auflager begründet liegt. Z.B. weist eine punktförmige Verklebung in der Geometrie eines runden Punkthalters am äußeren Umfang einen Bereich der Verklebung auf, der sich einschnüren kann, Abb. 2.35. „Es lässt sich sagen, dass dieser Bereich die im Inneren liegende Verklebung dann an der Kontraktion behindert. Daher sind im inneren Bereich der Verklebung die höchsten Spannungen im Klebstoff zu erwarten. Abb. 2.35 links zeigt die Spannungsverteilung in dieser Verklebung in Lastrichtung“ aus (48).

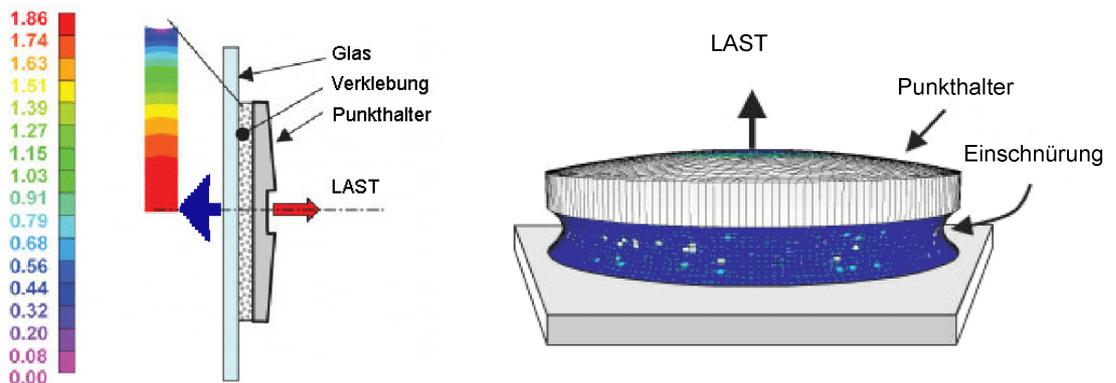


Abb. 2.35; Spannungsverteilung

Querkontraktionsbehinderung aus (48)

„Ein Beispiel für eine komplexere Verklebungsgeometrie ist eine U-förmige Verklebung, wie sie bei der Realisierung der Herz-Jesu-Kirche in München zum Einsatz kam, siehe Abb. 2.36 links. Auf Grund der Verklebungsgeometrie herrschen in der Verklebung an der Stirnfläche Zugspannungen und in den Flanken Schubspannungen. Unter der Berücksichtigung der Querkontraktionsbehinderung kann gezeigt werden, dass der Hauptanteil des Lastflusses über die Stirnfläche abgetragen wird, da sich Stirnfläche und Flanken wie parallel geschaltete Federn verhalten. In einem derartigen Fall zieht die steifere Feder – in diesem Fall die querkontraktionsbehinderte Stirnfläche – die Hauptlast auf sich. Die Flanken fungieren hierbei als redundanter Lastpfad im Fall eines Versagens der stirnseitigen Verklebung“ (48).

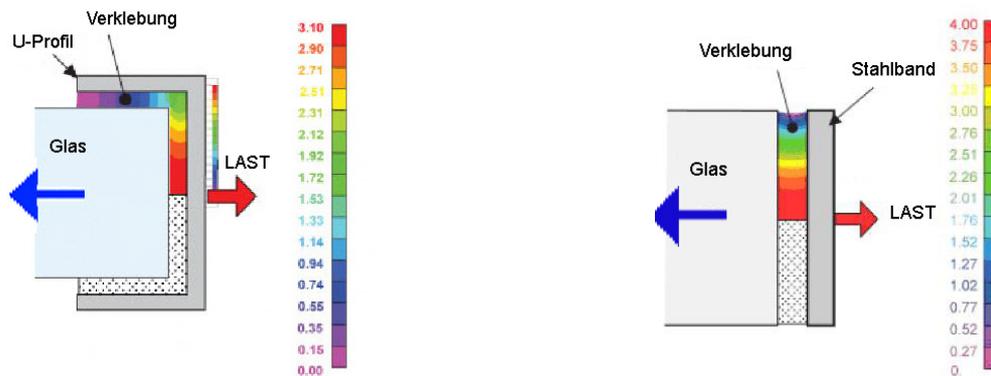


Abb. 2.36; Lastpfade aus (48)

Bei einer Druckbelastung wird das Material an der Stirnseite komprimiert und ist durch die Flanken in konstruktiver Hinsicht an einer Querkontraktion, wie sie in einer bandförmigen Verklebung möglich ist, behindert, Abb. 2.36 rechts.

Aus diesen Überlegungen heraus kann gesagt werden, dass es zwei grundsätzlich unterschiedliche Arten der Querkontraktionsbehinderung gibt:

- **geometrische Querkontraktionsbehinderung**, welche sich dadurch auszeichnet, dass sich unter einer Druck- oder Zugbelastung ringförmige Einschnürungen der Oberfläche und damit tangentiale und radiale Spannungen im Klebstoff aufbauen, Abb. 2.35 rechts.
- **konstruktive Querkontraktionsbehinderung**, welche sich dadurch auszeichnet, dass unter einer Druck oder Zugbelastung die Querdehnung durch eine konstruktive Umfassung des Klebstoffvolumens behindert wird, Abb. 2.36 links.

„Das Dehnungsverhalten von Kunststoffen kann für eher kleine Dehnungen als linear angesehen werden. Für solche linear-elastischen und isotropen Materialien wird das Hookesche Gesetz zur Berechnung angewendet, welches durch die zwei Werkstoffparameter (Elastizitätsmodul E und Querkontraktionszahl μ) definiert ist. Aus dem E -Modul und der Querkontraktionszahl lassen sich Kenngrößen, wie das Schubmodul G und das Kompressionsmodul K , nach den folgenden einfachen Zusammenhängen ableiten“ (48):

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad \frac{E}{3} < G < \frac{E}{2} \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)}$$

Daraus folgt, dass Materialien mit der grenzwertigen Querdehnungszahl von $\mu = 0,5$ inkompressibel sind, also ein annähernd unendlich hohes Kompressionsmodul besitzen (48).

$$\nu = 0,5 \rightarrow G = \frac{E}{3} \rightarrow K \rightarrow \infty$$

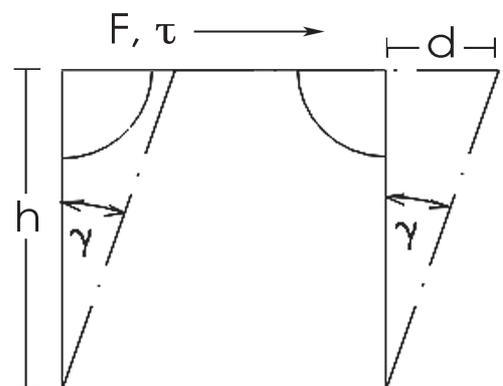
Diese Materialeigenschaft lässt sich durch Kunststofftechniker für z.B. Thermoplaste und Epoxyde grenzwertig einstellen. Die Kompressibilität ist also nur bei Zug und Druckbelastungen von Bedeutung. Laminate dagegen sind zwar auch druckbeansprucht, da sie den Druck von der einen Scheibe auf die andere flächig übertragen, jedoch ist die Steifigkeit des Bauteils von der Schubfestigkeit abhängig.

2.D.3.D.2 SCHUB

Die Steifigkeit der Klebeschicht und damit das Verformungsverhalten ist, insofern die Verformungen klein sind und man von einem linearen Materialverhalten ausgehen kann, vom Schubmodul abhängig. Das Schubmodul G ist als Quotient aus Schubspannung τ und dem Verdrehwinkel γ definiert (51).

$$G \times \gamma = \tau$$

mit $\tan \gamma = h/d$



Schubmodul und E-Modul sind Werkstoffgrößen, welche über die Querkontraktionszahl μ miteinander verknüpft sind.

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \mu)}$$

Zur Bestimmung des E-Moduls von Duromerklebstoffen haben sich an der Bergischen Universität Wuppertal Push-Out-Versuche, Abb. 2.37, bzw. „Doppelschubprüfkörper“ als geeignet erwiesen(5).

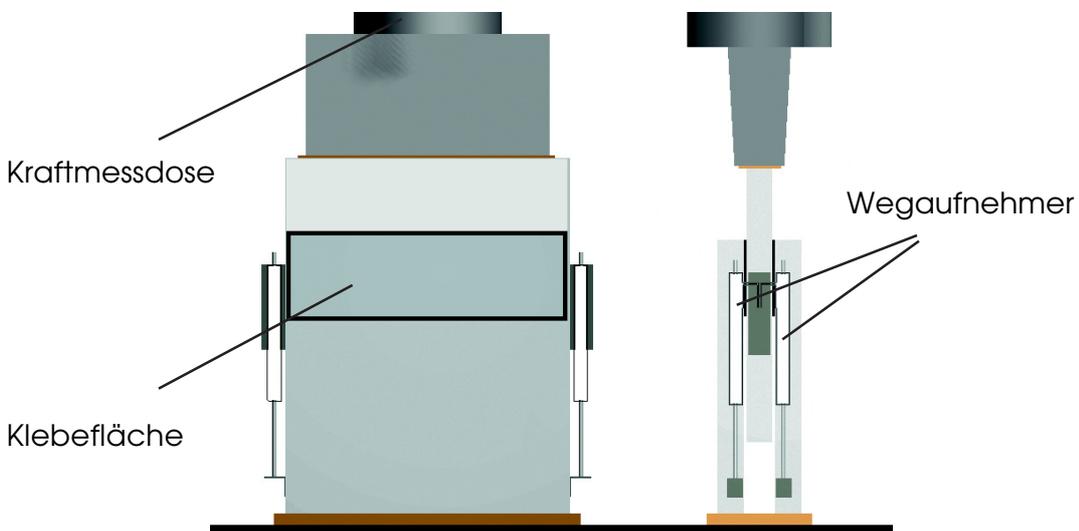
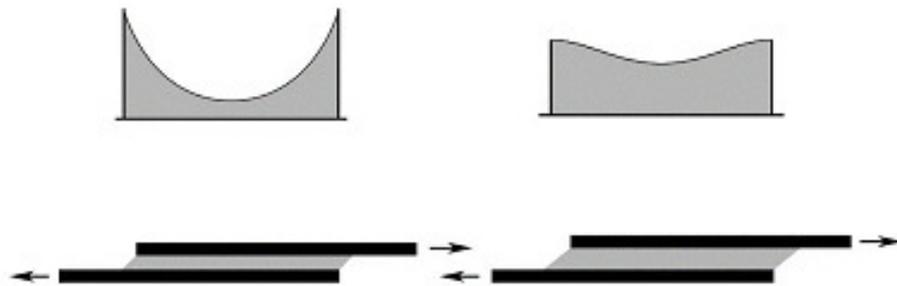


Abb. 2.37; push-out Versuche (5)

Für Elastomerverklebungen können damit, in Anlehnung an die ETAG 002, hinreichend gute Ergebnisse erzielt werden. Bei einer Analyse sollten auch die eingangs dargestellten Zonen der Verklebung berücksichtigt werden.

In Abb. 2.38 nach (52) wird der Zusammenhang von Schichtdicke, E-Modul und Schubspannungen wiedergegeben. Dünne Klebeschichten erzeugen hohe Schubspannungen am Anfang und am Ende der Klebeschicht, wobei sich die gleiche Spannungsverteilung bei Klebstoffen mit einem hohen E-Modul ergibt. Dicke Klebeschichten oder weiche Kleber mit einem geringen E-Modul führen dagegen zu einer besseren Spannungsverteilung mit geringeren Schubspannungen. Die Verformungen der Klebeflächen und Schubspannungen in den Kontaktflächen lassen sich über den E-Modul, aber auch über die Schichtdicke beeinflussen.



hoher E-Modul bzw. dünne Schicht

geringer E-Modul bzw. dicke Schicht

Abb. 2.38; Schubspannungen und Klebstoffeigenschaften aus (52)

2.D.3.D.3 ZUG

Dagegen ist der Rohrscher- bzw. Torsionsversuch nach DIN EN 14869-1 (53), wie er in Abb. 2.39 dargestellt ist, für alle Klebstoffe geeignet, da er den Vorteil hat, eine homogene über die Verklebungsfläche verteilte Schubbelastung für kleine Dicken im Vergleich zu großen Durchmessern aufzuweisen. Der Versuchskörper besteht aus zwei stumpf verklebten Rohren, welche auf Zug und/oder Torsion belastet werden können. Wird der Körper auf Torsion belastet, kann über das Schubspannungs-Gleitungsdiagramm das Schubmodul ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der Verformungsbehinderung zur Folge der Querkontraktion, also der Verformungsbehinderung in radialer Richtung, kann das E-Modul ermittelt werden. Aus E-Modul und Schubmodul lässt sich die Querkontraktionszahl μ berechnen.

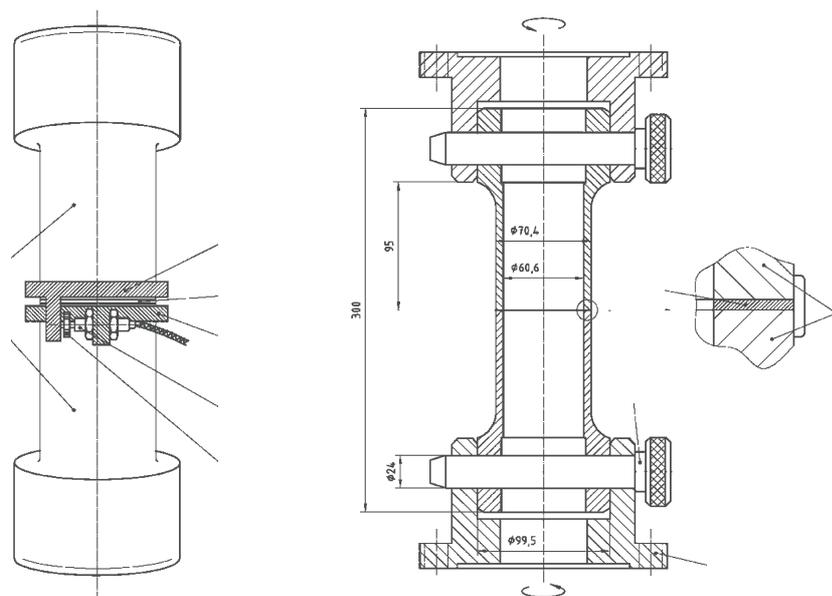


Abb. 2.39; Torsionsversuch aus DIN EN 14896-1 (53)

Zur Bestimmung des E-Moduls sind auch Zugproben aus Schulterprüfkörpern, Abb. 2.40, wie sie z. B. aus der DIN 53504 (54) entnommen werden können, geeignet. Der Vorteil dieser Methode liegt in der unbehinderten Verformbarkeit der Probe, so können die Materialkennwerte ohne behinderte Querkontraktion ermittelt werden. Die Querkontraktionszahl hingegen kann aus der Querdehnung berechnet werden.

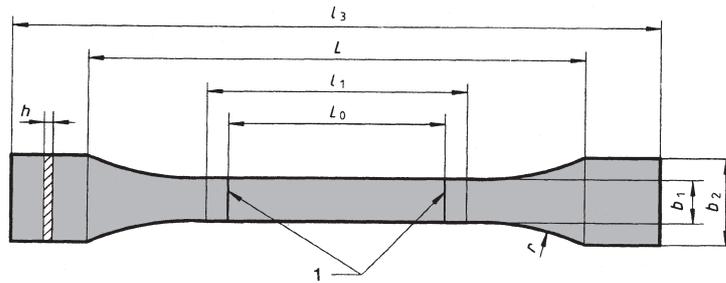
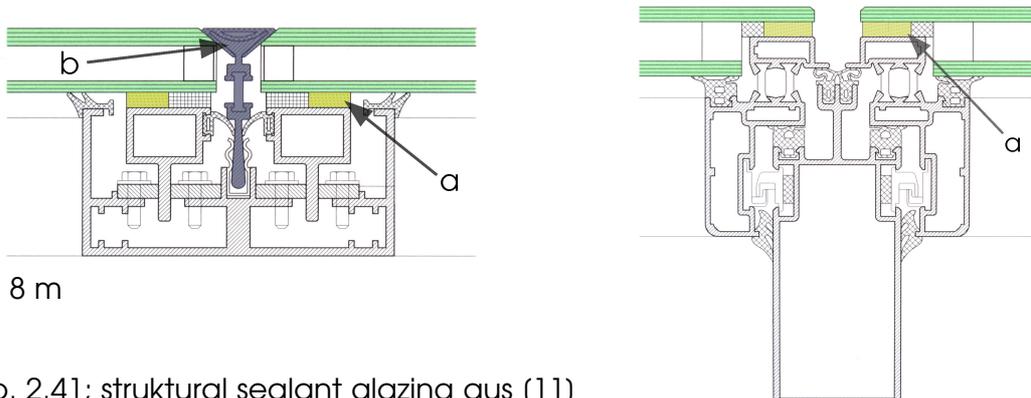


Abb. 2.40; Schulterprüfkörper aus DIN 53504

In der BRD sind für liniengelagerte bzw. verklebte Glasscheiben in Fassaden nur die Silikone zweier Firmen zugelassen. Zum einen ist das der DC 993 (zwei Komponenten = ohne Einschränkung der Fugengeometrie) und DC 859 (eine Komponente mit einer maximalen Fugenbreite zur Verklebungstiefe von ca. 3/1) der Firma Down Corning und zum andern das SG 500 der Fa. Elastosil (2K). Wie bereits angedeutet, dürfen sie dabei ausschließlich Windlasten übernehmen und tragen die Scheibe nicht in vertikaler Richtung. Derartige Konstruktionen werden als Struktural Sealant Glazing (SSG) bezeichnet und finden ihre Vorreiter in den USA. Vollständig verklebte Konstruktionen sind werkseitig herzustellen, bedürfen der Zulassung im Einzelfall und sind darüber hinaus nur bis zu einer Einbauhöhe von 8 m zugelassen, Abb. 2.41 rechts aus (11). Bei höheren Einbauten muss die Scheibe auch gegen ein Versagen des Klebers konstruktiv gesichert werden, Abb. 2.41 links. (a. = Verklebung, b. = konstruktive Sicherung)



$h > 8 \text{ m}$

Abb. 2.41; struktural sealant glazing aus (11)

2.E GLASLAMINATE

Die Verbundtechnologie stellt für vielfältige Probleme eine Lösung dar. So werden Laminare nicht nur im Überkopfbereich oder als Absturzsicherung verwendet, sondern auch in Fassaden als begehbare Fläche oder zur Gewährleistung von höchsten Sicherheitsanforderungen, wie sie z.B. mit durchschusshemmenden oder Brandschutzverglasungen erzeugt werden können. Die Bandbreite reicht darüber hinaus von bauphysikalischen Anforderungen bis zu gestalterischen Lösungen durch z.B. Einfärben der oder Einlagen in die Zwischenschicht.

2.E.1 VERBUNDGLAS

Glaslaminare ohne weitere Sicherheitsanforderungen werden allgemein als Verbundglas bezeichnet und nach DIN EN ISO 12543, Teil 2 (55) folgendermaßen definiert:

„Ein Aufbau, bestehend aus einer Glasscheibe mit einer oder mehreren Scheiben aus Glas und/oder Verglasungsmaterial aus Kunststoff, die durch eine oder mehrere Zwischenschichten miteinander verbunden sind“.

Diese Konstruktionen können mit unterschiedlichen Zwischenschichten aus Kunststoff hergestellt werden.

2.E.1.A SENTRYGLASS PLUS INTERLAYER

Seit 2002 wird auch in der BRD das in den USA entwickelte SentryGlass® Plus (SGP) als Zwischenlage verwendet. SGP gehört zu der Gruppe der teilkristallinen Thermoplaste (60) und besitzt, im Vergleich zu PVB (siehe 2.E.2), bei Raumtemperatur eine wesentlich höhere Steifigkeit. Deshalb wird es in den USA als Zwischenlage für Hurricaneverglasungen verwendet. Da es nur in Plattenform geliefert werden kann, führt die Verwendung von SGP zu einer Veränderung des Herstellungsprozesses. Die extreme Feuchtigkeitsempfindlichkeit bedeutet darüber hinaus einen höheren Planungsaufwand. Vom Hersteller wird wegen der besseren Haftungseigenschaften zwischen SGP und der Zinnbadseite vorgeschrieben, eben nur diese zur Laminierung zu verwenden. Deshalb wird für mehrschichtige Verbundgläser eine spezielle Oberflächenbehandlung der Atmosphärenseite des Floatglases erforderlich.

In einem davon abweichenden Verfahren werden Verbundscheiben mit Gießharzen befüllt. Gießharze zeichnen sich dadurch aus, dass sie flüssig verarbeitet werden können. Dabei wird das ein- oder mehrkomponentige Harz in die durch umlaufende Abstandshalter beabstandeten Scheiben eingefüllt.

In der Regel härten die einkomponentigen Gießharze durch die Bestrahlung mit UV-Licht aus. Zwei oder mehrkomponentige Gießharze härten durch die chemische Reaktion der Einzelkomponenten untereinander und eventuell unter Verwendung von Katalysatoren aus. Bei der Fa. Schollglas, vormals Weidemannglas aus Isernhagen, ist eine innovative Methode zum Verfüllen von Gießharz gefüllten Glasscheiben bekannt. Bei dem Verfahren werden die Scheiben während des Verfüllens mit einem zweikomponentigen Harz von der Vertikalen in die Horizontale verdreht, Abb. 2.42 links, um zum einen den hydrostatischen Druck auszugleichen und ein Verwölben der Scheiben zu verhindern, und zum anderen eine um möglichst luftblasenfreie Verfüllung zu gewährleisten.

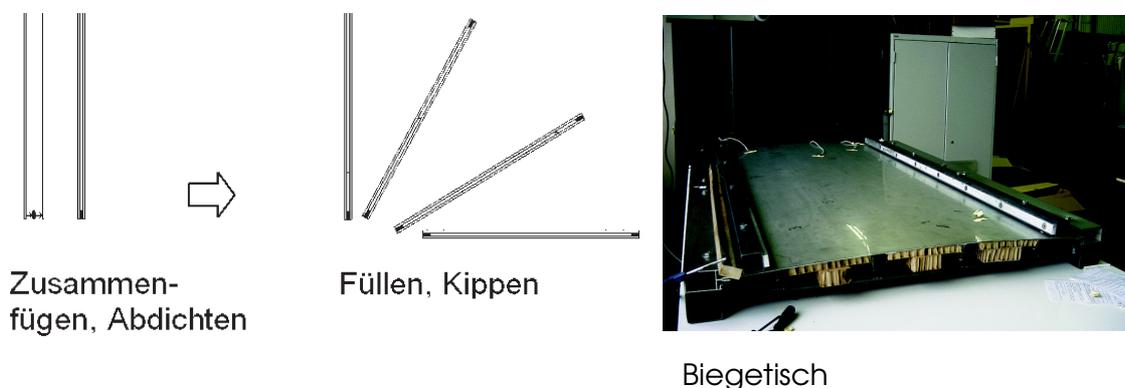


Abb. 2.42; Leichtglasherstellung

Anschließend können die Scheiben, bevor das Harz ausgehärtet ist, auf einem temperierbaren Biegetisch, Abb. 2.42 rechts, gekrümmt werden. Nachdem das Harz ausgehärtet ist und die Scheiben aus der Form gelöst wurden, verbleibt ein Teil der Krümmung in den Scheiben, wobei die Scheiben um einen gewissen Betrag zurückfedern und sich abschließend in einem Vorspannungszustand befinden.

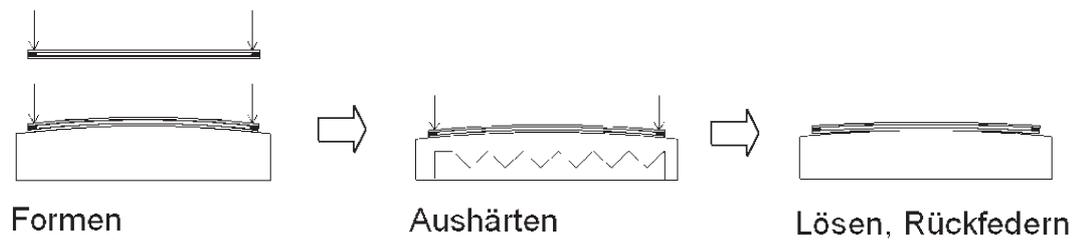


Abb. 2.43; kaltes Krümmen mit Gießharz

2.E.2 VERBUNDSICHERHEITSGLAS

Für Überkopfverglasungen wird nach den noch gültigen technischen Regeln (TRLV, (56)) die Verwendung von Verbundsicherheitsglas vorgeschrieben. Seine Definition lautet nach DIN EN ISO 12543, Teil 1(57) wie folgt:

„Verbundglas, bei dem im Fall eines Bruchs die Zwischenschicht dazu dient, Glasbruchstücke zurückzuhalten, die Öffnungsgröße zu begrenzen, eine Restfestigkeit zu bieten und das Risiko von Schnitt oder Stichverletzungen zu verringern“.

Die Restfestigkeit wird hierbei über die „Resttragfähigkeit“ im Versagensfall der Scheibe sichergestellt. Diese Eigenschaft ist nach der Anlage 11.3 zur DIN EN ISO 12543, für Verbundsicherheitsglasscheiben durch die Verwendung einer Zwischenschicht aus z.B. Polyvinylbutyral (PVB)-Folie herzustellen. Im Versagensfall einer der Scheiben wird durch das Anhaften ihrer Bruchstücke an der PVB-Folie und damit an der intakten Glasscheibe die Lage der Bruchstücke für einen bestimmten Zeitraum gesichert. Auch im Versagensfall beider Scheiben muss sich für die überlappenden Glasschollen eine Resttragfähigkeit ergeben.

In der Regel wird die Resttragfähigkeit durch sich an der späteren Verwendung orientierenden Versuchen sichergestellt. Hierbei wird eine mit einer verminderten Bemessungslast beaufschlagte Verbundglaseinheit zerstört und die Zeit bis zum völligen Versagen gemessen. In Tabelle 2.13 werden Glasarten bezüglich ihrer Resttragfähigkeit bewertet (58).

VSG aus verschiedene Glasarten				
	Resttragfähigkeit bei Zerstörung aller Scheiben			
	gering	mäßig	gut	sehr gut
Floatglas				X
ESG	X			
TVG			X	
ESG + VSG		X		
Drahtglas		X		

Tabelle 2.13; Resttragfähigkeit verschieden vorgespannter Gläser aus (58)

In Tabelle 2.14 werden verschieden gelagerte Glasscheiben bezüglich ihrer Resttragfähigkeit bewertet (58), vergleiche hierzu (59).

verschiedene Lagerungsarten für VSG				
Linienlagerung				
vierseitig				X
zweiseitig	X			
Punkthalter				
Tellerhalter			X	
versenkter Halt.		X		Spannungen für unterschiedliche Schubmodule bzw. Verbundverhalten

Tabelle 2.14; Resttragfähigkeit und Lagerungsbedingungen aus (58)

Glaslamine aus ESG gelten jedoch nicht als Verbundsicherheitsglas, da die kleinen Bruchstücke zu großen Verformungen führen und somit die gesamte Scheibe aus den Auflagern rutschen kann. „PVB gehört zur Gruppe der amorphen Thermoplaste. Die Folie entsteht aus PVC-Harz durch Zugabe von Weichmachern und Additiven im Extruder-Verfahren. Sie verlässt gas- und feuchtigkeitsdicht bei einer Eigenfeuchte von ca. 0,45 %, verpackt als Rollware,

mit einer maximalen Breite von 3,21 m, die Produktion. Sollte die Folienfeuchte zu hoch sein, ist es möglich, die PVB Folie auf 0,45 % Feuchte zu rekonditionieren. Die Folienfeuchte ist neben anderen Parametern, wie zum Beispiel der Welligkeit der Glasoberfläche, Sauberkeit der Glasoberfläche oder Zustand der Glas-Waschmaschinen, maßgeblich für die Haftung zwischen Glas und Folie verantwortlich (60).

Der Verbund von Floatglas und PVB wird durch einen mehrstufigen Herstellungsprozess erzeugt. Einem meist zweistufigen Vorverbund folgt ein abschließender Verbundprozess in einem Autoklav. Die Scheiben werden gewaschen und in der Horizontalen mit von der Rolle gezogenen Folien positioniert. Nach dem Abschneiden der überstehenden Folie werden im ersten Laminierungsgang die Schichten durch ein Walzenpaar bei ca. 35 °C miteinander verpresst.

Im zweiten Durchgang werden die enthaltenen Lufteinschlüsse bei einer Temperatur von ca. 70 °C herausgepresst. Die glastypische Transparenz und die endgültige Adhäsion von Folie und Glas wird abschließend in einem Autoklav, unter einem Druck von ca. 13 bis 14 bar und bei einer Temperatur von ca. 135 °C, erreicht.

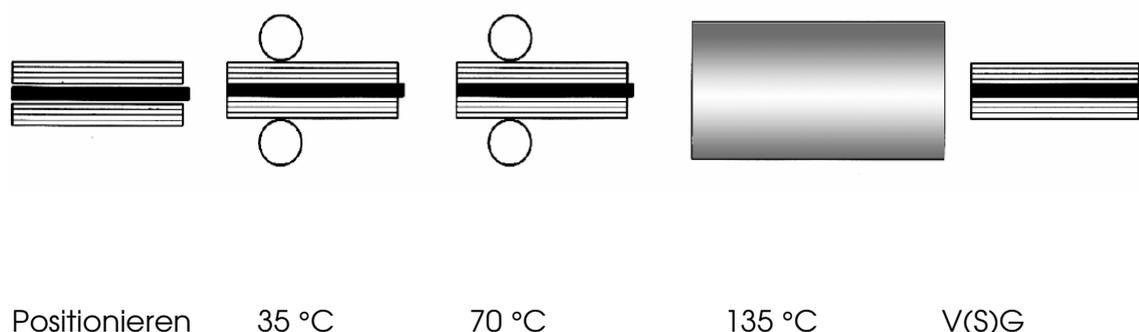


Abb. 2.44, Laminierungsprozess aus (11)

Für thermisch gebogenes Glas wird der Laminierungsprozess in einem evakuierten Foliensack erzeugt. Dieses Vakuum-Verfahren ist auch unter der Bezeichnung „Sackverbund“ bekannt. Beim Autoklavieren kommt es in der Regel zu einem Verschieben der Glasscheibenkanten gegeneinander, sodass die Scheibenkanten nicht miteinander fluchten.

3

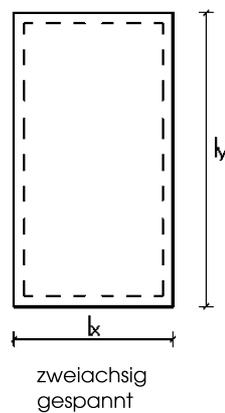
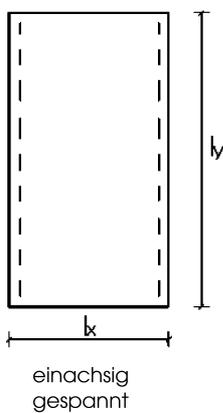
GLASPLATTEN

Glasscheiben mit einer zur Fläche rechtwinkligen Belastung werden aus statischer Sicht als Platte bezeichnet. Unter einer Scheibe versteht man hingegen, eine in Scheibenrichtung beanspruchte und ausschließlich mit Normalspannung beaufschlagte Konstruktion, wie sie z.B. zu Aussteifungszwecken genutzt werden kann. Scheiben kommen im Glasbau jedoch nur sehr selten vor, da meist zumindest Wind- oder Anpralllasten aus Personen abgetragen werden müssen. Da sich für Platte umgangssprachlich und im Glasbau üblicherweise die Bezeichnung Scheibe etabliert hat, wird hier der Begriff Platte verwendet, wenn auf das spezifische Tragverhalten hingewiesen werden soll.

3.A FÜGEN VON GLASPLATTEN

Glasplatten werden meistens liniengelagert montiert. Neben der zwei- und vierseitigen Lagerung werden Glastafeln auch dreiseitig oder punktuell gelagert, Abb. 3.1 (61). Diese Arbeit beschäftigt sich vorwiegend mit zwei- und vierseitig liniengelagerten Platten. Eine gute Darstellung des Tragverhaltens von punktgelagerten Platten und den Lastabtragungsmechanismen im Bohrungsbereich von Punkthaltern findet sich z.B. in (43, 52, 41).

Linienlagerung:



Punktlagerung:

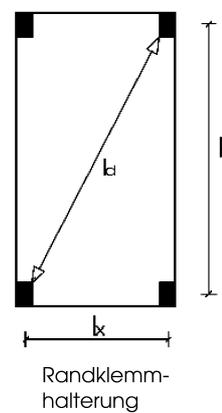
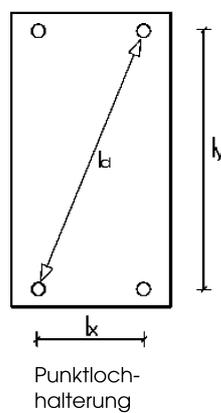


Abb. 3.1; Lagerungsarten für Glasplatten aus (61)

Zweiseitig gelagerte Scheiben besitzen eine freie Lagerungsseite. Solche lagerungsfreien Seiten werden mit der Glaskante oder Stoßseite zur nächsten Tafel hin mit Dichtprofilen oder mit Materialien, wie z.B. Silikon oder Acryl-Dispersionen nass, versiegelt, Abb. 3.2 links (58). Diese plastisch eingebrachten Fugenmassen können mit Dichtprofilen aus z.B. Silikon kombiniert werden, Abb. 3.2 Mitte und rechts. Sie werden bei einer Berechnung grundsätzlich nicht berücksichtigt. Selbstverständlich werden auch ausschließlich Dichtprofile montiert; diese haben jedoch den Nachteil, dass sie relativ leicht demontierbar sind und eventuell mit ungebetenen „Demonteuren“ zu rechnen ist.

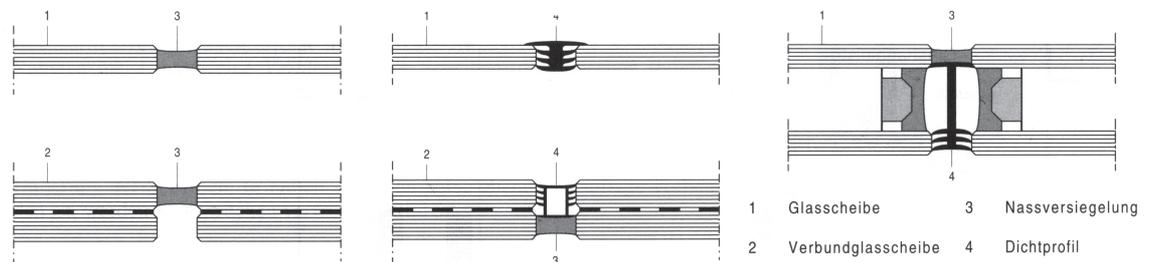


Abb. 3.2; Lagerungsfreie Plattenränder aus (58)

Eine vertikal stehende Glasscheibe, z.B. eine Isolierglaseinheit, wird in der Regel auf Verklottungen aus elastischen Materialien aufgelagert, Abb. 3.3 rechts. In der als Platte wirksamen Belastungsrichtung werden sie auf einer kontinuierlichen Lagerung aus 10 bis 25 mm breiten Elastomerstreifen aus EPDM- Material (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk) oder Silikonprofilen aufgelagert. Diese Auflager gewährleisten, neben der Dichtigkeit und dem Ausgleich kleinerer Unebenheiten, ein freies Verdrehen und Gleiten der Platten über dem Auflager.

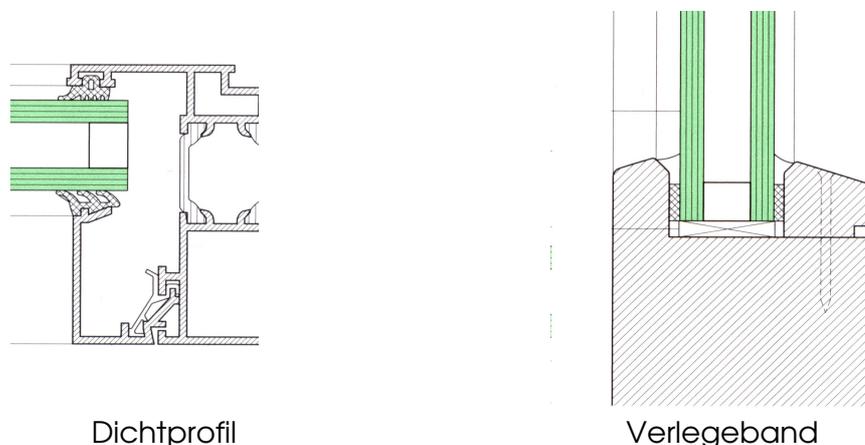


Abb. 3.3; Lagerung von Isolierglas aus (11)

Die Scheiben können mit Halteleisten oder Halteprofilen in ihrer Position fixiert werden. Je nach Ausführung sind die elastomeren Zwischenschichten unterschiedlich komprimierbar. Verlegebänder sind in der Regel weniger komprimierbar als Lippendichtungen mit Hohlräumen, Abb. 3.3. In Abhängigkeit von der Trennschicht zur tragenden Konstruktion erfahren die Platten also unterschiedlich weiche Bettungen in der Belastungsrichtung.

Da die Unterkonstruktion selbst ein elastisches System darstellt, ergeben sich in Abhängigkeit von der Steifigkeit der tragenden Konstruktion zusätzliche Verformungen und damit Spannungen der Platten im Randbereich. In der TRAV (68) wird hierzu eine Beschränkung von $l/200$ gefordert. In (64) werden ausgedehnte Studien vorgelegt, welche die Spannungsentwicklung von Platten mit unterschiedlich steifen Auflagern, als Folge differierender Unterkonstruktionen, in einer Platte analysieren. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird jedoch eine einheitliche Lagerung der Scheiben vorausgesetzt. Bei mit Presseleisten fixierten Platten kann es sogar zu kleinen Einspannungen der Scheiben in die Auflager kommen. In Abb. 3.4 links aus (58) ist eine Presseleiste dargestellt, welche über die versetzten Dichtprofile im Belastungsfall der Isoliereinheit eine Einspannung der Scheiben bewirkt. Dagegen zeigt Abb. 3.4 rechts aus (11) miteinander fluchtende Dichtprofile einer Presseleistenkonstruktion, welche keine Einspannung erzeugt.

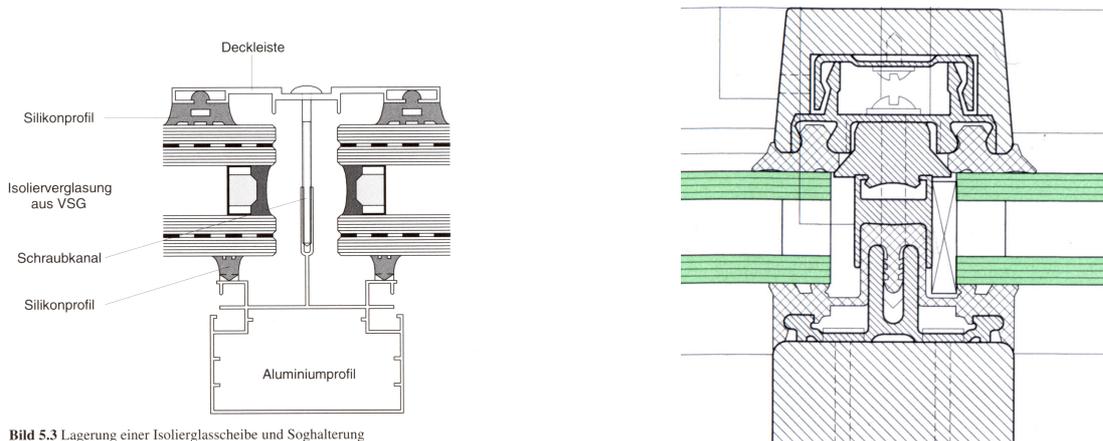


Bild 5.3 Lagerung einer Isolierglasscheibe und Soghalterung

Presseleiste mit Randeinspannung
aus (58)
Abb. 3.4

Presseleiste ohne Randeinspannung
aus (11)

Bei einer statischen Bemessung sollten derartige Einspannungen berücksichtigt werden. Die Lagerbedingung für Glasscheiben muss auch unter dem Gesichtspunkt betrachtet werden, dass sie als Isoliereinheit montiert und damit über den

Randabstandhalter und die eingeschlossene Luft, oder das eingeschlossene Edelgas, an eine andere Scheibe gekoppelt ist, vgl. TRAV (68). Isolierglasscheiben erfahren in Abhängigkeit von dem bei der Montage vorherrschenden Druck, durch die Differenzen des Luftdrucks zum Ort der Endmontage, so genannte Klimalasten. Diese Lasten müssen zu den anfallenden Belastungen addiert werden. Bei der Planung wird in der Regel von einer planebenen Scheibe ausgegangen. Bei größeren Isolierglaseinheiten können die Klimalasten zu konvexen oder konkaven Oberflächen führen, welche deutlich in Erscheinung treten und eine Fassade ihrer optischen Homogenität berauben: sie also in gewissem Sinne als unförmig erscheinen lassen. Abb. 3.5 aus (11) zeigt den Zusammenhang zwischen Scheibenwölbung, Innendruck im Scheibenzwischenraum (SZR) und den Umgebungsbedingungen.

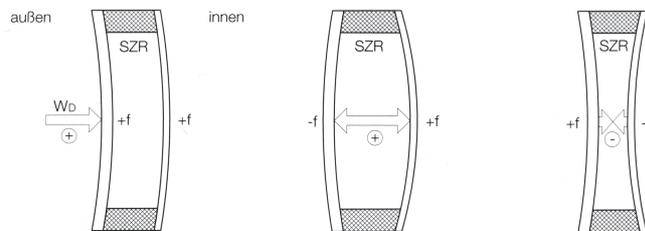


Abb. 3.5; Klimalast auf Isolierglas (11)

Eine Möglichkeit, dem Verwölben entgegenzuwirken, ist, die Steifigkeit der Einzelscheiben so anzupassen, dass eine „weiche“ und eine „steife“ Seite vorliegt, Abb. 3.6 links aus (11), sodass sich unter Klimalasten eine verminderte Krümmung der steiferen Scheiben ergibt.

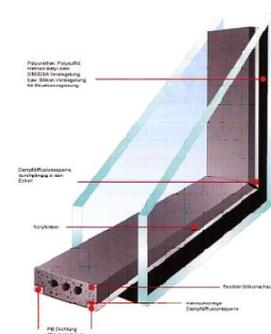
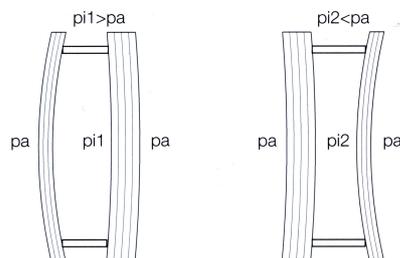


Abb. 3.6; „optische“ Maßnahme (11) Fa. Edgetch, flexible silicon foam spacer

Um die Belastung der Scheiben bzw. des Randverbundes durch das Verwölben zu verringern, werden anstatt der noch üblichen Aluminiumprofile, Abb. 3.7 links, weiche Abstandhalter eingesetzt, Abb. 3.7 rechts. Elastische Spacer eignen sich auch besser zur Herstellung gekrümmter Scheiben und werden vor allem ver-

mehrt wegen ihrer deutlich besseren Wärmeschutzeigenschaften eingesetzt, Abb. 3.6 rechts.

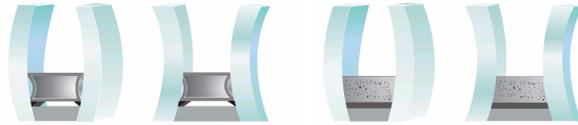


Abb. 3.7 ; Randeinspannung durch Spacer; Fa. Edgetech

3.B TRAGVERHALTEN LINIENGELAGERTER GLASPLATTEN

Um Aussagen über das grundsätzliche Tragverhalten von Glasplatten treffen zu können, bietet sich neben der Möglichkeit, zeit- und kostenaufwändige Versuche durchzuführen, die Analyse mit der Finiten-Element-Methode an. Um das Tragverhalten von Glasscheiben zu beschreiben, werden in den folgenden Studien ausschließlich rechteckige Scheibenformate verwendet. Das Tragverhalten der Scheiben wird neben den Lagerungsbedingungen, der Last, der Scheibendicke und den Materialwerten wie E-Modul und Querkontraktionszahl, durch die Elastizität und die Freiheitsgrade der Auflager, sowie das Seitenverhältnis der Scheiben (a/b , a = kürzere Spannrichtung) wesentlich bestimmt. Im Folgenden wird das Tragverhalten von zweiseitig und vierseitig gelagerten Glasplatten beschrieben.

3.B.1 ZUM TRAGVERHALTEN VIERSEITIG GELAGERTER PLATTEN

Traditionell wurden Glasscheiben nach der linear-elastischen Theorie bemessen, wie sie z.B. von Timoshenko & Krieger 1959 (62) vorgestellt wurde, obwohl schon in den 1930er Jahren nichtlineare Theorien unter Berücksichtigung großer Verformungen entwickelt wurden. Glasscheiben weisen im Verhältnis zu ihrer Dicke große Verformungen auf. Das Tragverhalten der Scheiben verändert sich derart, dass ein nichtlineares Last- Verformungsverhalten, „geometrische Nichtlinearität“, entsteht. Überschreitet die Durchbiegung einer vierseitig gelagerten Platte etwa die Plattendicke, gleitet das Tragsystem der Platte von einem Biegesystem hin zu einem Membransystem. Die Biegespannungen werden mit fortschreitender Durchbiegung von den Membranspannungen überlagert. Die Steifigkeit der Platten nimmt dabei mit steigender Belastung zu. Abb. 3.8 zeigt qualitativ den überproportionalen Anstieg der aufnehmbaren Last zur Durchbiegung einer vierseitig

gelagerten Scheibe. Der blau gestrichelte Bereich stellt das linear-elastische Verformungsverhalten bzw. den unteren „Biegebereich“ dar, wobei der rote Abschnitt die Erhöhung der Steifigkeit durch die Membrankräfte beschreibt.

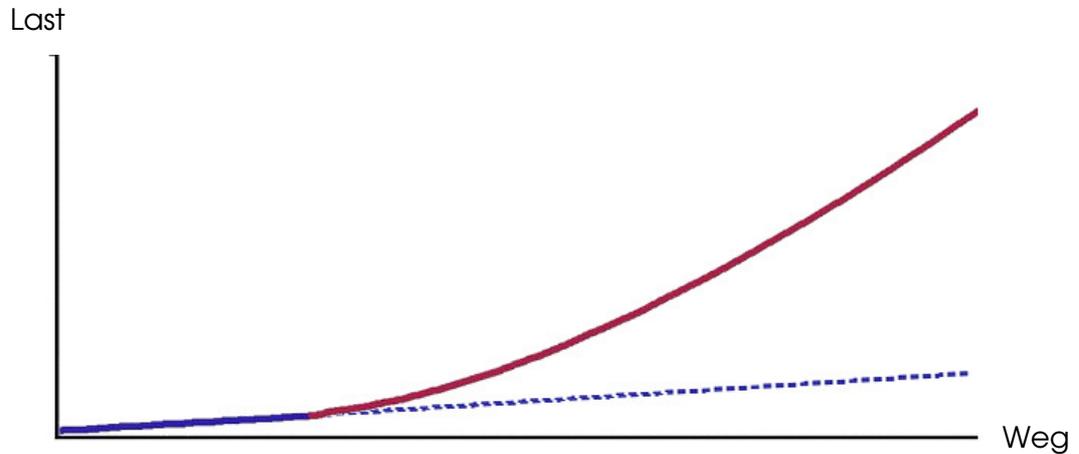
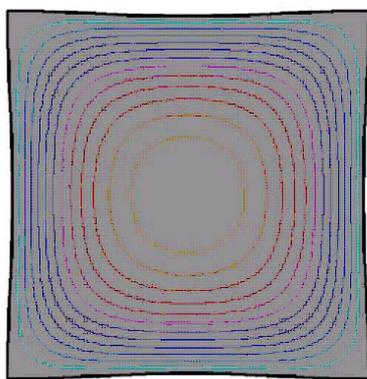
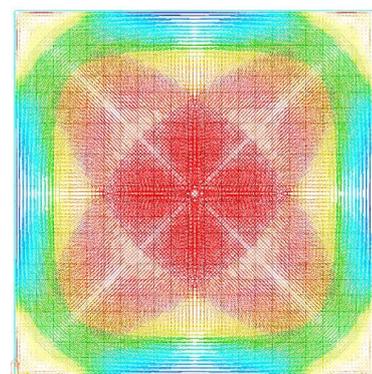


Abb. 3.8; nichtlineares Tragverhalten

Betrachtet man den Spannungsverlauf der Scheibe etwa in Feldmitte, wird die Biegedruckspannung an der Oberseite der Scheibe von den Zugspannungen aus der Membrantragwirkung zunehmend kompensiert. Zitat : „Das Tragsystem der Glasfläche ähnelt bei zunehmender Verformung immer mehr dem eines Tennisschlägers“ (K. Schwalbenhofer), Abb. 3.9 rechts. Die in der Fläche radial wirkenden Zugkräfte (rot bis gelb) erzwingen am Rand einen ausgleichenden Druckring (blau bis grün). Dieses steifigkeitserhöhende Verhalten durch Membrankräfte in dünnen Platten unter Querkraftbelastung wird als Membraneffekt bezeichnet. Eine grundlegende Arbeit dazu wurde von Hess 1986 vorgelegt (63). Gleichzeitig erfährt der Rand auf Grund der Querdehnung eine Druckbeanspruchung bzw. Einschnürung, Abb. 3.9 links.



Randeinschnürung



Membrankräfte

Abb. 3.9; Membraneffekt

Als ungünstigster Fall ist eine allseitig gelagerte Platte zu betrachten, welche z.B. mit Pressleisten fixiert wurde. Die Ränder dieser Platten bleiben frei verdrehbar, wobei die Ecken dazu tendieren, von den Auflagern abzuheben. Die maximalen Zugspannungen an der Unterseite wandern diagonal in Richtung der Ecken aus. Abb. 3.10 zeigt, von links nach rechts gesehen, dieses Auswandern der Spannung aus dem Zentrum in Richtung der Ecken auf der Unterseite einer Platte, vgl. (64). Die durch die Farben dargestellten Spannungsgrößen, auf der Unter- und Oberseite der Platte, sind ausschließlich innerhalb einer Laststufe miteinander vergleichbar. Somit ist zwischen den Laststufen I bis II, lediglich die größte Spannung und ihr Ort identifizierbar. (rot = Hauptzugspannung, blau = Hauptdruckspannung).

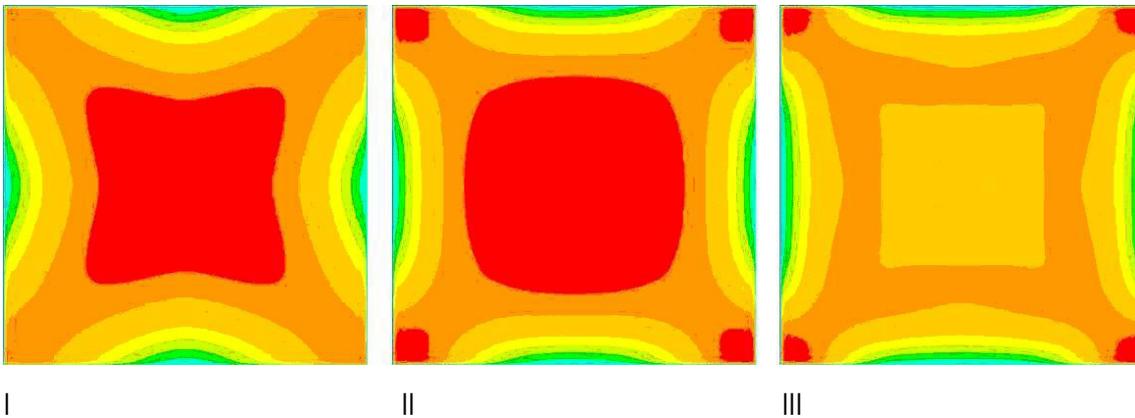


Abb. 3.10; Spannungsentwicklung an der Unterseite einer Glasplatte

Bei einer Finiten Element-Berechnung treten die größten Hauptzugspannungen jedoch nicht mehr auf der Unterseite der Platte, sondern auf der Oberseite in den Eckbereichen auf, Abb. 3.11.

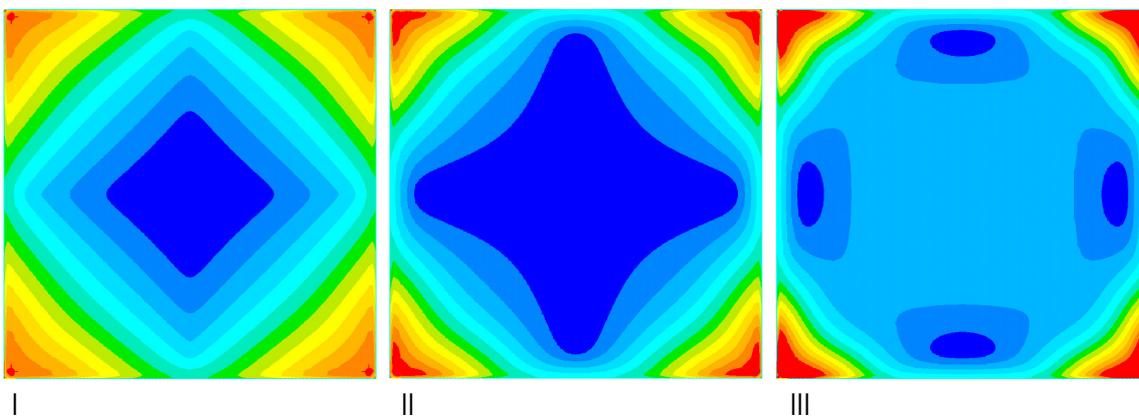


Abb. 3.11; Spannungsentwicklung an der Oberseite einer Glasplatte

Mit Abb. 3.12 wird die Zugspannungsentwicklung im Verhältnis zur Belastung graphisch veranschaulicht. Sobald die Platte etwa über ihre Dicke h verformt

wird steigt die Spannungsgröße rapide in den Eckbereichen auf der Oberseite an und überschreitet schnell den Wert der Feldspannung. Diese Entwicklung wird durch die unrealistisch steife bzw. unverschiebliche Lagerung der Scheiben im FE-Modell deutlich vergrößert. (verg. hierzu Seite 163, Abb. 5.12-a)

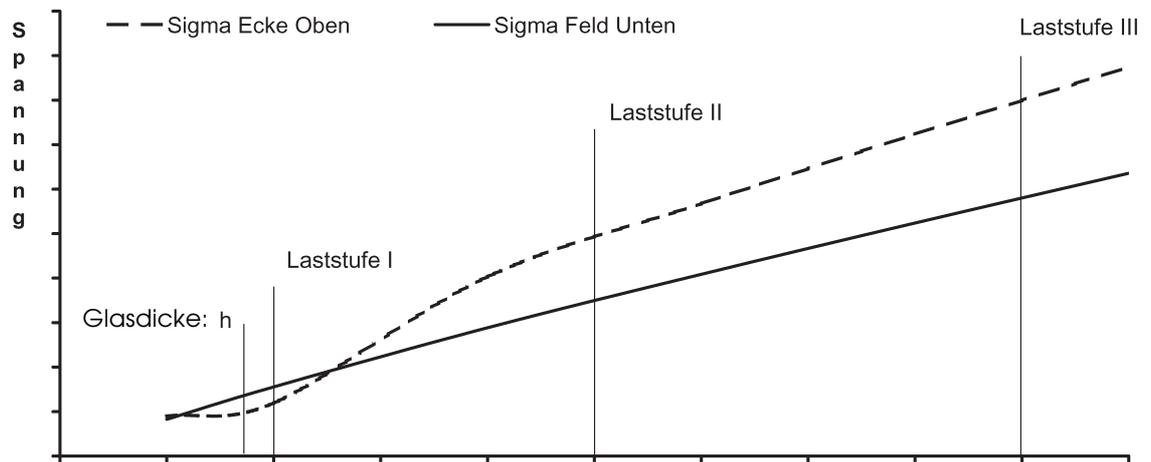


Abb. 3.12; Zugspannungsentwicklung in einer Glasplatte, FE-Berechnung Last

Die Verformungsfigur der vierseitig gelagerten Platte wandelt sich bei zunehmender Membranwirkung von einer parabelförmigen in eine tellerförmigen Figur, Abb. 3.13. Die den Laststufen entsprechenden Verformungen sind stark vergrößert und untereinander nicht maßstäblich dargestellt. Der zentrale Feldbereich erfährt eine kleinere Krümmung und erscheint abgeflacht. Die Spannungen in diesem Bereich sind auch deshalb geringer, vgl. Abb. 3.10 rechts.

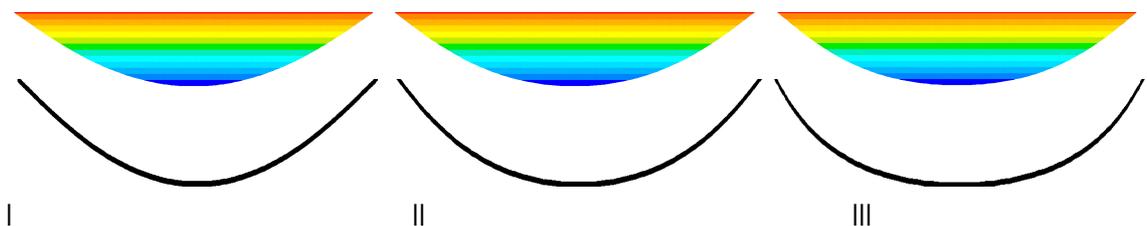


Abb. 3.13; Membranbiegeform einer Glasplatte

Das Seitenverhältnis der Platte ist ebenfalls entscheidend für die Entwicklung und die Effektivität des Membrantragverhaltens. In Abb. 3.14 ist das Seitenverhältnis von vierseitig gelagerter Platte dargestellt. Eine Platte mit einem Seitenverhältnis von 0.5 erfährt, bei der Berücksichtigung des Membrantragverhaltens, bereits mehr als die doppelte Verformung einer quadratischen Platte und eine Platte mit einem Seitenverhältnis von 0.3 mehr als das Dreifache der Verformung.

Zum Vergleich sind in Abb. 3.14 auch linear berechnete und vierseitig gelagerte Platten dargestellt.

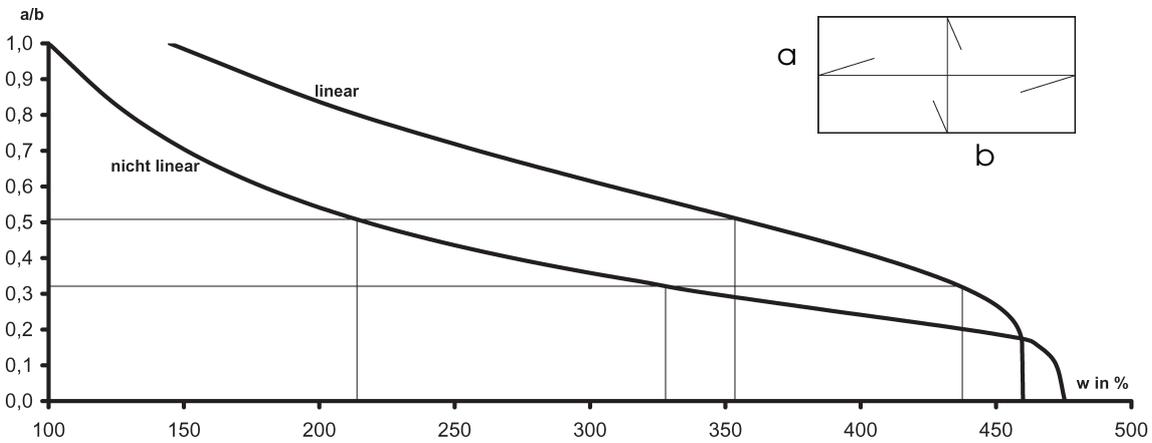


Abb. 3.14; Verformungsverhalten zum Seitenverhältnis einer Glasplatte

3.B.2 ZUM TRAGVERHALTEN ZWEISEITIG GELAGERTER PLATTEN

Der Membraneffekt und die Phänomene der Spannungswanderung sind bei zweiseitig gelagerten Platten in dieser Form nicht zu beobachten, obwohl auch zweiseitig gelagerte Platten auf Grund großer Verformungen im Verhältnis zur Systemhöhe (h) eine geometrische Nichtlinearität aufweisen. (rot = Hauptzugspannung, blau = Hauptdruckspannung)

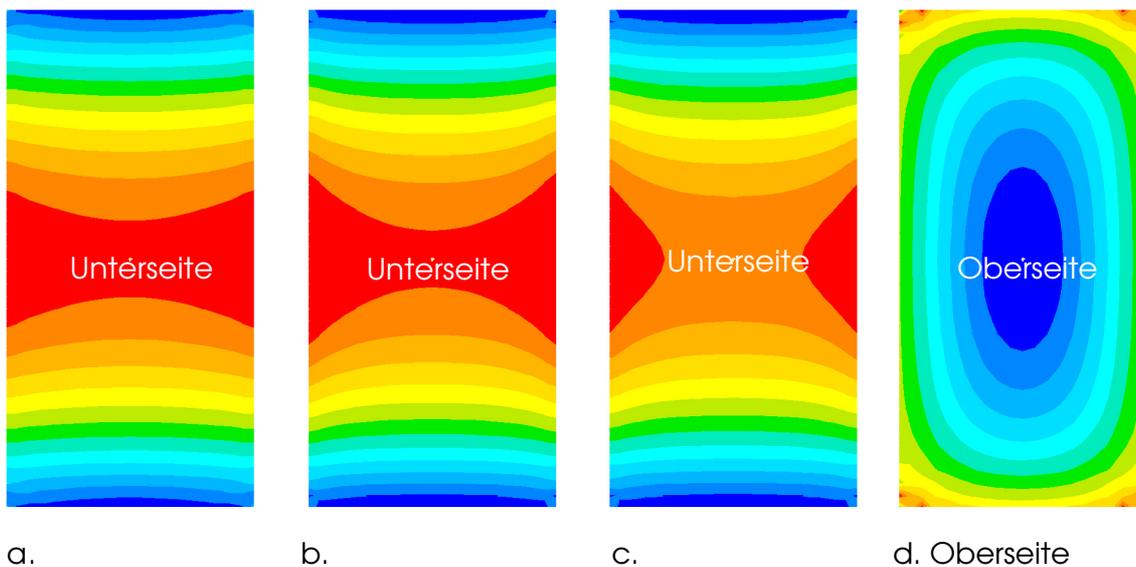


Abb. 3.15; Spannungsentwicklung bei zweiseitiger Lagerung einer Glasplatte

In Abb. 3.15 a-c, wurde die Spannungsentwicklung bei steigender Durchbiegung an der Unterseite einer zweiseitig gelagerten Platte dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass sich die Hauptzugspannungen (rot) bei steigender Durchbiegung (von links nach rechts gesehen) an den freien Rändern bzw. den Kanten konzentrieren. Auf der Oberseite formieren sich in den eckennahen Bereichen tangentielle Zugspannungen, Abb. 3.15 d. Die größten Spannungen treten jedoch im Feld an den freien Rändern auf.

Die Steifigkeitserhöhung durch die geometrische Nichtlinearität ist in zweiseitig gelagerten Platten weitaus geringer ausgeprägt als in vierseitig gelagerten Platten. In Abb. 3.16 ist das Lastverformungsverhalten einer zweiseitig gelagerten Scheibe nach einer linearen und einer nichtlinearen Berechnung graphisch gegenübergestellt. Man kann von einer Verformungsdifferenz von etwa. 5 - 10 % ausgehen.

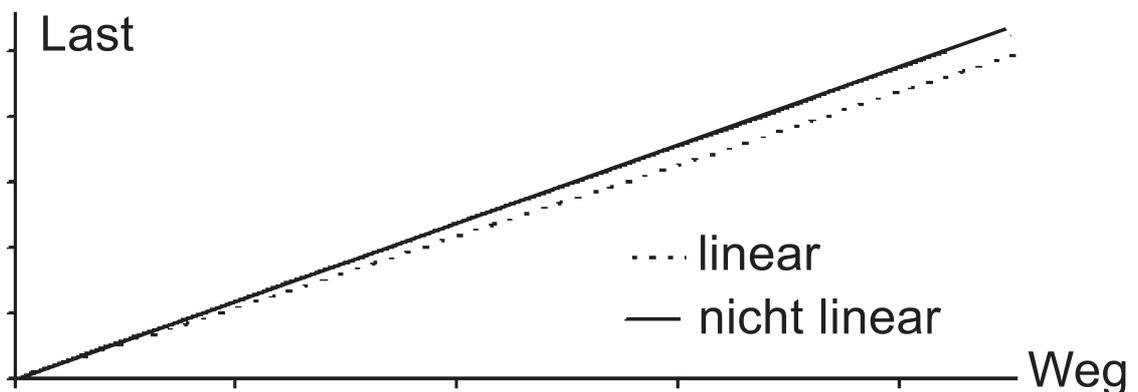


Abb. 3.16; Verformungsdifferenz der Berechnungsmethoden

3.B.3 ZUM TRAGVERHALTEN VON GLASLAMINATEN

Das Tragverhalten von Verbundglasscheiben wird im Wesentlichen durch die Eigenschaften und insbesondere durch die Schubfestigkeit bzw. durch das Schubmodul G der verwendeten Zwischenschichten bestimmt.

Das Schubmodul von PVB, als viskoelastisches Thermoplast, ist u.a. von der Temperatur abhängig. Bei niedrigen Temperaturen leistet PVB einen großen Widerstand gegen das Verschieben der Glasscheibenkanten zueinander. Das

Laminat trägt somit im vollen Verbund und besitzt die Biegesteifigkeit einer monolithischen Scheibe gleicher Gesamtdicke, Abb. 3.17, links. Mit steigender Temperatur erweicht die Zwischenschicht und die Verbundwirkung lässt nach, bis sie schließlich vollständig verschwindet. Die Verbundglasscheiben tragen die Lasten dann unabhängig voneinander, d.h. wie Einzelscheiben ab, Abb. 3.17 rechts. Unter Betrachtung einer einachsig beanspruchten Verbundplatte mit einer Durchbiegung unterhalb der Scheibendicke erfahren die Einzelscheiben in Abhängigkeit ihrer Steifigkeit (Dicke h) in Feldmitte jeweils auf ihrer Oberseite eine Druckdehnung und auf ihrer Unterseite eine Zugdehnung. Die daraus entstehenden Spannungen lassen sich, wie in Abb. 3.17 dargestellt, in Form von Spannungsdiagrammen über den Scheibenquerschnitt aufzeichnen.

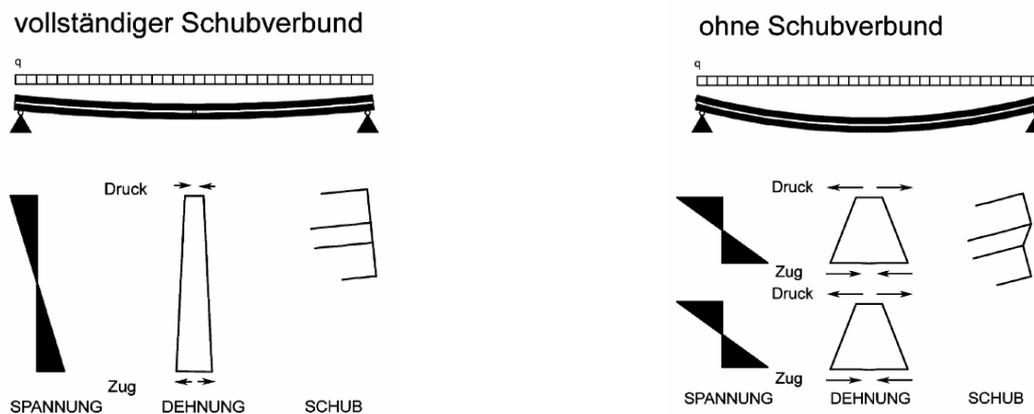


Abb. 3.17; Schubverformung am Rand von Glaslaminaten

Eine ausführliche Betrachtung dieses mechanischen Systems unterschiedlich steifer Verbundplatten wird von der klassischen Sandwichtheorie z.B. nach (65) geleistet. Ohne Schubverbund verteilt sich die Belastung auf die Einzelscheiben entsprechend dem Verhältnis der einzelnen Biegesteifigkeiten zur gesamten Biegesteifigkeit, vgl. 3.C.

Die Materialdehnungen von PVB sind dabei nahezu vollständig reversibel. Dies wird durch ein Zurückstreben der Kettenmoleküle in ihre Ausgangslage erklärbar. Studien zum Dehnungsverhalten von PVB zeigen, dass bei einer Temperatur von 23 °C ein Schubmodul von 0,2 N/mm² für die Folie veranschlagt werden kann (66). Schon bei einem sehr geringen Schubmodul geht die Durchbiegung des Laminates deutlich zurück. In Abb. 3.18 nach (36) wurde die Verbundwirkung in Abhängigkeit verschiedener Schubmodule dargestellt.

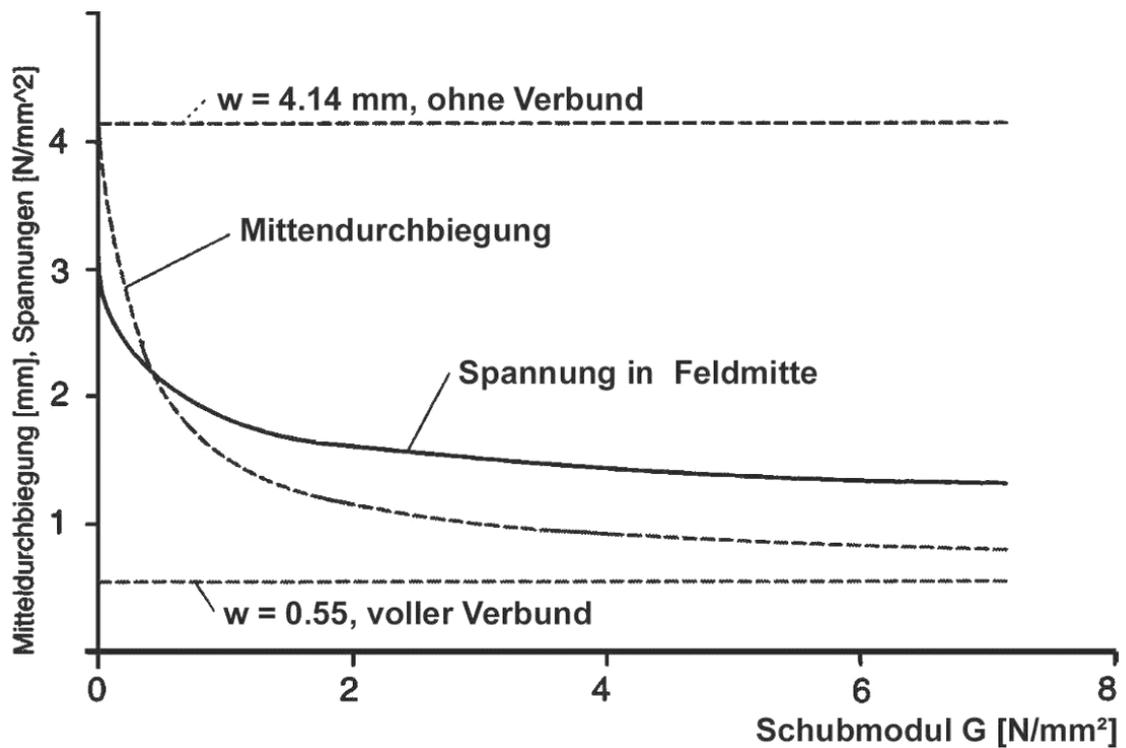


Abb. 3.18; Schubmodulstudie aus (36), Scheibenaufbau (4,0/0,76/8,0/0,76/8,0)

Danach wird schon bei einem Schubverbund von $G = 8 \text{ N/mm}^2$ ein nahezu vollständiger Verbund erreicht. Analog zur Verformung ergeben sich schon bei diesen geringen Steifigkeiten deutlich positive Auswirkungen auf das Spannungsniveau der Scheiben. Verbundglasscheiben befinden sich in der Regel zwischen diesen beiden maximalen Zuständen, voller und kein Verbund, und tragen die Belastungen mit einer mittleren Verbundtragwirkung ab, Abb. 3.19 .

teilweise Schubverbund

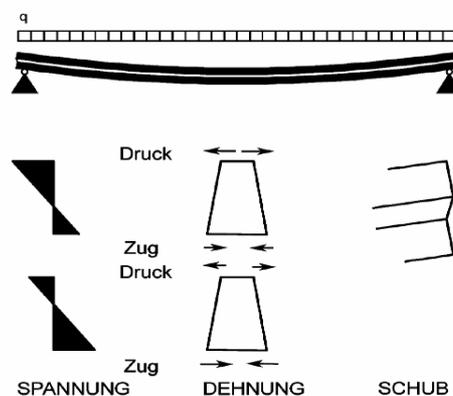


Abb. 3.19; Schubverformung am Rand von Glaslaminaten

Bei diesen Betrachtungen muss jedoch das rheologische Verhalten der Zwischenschicht berücksichtigt werden. PVB z.B. weist unter anhaltender Belastung ein deutliches Kriechverhalten auf. Dies führt ebenfalls zum Verlust des Schubverbundes. Unter stoßartigen Belastungen dagegen bildet sich durch den Dämpfungseffekt eine hohe Kurzzeitfestigkeit aus, welche nach (36) bei einer Temperatur von 23°C zwischen 3 und 4 N/mm² liegt.

Kurzzeitlasten sind für Glasscheiben in der Regel böige Windbelastungen, z.B. während eines Sturmtiefs. Unter Berücksichtigung des rheologischen sowie des viskoelastischen Verhaltens von PVB wurde für Verbundsicherheitsglas am Lehrstuhl für Stahlbau der TH Aachen ein Gutachten bezüglich der ansetzbaren Rechenwerte für das Schubmodul von PVB durchgeführt. In der folgenden Tabelle 3.1 sind beispielhafte Werte in N/mm² für das Schubmodul in Abhängigkeit von Temperatur und Lastdauer angegeben. Stoßartige Belastungen werden hier jedoch nicht erfasst. Es wird deshalb auf die in den technischen Richtlinien für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen(68), kurz TRAV, vom Deutschen Institut für Bautechnik vorgeschlagene Nachweise der Tragfähigkeit unter stoßartigen Einwirkungen verwiesen.

Lastdauer	t < 5 sec	t < 10 min	t < 1 d	t < 7 d	t < 90 d	ständig
T < 3 °C	1,86	1,44	1,01	0,84	0,62	-
T < 25 °C	0,54	0,37	0,19	0,12	0,03	-
T < 50 °C	0,32	0,09	-	-	-	-
T < 70 °C	0,15	-	-	-	-	-

Tabelle 3.1; ansetzbare Schubmoduli für PVB, RWTH Aachen

Darin wird im Wesentlichen der Pendelschlagversuch in Anlehnung an die DIN EN 12 600 (67) vorgeschlagen und durch vereinfachte Verfahren ergänzt. Grundsätzlich gilt jedoch nach den gültigen technischen Richtlinien, dass der Schubverbund bei einer Bemessung für VSG bzw. VG nicht berücksichtigt werden darf. Eine Ausnahme stellen Isoliergläser aus Verbundgläsern dar, bei denen die höhere Steifigkeit des vollen Verbundes wegen der Randeinspannung zu höheren Spannungen führen kann.

3.C Bemessung und Berechnung von Glasplatten

Baugläser werden gegenwärtig nach dem deterministischen globalen Sicherheitskonzept bemessen. Es gelten die zulässigen Biegezugspannungen nach den technischen Richtlinien für die Verwendung von liniengelagerten Verglasungen sowie die technischen Richtlinien für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen, kurz: TRLV bzw. TRAV (56,68), und ergänzend die DIN 18516 Teil 4. Die vorhandenen Normen und technischen Richtlinien erfassen das tatsächliche Materialverhalten von Glas nicht ausreichend. Sie enthalten lediglich allgemeine und spezielle Regeln und Verfahren zur Bemessung und Konstruktion von Glas im Bauwesen. Die zulässigen Zugspannungen werden unter Berücksichtigung von globalen Sicherheitsbeiwerten, von 2.5 bis 3, gegenüber den in Biegeversuchen ermittelten Serienfestigkeiten angegeben (36).

Aus der Bruchmechanik, welche eingangs dargestellt wurde, ergibt sich eine Vielzahl von verschiedenen Einflüssen auf die „Festigkeit“ – bzw. richtiger das Risswachstum – von Glas. Unter Berücksichtigung aller Kriterien kann ein Bemessungsverfahren entsprechend aufwendig und unhandlich erscheinen. Mit der EN 13474 (69) wurde ein entsprechend aufwendiges Verfahren nach dem probabilistischen Sicherheitskonzept vorgestellt.

Die Projekte prEN 13474-1 und -2 wurden im November 2003 vom CEN auf Grund massiver Proteste eingestellt. Die Zurückziehung der E DIN-EN 13474-1 und -2 ist bereits eingeleitet. Die sich derzeit in Bearbeitung befindliche DIN 18008 sollte nach (70), neben einer „wirklichkeitsnahen“ – und dementsprechend aufwendigen – Nachweismethode, auch jeweils vereinfachte Nachweismöglichkeiten anbieten. Eine ausführliche Darstellung der gegenwärtig vorliegenden Nachweis-konzepte findet sich z.B. in (15,70,71). Im Gegensatz zu den noch geltenden technischen Regeln werden aller Voraussicht nach für Glasprodukte zukünftig keine zulässigen Spannungen (deterministisches Bemessungskonzept), sondern charakteristische Spannungen angegeben. Mit der Einführung des Eurocodes wurde das semiprobabilistische Bemessungskonzept eingeführt (58). Demnach werden auf der Einwirkungsseite ebenso wie auf der Widerstandsseite Sicherheitsbeiwerte verwendet. Für eine Bemessung auf Grundlage der Bruchmechanik muss die charakteristische Glasfestigkeit, „die Prüffestigkeit“, mit der Weibullverteilung an vorgeschädigten Proben (Gebrauchsalterung) bestimmt werden. In der prEN 13474-1 werden hierzu folgende Werte in Abhängigkeit von der Vorspannung und Glasart angegeben:

Typ des vorgespannten Glas	Hergestellt aus	$f_{g,k}$ (N/mm ²)
Floatglas	Kalk-Natronglas, Borosilikatglas, Glaskeramik	45

Tabelle 3.2, 1 aus prEN 13474

Typ des vorgespannten Glas	Hergestellt aus	$f_{b,k}$ (N/mm ²)
Thermisch vorgespanntes Sicherheitsglas Heiß geprüfetes thermisch vorgespanntes Sicherheitsglas	Floatglas oder Kalk-Natronglas	120
	Ornamentiertes Glas	90
	Emailliertes Floatglas oder emailliertes Kalk-Natronglas	75
Teilvorgespanntes Glas	Floatglas oder Kalk-Natronglas	70
	Ornamentiertes Glas	55
	Emailliertes Floatglas oder emailliertes Kalk-Natronglas	45
Chemisch vorgespanntes Glas	Floatglas oder Kalk-Natronglas	150
	Ornamentiertes Glas	150
Thermisch vorgespanntes Borosilikat-Sicherheitsglas	Borosilikatglas	120

Tabelle 3.2, 2 aus prEN 13474

Diese normierten Werte sollen auf Grundlage der Bruchmechanik in die zulässige Spannung umgerechnet werden. Im Folgenden werden die wesentlichen Daten des Bemessungsverfahrens aufgeführt. Es wurde in der prEN 13474 vorgeschlagen: die **Einwirkungsdauer**, die **Scheibengröße** (Flächeneinfluss), die **Festigkeitsstreuung**, sowie den **Vorspannzustand** bei einer Ermittlung der zulässigen Spannung zu berücksichtigen. Auf Grund des subkritischen Risswachstums zur Folge der Spannungsdauer am Rissufer wird die Festigkeitsminderung auch in Abhängigkeit von der Lastdauer dargestellt. In der Norm wurde deshalb ein Modifikationsfaktor K_{mod} angegeben, Tabelle 3.3.

Einwirkungsdauer	Lasten als Beispiel	k_{mod}
kurz	Wind	0,72
mittel	Schnee	0,36
	Klima (für Isolierglaseinheiten)	0,36
ständig	Eigengewicht	0,27
	Höhenlage (für Isolierglaseinheiten)	0,27

Tabelle 3.3; aus prEN 13474

Zur Erfassung der „Qualitätsschwankungen“ der Glaserzeugnisse werden in Tabelle 3.4 folgende Teilsicherheitsbeiwerte für die Materialstreuung angegeben:

Glaserzeugnis	γ_M		γ_V		γ_V	
	normal gekühlt		Thermisch vorgespannt Hitze behandelt teilvergespannt		Chemisch vorgespannt	
	Grenzzustand der Tragfähigkeit	Grenzzustand d. Gebrauchs- tauglichkeit	Grenzzustand der Tragfähigkeit	Grenzzustand d. Gebrauchs- tauglichkeit	Grenzzustand der Tragfähigkeit	Grenzzustand d. Gebrauchs- tauglichkeit
Floatglas	1,8	1,0	2,3	1,5	2,3	1,5
Kalk-Natronglas	1,8	1,0	2,3	1,5	2,3	1,5
Emailliertes Float- oder	1,8	1,0	2,3	1,5	[...]	[...]
Ornamentglas	2,3	1,3	3,0	2,0	3,0	2,0
Emailliertes Ornamentglas	2,3	1,3	3,0	2,0	[...]	[...]
Drahtglas	2,3	1,3	-	-	-	-
Ornamentiertes Glas	3,2	1,8	-	-	-	-
Borosilikatglas	1,8	1,0	2,3	1,5	[...]	[...]
Glaskeramik	1,8	1,0	-	-	[...]	[...]

Tabelle 3.4; aus prEN 13474

Da die Bruchwahrscheinlichkeit mit der Scheibengröße zunimmt, wurde ein Flächenfaktor mit ($A = \text{Fläche in m}^2$) $A^{0,04} = K_A$ ermittelt. Einige Beispiele sind in Tabelle 3.5 angegeben.

Plattenfläche in m ²	Flächenfaktor k _A
0,2	0,93
0,5	0,97
1	1
2	1,03
5	1,07
10	1,1
20	1,13

Tabelle 3.5; aus prEN 13474

Demnach stellt sich die Bestimmung der „entworfenen“ Glasfestigkeit wie folgt dar:

$$f_{g,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_M \cdot k_A} \cdot \gamma_n$$

Der nationale Beiwert γ_n für die BRD ist 1,0.

Intensiv diskutiert wird die Berücksichtigung der Vorspannung auf der Widerstandsseite, da sie z.B. nach (70) eher eine Einwirkung als eine Materialeigenschaft darstellt. In der prEN 13474 wurde jedenfalls vorgeschlagen, vom Vorspannungszustand ($f_{b,k}$) die charakteristische Festigkeit des Ausgangsglases ($f_{g,k}$) abzuziehen und zur Bestimmung der zulässigen Spannung des vorgespannten Glases die zulässige Spannung des Ausgangsglases zu addieren, jeweils unter Berücksichtigung der entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte. Diese Berechnung stellt sich dann wie folgt dar:

$$f_{g,d} = \left(\frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{\gamma_V} + k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_M \cdot k_A} \right) \cdot \gamma_n$$

Im Folgenden wird die Einwirkungsseite zur Bemessung von Bauglasprodukten dargestellt. Die Kombination der Einwirkungen wird mit der folgenden Formel erfasst:

$$F_d = \sum_{i=1}^n (\gamma_{G,i} \cdot G_{k,i}) + \sum_{j=1}^m (\gamma_{Q,j} \cdot Q_{k,j} \cdot \psi)$$

$$\psi = 1,0 \quad \psi = 0,9$$

für $m = 1$; für $m > 1$

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen können der Tabelle 3.6 entnommen werden.

Einwirkungen		Grenzzustand der Tragfähigkeit		Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	
		Ständige Einwirkungen	Veränderliche Einwirkungen	Ständige Einwirkungen	Veränderliche Einwirkungen
		$\gamma_{G,i}$	$\gamma_{Q,j}$	$\gamma_{G,i}$	$\gamma_{Q,j}$
Ungünstige	Eigengewicht Wind, Schnee	1,35	1,50	1,00	1,00
	Klima	1,35	1,20	1,13	0,92
Günstige	Alle	1,00	0,00	1,00	0,00

Tabelle 3.6; aus prEN 13474

Da die lineare Berechnung der Glasscheiben zu einer deutlichen Überbemessung führt, sollte das nichtlineare Tragverhalten von „dünnen“ Glasplatten, insbesondere von vierseitig oder umlaufend gelagerten Scheiben, berücksichtigt werden. In der prEN 13474 werden hierzu Berechnungstabellen und Formeln angeboten, mit denen dieses Verhalten berücksichtigt werden kann. Zur Berechnung der Spannungen in den Scheiben wurde dabei die jeweils größere Hauptzugspannung berücksichtigt. Diese Annahme basiert darauf, dass die bruchauslösenden Störungen weder einen bevorzugten Ort noch eine bevorzugte Richtung zur Spannung aufweisen, (36). Außerdem wird zur Bestimmung der Prüfbiegefestigkeit auch nur die jeweils größere der Hauptzugspannungen als bruchauslösend angesehen. Zur Berechnung werden die Lasten in dimensionsloser normierter Form dargestellt. Es bestehen folgende Beziehungen nach (69,36) :

Für die gleichförmige Flächenlast p^* :

$$p^* = \frac{a^4 F_d}{h^4 E}$$

zur Ermittlung der maximalen Hauptzugspannung:

$$\sigma_{\max} = k_1 \frac{a^2}{h^2} F_d$$

und zur Berechnung der maximalen Durchbiegung:

$$w_{\max} = k_4 \frac{a^4}{h^3 E} F_d$$

Die zur Berechnung notwendigen Formbeiwerte, k_1 und k_4 können aus der Tabelle 3.7 nach prEN 13474 für vierseitig gelagerte Tafeln entnommen werden. Die Zwischenwerte können interpoliert werden.

k1	p*									
	0	5	10	20	30	50	100	200	300	500
1,0	0,272	0,271	0,268	0,258	0,245	0,227	0,207	0,188	0,178	0,165
0,9	0,323	0,320	0,314	0,293	0,269	0,243	0,222	0,230	0,193	0,180
0,8	0,383	0,378	0,365	0,329	0,294	0,262	0,240	0,221	0,210	0,198
0,7	0,451	0,442	0,421	0,368	0,322	0,282	0,261	0,241	0,230	0,217
0,6	0,526	0,514	0,485	0,417	0,362	0,305	0,284	0,263	0,250	0,239
0,5	0,630	0,590	0,560	0,485	0,424	0,342	0,309	0,289	0,277	0,264
0,4	0,673	0,665	0,643	0,580	0,519	0,429	0,337	0,317	0,306	0,292
0,3	0,725	0,722	0,714	0,687	0,650	0,575	0,444	0,349	0,337	0,323
0,2	0,748	0,747	0,746	0,744	0,739	0,724	0,671	0,561	0,481	0,384
0,1	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,748	0,746	0,739
0	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750

k4	p*									
	0	5	10	20	30	50	100	200	300	500
1,0	0,046	0,046	0,045	0,041	0,038	0,032	0,024	0,017	0,014	0,011
0,9	0,056	0,056	0,054	0,049	0,044	0,036	0,027	0,019	0,015	0,012
0,8	0,068	0,067	0,065	0,057	0,051	0,041	0,030	0,021	0,018	0,014
0,7	0,083	0,081	0,077	0,068	0,059	0,048	0,035	0,025	0,020	0,016
0,6	0,099	0,097	0,092	0,081	0,071	0,057	0,041	0,029	0,024	0,019
0,5	0,115	0,113	0,109	0,097	0,086	0,070	0,051	0,036	0,030	0,023
0,4	0,131	0,129	0,126	0,116	0,105	0,088	0,065	0,046	0,038	0,030
0,3	0,147	0,142	0,140	0,135	0,128	0,114	0,088	0,064	0,053	0,041
0,2	0,147	0,147	0,147	0,146	0,145	0,140	0,126	0,101	0,085	0,067
0,1	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,147	0,146	0,143	0,136
0,0	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148

Tabelle 3.7; aus prEN 13474

Nachweise:

Tragfähigkeitsnachweis:

$$\sigma_{\max} \leq f_{g,d}$$

Gebrauchstauglichkeitsnachweis:

$$W_{\max} \leq W_d$$

3.D FE-Basismodelle

Für die in den folgenden Kapiteln durchgeführten Untersuchungen zu Glasscheiben und Glaslaminaten wird es im Vorfeld notwendig, FE- Modelle zu konzipieren, welche durch vergleichende Berechnungen verifiziert werden. Hierzu wurde eine zweiseitig gelagerte 1250 * 2500 mm und eine umseitig gelagerte 2500 * 2500 mm Glasplatte ausgewählt und modelliert. Mit den in (69) vorgeschlagenen Berechnungsformeln für Glasscheiben wurden vergleichende Berechnungen durchgeführt. Beabsichtigt sind in dieser Arbeit Studien zum grundsätzlichen Tragverhalten, sodass das Tragverhalten sowie die Spannungsentwicklung der untersuchten Systeme qualitativ beschrieben und in ihren Tendenzen bewertet werden können. Als Belastung wurden sechs Laststufen gewählt, welche einen realistischen Belastungsbereich von Glasscheiben abdecken.

Laststufe					
1	2	3	4	5	6
0,3 KN/m ²	0,6 KN/m ²	1,2 KN/m ²	1,8 KN/m ²	2,4 KN/m ²	3,0 KN/m ²

Tabelle 3.8; Belastungsstufen Glasplatten

3.D.1 BERECHNUNGSMODELL FÜR ZWEISEITIG GELAGERTE GLASPLATTEN

Wie in Kapitel 3.B.2 bereits ausführlich beschrieben wurde, können zweiseitig gelagerte Platten mit der linearen Berechnungsmethode beschrieben werden. Die Last wird dabei als globale Flächenlast in Richtung -Z beaufschlagt, Abb. 3.20, links. Die Auflagerbedingungen wurde in Übereinstimmung mit den Voraussetzungen der Berechnungsformeln aus (36, 69) gewählt. Die Scheiben sind an den Rändern in Z-Richtung unverschieblich gelagert. Im Zentrum werden sie horizontal in X und Y-Richtung, sowie gegen Torsion um die Z-Achse gesichert, Abb. 3.20 rechts.

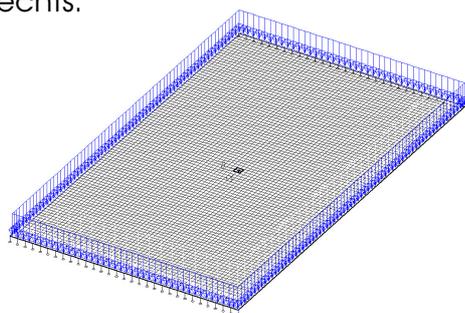
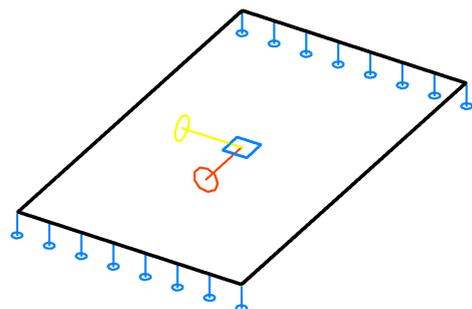


Abb. 3.20; Lastbild



Lagerungsbedingungen

Bei der Berechnung mit FE- Programmen kann die Anzahl und damit die Dichte der Elemente deutlichen Einfluss auf die auftretenden Spannungen und eventuell auch die Verformungen haben. Hierzu wurde die 1250 * 2500 mm Scheibe, $h = 21$ mm mit unterschiedlichen Netzdichten und unter Ansatz der oben eingeführten Belastungsstufen berechnet, Abb. 3.21.

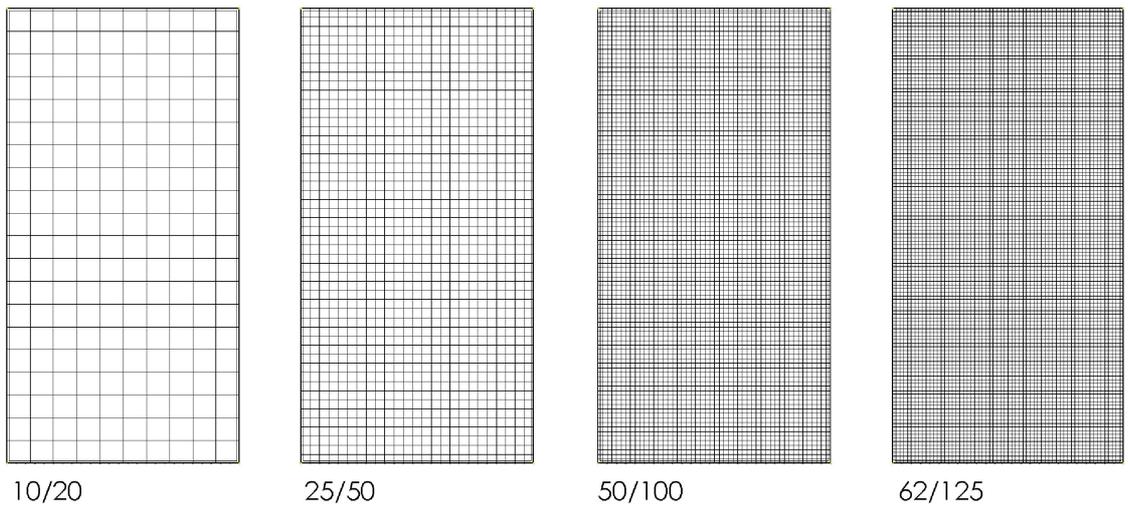


Abb. 3.21; Netzdichte zweiseitig gelagerter Platten

Die Spannungen wurden mit steigender Netzdichte größer. Es konnte festgestellt werden, dass ab einer Netzdichte von 50 * 100 Elementen, also mit einem Regelelement von 25 * 25 mm, kein Spannungsanstieg mehr zu verzeichnen war. Im weiteren Verlauf wird diese Dichte in den Modellen Verwendung finden. In Abb. 3.22 sind die Ergebnisse der FE-Studie zur Netzdichte graphisch aufgetragen. Dargestellt ist die maximale Zugspannung in Feldmitte zur Seitenlänge eines Regelelementes:

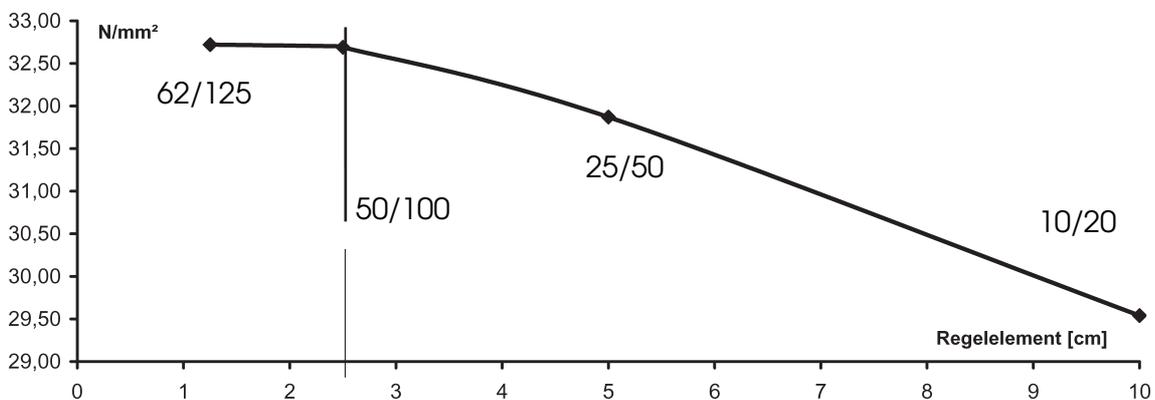


Abb. 3.22; Spannungsentwicklung zur Seitenlänge der Regelelemente

Wie bereits beschrieben, ist die gebräuchliche lineare Berechnung für umseitig gelagerte Platten nicht ausreichend, um das Tragverhalten zu beschreiben. Es wird eine nichtlineare Berechnung nach Theorie dritter Ordnung erforderlich. Mathematisch wird dies durch den Ansatz eines Algorithmus, basierend auf dem Newton- Rapson Verfahren, zur Lösung von nichtlinearen Gleichungen erfolgen. Dieses Verfahren ist allgemein gültig und kann auch bei großen Verformungen und Verdrehungen verwendet werden. Mit dem FE-Programm Esa-Prima Win 3.6 (SCIA) kann ein aus 2D Elementen bestehendes Modell (Platten) erstellt werden, mit dem das Tragverhalten der Platten, unter Anwendung des Newton- Rapson Verfahrens, hinreichend genau untersucht werden kann. Die Begrenzung auf kleine Dehnungen bleibt jedoch erhalten, sodass Materialien mit hyperelastischem Verhalten oder „nichtlinearem Materialverhalten“ wie Kautschuk oder Silikon durch diese Berechnungsmethode nicht abgebildet werden können. Die Last wird inkrementell aufgebracht, wobei jeder Zuwachs iterativ gelöst wird. Die Anzahl der Iterationen kann von 1 bis 50 gewählt werden. Die Genauigkeit der Ergebnisse kann außerdem durch feinere Netzverteilung und durch Erhöhung der Anzahl der Zuwächse verbessert werden.

Die Last wird als globale Flächenlast in Richtung $-Z$ beaufschlagt, Abb. 3.23, links. Die Auflagerbedingungen wurden in Übereinstimmung mit den Voraussetzungen der Berechnungsformeln aus (36.69) gewählt. Die Scheiben sind an den Rändern in Z -Richtung unverschieblich gelagert. Im Zentrum werden sie horizontal in X - und Y -Richtung sowie gegen Torsion um die Z - Achse gesichert, Abb. 3.23 rechts. Damit wird eine eventuelle Beeinträchtigung des Tragverhaltens durch die horizontale Lagerung ausgeschlossen.

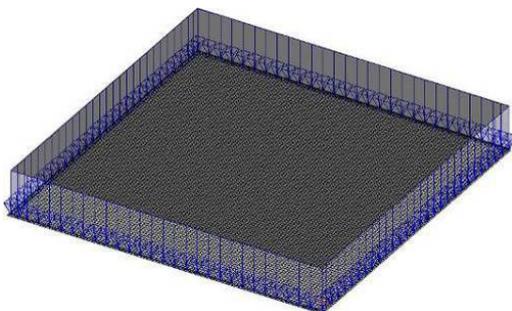
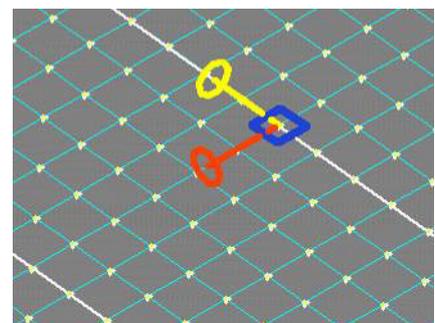


Abb. 3.23; Lastbild



Lagerungsbedingung

Bei der Berechnung mit einem FE-Programm hat die Anzahl und damit die Dichte der Elemente einen Einfluss auf die auftretenden Spannungen. Hierzu wurde die 2500×2500 mm Scheibe, $h = 10$ mm, mit unterschiedlichen Netzdichten und unter Ansatz der oben eingeführten Belastungsstufen berechnet.

Es konnte festgestellt werden, dass ab einer Netzdichte von 100×100 Elementen mit einem Regelement von 25 mm kein nennenswerter Spannungsabfall mehr zu verzeichnen ist. D.h., dass das Netz für die gewählte Scheibe mit 2500×2500 mm, also 10.000 Elementen, ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Im weiteren Verlauf wird diese Dichte in den Modellen Verwendung finden. In Abb. 3.24 sind die Ergebnisse der FE-Studie zur Netzdichte graphisch aufgetragen. Dargestellt ist die maximale Zugspannung in Feldmitte zur Seitenlänge eines Regelementes.

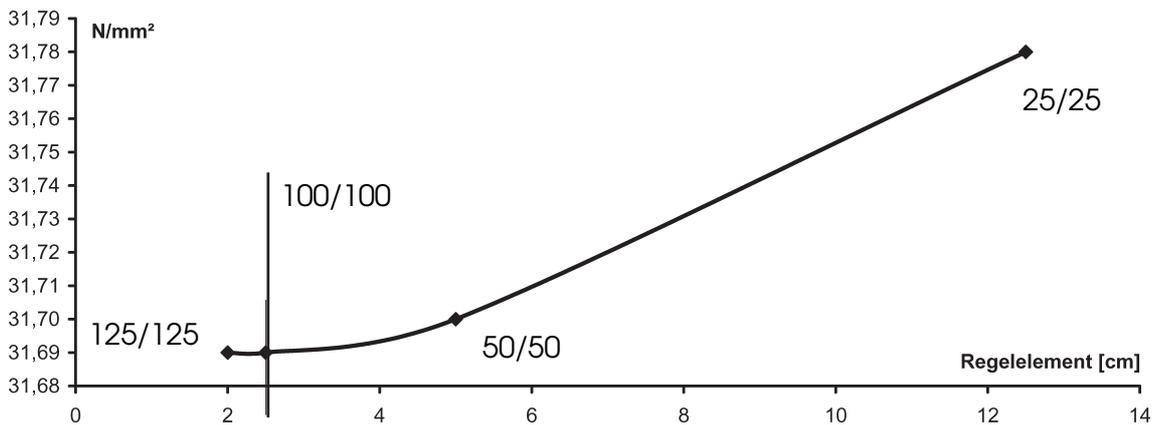


Abb. 3.24; Spannungsentwicklung zur Seitenlänge der Regelemente

3.D.3 VERIFIZIERUNG DURCH VERGLEICHBERECHNUNGEN

Zur Verifizierung der berechneten Spannungs- und Verformungsgrößen der FE-Basismodelle wurden Vergleichsberechnungen nach prEN 13474 (69) durchgeführt, siehe Kapitel 3.C. Zur Berechnung wurden die Materialkennwerte, E-Modul = 7000 N/mm² und eine Querkontraktionszahl, von $\mu = 0.2$ zu Grunde gelegt. Für Glas werden im Allgemeinen Querkontraktionszahlen von $\mu = 0.2$ bis zu $\mu = 0.24$ angegeben. Bei der Berechnung mit den in (69) dargelegten Berechnungsformeln bleibt der Einfluss auf die berechneten Spannungen und Verformungen als Folge der Querkontraktionszahl gering (15).

3.D.3.A ZWEISEITIG GELAGERTE PLATTEN

Zur Berechnung von zweiseitig gelagerten Platten kann ersatzweise ein lineares Lastverformungsverhalten angenommen werden. Die nach den in (69) benannten Formeln zu berechnende zweiseitig gelagerte Platte wird mit einem Seitenverhältnis von $a/b = 0$ angenommen. Das entspricht einer Auflagerlänge von $b = \infty$.

Damit sind die Formbeiwerte $K_1 = 0.75$ und $K_4 = 0.148$. Die FE-Berechnungsergebnisse des Basismodells zur Plattendurchbiegung und maximalen Zugspannung werden im Plattenzentrum (Feld) entnommen. Für die sechs Laststufen ergeben sich folgende Berechnungsergebnisse:

Laststufe						
	1	2	3	4	5	6
	0,3 KN/m ²	0,6 KN/m ²	1,2 KN/m ²	1,8 KN/m ²	2,4 KN/m ²	3,0 KN/m ²
FE-Basismodell zweiseitige Lagerung, h = 21 mm,						
W – Max [mm]	2,76	5,52	11,04	16,56	22,07	27,59
Sig. Max [N/mm ²]	3,15	6,31	12,61	18,92	25,23	31,54
preEN 13474 K1 = 0.75; K4 = 0.148						
W – Max [mm]	2,68	5,35	10,70	16,05	21,40	26,75
Sig.- Max [N/mm ²]	3,19	6,38	12,76	19,13	25,51	31,89

Tabelle 3.9

Zur besseren Veranschaulichung werden die Ergebnisse im Folgenden grafisch gegenüber gestellt. Wie bereits erwähnt, sind Studien zum grundsätzlichen Tragverhalten beabsichtigt. Die Abweichungen der FE- Studien von den Berechnungsergebnissen nach preEn bieten eine hinreichende Genauigkeit um das tendenzielle Tragverhalten zu beschreiben.

Die berechneten Spannungen, Abb. 3.26, und Verformungen, Abb. 3.25, weichen insbesondere in den größeren Lastbereichen voneinander ab. Mit diesen Ergebnissen wird jedoch gezeigt, dass eine weitgehende Übereinstimmung der FE-Modelle mit den in der preNorm vorgestellten Formeln besteht. Die etwas

größere Diskrepanz zwischen den Verformungsergebnissen - auf Grund der Berechnungsmethoden - erklärt sich aus dem in der preNorm nicht berücksichtigten Randverformung.

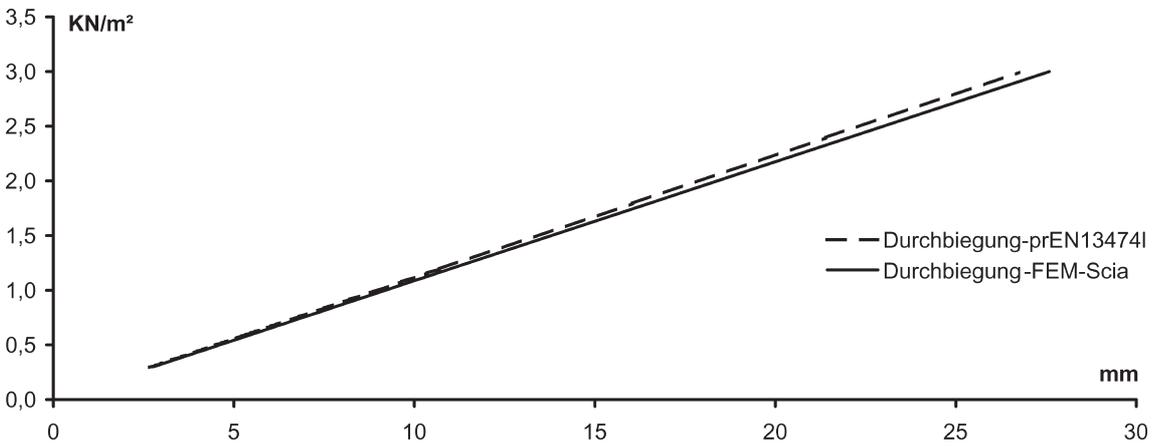


Abb. 3.25; Vergleichsberechnung zur Verformung zweiseitig gelagerter Platten

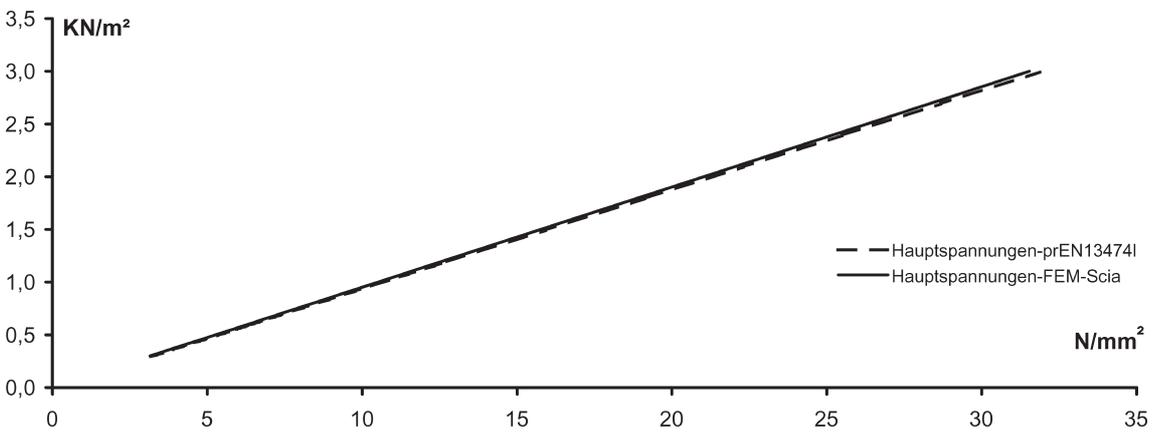


Abb. 3.26; Vergleichsberechnung zur Zugspannung in zweiseitig gelagerten Platten

Die zu berechnende Scheibe hat mit 2500 *2500 mm ein Seitenverhältnis von $e = 1$, womit sich folgende Werte aus den in (69) veröffentlichten Tabellen und der Berechnung des FE- Basismodells ergeben:

Laststufe						
	1	2	3	4	5	6
	0,3 KN/m ²	0,6 KN/m ²	1,2 KN/m ²	1,8 KN/m ²	2,4 KN/m ²	3,0 KN/m ²
Berechnung nach [preEN 13474]						
P*	16,74	33,48	66,96	100,44	133,92	167,41
k1	0,265	0,241	0,219	0,206	0,198	0,190
k3	0,042	0,036	0,029	0,024	0,021	0,019
W –max [mm]	7,08	12,02	19,61	24,80	29,02	32,28
Sig. Max [N/mm ²]	4,37	8,10	14,75	20,78	26,86	32,49

Tabelle 3.10

FE-Studie; EsaPrima Win, SCIA						
W –max [mm]	7,22	12,49	19,69	24,93	29,23	32,9
Sig. Max [N/mm ²]	4,870	8,480	14,740	20,930	26,890	32,690

Tabelle 3.11

Bei den Verformungsberechnungen ergeben sich im unteren Bereich Abweichungen von ca. 4% und bei den Hauptzugspannungen von etwa 11% wobei die Abweichung im oberen Lastbereich deutlich geringer ist.

Abweichung in %						
W	2,0	3,9	0,4	0,5	0,7	1,9
Sig.	11,4	4,7	0,0	0,7	0,1	0,6

Tabelle 3.12

Zur besseren Veranschaulichung werden die Ergebnisse im Folgenden grafisch gegenübergestellt.

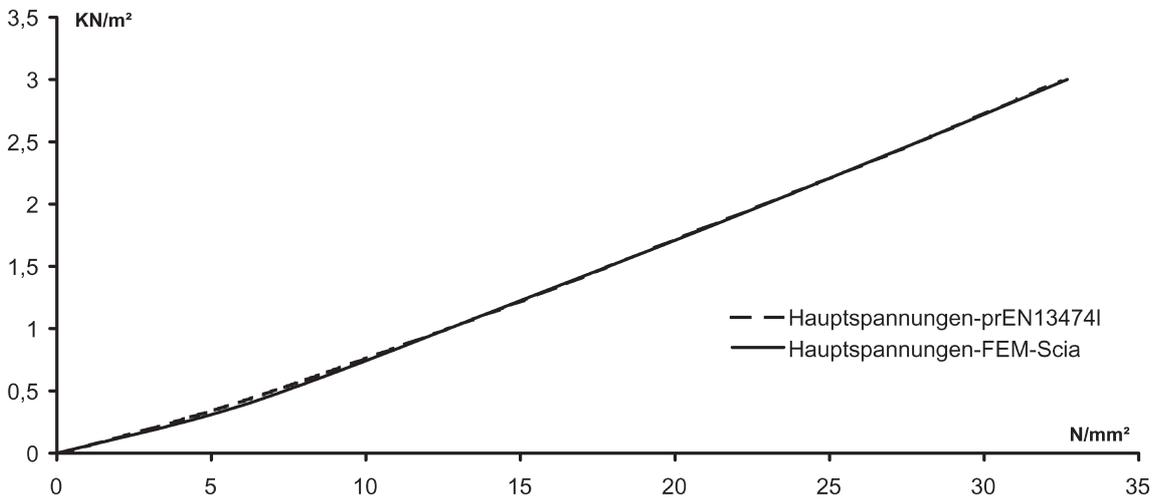


Abb. 3.27; Vergleichsberechnung zur Verformung vierseitig gelagerter Platten

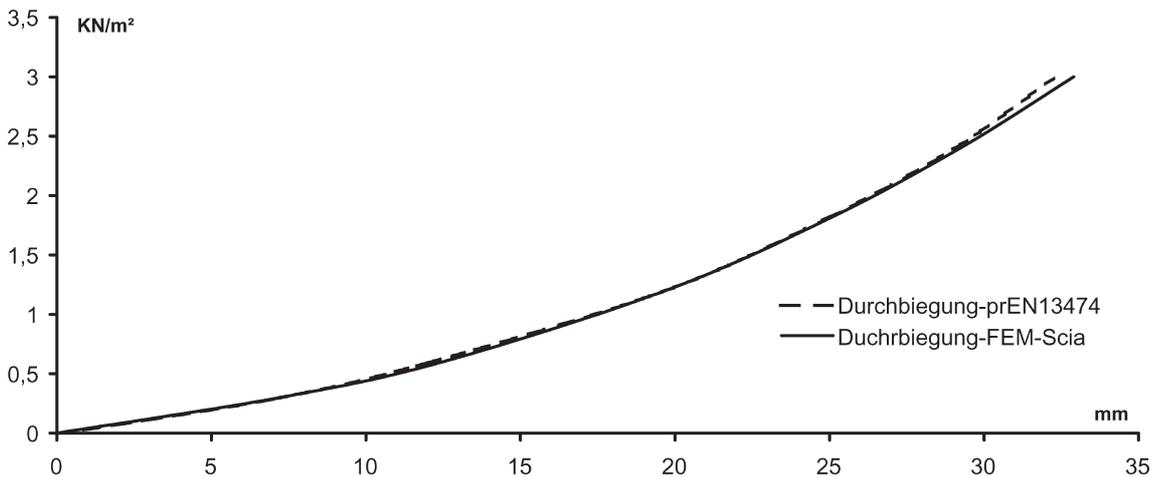


Abb. 3.28; Vergleichsberechnung zur Zugspannung in vierseitig gelagerter Platten

Mit diesen Ergebnissen wird gezeigt, dass das FE-Basismodell eine gute Übereinstimmung mit den in der preNorm angebotenen Formeln liefert und das Tragverhalten vierseitig gelagerter Platten mit ausreichender Genauigkeit beschreibt.

3.E BERECHNUNGSMODELLE FÜR GLASLAMINATE

Auf der Grundlage der entwickelten FE-Basismodelle sollen nun im Vorfeld für die beabsichtigten Untersuchungen zur Analyse des Tragverhaltens FE-Modelle für zweiseitig und vierseitig gelagerte Laminatplatten entwickelt und durch vergleichende Berechnungen verifiziert werden. Hierzu werden Vergleichsberechnungen mit den in der preEN 13474 vorgeschlagenen Berechnungsformeln für Glasscheiben bzw. Verbundglasscheiben durchgeführt.

Verbundglasscheiben ohne Schubverbund tragen die Lasten über die Steifigkeit der Einzelscheiben ab. Insofern die Einzelscheiben gleich dick sind, führt die Berechnung einer Einzelscheibe mit halber Last zu einer korrekten Lösung. Da Floatglas nur in bestimmten Dicken hergestellt wird, werden z.B. auf Grund einer Optimierung unterschiedlich dicke Scheiben zu Verbundglas laminiert. Bei der Berechnung dieser Laminatplatten muss das Tragverhalten der Einzelscheiben zur Gesamtsteifigkeit berücksichtigt werden. Die Verformungen und Spannungen einer Verbundglasscheibe können mit der effektiven Ersatzdicke nach preEn 13474 berechnet werden.

Effektive Dicke zur Berechnung der Durchbiegung:

$$h_{\text{ef};w} = \sqrt[3]{\sum_i h_i^3}$$

Effektive Dicke zur Berechnung der Spannung von einzelnen Glasschichten:

$$h_{\text{ef};\sigma;j} = \sqrt{\frac{\sum_i h_i^3}{h_j}}$$

Das Tragverhalten ist neben der Scheibendicken bzw. der effektiven Dicke abhängig von der Belastung, der Spannweite und den Lagerungsbedingungen. Wie bereits in den vorausgegangenen Untersuchungen wird die Lagerung des Randes als „ausschließlich“ in Belastungsrichtung unverschieblich angenommen.

3.E.1 BERECHNUNGSMODELL FÜR ZWEISEITIG GELAGERTE GLASLAMINATE

Auf Grundlage des Basismodells für eine zweiseitige Lagerung wird eine 1250 * 2500mm Glasscheibe mit einer Gesamtglasdicke von 21mm als Laminat modelliert. Eine Laminatstärke von 21mm (ohne Zwischenschicht) lässt sich herstellen aus 15mm + 6mm und aus 19mm + 2mm Floatglas. Gewählt wurde die 15mm + 6mm Variante.

In den Schwerachsen der Plattenelemente (Glasplatten) werden orthogonal stabförmige Elemente als „Beabstandungselemente“ angeschlossen. Die Stablänge entspricht dem Achsabstand s der Platten, welche unter Berücksichtigung einer Folienstärke von 0,76mm, 11,26 mm beträgt, Abb. 3.31, rechts.

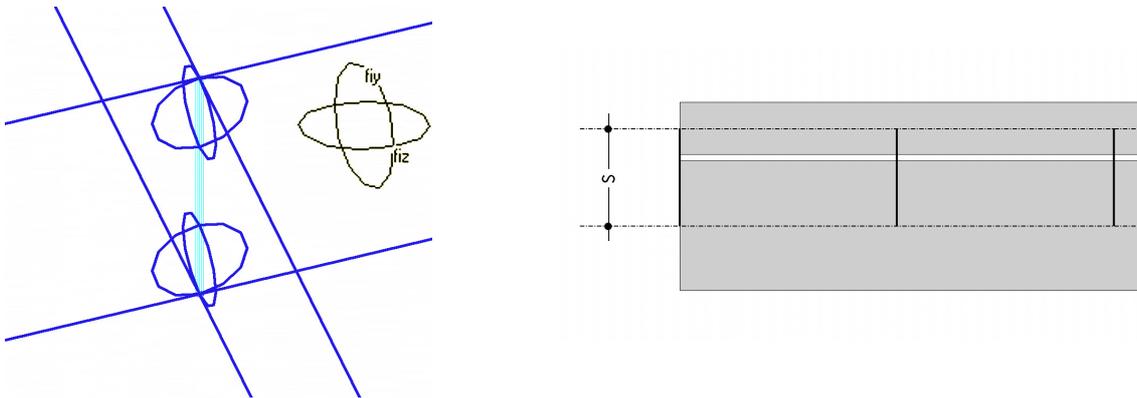


Abb. 3.29; Anschluss der Beabstandungselemente und Achsabstand

In der folgenden Studie wird ausschließlich der Extremfall ohne Verbundwirkung untersucht. Für den Fall ohne Verbundwirkung werden die stabförmigen Elemente mit Gelenken um die lokale Achse Y und Z an die 2D-Elemente angeschlossen, Abb. 3.29 links. So wird sichergestellt, dass ausschließlich Normalkraft (Klebewirkung in Belastungsrichtung) über die Stäbe übertragen wird.

Die Materialparameter entsprechen dem in Abschnitt 3.D.3 berechneten FE-Modell. Abb. 3.30 links und Mitte zeigen die Lagerung der Einzelplatte. Die Lagerung der unteren Platte entspricht exakt der des Basismodells, die obere Platte hingegen wird ausschließlich zur Verhinderung der Rotation und des Gleitens im Mittelknoten der Fläche gehalten.

Das Regelement der Glasplatten hat eine Größe von $2,5\text{cm} * 2,5\text{cm}$. Zur Vereinfachung werden die Regelstäbe der Netzgeometrie im Querschnitt angepasst, Abb. 3.30 rechts. Die Randelemente werden folglich mit $1,25\text{cm} * 2,5\text{cm}$ und die Eckelemente mit $1,25\text{cm} * 1,25\text{cm}$ an ihre Klebefläche angepasst.

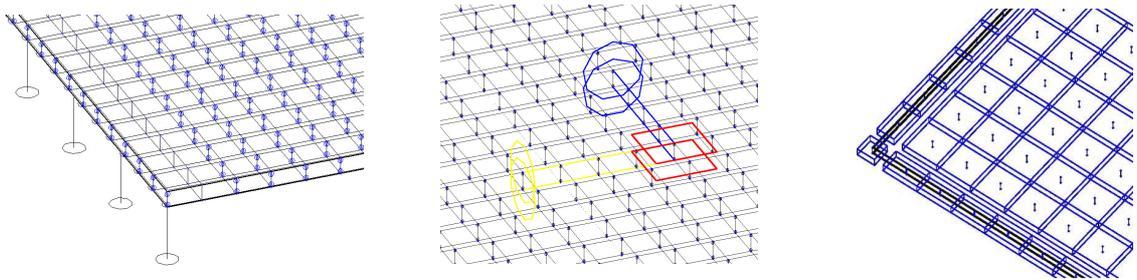


Abb. 3.30; Lagerung der Einzelplatten und Kalibrierung der Abstandselemente

3.E.2 BERECHNUNGSMODELL FÜR VIERSEITIG GELAGERTE GLASLAMINATE

Dem Basismodell folgend wird eine $2500\text{mm} * 2500\text{mm}$ Glasscheibe mit einer Gesamtglasdicke von 10mm als Laminat, also mit $2\text{mm} * 5\text{mm}$ modelliert. In den Schwerachsen der Platten (Glasplatten) werden ebenfalls orthogonal stabförmige Elemente als „Beabstandungselemente“ angeschlossen. Die Stablänge entspricht dem Achsabstand S der Platten, welcher unter Berücksichtigung einer Folienstärke von $0,76\text{ mm}$ $5,76\text{ mm}$ beträgt, Abb. 3.31 rechts.

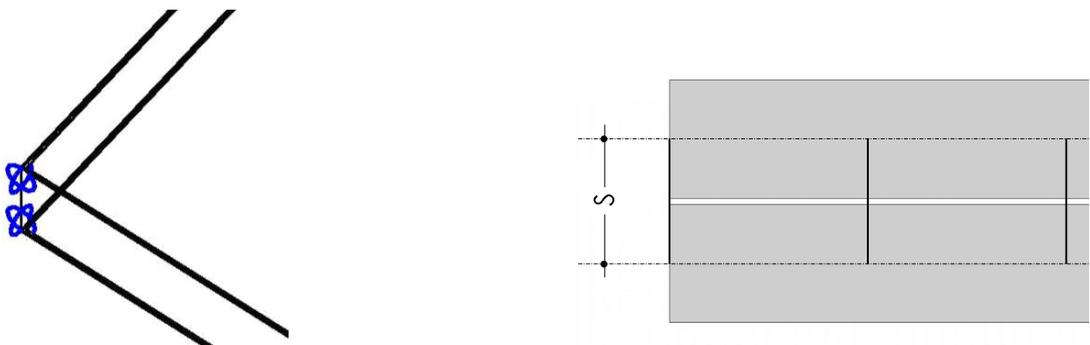


Abb. 3.3; Anschluss der Beabstandungselemente und Achsabstand

Für den Fall ohne Verbundwirkung werden die stabförmigen Elemente mit Gelenken um die lokale Achse Y und Z an die 2D-Elemente angeschlossen, Abb. 3.31 links. Die Materialparameter und Lagerbedingungen für jede Einzelscheibe entsprechen dem in Abschnitt 3.D.3 berechneten FE-Modell. Abb. 3.32 rechts zeigt die Lagerung des Glaslaminates.

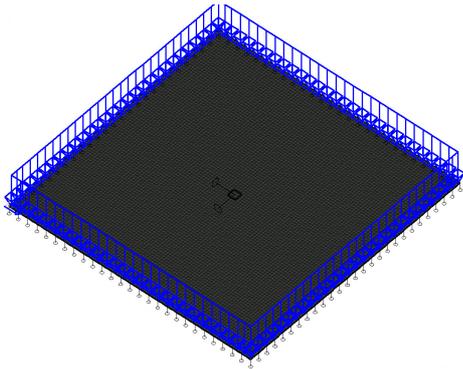
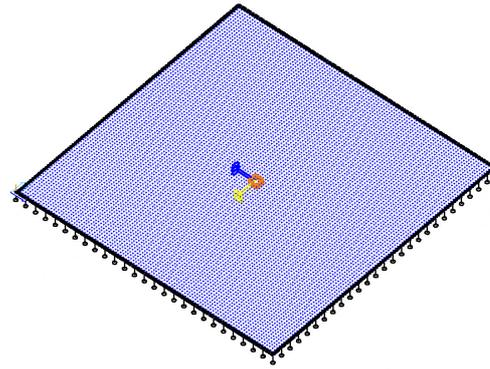


Abb. 3.32; Lastbild



Lagerungsbedingungen

Das Regelelement der Glasplatten hat eine Größe von 2,5 * 2,5 cm. Zur Vereinfachung werden die Regelstäbe dieser Dimension im Querschnitt angepasst. Die Belastung wird in Global-Z, als Flächenlast aufgebracht, Abb. 3.32 links.

3.E.3 VERIFIZIERUNG DURCH VERGLEICHBERECHNUNGEN

Berechnet werden aus zwei Einzelscheiben bestehende, linienförmig und gelenkig gelagerte Verbundglasscheiben ohne Schubverbundwirkung. Die Berechnungsergebnisse der FE-Modelle werden den Berechnungen nach prEN 13474 gegenübergestellt. Als Belastung wurden die sechs Laststufen aus den vorangegangenen Untersuchungen übernommen.

Laststufe					
1	2	3	4	5	6
0,3 KN/m ²	0,6 KN/m ²	1,2 KN/m ²	1,8 KN/m ²	2,4 KN/m ²	3,0 KN/m ²

Tabelle 3.13

3.E.3.A ZWEISEITIG GELAGERTE GLASLAMINATE

Zur Berechnung der maximalen Hauptzugspannung und Verformung von Verbundglasscheiben werden nach (69) bei einem Laminat zunächst die effektiven Ersatzdicken berechnet.

Zur Berechnung der Hauptzugspannungen wird die dickere der beiden Scheiben herangezogen. Die Ergebnisse nach der linearer Berechnungsmethode und nach der preEN 13474 werden in Tabelle 3.14 gegenübergestellt.

Laststufe						
	1	2	3	4	5	6
	0,3 KN/m ²	0,6 KN/m ²	1,2 KN/m ²	1,8 KN/m ²	2,4 KN/m ²	3,0 KN/m ²
FE-Basislaminatmodell, zweiseitige Lagerung, h = 15+6 mm						
W – Max [mm]	7,11	14,23	28,46	42,69	56,92	71,15
Sig. Max [N/mm ²]	5,82	11,64	23,29	34,93	46,58	58,22
preEN 13474 K1 = 0.75; K4 = 0.148, h = 15+6 mm, h eff. Sigma = 15,472 mm , h eff. w = 15,313 mm,						
W – Max [mm]	6,90	13,80	27,60	41,40	55,20	69,00
Sig.- Max [N/mm ²]	5,88	11,75	23,50	35,25	47,00	58,75

Tabelle 3.14

Die Ergebnisse sind bezüglich der Laststufen annähernd identisch und zeigen, dass das FE-Modell des Glaslaminates aus zwei Scheiben dem Tragverhalten einer Verbundglasscheibe ohne Verbundtragwirkung entspricht. D.h., dass die Konstruktion des Laminates mit Abstandsstäbchen keinen negativen Einfluss auf das Berechnungsergebnis hat. Wie zu erwarten war, sind die maximalen Verformungen des FE-Modells etwas größer als die mit den Formeln berechneten. Zur besseren Veranschaulichung werden die Ergebnisse einander im Folgenden grafisch gegenübergestellt, Abb. 3.33. Die Spannungen hingegen ergeben erwartungsgemäß eine höhere Übereinstimmung, verg. Abb. 3.34.

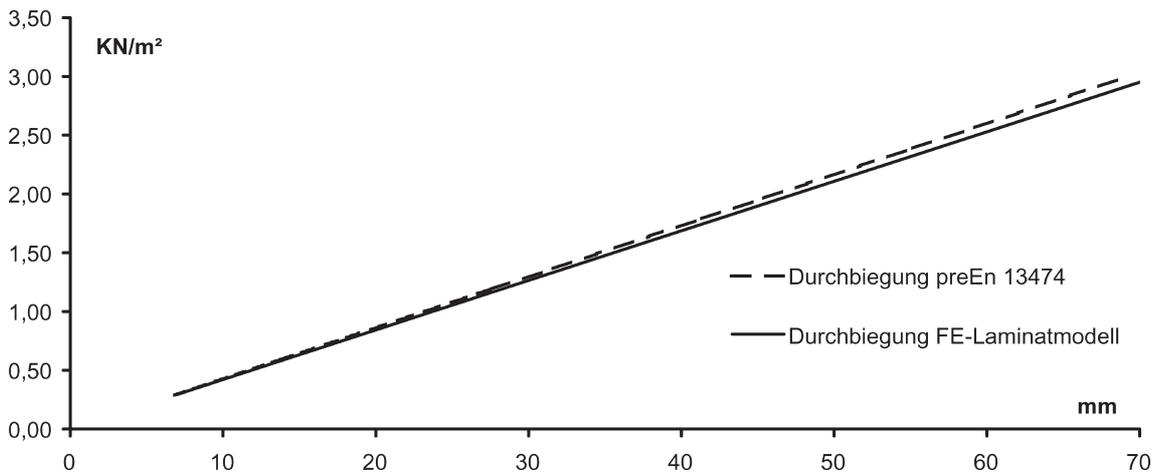


Abb. 3.33; Vergleichsberechnung zur Verformung zweiseitig gelagerter Glaslamine

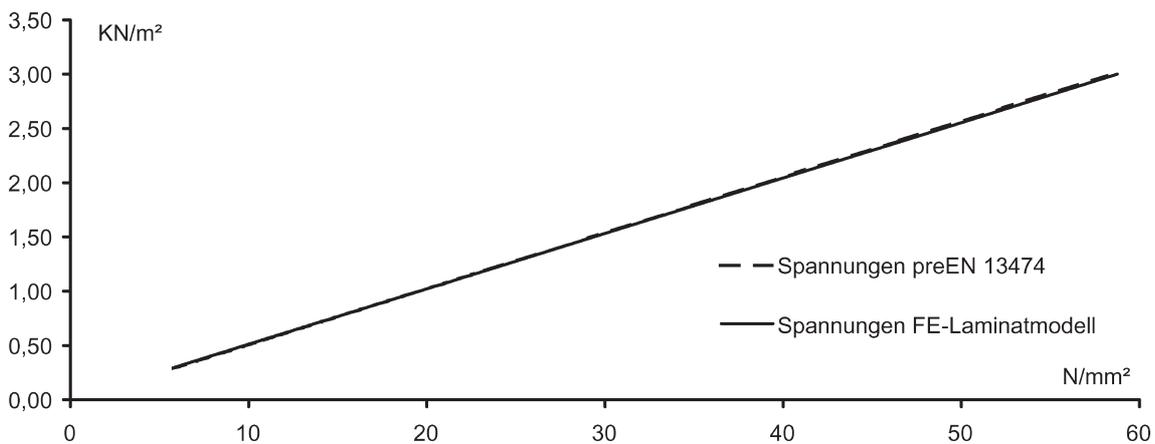


Abb. 3.34; Vergleichsberechnung zur Zugspannung in zweiseitig gelagerten Glaslaminaten

3.E.3.B VIERSEITIG GELAGERTE GLASLAMINATE

Die maximale Hauptzugspannung und Verformung von Verbundglasscheiben kann nach (69) bei einem Laminat aus zwei gleich dicken Scheiben auch mit einer der Einzelscheiben berechnet werden. Hierzu wird eine Glasscheibe mit

Laststufen						
	1	2	3	4	5	6
FE-Modell Glaslaminat, h= 2*5mm, 0,76mm						
	0,3 KN/m ²	0,6 KN/m ²	1,2 KN/m ²	1,8 KN/m ²	2,4 KN/m ²	3,0 KN/m ²
W – Max [mm]	14,610	21,270	29,150	34,620	39,110	42,960
Sig. Max [N/mm ²]	6,570	12,200	22,670	32,630	42,250	51,550
FE-Modell einer Einzelscheibe, h= 5mm						
	0,15 KN/m ²	0,3KN/m ²	0,6 KN/m ²	0,9 KN/m ²	1,2 KN/m ²	1,5 KN/m ²
W – Max [mm]	14,610	21,270	29,150	34,620	39,110	42,960
Sig.- Max [N/mm ²]	6,570	12,200	22,670	32,630	42,250	51,550

Tabelle 3.15

einer Dicke $h = 5 \text{ mm}$ modelliert, welche dem entwickelten FE-Basismodell entspricht. Diese Scheibe wird mit der Hälfte der Last beaufschlagt. Die nichtlinearen FE-Berechnungsergebnisse des Modells einer Verbundscheibe mit $2500 * 2500 \text{ mm}$ aus $2 * 5 \text{ mm}$ Glas und mit einem Abstand der Schwerachsen von $5,76 \text{ mm}$ sind in Tabelle 3.15 denen einer Einzelscheibe aus 5 mm Glas gegenübergestellt.

Die Ergebnisse sind bezüglich der Laststufen vollkommen identisch und zeigen, dass das FE-Modell des Glaslaminates aus zwei Scheiben dem nicht linearem Tragverhalten einer Verbundglasscheibe ohne Verbundtragwirkung entspricht. Zur besseren Veranschaulichung werden die Ergebnisse im Folgenden grafisch gegenübergestellt.

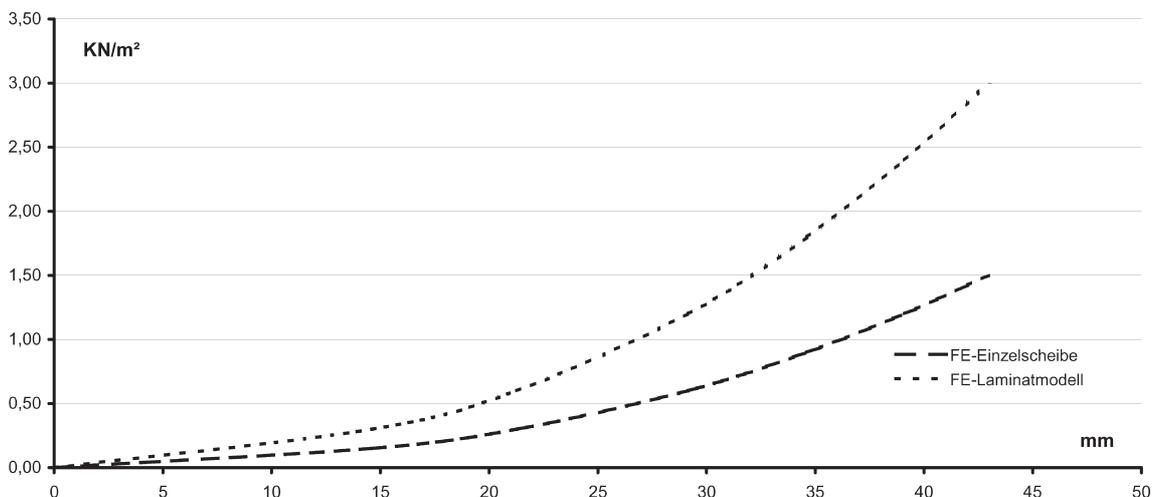


Abb. 3.35; Vergleichsberechnung zur Verformung vierseitig gelagerter Glaslaminat

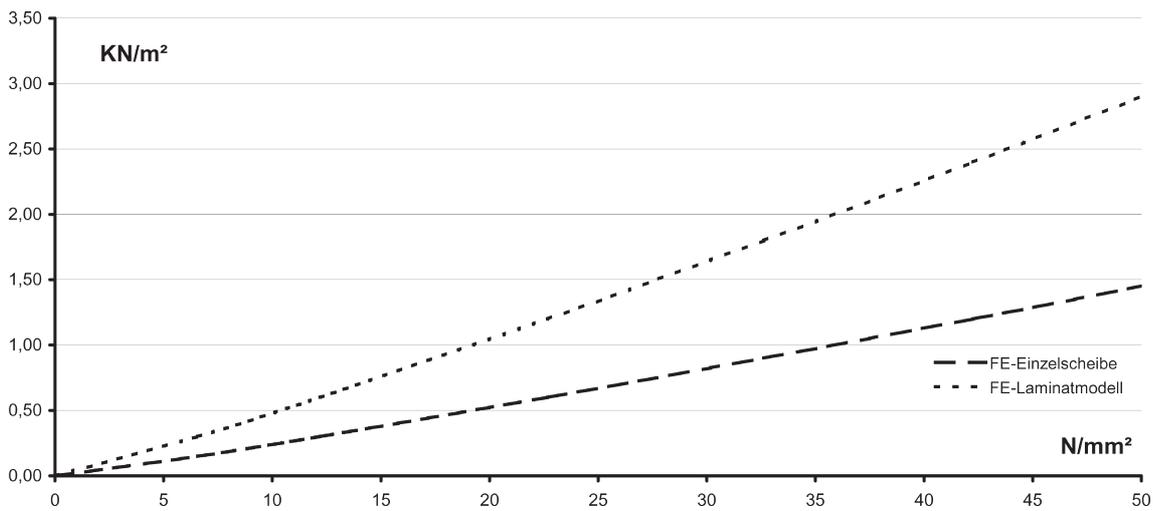


Abb. 3.36; Vergleichsberechnung zur Zugspannung in vierseitig gelagerten Glaslaminaten

Durch das bisher umrissene Tragverhalten von Einzelscheiben und Laminaten aus Glas wird ersichtlich, dass sich neben dem positiv auswirkenden Tragverhalten durch den Membraneffekt im Biegebereich von Laminatplatten ein zusätzliches Einsparpotenzial verbirgt, Abb. 3.37. Der Steifigkeitszuwachs einer monolithischen Scheibe im Vergleich zu einem gleich dicken Glaslaminat nähert sich im nicht-linearen Bereich deutlich an. Die Gradienten g verfügen über annähernd identische Steigungen, vergleiche hierzu (4).

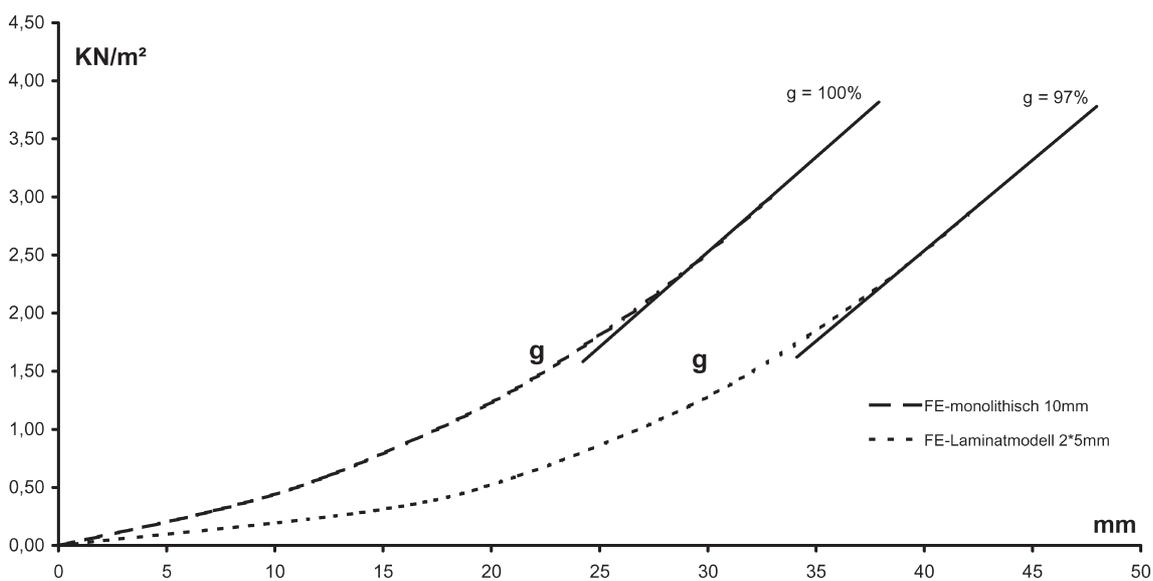


Abb. 3.37; Steifigkeitsgradienten im Vergleich

4

KANTENSCHUBVERBUND

Ziel ist es, eine zeit- und temperaturunabhängige Verbundwirkung zu aktivieren, sodass das Tragverhalten von Glaslaminaten unter Biegebeanspruchung deutlich verbessert wird.

Hierzu gibt es zahlreiche Bestrebungen. Vor allem werden Zwischenschichten erforscht, welche eben kein viskoelastisches bzw. rheologisches Verhalten mehr aufweisen und trotzdem die Transparenz und relativ einfache Verarbeitung, wie sie z.B. bei PVB-Folien gegeben ist, gewährleisten. Mit den teilkristallinen Thermoplasten ist ein erster Schritt in diese Richtung gelungen. Neben chemischen Strategien gibt es auch konstruktive Möglichkeiten, die Schubfestigkeit der Zwischenschicht zu erhöhen, ohne eine möglicherweise geforderte Resttragfähigkeit negativ zu beeinflussen.

Mit der folgenden Untersuchung wird eine Glaskonstruktion vorgestellt, welche durch konstruktive Maßnahmen im Kantenbereich der Glasscheiben ein Verbundtragverhalten erzeugt. Der Grundgedanke basiert darauf, die Glaskanten der Scheibenränder von Einzelscheiben eines Glaslaminates in der Art aneinander zu koppeln, dass ein gegenseitiges Verschieben der Stoßflächen der Glaskanten verhindert wird und die Kanten weiterhin miteinander fluchten. Oder anders ausgedrückt, dass die in (4), Abb. 4.1 links eingeführten Schubwinkel als Verschiebung der Schwerachsenenden über dem Auflager annähernd den gleichen Wert behalten.

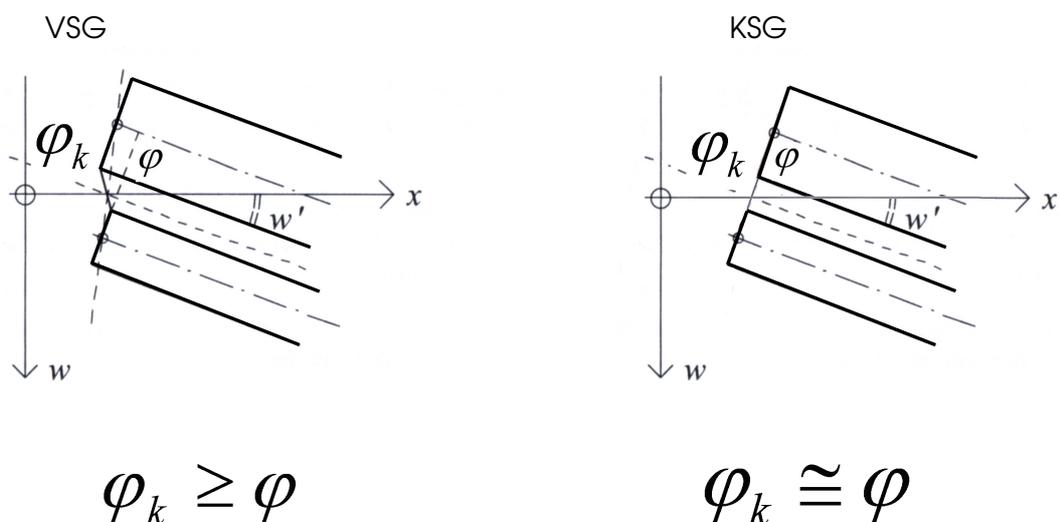


Abb. 4.1; Kantenverformung aus (4)

Eine derartige Konstruktion wird als **KS-Glas (Kantenschubverbundglas)** bezeichnet. Die anvisierten Systeme sind liniengelagerte Glasscheiben, welche mit einem konstruktionsbedingten Glaseinstand am Rand aufliegen. Die konstruktiven Eingriffe im Randbereich sollen so ausgeführt werden können, dass sie später von Halteleisten oder Presseleisten überdeckt werden können. Damit ist ein Kantenbereich von maximal 30 mm, besser jedoch 25 mm festgelegt.

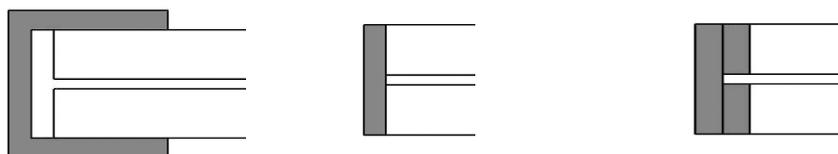
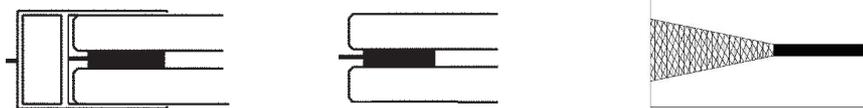
4.A Konstruktive Varianten

Die Schubkraft in der Fuge nimmt, wie bei Balken, über den Auflagern den größten Wert an. Wird im Randbereich der Glasscheiben ein schubfestes Element zwischen die Glasscheiben scherfest eingebracht, wird dadurch die Gesamtsteifigkeit im Vergleich zu zwei Einzelscheiben, wie die im Folgenden beschriebenen Versuche und Berechnungen zeigen werden, deutlich erhöht. Diese Elemente werden als **KS-Elemente** bezeichnet. Die schubsteifen KS-Elemente können grundsätzlich geklemmt, geklebt oder geschweißt ausgeführt werden. Die im Folgenden dargestellten Elemente stellen lediglich einen Auszug aus der großen Fülle möglicher konstruktiver Varianten dar und haben daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Klemmen



Kleben



Verkeilen mit Nut und Feder



Abb. 4.2; Konstruktive Varianten von Randkopplungen (76).

Auf Grund der in 2.D.3.D gewonnenen Erkenntnis zur Querkontraktionsbehinderung wird im Folgenden ein Konzept zur Umsetzung eines möglichen KS-Elementes erläutert. Dieser konstruktive Ansatz ist noch nicht durch Versuche verifiziert worden und befindet sich im Ideenstadium. Geometrische Querkontraktionsbehinderungen verringern offensichtlich die Dehnungen der viskoelastischen Klebstoffe, sie verhindern aber nicht das Fließen. In der Definition der konstruktiven Querkontraktionsbehinderung, insbesondere unter einer Druckbelastung, verbergen sich weitere neuartige Lösungen, mit denen das Fließverhalten der Kunststoffe gänzlich „ausgeschaltet“ werden kann. Das vornehmliche Ziel ist es also, dass eine Zwischenschicht eine Kompression kriechfrei überträgt. Es wurde ein Konzept entwickelt, welches auf dem inkompressiblen Verhalten von unter Druck stehenden und an der Querdehnung behinderten viskosen Materialien, wie sie Elastomere oder Thermoplaste darstellen, basiert, siehe 2.D.3.D. Eine geglückte Querkontraktionsbehinderung kann ein von der Viskoelastizität der Kunststoffe unabhängiges Tragverhalten erzeugen. Damit könnte das größte Hindernis, das Kriechverhalten der Kunststoffe, überwunden werden.

Eine mögliche Konstruktion dazu besteht darin, eine kompressible Schnur aus hochzugfestem Material ringförmig, eventuell mit Einlagen aus z.B. Stahl, in die Zwischenschicht einzulegen. Diese Schnüre können z.B. vor dem Verbund auf die Scheibe aufgelegt werden und bilden unter Druck eine Barriere für den eingeschlossenen Kunststoff, Abb. 4.3 links. Durch den Laminierungsprozess, insbesondere durch das Walzen im Autoklav, drücken die Schnüre sich durch die Folie und bilden eine ringförmige Barriere. Diese Barriere führt unter von außen aufgebrachtem Druck zum Kompressionsaufbau und damit zu einer hoch beanspruchbaren inkompressiblen Druckfläche innerhalb des Querschnittes. Auf diese Weise kann der Druck sicher über die Zwischenschicht übertragen werden. Diese Anordnung stellt eine konstruktive innere Behinderung der Querkontraktion dar.

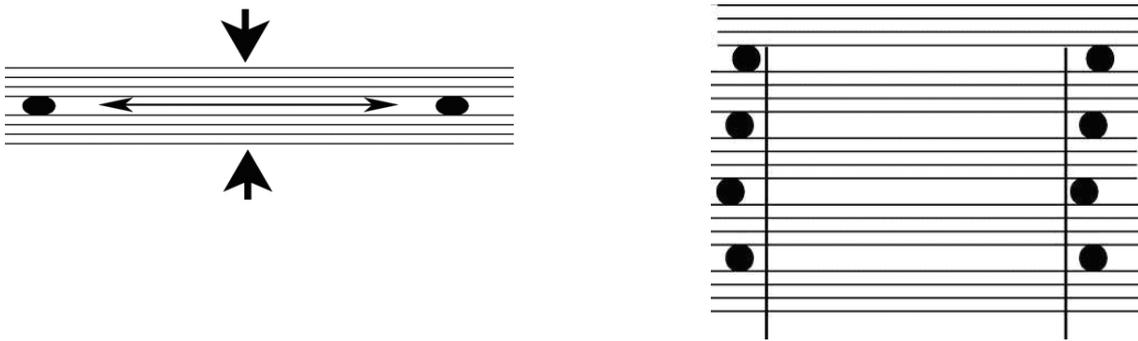


Abb. 4.3; innere Querkontraktionsbehinderung

Die Schnüre können in den Klebeschichten bei mehrlagigen Verbundkonstruktionen übereinander angeordnet werden, Abb. 4.3 rechts. Wegen des Kontaktes der Schnüre mit dem Glas kann auch ein Verschieben der Scheiben auf Grund der Druckvorspannung in der Scheibenlängsachse erschwert werden. So kann auch über die Haftreibung zwischen den Scheiben und den inkompressiblen Bereichen eine dauerhafte Fixierung der Scheiben bzw. ein Schubverbund umgesetzt werden.

Das Gesamttragverhalten hängt nun nicht mehr von der Viskoelastizität des Kunststoffes, sondern von der Zugfestigkeit der Schnüre und der Druckfestigkeit des Glases sowie den verwendeten Vorspannkonstruktionen zur Aufbringung des Drucks ab. Für die Schnüre können bekannte Materialien wie z.B. Weichmetalle, Kohlefasern oder Nylon zum Einsatz kommen, deren Reißfestigkeiten bzw. Versagensmechanismen hinreichend bekannt und kalkulierbar sind. Ziel der nun folgenden Studien ist es, das Tragverhalten der KS-Glaskonstruktion grundsätzlich zu beschreiben und unterschiedliche Kantenkonstruktionen zu erörtern.

4.B Tragverhalten von zweiseitig gelagerten KS-Platten

In einem ersten Schritt wurden im Fachbereich Architektur, Design, Kunst am Lehrgebiet für Tragwerklehre der Bergischen Universität Wuppertal Konstruktionsvarianten sowohl experimentell als auch mit der FE-Methode untersucht. Die Geometrie der Prüfkörper wurde in Anlehnung an die DIN 1288-3 (72) festgelegt, vgl. 2.C.5. Hierzu wurden zwei Konstruktionsvarianten ausgewählt und an die gegebenen technischen Möglichkeiten angeglichen.

Neben der Dicke und der Spannweite der Glasscheiben entscheidet ihr Abstand über die Biegesteifigkeit der Glaskonstruktion. Da zum einen zur Sicherstellung der Resttragfähigkeit 0,38 mm bzw. 0,76 mm starke Folien und zum anderen Gießharze in Schichtstärken von mehreren Millimetern zum Einsatz kommen, müssen diese Beabstandungen konstruktiv abgebildet werden. Hierzu werden, vor allem im Bereich der Lasteinleitung, zwischen die Glasscheiben nicht fixierte Polymethylmethacrylatstreifen in 2mm und 4mm Dicke eingelegt. Polymethylmethacrylat (Kurzzeichen PMMA) ist auch unter den Handelsnamen „Plexiglas“ (Fa. Röhm) oder auch Acrylglas bekannt. Es handelt sich dabei um einen synthetischen, glasähnlichen thermoplastischen Kunststoff mit ca. 50 Prozent geringerer Wichte als Mineralglas (ca. 12 KN/m³). Gemessen wurde jedoch eine Wichte von 10.5 KN/m³. Das E-Modul wird mit 270 bis 320 KN/cm² und die Querkontraktionszahl wird zwischen $\mu = 0,37$ bis 0,43 angegeben (73). Für die eingelegten Platten wurde ein E-Modul von 400 KN/cm² gemessen und eine Poissonzahl von 0.4 angenommen.

4.B.1 PRÜFKÖRPER

Zur Erfassung des grundsätzlichen Tragverhaltens wurde zunächst eine geklebte Variante KS1 konstruiert. Hierzu wurden quer zur Längsrichtung KS-Elemente aus 25 mm x 500 mm x 4 mm Floatglas mit einem Randabstand von 5mm eingeklebt.

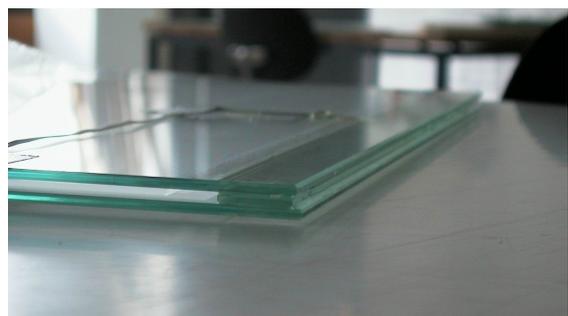
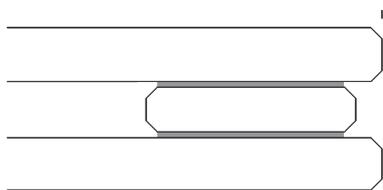


Abb. 4.4; Prüfkörper KS1

Zur Verklebung wurde der Strukturklebstoff (Loctite 3421 A&B) der Firma Hysol (heute wieder Bayer) verwendet. Es handelt sich dabei um einen zweikomponentigen Epoxidharzklebstoff, der unter anderem im Flugzeugbau Verwendung findet und auf Grund seiner Zusammensetzung über ein geringes Kriechverhalten und über eine hervorragende Haftung auf Glasflächen verfügt.

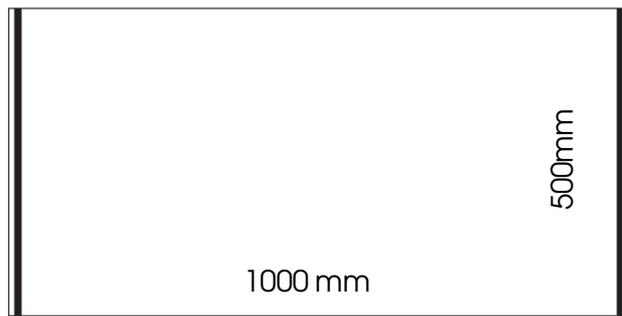


Abb. 4.5; KS-Elemente in KS1

Ein zweiter Prüfkörper KS2 wurde als Reibverbindung ausgeführt und mit je 5 Bohrungen zu $D = 8 \text{ mm}$ im Abstand von 70 mm , $4 \times 90 \text{ mm}$ und 70 mm , quer zur Längsrichtung mit 30 mm Randabstand versehen, Abb. 4.7. Das KS-Element wurde mit den gleichen Bohrungen versehen und besteht aus Aluminium mit $25 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$.

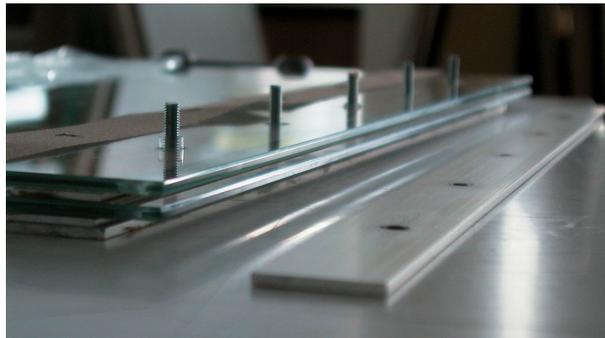
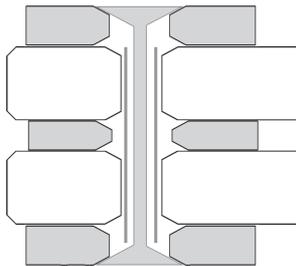


Abb. 4.6; Prüfkörper KS2

Alle Bohrungen wurden mit Senkung ausgeführt. Eine durch die Bohrungen geführte Kunststoffhülse dient als „weiche Trennlage“ zwischen Glas und Schraube. Außen werden Aluminiumstreifen ($3 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$) als „Lastverteiler“ verwendet. Als Trennlage zwischen Aluminium und Glas dient 120g Papier.

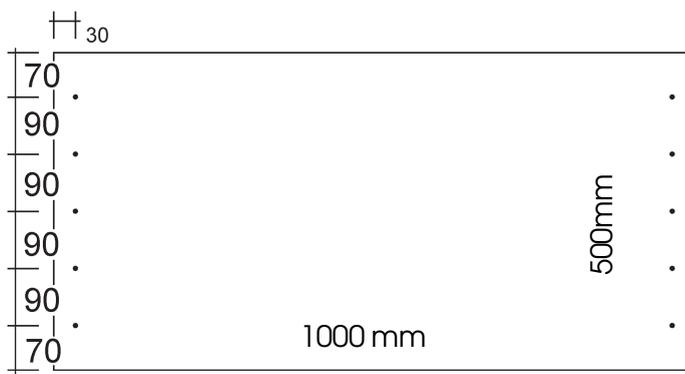


Abb. 4.7; KS-Elemente in KS2

Das Konzept der Konstruktion entspricht den im Stahlbau verwendeten Reibverbindungen und nutzt die Haftreibung zwischen den sich berührenden Bauteilen aus, siehe 3. Die Größe der Haftreibungskraft ist von dem Produkt, der auf die Kontaktfläche wirkenden Druckkraft und der Haftreibungszahl der sich berührenden Bauteile abhängig. Entscheidend für die Wirksamkeit der verschraubten KS-Gläser ist also die Größe der Haftreibungszahl bzw. der Druckkraft. Die Haftreibungszahl muss in der Regel experimentell bestimmt werden. Eine durch Verschraubung eingebrachte Druckkraft kann demnach das Verschieben der Glasscheibenkanten behindern.

4.B.2 BERECHNUNGSMODELL FÜR DIE PRÜFKÖRPER

Da die Durchbiegungen der zweiseitig gelagerten Platten klein gehalten werden und ausschließlich der lineare Biegebereich untersucht werden soll, können die Berechnungen mit der linearen Berechnungsmethode durchgeführt werden. Die Last wird als Linienlast in Global-Z beaufschlagt, Abb. 4.8 links. Die Platte hat eine Spannweite zwischen den Auflagern von 950 mm und somit einen Glasüberstand von 2.5 cm je Auflager. Die Auflagerbedingungen wurden für die Scheiben in Z-Richtung unverschieblich und am Mittelknoten der Plattenfläche horizontal in X- und in Y-Richtung gehalten und um die lokale Achse Z gegen Rotation gesichert, Abb. 4.8 rechts.

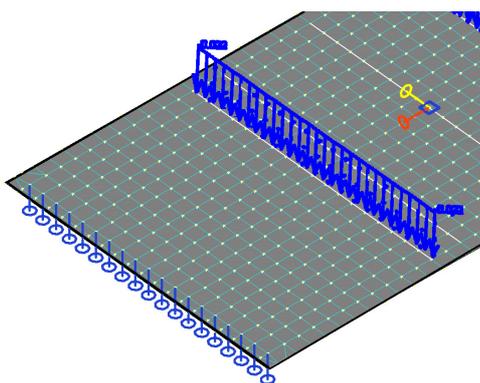
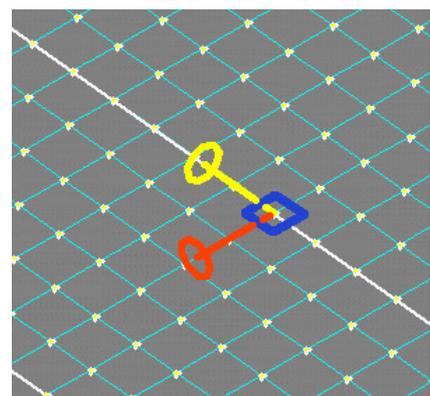


Abb. 4.8; Lastbild



Lagerungsbedingung

KS1 hat eine Zwischenlage von 4mm Plexiglas und KS2 hat eine Zwischenlage von 2mm Plexiglas. Damit haben die Plattenachsen einen Abstand von 8mm bzw. 6mm. In den Schwerachsen der Plattenelemente werden orthogonal

stabförmige Elemente als „Beabstandungselemente“ angeschlossen, vgl. 3.E. Die Stablänge entspricht dem Achsenabstand der Platten. Um das Tragverhalten der Plexiglasscheiben ebenfalls zu berücksichtigen, wurden in die Schwerachse des Scheibenstapels die Plexiglasplatten mit ihrer jeweiligen Schichtstärke eingefügt, Abb. 4.9 links.

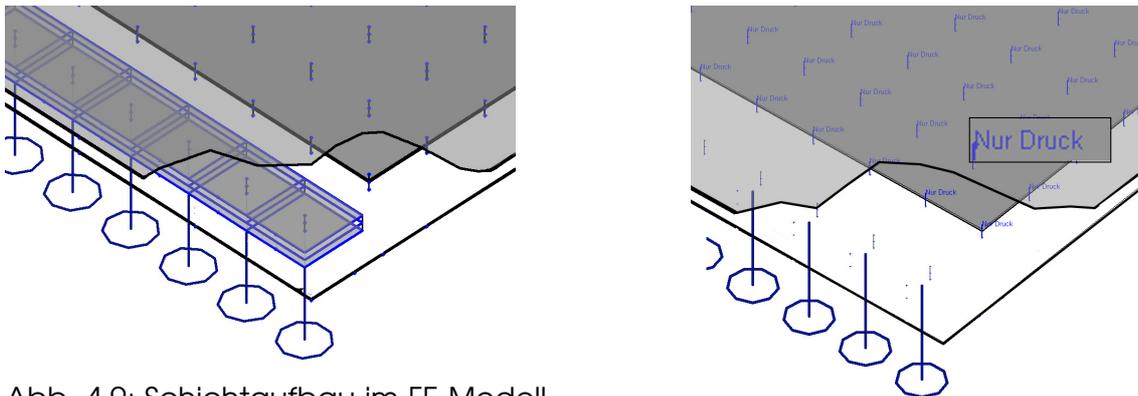


Abb. 4.9; Schichtaufbau im FE-Modell

Die Kopplungselemente (KS-Elemente) im Randbereich werden ebenfalls aus Abstandsstäben modelliert. Sie werden in ihrer Dimension dem eingeklebten Glasstreifen entsprechend festgelegt und biegesteif mit den Plattenelementen verbunden. Die sich eventuell daraus ergebenden Spannungsspitzen am Knoten zwischen Element und Platte werden hier nicht betrachtet, weil das Gesamttragverhalten von Interesse für die Charakteristik bzw. Dimension der Spannung an bestimmten Punkten ist, siehe Kapitel 4.B.4. Die Netzdichte orientiert sich an den vorherigen FE-Modellen. Sodass das Regelelement in der Scheibenfläche mit 2,5 cm Kantenlänge aus Kapitel 3.D.1 übernommen wurde. Daraus ergibt sich für die gewählte Scheibe mit 500 * 1000 mm eine Netzdichte von 20 * 40 Elementen, also insgesamt 800 Elemente. Das KS-Element der KS1 Scheibe hat einen Scheibeneinstand von 5 mm und eine Breite von 25 mm. Demnach liegt die Schwerachse des Glasstreifens bei 17,5 mm. Zur Modellierung der KS1-Elementstäbchen wurde eine zusätzliche Knotenreihe in das Netz eingefügt, Abb. 4.9 rechts. Die Mittelpunkte der Bohrungen haben einen Glaseinstand von 30 mm. Zur Vereinfachung wurden die KS2-Elemente an den Knoten, welche auch die Achse der Auflager darstellen, angeschlossen, Abb. 4.10 links.

Da die Prüfscheiben nicht miteinander verbunden sind, sondern lediglich lose aufeinander liegen, müssen die Stäbe so definiert werden, dass sie nur Druckkräfte übertragen können. Abb. 4.9 rechts.“ Esa-Prima Win bietet die Möglichkeit



KS2

KS1

Abb. 4.10; Diskretisierung der FE-Modelle

solche Stäbe mittels eines Algorithmus zu berechnen, welcher dazu gedacht ist, das Stabilitätsversagen z.B. von Druckstützen oder von großen Strukturen zu erfassen. Das Verfahren ist iterativ und konvergiert zu der exakten Lösung. In jedem Iterationsschritt werden alle nichtlinearen Stäbe gleichzeitig getestet und bearbeitet. Um iterative Berechnungen durchzuführen, muss ein entsprechender Algorithmus gewählt werden. Der hier verwendete Algorithmus basiert auf der exakten Lösung von Timoshenko für Stäbe mit bekannter Normalkraft. Es ist eine Berechnung nach der Theorie zweiter Ordnung unter der Voraussetzung des Gleichgewichts an der verformten Struktur. Außerdem werden kleine Verformungen und Verdrehungen und kleine Dehnungen zu Grunde gelegt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass eine Unterteilung des Stabes in Netzelemente nicht notwendig ist. Ist die Normalkraft niedriger als die kritische Normalkraft, so ist die Lösung stabil. Der Algorithmus ist sehr effizient, da er nur zwei Iterationsschritte braucht. Der erste Iterationsschritt ist notwendig für die Berechnung der Normalkraft und im zweiten Schritt werden diese Normalkräfte in Timoshenkos exakter Lösung verwendet (aus 74)., Dieser Algorithmus ist für die Glasplatten geeignet, da der betrachtete Verformungsbereich klein ist und sich die Normalkräfte in den Abstandsstäben nicht wesentlich durch die Verformung der Struktur ändern.

4.B.3 CHARAKTERISTISCHES TRAGVERHALTEN ZWEISEITIG GELAGERTER KS-PLATTEN

Zum Vergleich wurde eine 8 mm Einzelscheibe und ein Glaslaminat aus zwei Einzelscheiben aus dem FE- Modell von KS1 modelliert. D.h., dass alle Abstandselemente ausschließlich Druck übertragen, sodass das Tragverhalten einem Laminat ohne Schubverbund entspricht. Das berechnete Last-Verformungsverhalten ist in Abb. 4.11 graphisch aufgetragen.

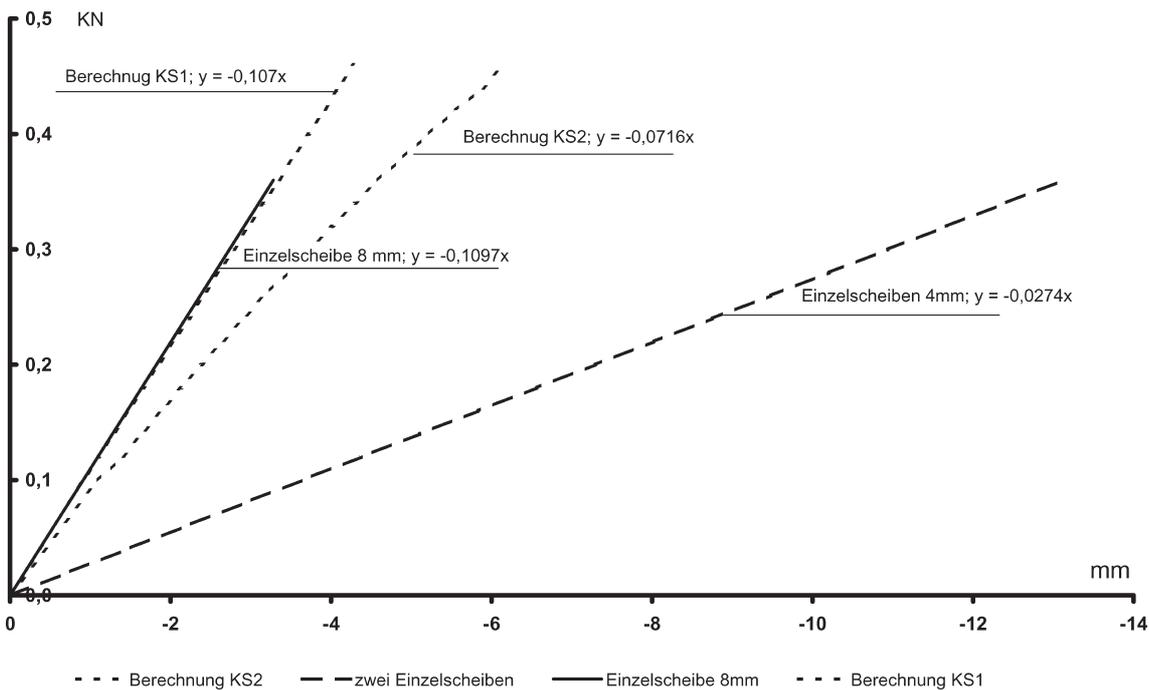


Abb. 4.11; Berechnungsergebnisse von KS1 und KS2 im Vergleich

Der Steifigkeitsgradient (Steigung) der 8mm Scheibe ist erwartungsgemäß exakt vier mal so hoch wie der Gradient der Einzelscheibe aus 2×4 mm Float mit 4 mm Beabstandung. Die numerische Steifigkeit der KS1-Scheibe erreicht ca. 97,5 % der Steifigkeit der monolithischen Scheibe mit 8mm. Für diesen Vergleich kann also festgehalten werden, dass die theoretische Steifigkeit der KS1-Scheibe aus 2×4 mm Floatglas mit 4 mm Zwischenschicht etwa der Steifigkeit einer vergleichbaren monolithischen Scheibe ohne Zwischenschicht entspricht. Die numerische Steifigkeit der KS2-Scheibe erreicht noch ca. 65 % der Steifigkeit der monolithischen Scheibe mit 8 mm Dicke. Wie zu erwarten war, ist die Dicke der Zwischenschichten von großer Bedeutung für die Steifigkeit der Verbundkonstruktionen. Um die Effektivität der KS-Scheibe abschätzen zu können und die Einwirkung aus den Plexiglaszwischenschichten zu eliminieren, wurde aus dem KS1-Modell eine KS0-Scheibe modelliert, welche der 8 mm Scheibe auch in der Dicke entspricht. Diese weist keine Zwischenschicht auf, sodass die Scheiben mit einem Abstand der Schwerachsen von 4 mm direkt aufeinander aufliegen.

Abb. 4.12 zeigt, dass die KS0-Scheibe noch 56,6 % der Steifigkeit der monolithischen Scheibe besitzt und 225 % der Steifigkeit eines vergleichbaren Glaslaminates ohne Verbundwirkung aufweist. Bemerkenswert ist auch, dass die gemessenen

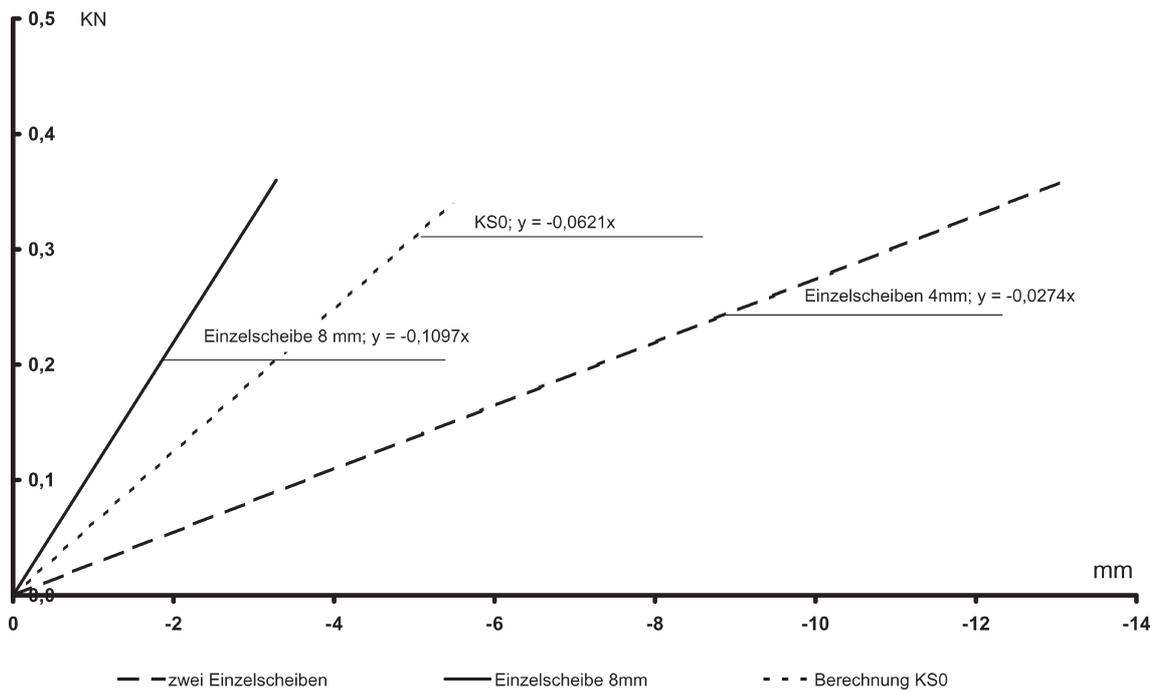
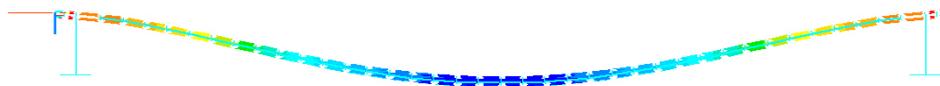
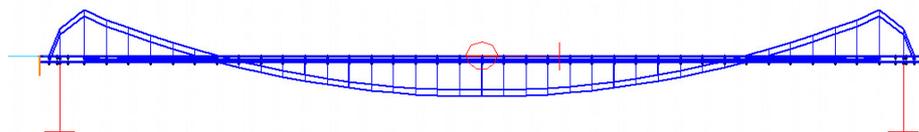


Abb. 4.12; Berechnungsergebnisse von KS0 im Vergleich

Spannungen im Randbereich an der Oberseite der KS-Glasscheibe Zugspannungen sind und in dieser Form weder bei Einzelscheiben noch bei Verbundglasscheiben unter einachsiger Biegung auftreten. Abb. 4.13 oben zeigt eine flügelartige Biegelinie (Flächenlast) und Abb. 4.13 unten die dazugehörige M-Linie der Scheiben. Der Randverbund erzeugt ein Einspannmoment im Randbereich, woraus sich Zugspannungen an der Oberseite der oberen Scheibe im Randbereich ergeben.



KS-Glas charakteristische Flügelform

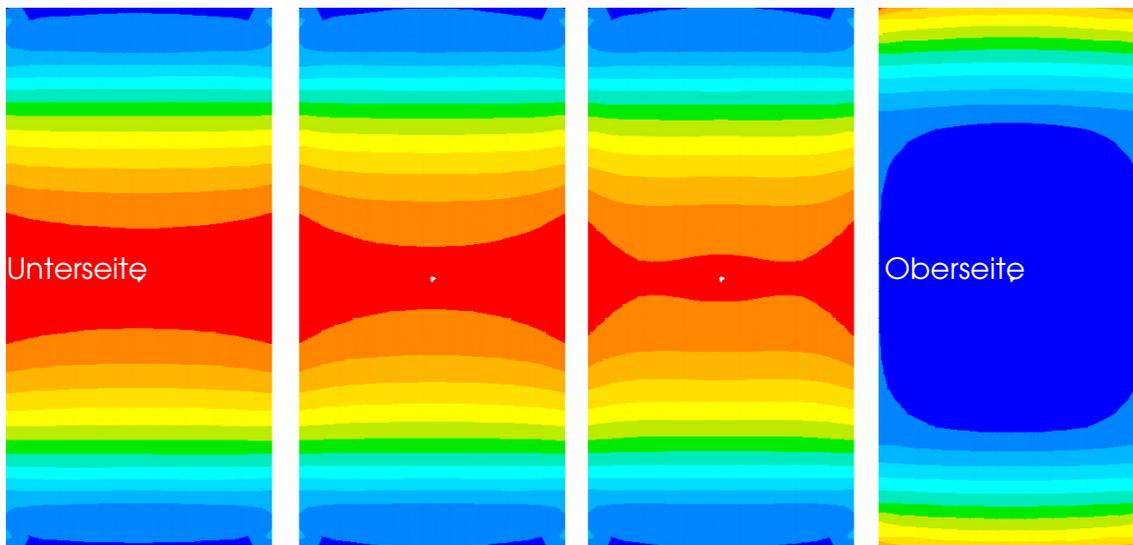


M-Linie der KS-Gläser

Abb. 4.13

Die Spannungsentwicklung, dieser mit einer Flächenlast belasteten KS-Glasscheibe, an der Unterseite einer der unteren Platte, ist in Abb. 4.14 für drei Laststufen I bis III dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass sich die Hauptzugspannungen

mit steigender Durchbiegung, vergleichbar mit monolithischen Scheiben, an den freien Rändern konzentrieren. Im Gegensatz zu Einzelscheiben formieren sich die größten Spannungen auf der Oberseite der unteren Platte in den Ecken, Abb. 4.14 d. (rot = größte Hauptzugspannung, blau = gr. Hauptdruckspannung)



I. II. III. d.

Abb. 4.14; Spannungsentwicklung in der unteren Scheibe von zweiseitig gelagertem KS-Glas

Der Vergleich der Eck- und Feldspannung bei zunehmender Verformung in Abb. 4.15, macht deutlich, dass bei einer Bemessung die Spannungen in den Eckbereichen ausschlaggebend sind. Die Eckspannung beträgt etwa 120% der Feldspannung. Im Vergleich zu Einzelplatten wird auch die Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearität relevant. Die Spannungen in den Ecken nehmen bei einer nichtlinearen Berechnung etwa 5% höhere Werte an als bei einer linearen Berechnung.

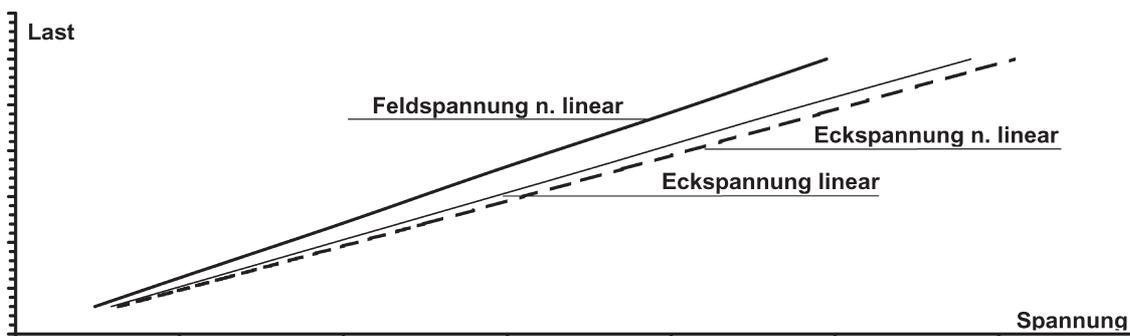


Abb. 4.15; Qualitativer Vergleich der Spannungen im Feld und im Eckbereich

Abb. 4.16 zeigt ergänzend dazu die Entwicklung der Feld- und Randdurchbiegung der Platte. Erwartungsgemäß erfährt die Platte am Rand die größten Verformungen. Abb. 4.16 zeigt die Rand und Feldverformung (nichtlineare Berechnung). Daraus wird ersichtlich, dass die Verformungsdifferenzen bei einer Bemessung irrelevant sind.

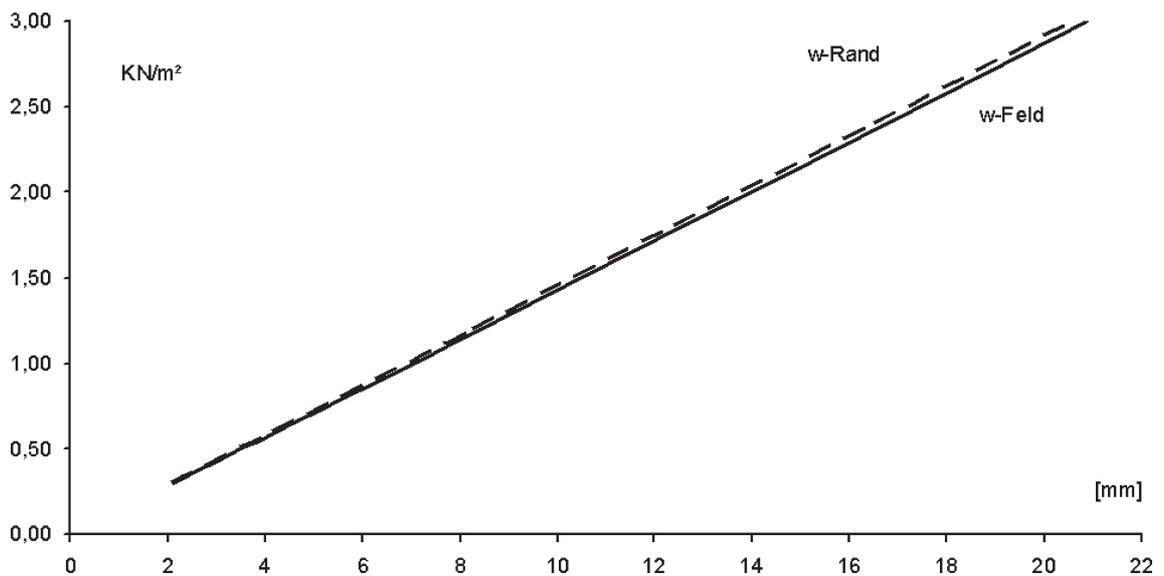


Abb. 4.16; Rand- und Feldverformung im Vergleich

In Abb. 4.17 ist darüber hinaus die Rand und Feldverformung in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis a/b dargestellt. Schmale Platten verformen sich etwas mehr als breite. Das Verhältnis von Rand- zur Feldverformung wird dadurch jedoch nur unwesentlich beeinflusst.

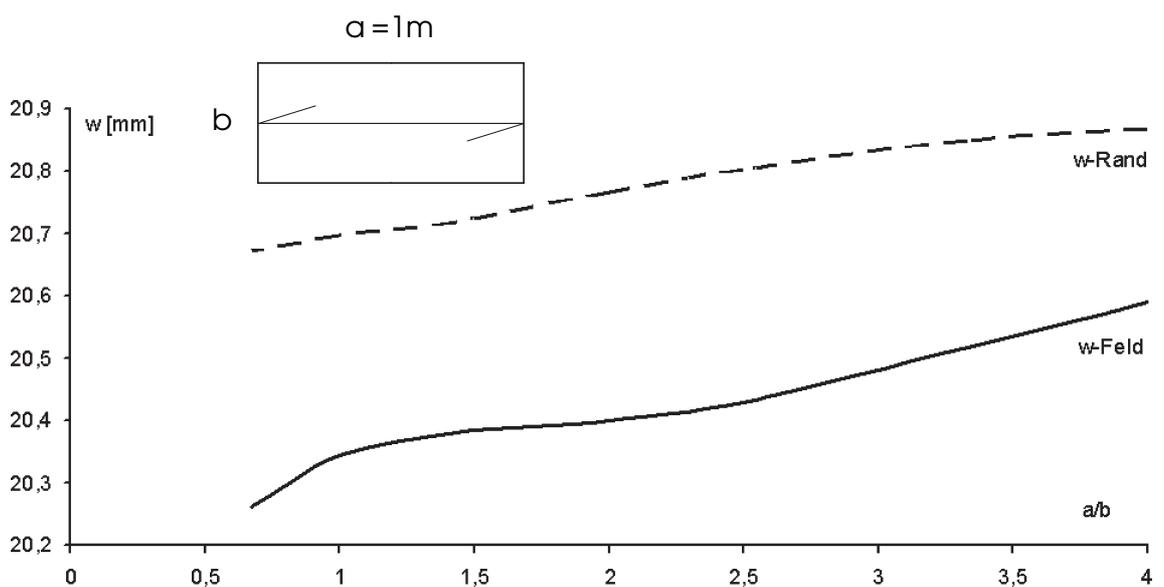


Abb. 4.17; Rand- und Feldverformung bei differierendem Seitenverhältnis

Die Glasscheiben werden in Anlehnung an die DIN1288-3 geprüft, siehe 2.C.5 und haben die Abmessungen 500 mm x 1000 mm x 4 mm, aus Floatglas mit gebrochenen und polierten Kanten. Abweichend von der Norm wird die Lasteinleitung zum Auflager hin um je 10 cm auf einen Abstand von 40 cm verschoben.

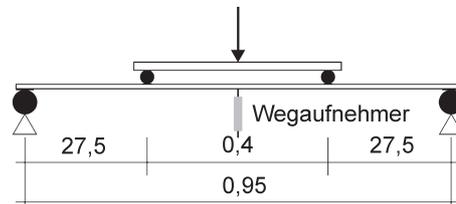


Abb. 4.18; Vierschneiden Versuchsaufbau

Durch diese Maßnahme wird die Durchbiegung verringert und der Schub in den Randkopplungen erhöht. In Abb. 4.18 wird das statische System der Versuchsdurchführung dargestellt. Gemessen wird die Maschinenkraft, sowie im Plattenzentrum unterhalb der Konstruktion die Durchbiegung der Scheibe mittels eines Potentiometers (Wegaufnehmer). Die Prüfungen an KS1 und KS2 wurden im Institut für konstruktiven Ingenieurbau in Wuppertal durchgeführt. Abb. 4.19 zeigt die Prüfeinrichtung mit eingelegtem Prüfling. Auf allen Probekörpern wurde auf der Unter- und Oberseite selbsthaftende Frischhaltefolie angebracht, um im Bruchfall die Splitter aufzufangen. Die Scheiben wurden mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0.5mm/min belastet. Als Trennlage zwischen Glas und den lastübertragenden Stahlrollen diente Graupappe mit 2 mm Stärke. Auf den Probekörper KS1 wurden 5 lineare DMS (Dehnungsmesstreifen) appliziert, Abb. 4.20. Die DMS dienen zur Aufnahme der Dehnung in der Glasoberfläche und wurden zur Ermittlung des Spannungsquerschnittes im Scheibenzentrum angeordnet. Sie befinden sich jeweils auf der Scheibenober- und Scheibenunterseite von oben nach unten nummeriert.

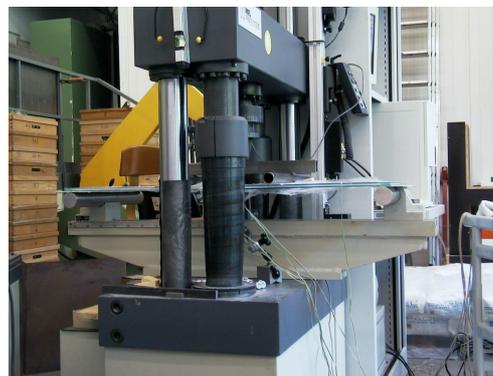


Abb. 4.19; Prüfeinrichtung

Es wurde ein DMS auf der Oberseite im mittleren Randbereich appliziert, um den KS-Glas typischen Spannungszustand im Randbereich der oberen Glasscheibe zu erfassen.

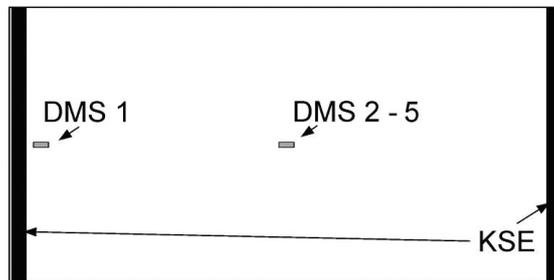


Abb. 4.20; Platzierung der Dehnungsmessstreifen auf KS1

4.B.5 AUSWERTUNG DER EXPERIMENTE

Nach anfänglicher Justierung und Setzung der Versuchsaufbauten konnte für KS1 eine Übereinstimmung des Lastverformungsverhaltens und der Spannungsverteilung mit dem berechneten Verhalten festgestellt werden. Zunächst wird die Dehnungsentwicklung in Folge der stufenweise eingepprägten Belastung gegen die Zeit graphisch aufgetragen. Zwischen jeder Belastungsphase wurde eine Ruhepause von etwa 10 Minuten eingehalten, Abb. 4.21.

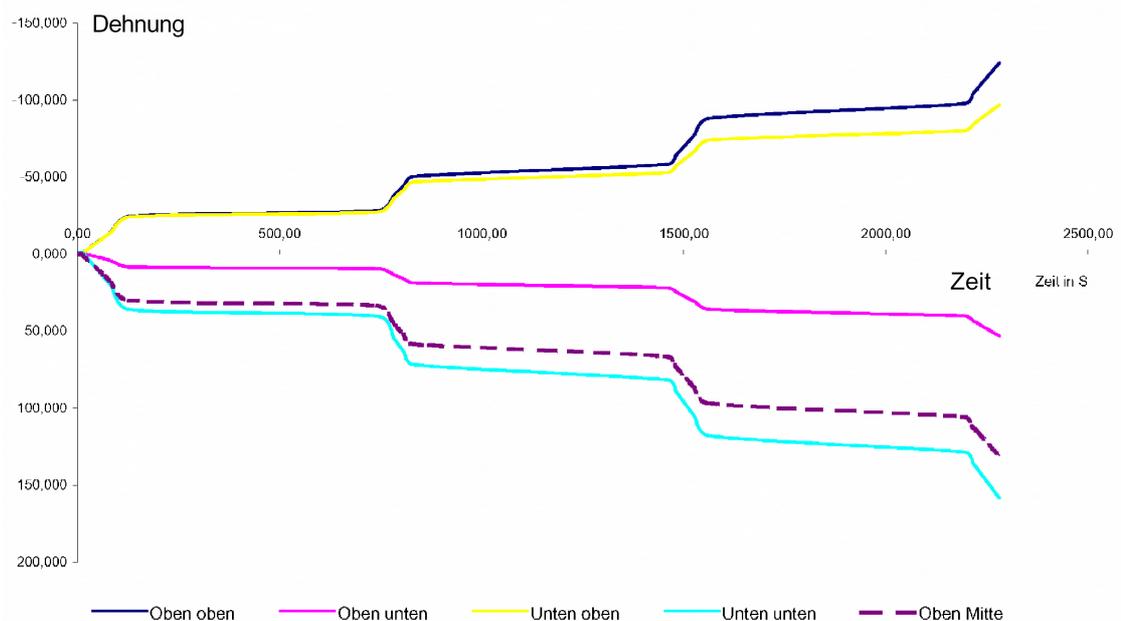


Abb. 4.21; Dehnungsverhalten während der Belastungs- und Ruhephasen

In Abb. 4.22 wird das numerisch ermittelte Lastverformungsverhalten zweier Einzelscheiben mit 2 * 4 mm Floatglas mit 4 mm Plexiglas (6 mm Achsabstand) sowie das einer monolithischen Scheibe mit 8 mm Floatglas und einer mit 12 mm Floatglas (gleiche Gesamtdicke) dem Tragverhalten von KS1 gegenübergestellt.

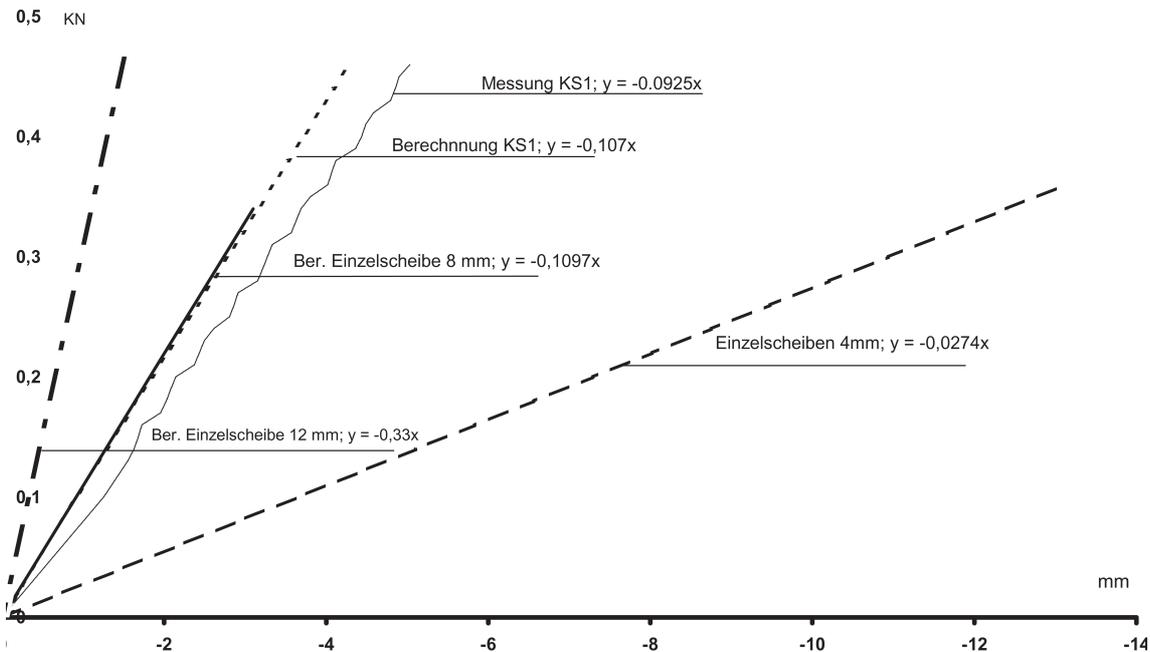


Abb. 4.22; Berechnungs- und Messergebnisse zu KS1 im Vergleich

Der Prüfkörper KS1 erreicht ca. 84 % der Steifigkeit der monolithischen Einzelscheibe aus 8 mm Floatglas und etwa 86,4 % der Steifigkeit welche anhand der FE-Berechnung ermittelt wurde. Der Prüfkörper erreicht jedoch nur 32 % der Steifigkeit einer berechneten monolithischen Scheibe mit 12 mm Dicke, d.h. der gleichen Gesamtdicke. Die durchgeführten Dehnungsmessungen zeigen, dass der Spannungszustand im Zentrum der Scheiben im Wesentlichen dem einer Verbundglas-scheibe ähnelt.

Im Folgenden werden die numerisch ermittelten Werte, Abb. 4.23 und 4.24, den Messergebnissen gegenübergestellt. Auffällig ist, dass DMS3 und DMS4 eine deutlich abweichende Charakteristik aufweisen. Abgesehen von den relativ großen Abweichungen zwischen den Ergebnissen im Inneren des Verbundes, stellen sich an den Oberflächen ähnliche Spannungsgrößen und insbesondere im Auflagerbereich an der Oberseite der oberen Scheibe die charakteristische Zugspannung (DMS1), wie im FE-Modell vorhergesagt, ein.

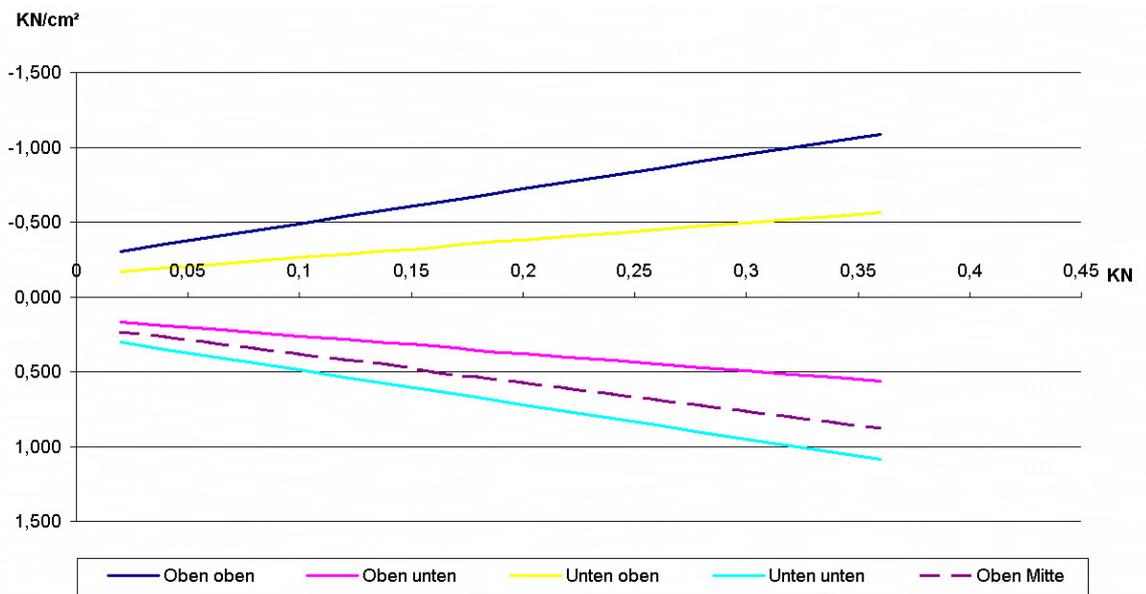


Abb. 4.23; Spannungsentwicklung in KS1 (berechnet)

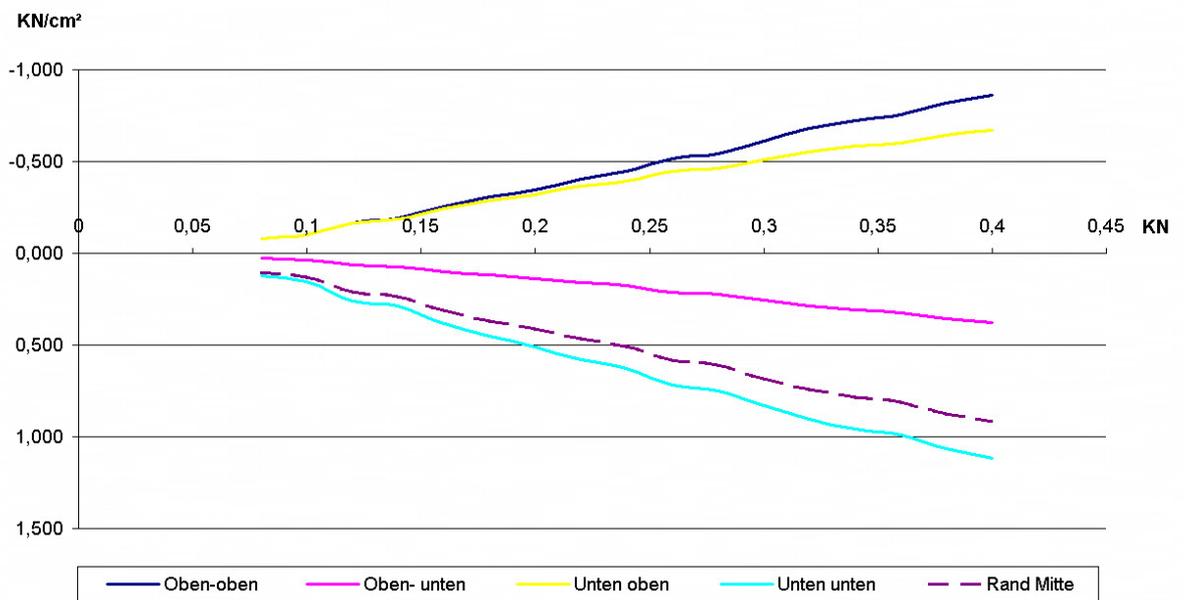


Abb. 4.24; Spannungsentwicklung in KS1 (gemessen)

Zur Veranschaulichung wurden die aus den Dehnungsmessungen und Berechnungen gewonnenen Spannungen als Spannungsquerschnitte aufgezeichnet und graphisch gegenübergestellt.

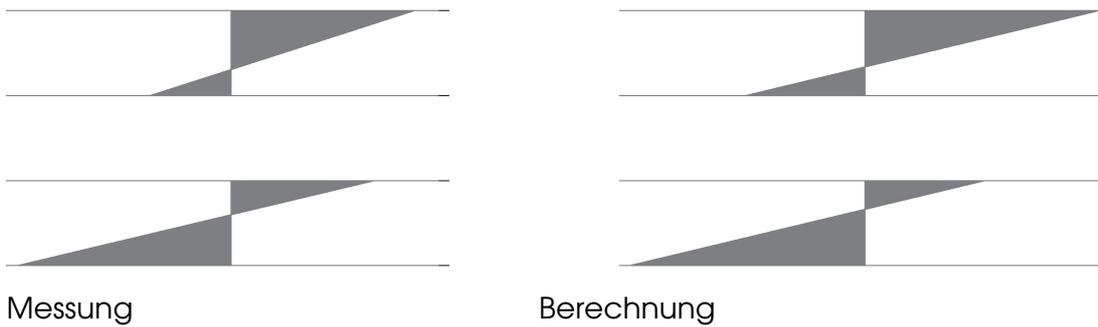


Abb. 4.25; Spannungsquerschnitt von KS1 in Feldmitte

Die experimentellen und rechnerischen Untersuchungen zeigen sehr deutlich, dass der Kantenschubverbund positive Auswirkungen auf das Verformungs- bzw. Tragverhalten hat. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen von KS1 zeigt einen ähnlichen Spannungsquerschnitt, wie im FE-Modell vorhergesagt. Es wird deutlich, dass das KS-Element, wie vermutet, eine deutliche Verbundwirkung ausschließlich über die Randkopplung erzeugt.

Eine Messung hat keine allgemeingültige Relevanz. Die gemessenen Werte weichen von den berechneten Werten ab, wobei sie jedoch eine tendenzielle Übereinstimmung mit dem Berechnungsmodell aufweisen. Die Ergebnisse sind somit ausreichend genau, um einen ersten Einblick in die grundsätzliche Funktionsweise der KS-Konstruktion aufzuzeigen. Die Gründe für die Differenzen zwischen Messung und Berechnung der Spannungen und insbesondere der Verformungen können, neben Messfehlern der DMS bzw. der DMS üblichen Ungenauigkeit und einem eventuellen Fließverhalten des Klebstoffs, auch die Schichtdicken der verwendeten Glasplatten sein. Zukünftig sollten Konstruktionen untersucht werden, ohne eingelegte und eventuell störende Zwischenschichten. Außerdem können zur Optimierung des Berechnungsmodells auch Last-Verformungstests an den Einzelscheiben von Interesse sein, bevor sie zu KS-Glas zusammengefügt werden. Im Gegensatz zum Verhalten der geklebten Variante ist das Verformungsverhalten der geschraubten KS2-Scheibe durch Wegsprünge gekennzeichnet. Das lässt darauf schließen, dass die eingebrachte Druckkraft nicht zur Lagesicherung der Glaskanten ausreicht und die Scheiben der Schubkraft durch ruckhaftes Gleiten nachgeben können. Das Lastverformungsverhalten wird äquivalent zur Auswertung von KS1 graphisch in Abb. 4.26 dargestellt.

Die relativ große Verformung zeigt die geringe Effizienz der gewählten Konstruktionsweise, was durch ein Versagen der Scheibe, ausgehend von einem

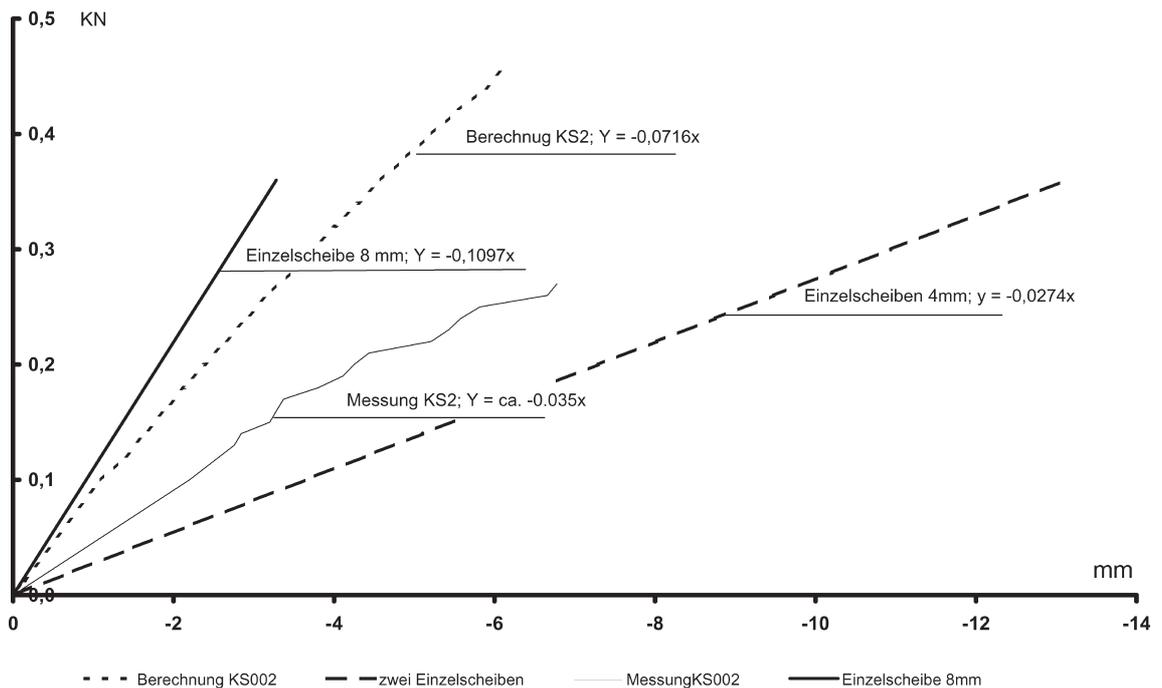


Abb. 4.26; Berechnungs- und Messergebnisse zu KS2 im Vergleich

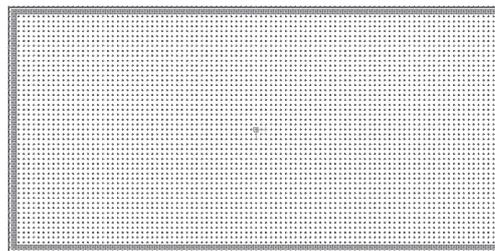
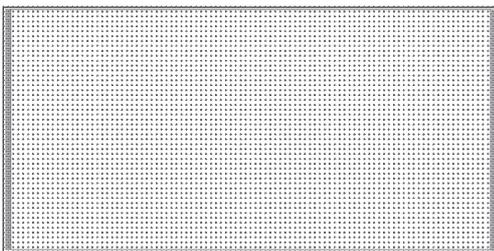
Bohrloch während einer Belastungspause, bestätigt wird. Der konstruktive Aufwand, funktionierende Reibverbindungen als Kantenschubverbindung unter Verwendung von Bohrlöchern zu entwickeln, erscheint im Rahmen dieser Untersuchungen als zu groß und wird deshalb nicht mehr weiterverfolgt.

Kleben erscheint dagegen aus jetziger Sicht die sinnvollste Methode des Fügens zu sein, welche Aufwand und Nutzen rechtfertigen kann. Das Bohren ist extrem aufwändig und teuer. Kleben dagegen kann industriell hoch rationell umgesetzt werden und bildet deshalb die Grundlage für die später in dieser Arbeit untersuchten Varianten von KS-Glaskonstruktionen.

4.B.6 ZWEISEITIGE GELAGERTE KS-PLATTEN MIT UMLAUFENDER RANDKOPPLUNG

Bisher wurden die zweiseitig gelagerten Scheiben ausschließlich mit Kopplungselementen über den Auflagern betrachtet. Ein umlaufendes KS-Element bringt eine zusätzliche Steifigkeit des Randes in die Platte und muss einen Einfluss auf die Rand- und Feldverformung haben. Deshalb wird auch eine Betrachtung von zweiseitig gelagerten Scheiben mit umlaufenden KS-Elementen interessant. Hierzu wird auf Grundlage der vorangegangenen Studie ein Modell mit 2 * 4 mm Floatglas und einem Abstand der Schwerachsen von 4 mm gebildet. Laststufen, Material-

parameter, Geometrie, Netzdichte, Abstandsstäbe und Lagerung entsprechen dem Basismodell für eine zweiseitig gelagerte Verbundglasscheibe. Das KS-Element wird wie aus Aluminium mit 25 * 25 mm, also dem Regelement der Netzaufteilung entsprechend, gebildet. Diese FE-Studie wird ebenfalls mit der nicht linearen Berechnungsmethode durchgeführt. Zum direkten Vergleich wird zunächst je ein FE-Modell mit umlaufenden und ein FE-Modell mit ausschließlich über dem Auflager eingebundenen KS-Elementen diskretisiert, Abb. 4.27.



KSE ausschließlich über den Auflagern

KSE umlaufend

Abb. 4.27

In Abb. 4.28 ist das Last-Verformungsverhalten der FE-Berechnungen gegenübergestellt. Ein umlaufendes KS-Element kann demnach die Steifigkeit eines Laminates um etwa 25 % erhöhen.

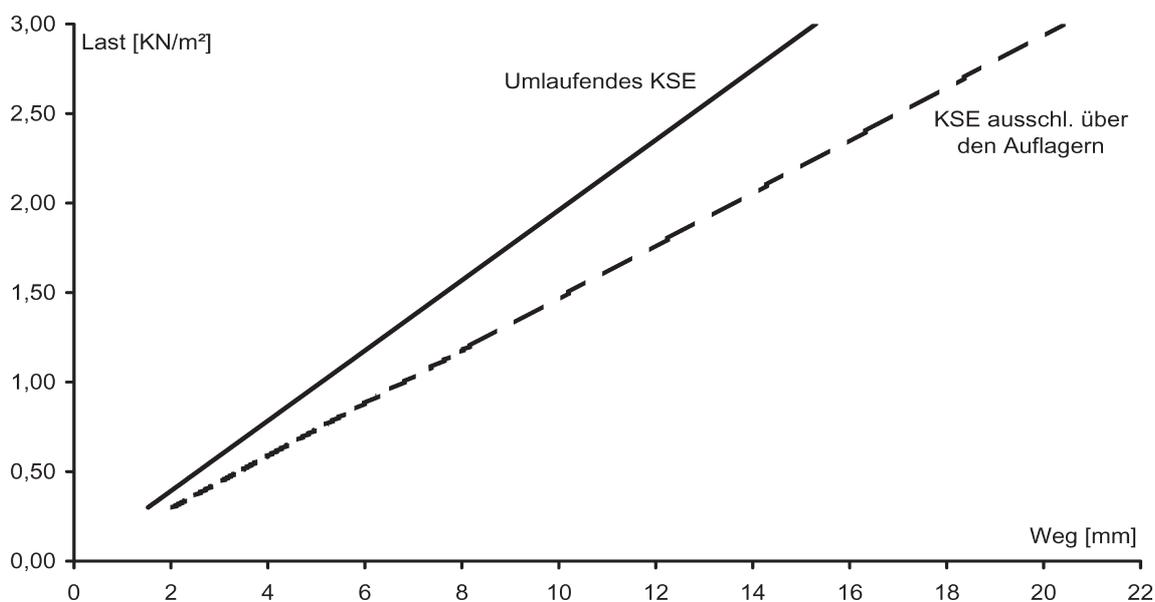
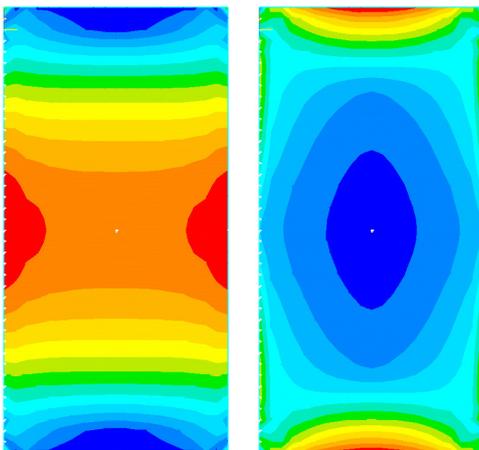


Abb. 4.28, Verformungsvergleich

An der Unterseite der KS-Platte mit umlaufendem Element, Abb. 4.29 a, konzentrieren sich die Spannungen, vergleichbar mit herkömmlichen Platten, an den

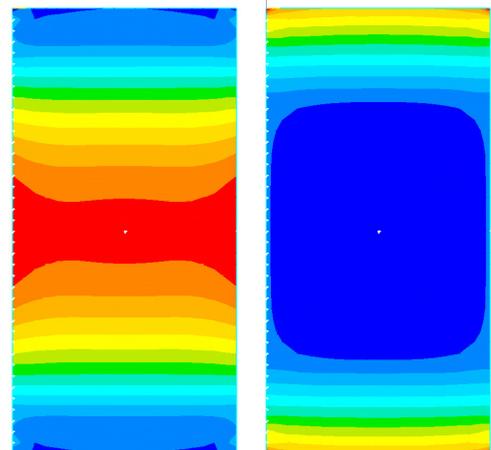
freien Rändern. Deutlich erkennbar ist, dass sich die Hauptzugspannungen auf der Oberseite, b, nicht wie in Platten mit zweiseitigem KS-Element in den Ecken konzentrieren, d, sondern am Rand der kurzen Seite. Die größeren Spannungen treten bei diesen Platten nicht an den Ecken, sondern an den freien Rändern auf. Das Spannungsniveau in Platten mit umlaufendem KS-Element, ist deutlich geringer als in Platten mit zweiseitig eingefügtem Element.

umlaufendes KSE



a, Unterseite b, Oberseite

KSE ausschl. über den Auflagern



c, Unterseite d, Oberseite

Abb. 4.29; Spannungsvergleich mit unterschiedlichen KSE-Anordnungen bei 2 KN/m² Belastung.

Betrachtet man nun das Verformungsverhalten des Randes und des Feldes, Abb. 4.30, in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis, ergibt sich dadurch eine deutliche Beeinflussung.

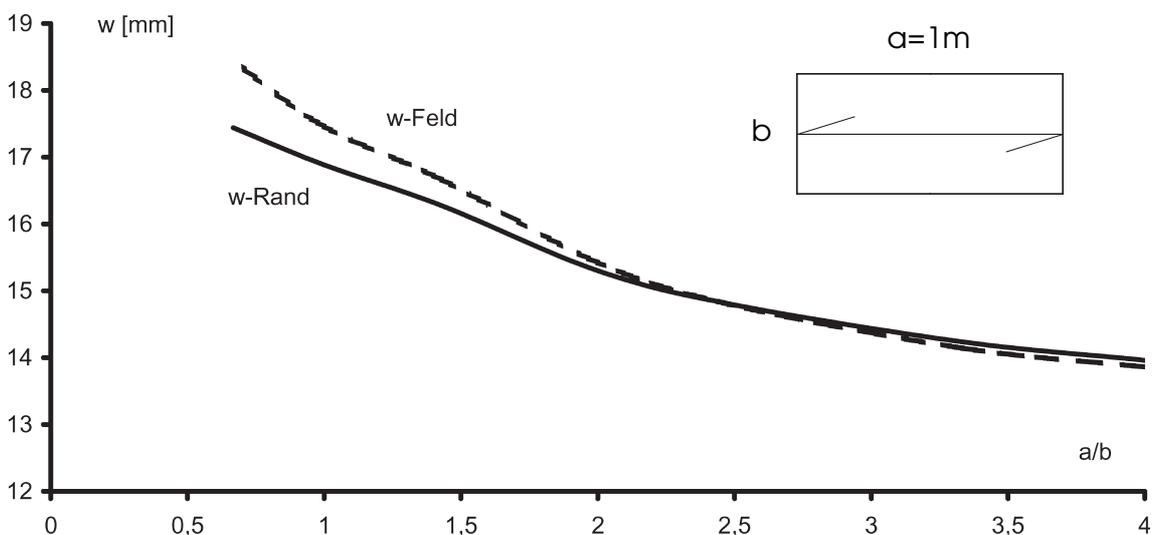


Abb. 4.30; Entwicklung der Rand- und Feldverformung bei umlaufendem KSE und bei differierendem Seitenverhältnis

Zum einen ist das Verformungsverhalten von Feld und Rand bis zu einem Verhältnis von etwa 2,5 annähernd gleich, darunter d.h. bei breiteren Platten, erfährt das Feld eine größere Verformung als der Rand. Außerdem wird die Gesamtverformung mit steigendem Seitenverhältnis deutlich geringer. Das ist dadurch zu erklären, dass der Steifigkeitsanteil des „ertüchtigten“ Randes zur Gesamtsteifigkeit der Platte mit wachsendem Seitenverhältnis ansteigt und damit die Gesamtsteifigkeit erhöht wird. Abschließend wird in Abb. 4.31 das charakteristische Verformungsverhalten einer monolithischen Scheibe a. einer KS-Glasscheibe mit zweiseitigem Schubverbund b. dem einer KS-Glasscheibe mit umlaufendem Schubverbund c. unter gleich großer Feldverformung gegenübergestellt.

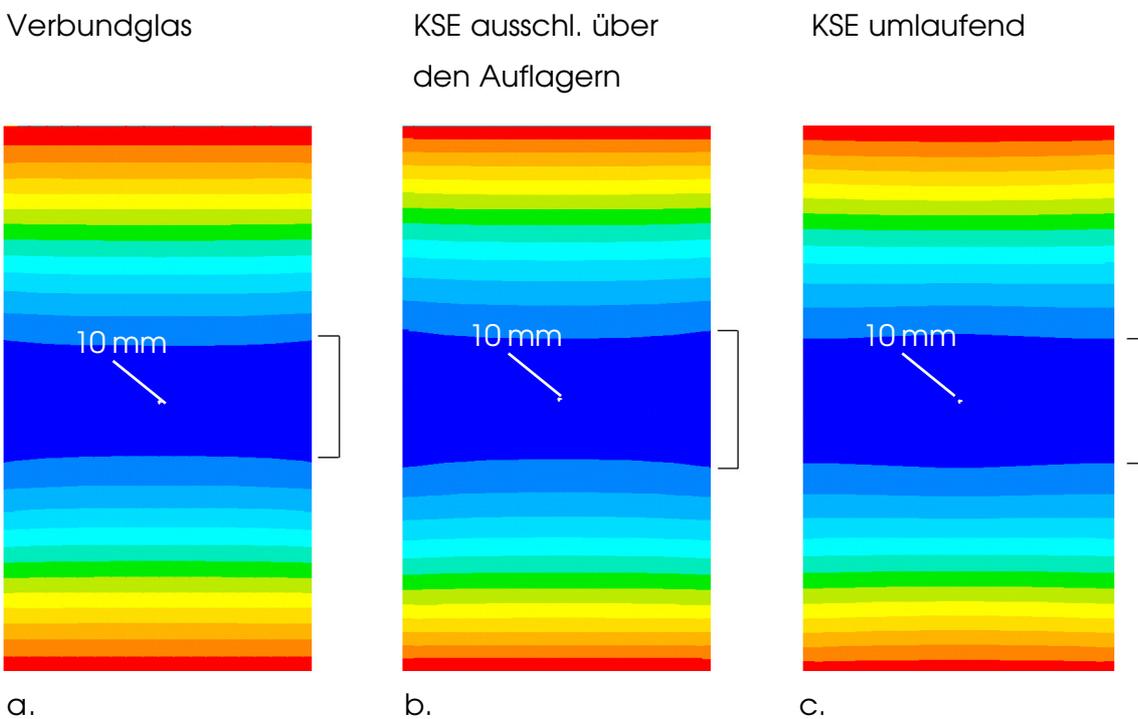


Abb. 4.31; Randverformungsvergleich verschiedener Laminare

4.C Tragverhalten vierseitig gelagerter KS-Platten

Im Folgenden wird das in 3.E.2 entwickelte und durch Vergleichsberechnungen verifizierte Plattenmodell einer Verbundglasscheibe ohne Schubverbund zur Abschätzung des Tragverhaltens vierseitig gelagerter KS-Glasscheiben mit umlaufenden KS-Elementen ausgeformt und berechnet. Zur späteren Analyse der Elemente werden anschließend auch die Kraftgrößen in den KS-Elementen abgeschätzt, um zum einen Aussagen über die Anforderungen an die Klebefuge treffen zu können, und zum anderen Erkenntnisse über die Anforderungen an das

KS-Element selbst zu sammeln. Die KS-Elemente werden zunächst als völlig steif angenommen und in der Länge der Achsabstände definiert. Das entspricht einem Verkleben oder auch Verschweißen der Platten in diesem Bereich.

4.C.1 MODELLBILDUNG

Zur besseren Vergleichbarkeit der Verbundscheibe mit 2 * 5 mm Glasdicke mit einer monolithischen Scheibe aus einer 10 mm Platte wird der Abstand der Schwerachsen auf 5 mm festgelegt. Die KS-Elemente werden biegesteif mit einem Glas-einstand von 25 mm modelliert und sind in ihrer Dimension an den Einzugsbereich bzw. dem Regelement der Platte mit 25 * 25 mm angepasst, Abb. 4.32 links. So kann auf das vorhandene Netz zurückgegriffen werden, ohne zusätzlich Knoten einzufügen. Alle übrigen Abstandsstäbchen werden gelenkig in der lokalen Achse Y und Z an die Platten angeschlossen, Abb. 4.32 rechts. Es wird eine hohe Steifigkeit der Elemente angenommen, damit es nicht zu einer Verschiebung in der lokalen Z-Achse kommen kann, Rigid- Z. Das entspricht im Wesentlichen dem Verhalten der sich berührenden Platten. Im Unterschied zu den Versuchen in 4.B.2 bzw. 4.B.1 kann ein Anhaften der Platten in Z-Richtung bei gleichzeitigem Fehlen jeglichen Schubverbundes angenommen werden, da das dem tatsächlichen Verhalten von Verbundglasscheiben mit thermoplastischen Zwischenschichten entspricht.

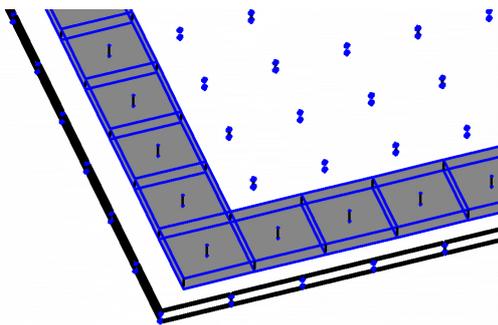
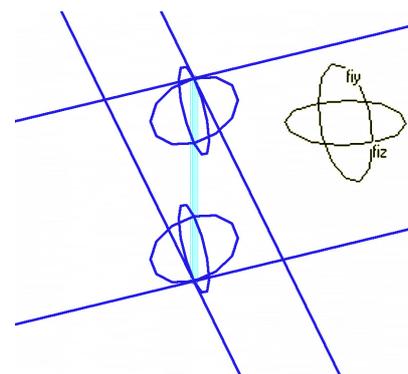


Abb. 4.32; Anordnung der KSE



Lagerung der KSE

In der TRAV (68) wird eine Durchbiegungsbegrenzung von $l/100$ gefordert, was für die 2500 mm*2500 mm Scheibe ein w_{max} von 25 mm bedeutet. Die Belastungen der KS-Glasscheibe werden in Anlehnung an diese Forderung gewählt, sodass eine maximale Durchbiegung von ca. 25 mm nicht überschritten

werden soll. Zur Abschätzung der Belastungsgröße geben die bisherigen Ergebnisse gute Hinweise. Eine monolithische 10 mm Scheibe erreichte in den Vergleichsberechnungen, 3.D.3, bei einer Last von 1,8 KN/m² (24,93mm). Das Glaslaminat (Einzelscheiben) ohne Schubverbund erreichte die zulässige Durchbiegung bereits unter einer Belastung von 0,84 KN/m².

Es ist also im Stande, auf Grund des Membrantragverhaltens, bereits ca. 47% der Belastung der monolithischen Scheibe zu tragen. In 4.B.2 wurde für eine KS-Glasscheibe (KS0) im Biegebereich 56,6% des Steifigkeitsgradienten einer gleich dicken monolithischen Scheibe festgestellt. Auf Grund des Membrantragverhaltens bei einer zu erwartenden höheren Steifigkeit und bei einer Durchbiegung von 25 mm, werden die Belastungsstufen wie folgt festgelegt:

Laststufe					
0,2 KN/m ²	0,4 KN/m ²	0,8 KN/m ²	1,2 KN/m ²	1,6 KN/m ²	2,0 KN/m ²

Tabelle 4.1

4.C.2 AUSWERTUNG

Die berechneten Last-Wege-Beziehungen der KS-Glasscheibe, werden in Abb. 4.33 den Ergebnissen aus 3.D.3 und 3.E.3 graphisch gegenübergestellt. Die KS-Glasscheibe liegt mit einer Belastung von etwa **1,43 KN/m²**, bei 25 mm Durchbiegung deutlich über dem Laminat und trägt etwa 80% der Last der monolithischen Scheibe.

Die Anfangssteifigkeit der Systeme im Vergleich beträgt etwa 1:0,6:0,5 (monolithisch: KS: Einzelscheiben). An Hand der Steifigkeitsgradienten in Abb. 4.33 wird ersichtlich, dass der Einfluss der Anfangssteifigkeit durch den Membraneffekt mit steigender Verformung kompensiert wurde, sodass sich die Steifigkeiten der Systeme nahezu angeglichen haben. Die KS-Glasscheibe erreicht bei ca. 25 mm Durchbiegung 98% des Steifigkeitsgradienten der monolithischen Vergleichscheibe, wobei die „Einzelscheibe“ bereits 93.5% besitzt. Vergleicht man darüber hinaus die Membrankräfte bzw. Normalkräfte in den Plattenschwerachsen in den Einzelscheiben der KS-Glasscheibe miteinander, fällt auf, dass die obere

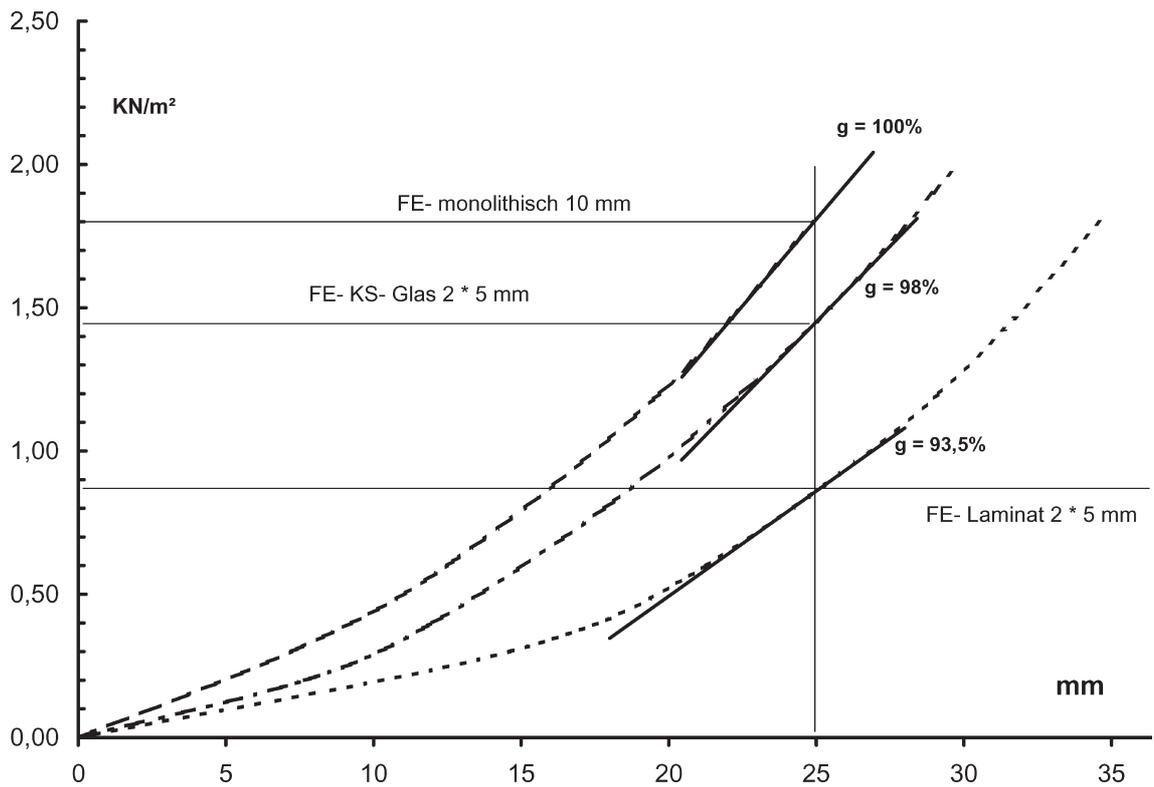


Abb. 4.33; Steifigkeitsgradienten von vierseitig gelagerten Systemen im Vergleich

Scheibe einen Druckring mit weitaus größeren Druckkräften ausgebildet hat als die untere Scheibe. Die untere Scheibe hat im Gegensatz dazu eine deutliche Zugzone formiert, Abb. 4.34 (Laststufe 6). Die Darstellung der oberen und unteren Scheibe wurde mit derselben Farbskala angefertigt, sodass die Normalkraftdarstellung der Platten direkt miteinander vergleichbar ist.

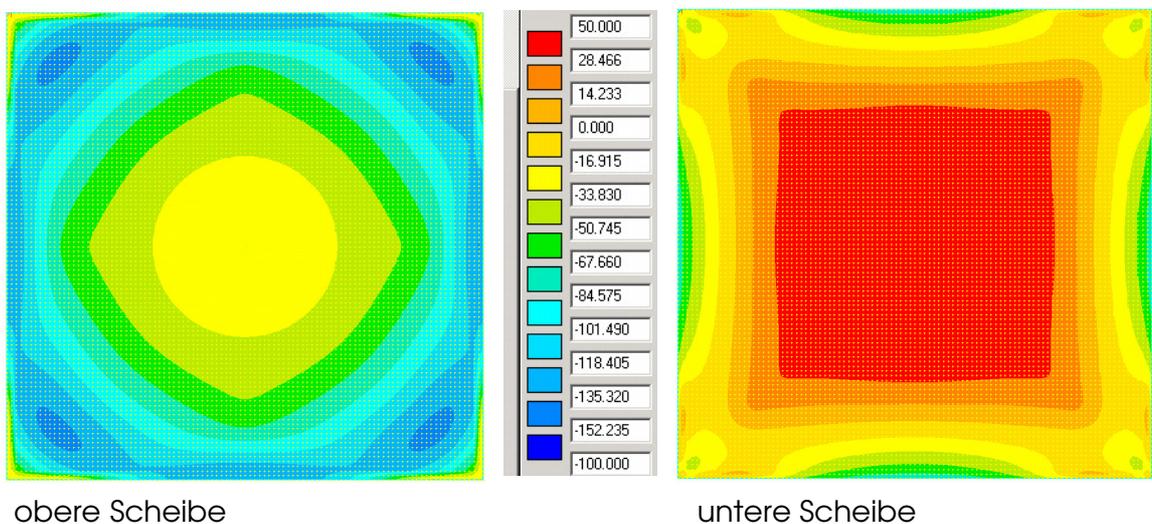


Abb. 4.34; N in den Schwerachsen der Einzelscheiben einer KS-Platte

Die Berechnungsergebnisse wurden nicht durch Dehnungsmessungen verifiziert. Sie geben einen ersten Hinweis darauf, wie sich das Tragverhalten der Glasplatten im Membranbereich gegenseitig beeinflusst, sodass die einzelnen Glasscheiben unterschiedlich an dem Tragverhalten beteiligt sind.

Die Entwicklung der Hauptspannungen entspricht im Wesentlichen den in 3.B gemachten Beobachtungen. Die Spannungsentwicklung der Einzelscheiben weist jedoch eine jeweils eigene Charakteristik auf.

Die Spannungsentwicklung in der oberen Scheibe ist in Abb. 4.35, die der unteren in Abb. 4.36, in Abhängigkeit von den eingangs gewählten sechs Laststufen, dargestellt. Die Darstellungen innerhalb jeder Laststufen ist mit einer eigenen Skala versehen worden. Innerhalb einer Belastungsstufe können die Spannungen also direkt miteinander verglichen werden. Zwischen den Laststufen lassen sich die Spannungsgrößen auf Grund der Farbverteilung und der Größe der Farbflächen nicht erfassen. Die den Farben entsprechenden Spannungen sind: Rot = Zug und Blau = Druck. Auch bei KS-Glasscheiben wandern die Hauptzugspannungen, wie es bei monolithischen Platten beobachtet werden konnte, aus dem Plattenfeld in Richtung der Eckbereiche aus (IV, II). Hier sind jedoch deutliche Unterschiede zwischen den Einzelplatten festzustellen.

Wie bei Glaslaminaten mit einer teilweisen Verbundwirkung ist in der Unterseite der oberen Scheibe eine geringe Druckspannung vorhanden, während die Unterseite der unteren Scheibe eine deutlich höhere Zugspannung erfährt. Außerdem treten an der Oberseite der oberen Platte ebenfalls in den Eckbereichen große Zugspannungen auf (V), welche bei fortschreitender Durchbiegung zu Tangentialspannungen in den Eckbereichen werden. Auf der Oberseite der unteren Platte treten zusätzlich in Elementnähe Zugspannungen auf (III), welche in dieser Form charakteristisch für die am Rand gekoppelten Scheiben sind.

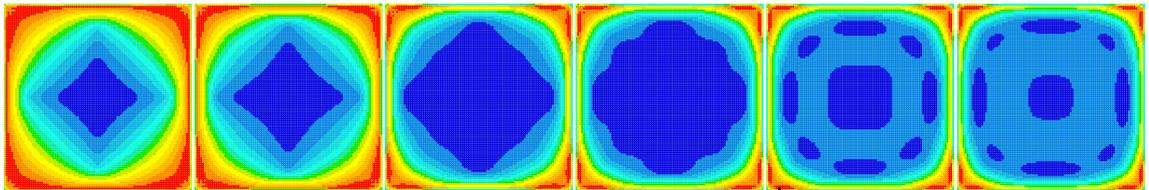
Die Hauptzugspannungen im Feld und im Eckbereich wandern also, vergleichbar mit einer monolithischen Scheibe, über die Glasfläche.

Ebenso verändert sich auch die Lage der größten Hauptzugspannung am Element. Mit steigender Durchbiegung wandert sie vom Zentrum des Randes in Richtung der Ecken.

0,2 KN/m² ➔ 2,0 KN/m²

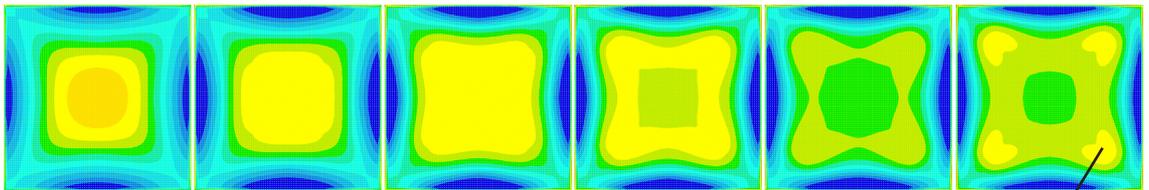
Entwicklung der Spannungsfelder in einer vierseitig gelagerten KS-Platte

Oberseite der oberen Platte



V

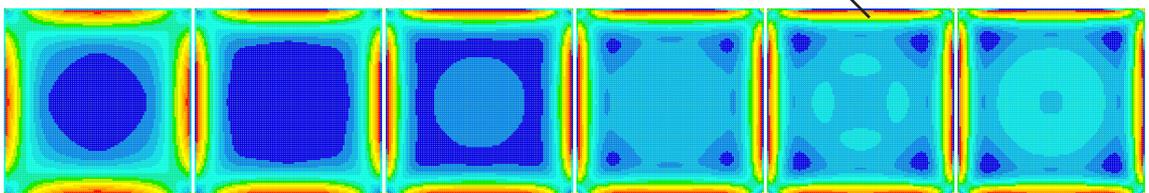
Unterseite der oberen Platte



IV

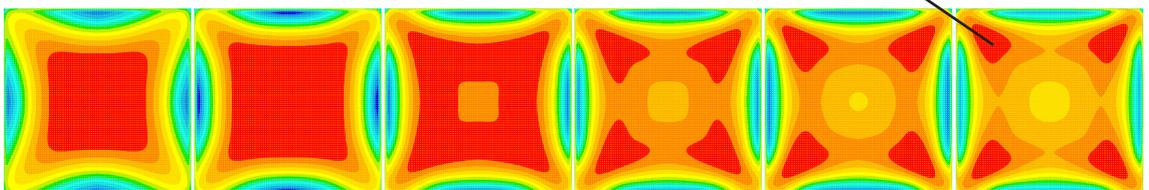
Abb. 4.35; obere Platte

Oberseite der unteren Platte



III

Unterseite der unteren Platte



II

Abb. 4.36; untere Platte

Die Entwicklung der Hauptzugspannungen in der oberen Scheibe sind in Abb. 4.37 quantitativ dargestellt.

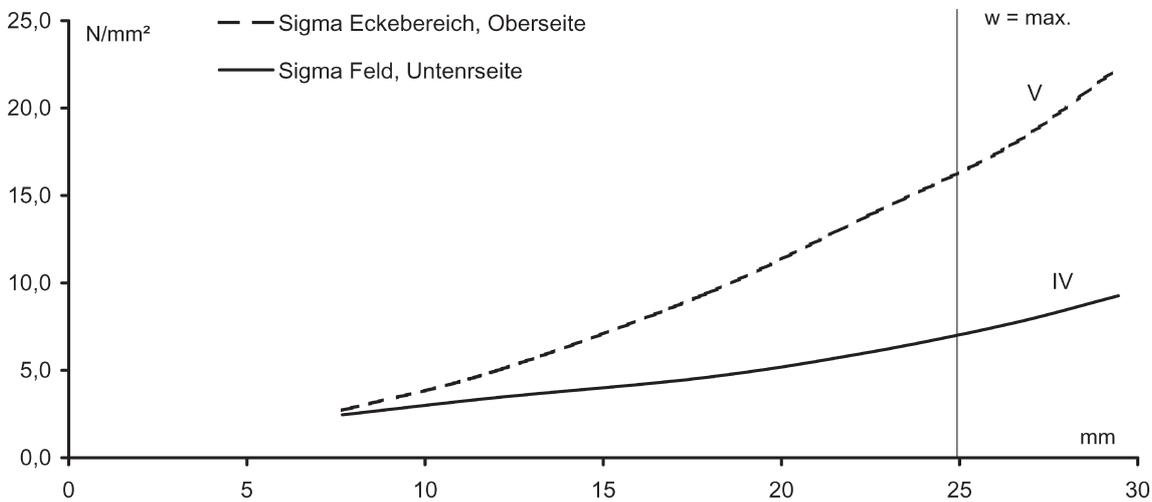


Abb. 4.37; Entwicklung der Hauptzugspannungen in der oberen KS-Platte

Im Gegensatz zu herkömmlichen Verbundglasscheiben treten also drei anstatt zwei Zugspannungsfelder in der unteren Scheibe auf. Den größten Wert nehmen die Zugspannungen jedoch in der unteren Scheibe in den Eckbereichen und an den Kopplungselementen, in Abhängigkeit von der Durchbiegung, ein. (Verg. hierzu Abb. 3.12, Seite 75 und Abb. 5.12-a, Seite 163)

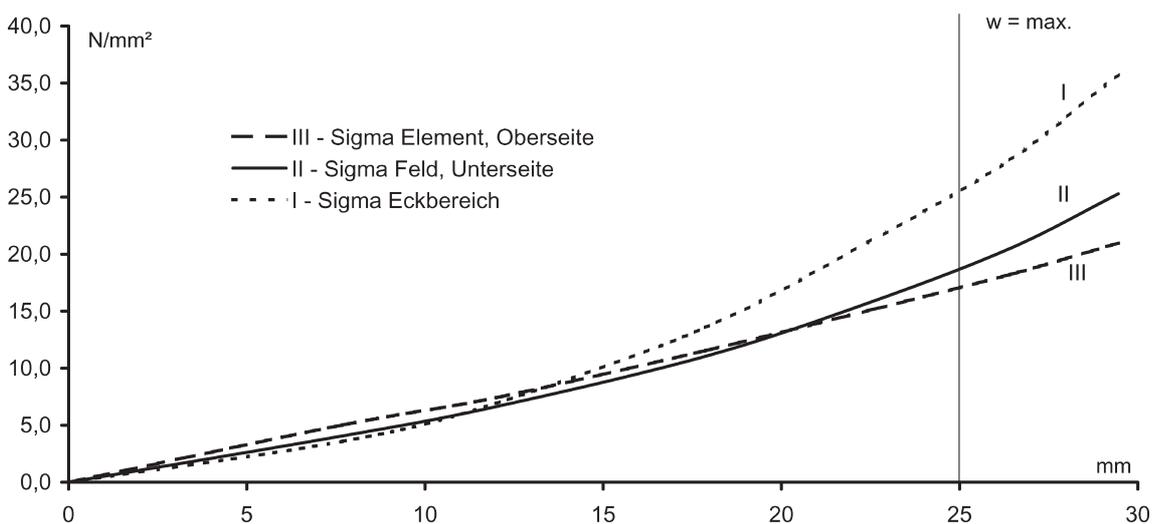


Abb. 4.38; Entwicklung der Hauptzugspannungen in der unteren KS-Platte

Der Spannungsanstieg ist jedoch geringer als der Anstieg der übrigen Hauptzugspannungen, sodass die Zugspannung am Element zunächst im Biegebereich

der Platte dominiert und alsbald nach Beginn der Membrantragwirkung von der Feldspannung und insbesondere von der Spannung I im Eckbereich überholt wird, Abb. 4.38 und Abb. 4.39.

Der Spannungsanstieg der Eckspannung I ist kritisch zu bewerten, da es in Eckelementen einer diskretisierten Platte bei einer FE-Berechnung leicht zu einem extremen Spannungsanstieg kommen kann. In diesem Beispiel ist die Elementspannung III bei der bemessungsrelevanten Durchbiegung von 25 mm gerade niedriger als die Feldspannung II. Die dieser Durchbiegung entsprechende Belastung beträgt, wie bereits erwähnt, etwa 1.43 KN/m². In Abb. 4.39 ist die Spannungsverteilung, unter dieser Belastung (1.43 KN/m²), in den Eckebereichen der monolithischen 10 mm Scheibe den Spannungen der oberen und unteren KS-Scheibe gegenübergestellt. In den Darstellungen wurde die gleiche Farbskala gewählt, sodass sie direkt miteinander vergleichbar sind. Oo = Verlauf der größeren Hauptzugspannung auf der Oberseite der oberen Scheibe, usw.

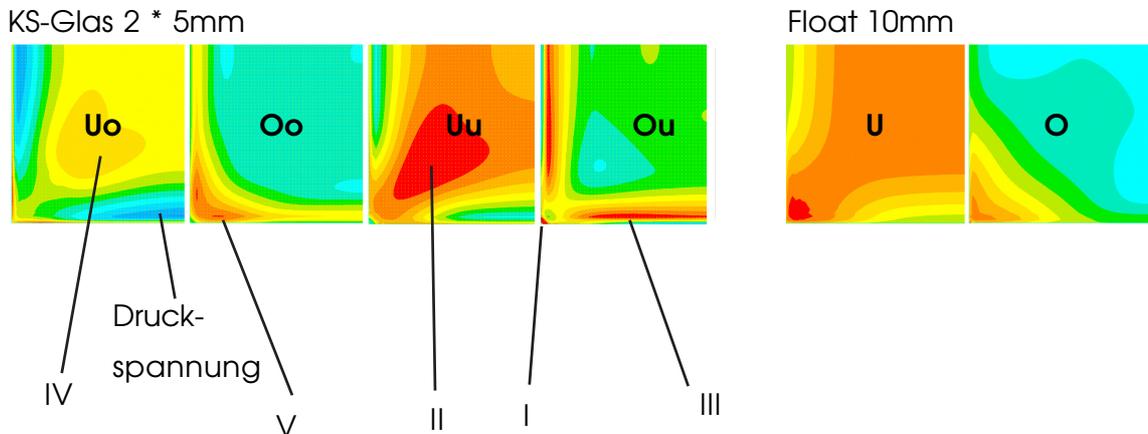


Abb. 4.39; Spannungsfelder bei der zul. Durchbiegung (25 mm) im Vergleich
 Deutlich zu erkennen sind also die Auswirkungen durch die Kopplungselemente im Randbereich auf den Spannungsverlauf. Insbesondere ein der Spannung III entsprechender Druckbereich, D in der Unterseite der oberen Platte.

Das Spannungsniveau der KS-Scheiben im Feld wird darüber hinaus im Folgenden durch einen quantitativen Vergleich mit den Spannungen der bereits berechneten Systeme erfasst, Abb. 4.40. Dargestellt sind jeweils die größten Hauptzugspannungen (ohne die Spannungen am gekoppelten Rand).

Auffällig ist, dass sich die Spannung in der monolithischen 10 mm Scheibe zwischen den Werten der unteren und oberen KS-Scheibe bewegt. Deutlich zu erkennen ist auch, dass die Spannung in den Einzelscheiben der Verbundscheibe ohne Schubverbund (2 * 5 mm) bei gleicher Belastung deutlich größere Werte einnehmen als die Spannungen in der unteren KS-Scheibe.

Die untere Scheibe erfährt mit 25,3 N/mm² etwa 71% der Spannungen der Verbundscheibe und 110% der Spannungen der monolithischen 10 mm Scheibe.

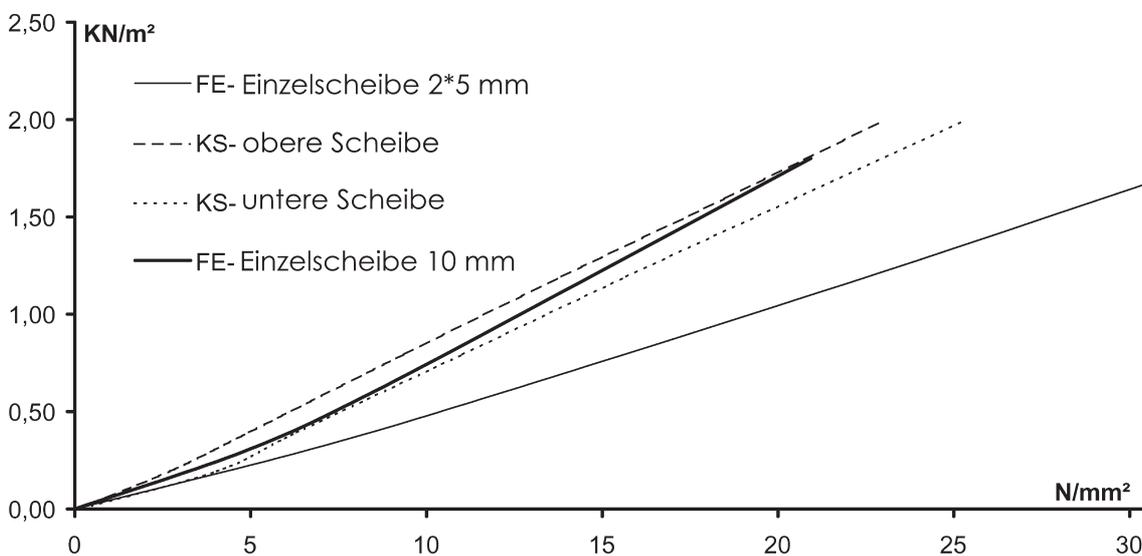


Abb. 4.40; quantitativer Vergleich der Spannungsentwicklung verschiedener Platten

Betrachtet man im Vergleich dazu noch einmal das Durchbiegungsverhalten in Abb. 4.33, erfährt die KS-Glasscheibe etwa 120% der Durchbiegung der monolithischen Scheibe.

Wie beim Membrantragverhalten bereits angedeutet wurde, haben auch diese Ergebnisse tendenziellen Charakter. Solange sie nicht durch Versuche oder weitere Berechnungen verifiziert worden sind, können sie ausschließlich für dieses Beispiel als charakteristisch angesehen werden.

Um die Spannungsentwicklung in der Scheibe und insbesondere an den Scheibenkanten zu bewerten, müssen die Spannungen und Kraftgrößen am Element untersucht werden.

4.D KRAFTGRÖSSEN IN KS-ELEMENTEN

Die KS-Elemente verhindern im Wesentlichen eine Veränderung des Schubwinkels am Rand. Die Querkraft in diesen als Stab definierten Elementen entspricht der Schubkraft in der Schwerachse der Platten. Hieraus lässt sich ableiten, welche Kraftgrößen der Klebstoff in der Klebefuge übertragen muss. Zur Darstellung der Kraftgrößen in den Elementen, bei einer Durchbiegung von 25 mm, Abb. 4.41, wurden die Querkräfte (V_y und V_z) in den biegesteif verbundenen Stäben, der vierseitig gelagerten Platte aus Kapitel 4.C.1, vektoriell addiert. Dargestellt ist also die resultierende Kraftgröße und ihre Neigung:

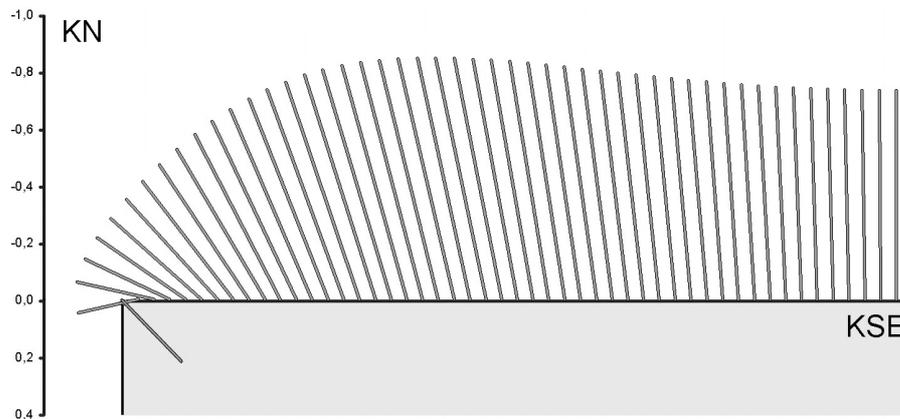


Abb. 4.4; Größe und Neigung der resultierenden Querkraft in der Klebefuge

So sind die Größenverhältnisse der Elementbelastung untereinander gut erkennbar. Deutlich wird, dass in den Ecken der Scheibe die geringste Schubbeanspruchung (Querkraft) auftritt, wobei sich zwei Maxima an je einer Seite zu den Ecken hin ausbilden. Bei dem hier betrachteten Beispiel beträgt die größte Schubkraft an einem Element 0,93 KN und damit etwa 0,36 KN/cm. Um die Kraftgrößen direkt miteinander vergleichen zu können, werden sie unabhängig von ihrer Richtung, in Abb. 4.42, für eine Seite aufgezeichnet.

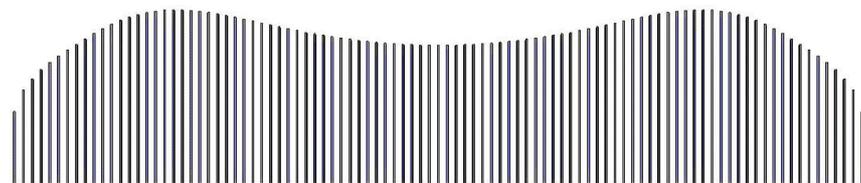


Abb. 4.42; vereinheitlichte Kraftgrößen in den KSE

Die verwendbaren Klebstoffe sind Duromere (Acrylatkleber), welche sich durch eine hohe Festigkeit, aber auch einen hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten auszeichnen. Deshalb sollten, vor allem wegen des vom Glas differieren-

den Dehnungsverhaltens der verklebten Materialien, kleine Klebeflächen verwendet werden. Das KS-Element sollte also nicht als linienförmig, sondern als punktuelle Verklebung umgesetzt werden. Auch ist es nicht erforderlich, die Scheiben umlaufend zu verbinden. Ein Aussparen der Eckbereiche führt zu einer besseren Ausnutzung der Klebepunkte. Dies kann auch durch differierende Abstände der KS-Elemente gewährleistet werden. Abb. 4.43 rechts zeigt die Querkraftentwicklung mit ausgesparten Ecken (je 17,5 cm). In Abb. 4.43 links sind die Kraftgrößen bei umlaufenden Elementen dargestellt, Mitte wurden die maßstäblichen Darstellungen übereinander gelegt. Der Kraftanstieg in den verbleibenden Elementen beträgt nur wenige Prozentpunkte.

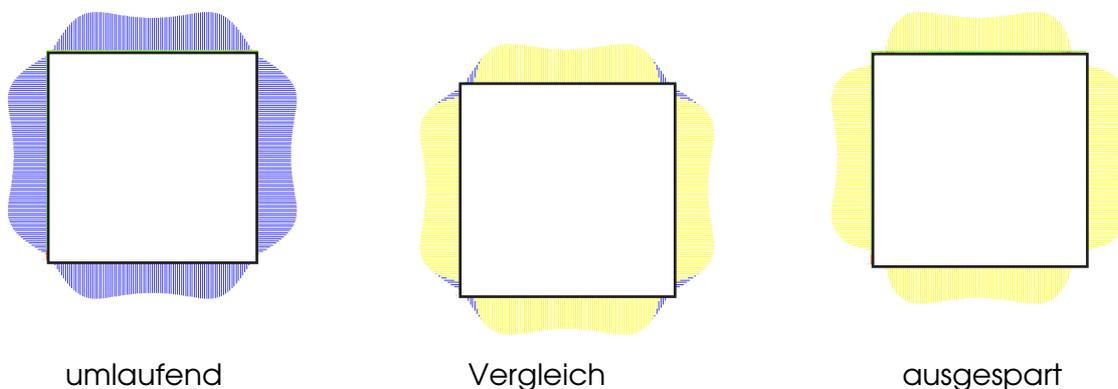
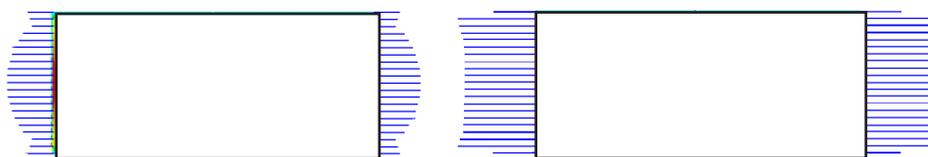


Abb. 4.43; Kraftgrößen in den KSE bei im Eckbereich ausgesparten Elementen
 Zum Vergleich dazu wurde eine zweiseitig gelagerte KS-Glasscheibe in Anlehnung an das entwickelte FE-Basismodel diskretisiert. In Abb. 4.44 ist die Querkraftentwicklung in den Kantenschubelementen über den Auflagern dargestellt. Der maximale Wert liegt bei einer Scheibe mit 2500mm Spannweite, 2 * 12mm Floatglas und 25mm Durchbiegung mit umlaufenden Elementen, Abb. 4.44 links, bei 0,62 KN/cm und mit ausschließlich über den Auflagern eingebundenen Elementen, rechts, bei 0,81 KN/cm.



umlaufende KSE

KSE ausschl. über den Auflagern

Abb. 4.44; Schubkräftevergleich in zweiseitig gelagerten KS-Platten
 Die Spannungsentwicklung am Element ist von der gewählten konstruktiven Variante abhängig. Zur Analyse wurden vier Konstruktionsvarianten ausgewählt und eine vergleichende qualitative Untersuchung durchgeführt.

Das FE-Programm Ansys 8.1 bietet eine Vielzahl verschiedener Elemente für Strukturanalysen. Diese unterscheiden sich in der Anzahl der Knoten sowie den gewählten Ansatzfunktionen. Das bedeutet, dass ein strukturelles Problem mit verschiedenen Modellen abgebildet und gelöst werden kann. Diese Modelle müssen mit Versuchen oder analytischen Lösungen verglichen und beurteilt werden, da die Berechnungsergebnisse von den gewählten Elementen, dem verwendeten Berechnungsverfahren und der Netzdicke abhängen. Auch ohne eine quantitativ vergleichende Analyse besitzen sie untereinander eine qualitative Vergleichbarkeit.

Die Klebefuge wurde auf Grund ihrer geringen Schichtdicke „übermessen“ und die Elemente direkt aneinander gekoppelt, vergleiche hierzu (36). Vereinfachend wurde mit dem FE-Programm Ansys 8.1 ein ebener Schnitt durch eine zweiseitig gelagerte KS-Scheibe als Submodell konzipiert und linear berechnet. Hierzu wurden die Modelle mit dem ebenen PLANE 42 Element diskretisiert, Abb. 4.35. Dieses Element verfügt über vier Knoten mit je zwei Freiheitsgraden (x, y- Richtung) und ist zur Berechnung eines ebenen Spannungs- oder Dehnungszustandes geeignet.

Figure 42.1 PLANE42 Geometry

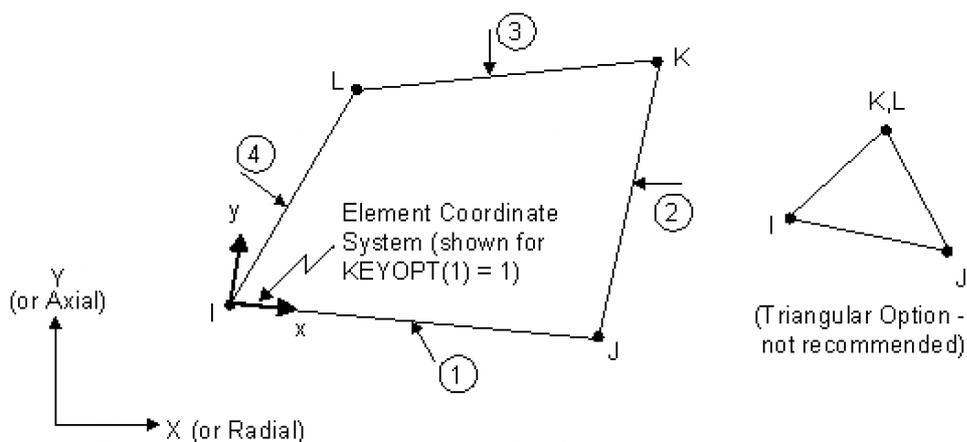


Abb. 4.45; Ansys 2D Element

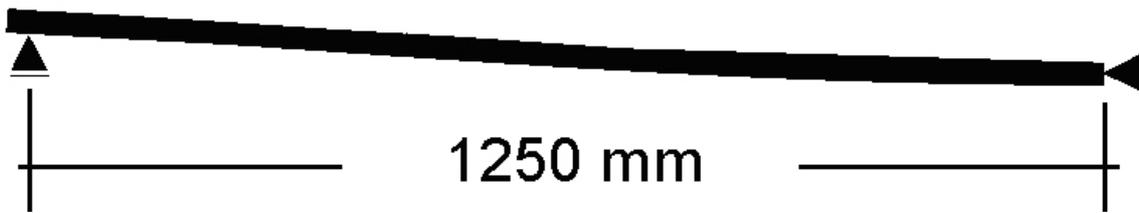


Abb. 4.46; Statisches System des Submodells

Das statische Subsystem ist als halber Einfeldträger diskretisiert und mit einer Streckenlast von 3 kN/m in globaler Y Richtung belastet, Abb. 4.46. Die Glas-scheiben wurden mit einer Dicke von je 12 mm angenommen und mit einem Regelelement von 2 mm² ausgebildet, wobei eine Analyse der Netzdichte nicht durchgeführt wurde. In Elementnähe wurde das Netz dichter ausgeführt. In Abb. 4.47 ist exemplarisch eine Auflagersituation mit dem KS-Element und der Vernetzung dargestellt. Die sich gegenüberliegenden Knoten der Glasplatten, wurden aneinander in Y-Richtung gekoppelt, Rigid Y. Das entspricht dem tatsächlichen Tragverhalten der Glaslaminare mit elastomeren Trennschichten.

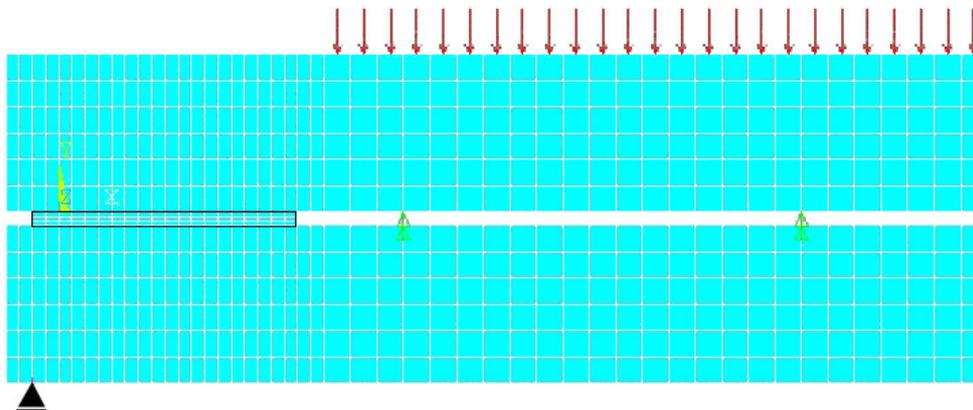


Abb. 4.47; 2D-Modell in Ansys

Zunächst wird die Konstruktionsvariante, K1, Abb. 4.48 links, analysiert. Es ist ein aus dem Versuch bekanntes System eines in die Klebeschicht eingelegten schubfesten Elementes, z.B. aus Aluminium. Aluminium ist deshalb besonders gut geeignet, da es annähernd dasselbe E-Modul wie Glas besitzt und auch, insofern die Klebeflächen nicht zu groß sind, in seinem thermischen Ausdehnungsverhalten gut mit Glas harmonisiert.

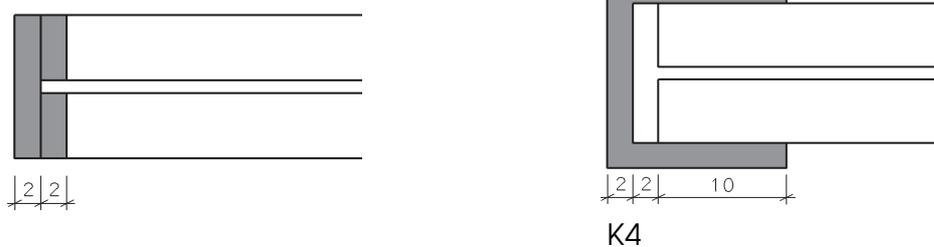


K1

K2

Abb. 4.48; Varianten

In Abb. 4.48 rechts ist die Variante K2 dargestellt. Sie ist als ein auf die Stirnseiten der Glasscheiben appliziertes „Plättchen“ aus Aluminium mit 1 mm Dicke konzipiert. Diese Variante ist deshalb von besonderem Interesse, weil sie aus heutiger Sicht gut in den Konfektionierungsprozess der Verbundglasscheiben integrierbar erscheint. Wird die Scheibe mit einem Laser geschnitten und hat eine ideal plane Oberfläche, könnte die Schnittfläche direkt nach dem Schneiden mit den Elementen versehen werden. Auf diese Weise könnte auch die hohe Kantenqualität des Laserschnitts dauerhaft gesichert werden. Eine andere Form der Variante K2 stellt die Konstruktion K3 dar, Abb. 4.49 links. K4, Abb. 4.49 rechts ist als außen liegende und im Wesentlichen vom Konfektionierungsprozess und der Kantenqualität unabhängige Variante anzusehen, da sie auf die Außenflächen appliziert wird.



K3

K4

Abb. 4.49; Varianten

4.D.2 QUALITATIVE AUSWERTUNG

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse der vier Varianten dargestellt. Betrachtet wird die Spannungsentwicklung in Längsrichtung der Scheiben. Deutlich zu erkennen ist, dass Variante K1 die geringste Spannungsintensität hervorruft. Die Spannungen liegen auf den Glasinnenseiten des Laminates, Abb. 4.50. Hier findet jedoch kein Alterungsprozess auf Grund von Schädigungen der Glasoberfläche statt. Bei einer Bemessung müsste dieser Umstand berücksichtigt und eine deutlich höhere Glasfestigkeit zu Grunde gelegt werden.

```

1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SX      (AVG)
RSYS=0
DMX =28.086
SMN =-48.425
SMX =48.372
U
CP
NEOR
REOR
PRES-NORM
.003
    
```

ANSYS
 JAN 18 2007
 18:50:59

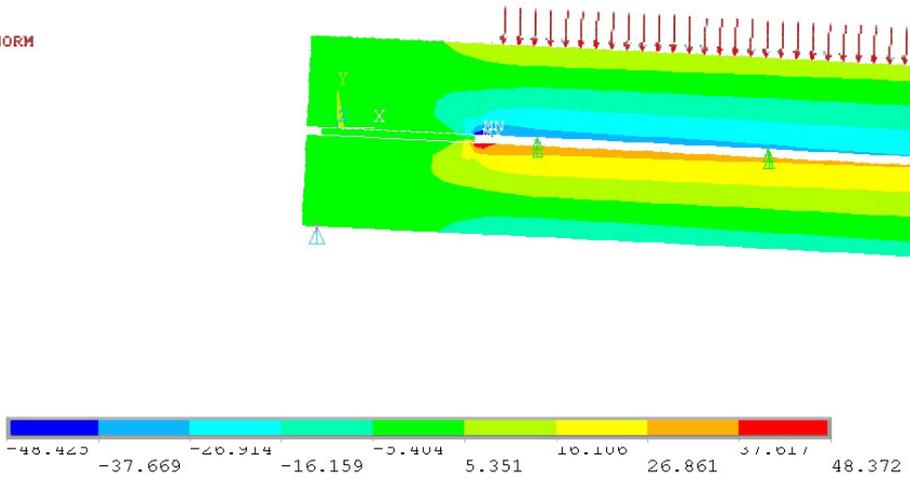


Abb. 4.50; Hauptspannungen in X-Richtung in K1

```

1
NODAL SOLUTION
SUB =1
TIME=1
SX      (AVG)
RSYS=0
DMX =29.478
SMN =-142.778
SMX =143.282
U
CP
NEOR
REOR
PRES-NORM
.003
    
```

ANSYS
 JAN 18 2007
 18:48:57

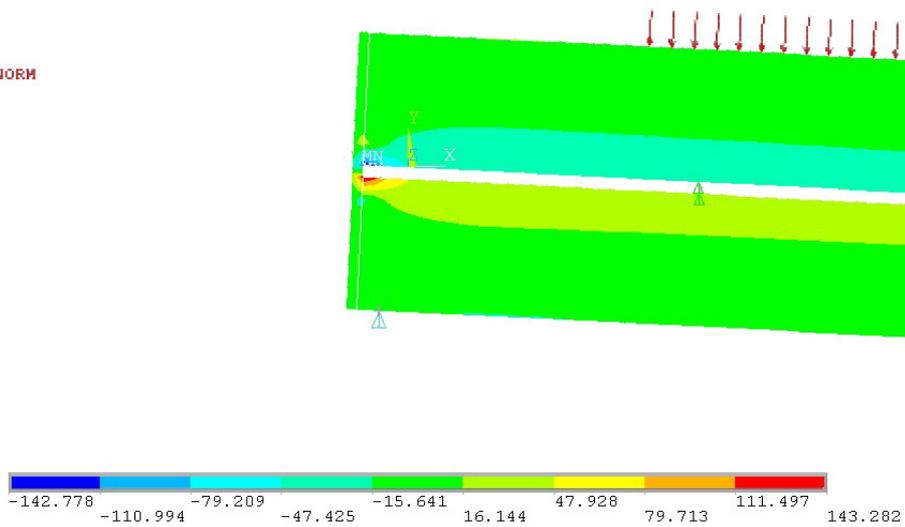


Abb. 4.51; Hauptspannungen in X-Richtung in K2

1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 SX (AVG)
 RSYS=0
 DMX =29.585
 SMN =-132.324
 SMX =132.323
 U
 CP
 NFOR
 RFOR
 PRES-NORM
 .003

ANSYS
 JAN 18 2007
 18:46:49

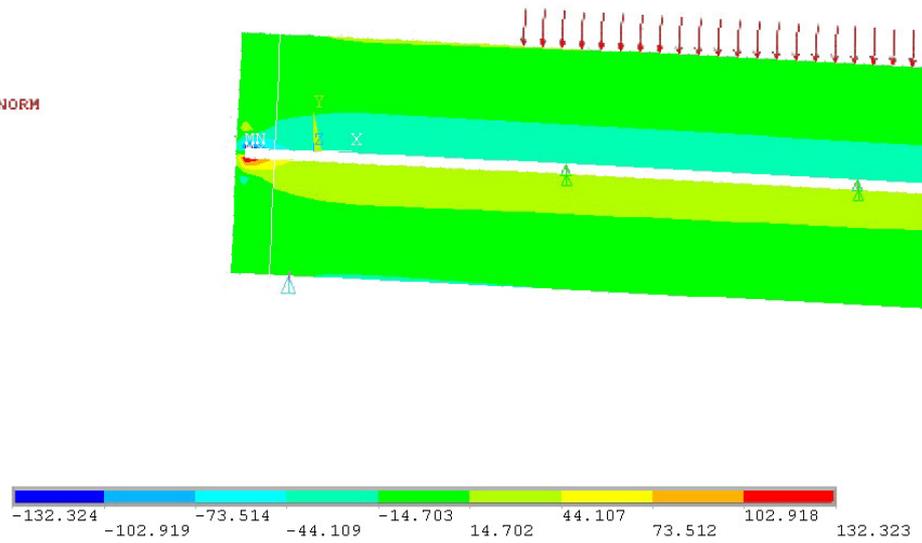


Abb. 4.52; Hauptspannungen in X-Richtung in K3

1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 SX (AVG)
 RSYS=0
 DMX =74.787
 SMN =-214.602
 SMX =223.993

ANSYS
 JAN 18 2007
 19:01:13

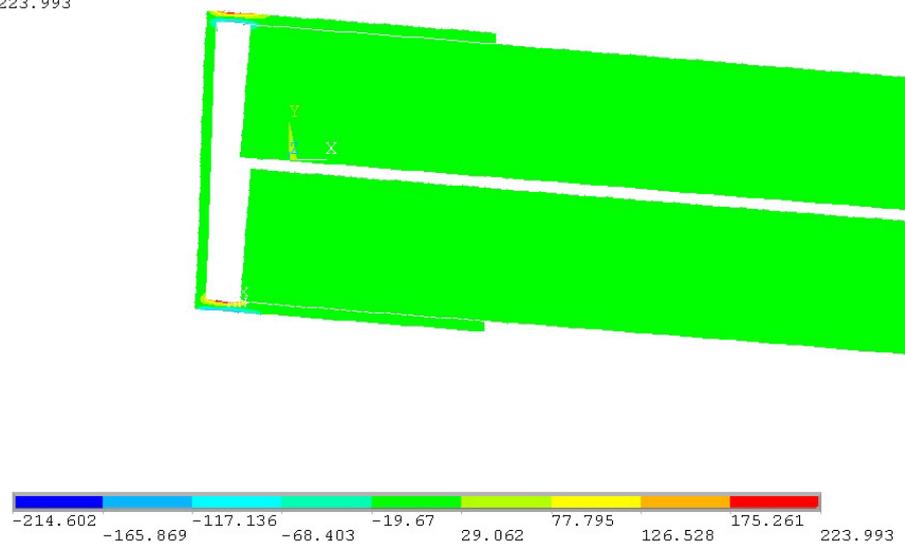


Abb. 4.53; Hauptspannungen in X-Richtung in K4

Variante K2, Abb. 4.51 entwickelt die ungünstigste Beanspruchung des Glasrandes. Die Spannung konzentriert sich direkt an der Kante. Eine gesäumte Kante könnte vermutlich eine Verbesserung der Beanspruchung ermöglichen. Dagegen ist die Variante K3 deutlich vorzuziehen, Abb. 4.52. Die Spannungen werden durch das aufgeklebte Element vom Glas ferngehalten und „toben“ sich im Element aus. Wie bei der vorherigen Variante ist festzustellen, dass sich die Spannungen an der Innenkante der sich gegenüberliegenden Scheiben entwickeln. Hier kann eine Schädigung des Glases über die gesamte Lebensdauer durch die applizierten Elemente vermieden werden, sodass ebenfalls eine höhere Glasfestigkeit für die Bemessung zu Grunde gelegt werden könnte. Aus Abb. 4.53 wird ersichtlich, dass die Spannungen durch das Applizieren eines Elementes direkt auf die Außenflächen zwar aus dem Glas „gezogen“ werden, es aber durch den relativ großen Hebelarm zu einer extremen Beanspruchung und vor allem zu großen Verformung des Elementes kommt. Diese Variante K4 wurde mit einem 1 mm U-Profil ausgeführt. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch sehr massive Ausführungen wenig Erfolg versprechend sind.

Abschließend kann gesagt werden, dass Variante K3 von den hier untersuchten Lösungen den besten Ansatz zur Umsetzung eines Elementes darstellt. Das Applizieren dieser Variante könnte relativ einfach in den Konfektionierungsprozess von VSG integriert werden, indem das Element von aufgerollten Bändern auf die frisch geschnittenen Kanten appliziert wird, Abb. 4.54.

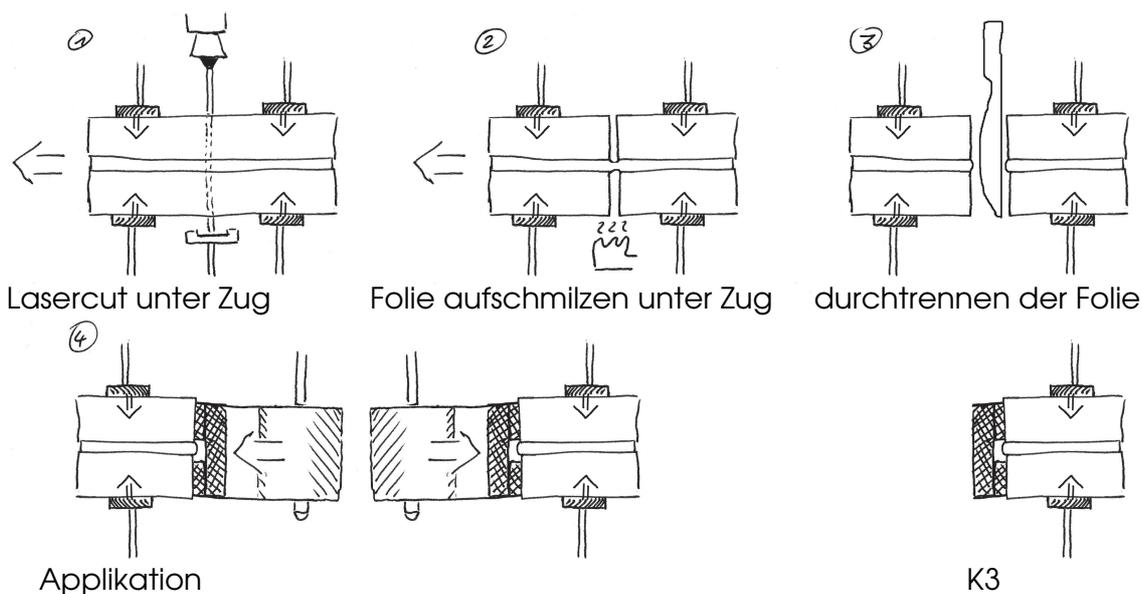


Abb. 4.54; Prozesskette der KS-Element Applikation

4.D.3 SCHUBMODUL DER KANTENSCHUBELEMENTE

Um das Tragverhalten der KS-Glaskonstruktion auch in Abhängigkeit von der Steifigkeit des Elementes zu beurteilen, wurde das in 4.D.1 entwickelte FE-Modell mit der Kantenkonstruktion K1 verwendet. Hierzu wurde das Schubmodul des 1 mm hohen KS-Elementes mit einer Klebefläche von 20 mm Breite von 30 N/mm² in zehn Berechnungsschritten auf 30.000 N/mm² erhöht.

Berechnungsschritte									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Schubmodul im KS-Element [N/mm ²]									
30000	3000	300	30	14	3	1,5	0,3	0,15	0,03

Tabelle 4.2

Die Berechnungen zeigen, dass schon sehr geringe Schubfestigkeiten des eingelegten Elementes großen Einfluss auf die Verformungen und Spannungen haben. In Abb. 4.55 sind unsere Ergebnisse dargestellt. Während die Durchbiegung W und Zugspannung σ_f in Feldmitte bei steigender Schubfestigkeit G gegen einen minimalen Wert strebt, bewegt sich die Zugspannung σ_e in Elementnähe gegen einen maximalen Wert. Schon bei einem Schubmodul von ca. 80 N/mm² wird die Spannung und Durchbiegung im Feld deutlich reduziert. Glas hat zum Vergleich ein Schubmodul von 28000 N/mm².

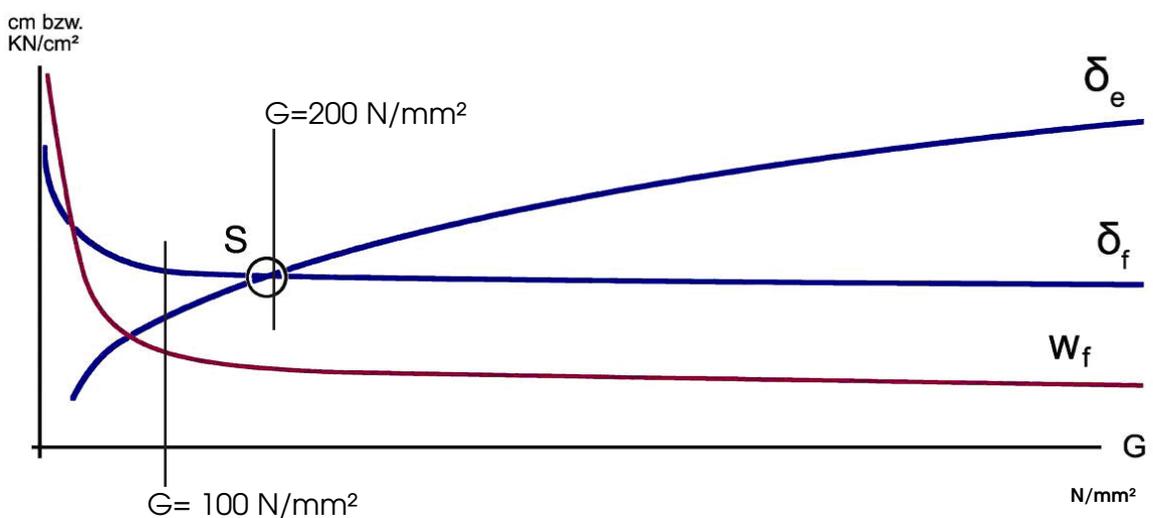


Abb. 4.55; Schubmodulstudie der KSE

Bei einer derart hohen Elementfestigkeit wird die Durchbiegung nur noch unwesentlich verbessert. Die Spannungen in Elementnähe hingegen steigen deutlich an. Das dem Schnittpunkt S der beiden Kurven entsprechende Schubmodul von ca. $G = 200 \text{ N/mm}^2$ stellt somit ein Optimum für das Element dar. In Abb. 4.56 sind die Spannungsquerschnitte der Maximalspannungen in Feldmitte und in Elementnähe in ihren Proportionen zueinander für die Schubmodulschritte 10, 5, 3, 1 dargestellt, v.V. = voller Verbund.

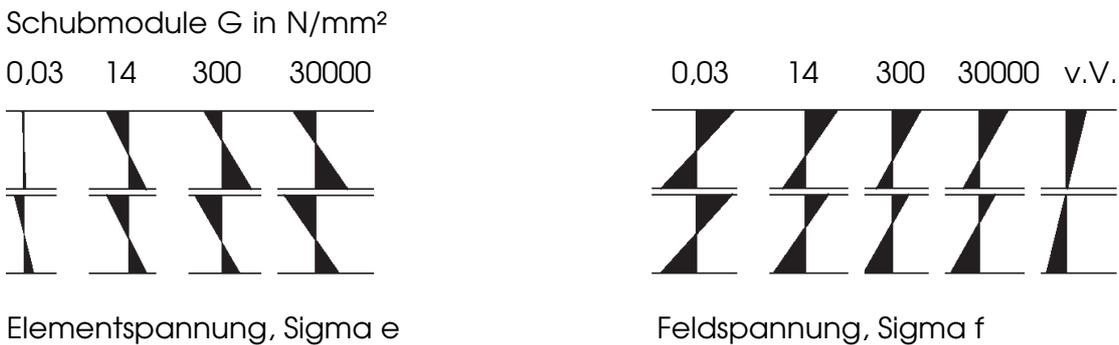


Abb. 4.56; Spannungsquerschnitte in Abhängigkeit vom Schubmodul des KSE

4.E ZUM POTENZIAL VON KS-GLAS

KSG ist ein Verbundglas und sollte deshalb auch mit Verbundglas verglichen werden. Zur Abschätzung des Einsparpotenzials durch die Verwendung von KS-Glas als System unter ständiger Last müssen zunächst die Spannungen am Element in ihrer Größenordnung abgeschätzt werden. In Anbetracht des bisherigen Entwicklungsstandes von KS-Glas liegen noch keine gesicherten Erkenntnisse zur Spannungsgröße am KS-Element vor. Um dennoch einen Anhaltspunkt zu erhalten und gleichzeitig den Berechnungsaufwand gering zu gestalten, wurden in der folgenden Untersuchung die bisher verwendeten FE-Modelle mit einachsiger Biegung bzw. annähernd linearem Tragverhalten verwendet.

Das in 4.D.1 entwickelte ebene Ansys FE-Modell K3 entspricht nach gegenwärtigem Erkenntnisstand bzw. zur Folge der qualitativen Analyse in 4.D.2 der bevorzugten konstruktiven Variante. Das KS-Element dieses Modells wurde derart

kalibriert, dass Feld und Randzugspannung in den Glasscheiben in etwa einen gleich großen Betrag annehmen und unterhalb der zulässigen Spannungen für ESG liegen. Um dem Bruchverhalten von Glas Rechnung zu tragen, wurden die zulässigen Spannungen nach prEn 13474 berechnet. Die zulässige Spannung beträgt bei einem E-Modul von 70000 N/mm^2 unter einer ständiger Belastung von 3 KN/m^2 (inkl. Eigengewicht) und bei einer Spannweite von 2.5m (2.5m^2): $39,12 \text{ N/mm}^2$.

Das KS-Element wurde mit den Materialeigenschaften von Aluminium diskretisiert, (E-Modul = 70000 N/mm^2 , Querkontraktionszahl = 0.3), wobei die maximale Spannung erwartungsgemäß im Element auftritt, sodass die Spannung im angrenzenden Glas relativ gering ist. Aus Abb. 4.57 geht die Spannungsverteilung im Feld und aus Abb. 4.58 geht jene am Rand bzw. am KSE hervor.

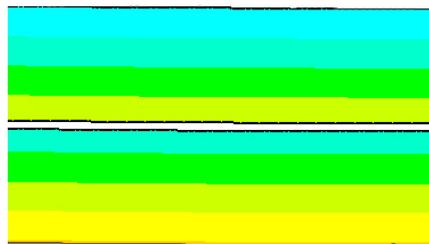


Abb. 4.57; Feldspannung

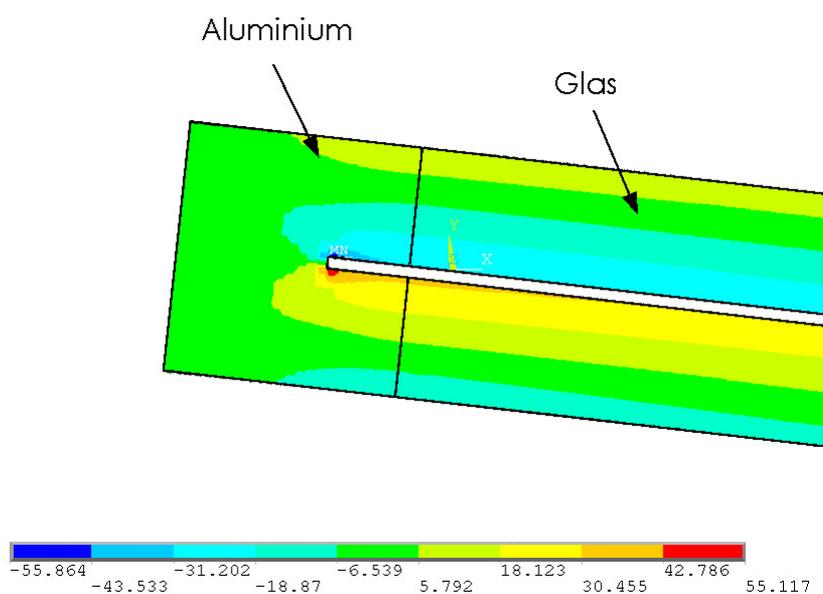


Abb. 4.58; Elementspannung

Da die Diskretisierung mit Ansys relativ aufwendig ist, wird für die weitere Analyse ein FE-Modell mit Esa Prima-Win. 3.6 in Anlehnung an Kapitel 3.E erstellt. Um nun der konstruktiven Variante K3 zu entsprechen, wurde das KS-Element im Scia FE-Modell an den Rand versetzt und so lange in seiner Geometrie kalibriert, bis die Verformung der Scheibe in Feldmitte der Verformung des Ansys-Modells entspricht. Der Abstand der Schwerachsen der Scheiben berücksichtigt die in Ansys eingeführte 1 mm Fuge und beträgt damit 13 mm. Das KS-Element wurde mit den Materialeigenschaften für Aluminium und mit einem quadratischen Querschnitt mit einer Kantenlänge von 13,2 mm ausgeformt. In Abb. 4.59 sind die Zugspannungen in der unteren Scheibe im Feld und am Rand dargestellt. Die Verformungsdifferenz zwischen den Modellen beträgt nur wenige tausendstel Millimeter und kann getrost vernachlässigt werden. (Ansys = 29,205 mm, Scia = 29,209 mm).

Spannungsfelder

Durchbiegung

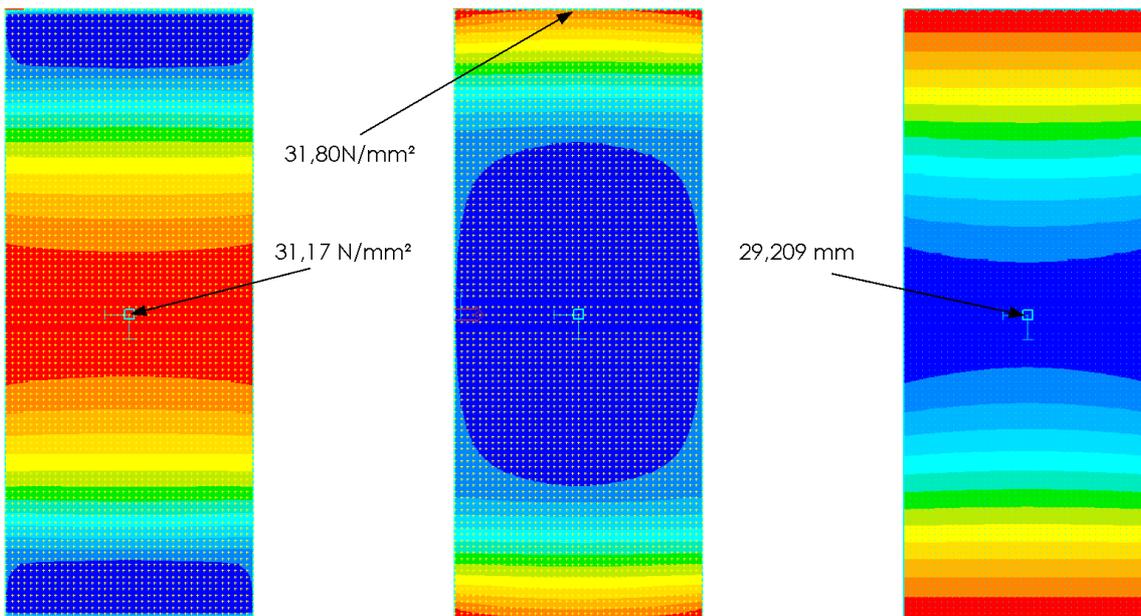


Abb. 4.59; Ort der Vergleichsspannung und -verformung in zweiseitig gelagerten Platten.

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse gibt Anlass zur Annahme, dass auch mit Plattenmodellen und Distanzstäben das Tragverhalten und insbesondere die Spannungen allgemein im KS-Glas gut erfasst werden können. Die berechneten Spannungsverläufe am Element und im Feld werden in Abb. 4.60 gegenübergestellt.

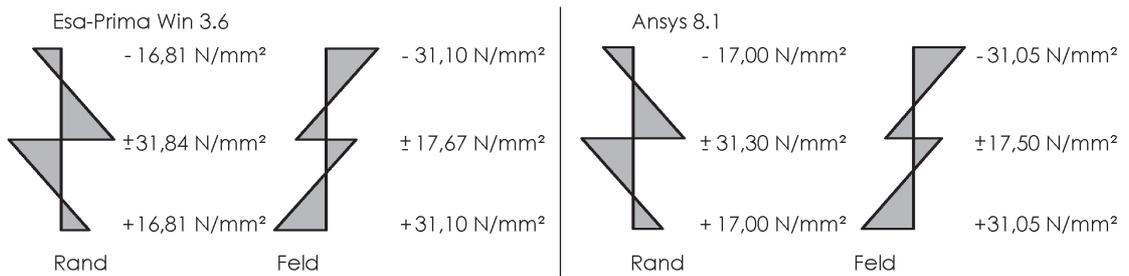


Abb. 4.60; Berechnete Spannungsquerschnitte im Vergleich

Die Übereinstimmung der lokalen Spannungen und Verformungen, insbesondere die charakteristische flügelartige Verformung durch den Kantenschubverbund in beiden Modellen, Abb. 4.61, lassen vermuten, dass die Spannungsgrößen den realistischen Werten annähernd entsprechen.

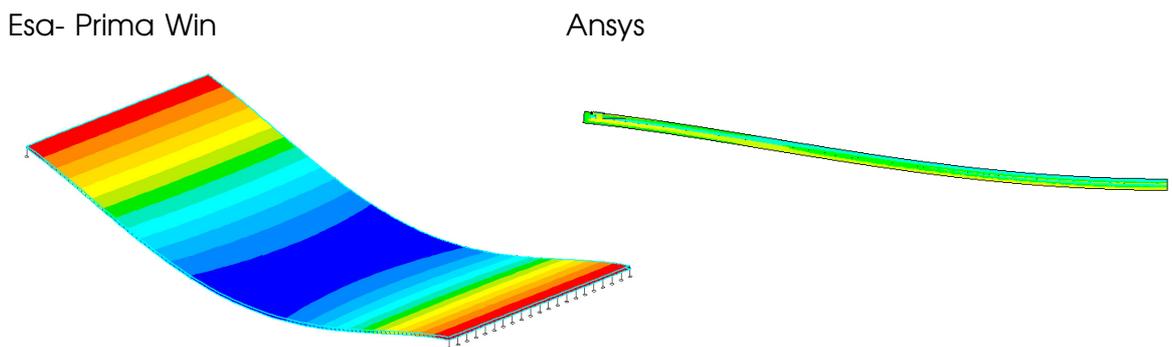


Abb. 4.61; charakteristische Flügelartigkeit in den FE-Modellen

4.E.1 KS-GLAS ALS VERBUNDGLAS

Wird nun vorausgesetzt, dass die mit Ansys und Scia berechneten Spannungen zumindest in ihrer Größenordnung den tatsächlichen Spannungen entsprechen, können KS-Glasscheiben unter Verwendung des entwickelten FE-Modells mit der Software Esa-Prima Win.3.6 bemessen und mit herkömmlichen Verbundglas-scheiben verglichen werden. Hierzu wird zunächst die Spannweite aller möglichen Scheibendickenkombinationen ohne Schubverbund, für die angenommene Last von 3 kN/m² zuzüglich des jeweiligen Eigengewichtes optimiert. Gewöhnlich stehen die Spannweite und die Belastung bei einer Bemessung fest, sodass das Bauteil selbst optimiert wird; hier wird ein umgekehrter Bemessungsweg beschrieben. Diese Methode wird deshalb angewendet, da die Scheibendicken nicht beliebig, sondern in Steifigkeitssprüngen feststehen und für eine Optimierung

mit gegebener Last und Spannweite zum Teil relativ schlechte Ausnutzungsgrade entstehen. Bei einer grenzwertigen Optimierung muss deshalb entweder die maximale Last oder die maximale Spannweite zur jeweiligen Scheibenkombination bzw. effektiven Steifigkeit bestimmt werden. Um für die gegebene effektive Dicke die optimale Spannweite zu bestimmen, wurden die zulässigen

h	h	h eff.	h eff.	h	3 KN/m ²	vorh.	zul.	w	L	W	Sigma
mm	mm	w	sigma	ges.	KN/m ²	Sigma	Sigma	mm	mm	%	%
4	4	5,040	5,657	8	3,20	24,711	39,51	5,738	574,0	99,96	62,54
5	4	5,739	6,148	9	3,23	27,202	39,48	6,520	652,0	99,99	68,91
5	5	6,300	7,071	10	3,25	24,783	39,45	7,103	713,0	99,63	62,82
6	4	6,542	6,831	10	3,25	28,680	39,44	7,399	741,0	99,85	72,72
6	5	6,986	7,539	11	3,28	26,904	39,42	7,869	789,0	99,74	68,25
6	6	7,560	8,485	12	3,30	24,953	39,40	8,510	852,0	99,89	63,33
8	4	8,320	8,485	12	3,30	30,245	39,38	9,377	938,0	99,97	76,81
8	5	8,604	8,923	13	3,33	29,286	39,37	9,650	967,0	99,79	74,39
8	6	8,996	9,539	14	3,35	28,109	39,36	10,084	1009,0	99,94	71,42
8	8	10,079	11,314	16	3,40	25,214	39,33	11,245	1125,0	99,95	64,11
10	4	10,209	10,315	14	3,35	30,958	39,32	11,442	1145,0	99,93	78,73
10	5	10,400	10,607	15	3,38	30,433	39,32	11,604	1163,0	99,78	77,40
10	6	10,674	11,027	16	3,40	29,746	39,31	11,895	1191,0	99,87	75,67
10	8	11,478	12,296	18	3,45	27,819	39,29	12,749	1275,0	99,99	70,80
12	4	12,146	12,220	16	3,40	31,352	39,28	13,523	1355,0	99,80	79,82
12	5	12,283	12,426	17	3,43	31,086	39,27	13,647	1367,0	99,83	79,15
12	6	12,481	12,728	18	3,45	30,683	39,27	13,846	1386,0	99,90	78,13
10	10	12,599	14,142	20	3,50	25,432	39,27	13,892	1392,0	99,80	64,76
12	8	13,084	13,663	20	3,50	29,404	39,26	14,443	1446,0	99,88	74,89
12	10	13,973	15,078	22	3,55	27,668	39,24	15,355	1537,0	99,90	70,50
12	12	15,119	16,971	24	3,60	26,399	39,22	16,469	1655,0	99,52	80,03
15	4	15,094	15,142	19	3,48	31,780	39,22	16,697	1672,0	99,86	81,03
15	5	15,183	15,275	20	3,50	31,676	39,22	16,762	1678,0	99,89	80,77
15	6	15,313	15,473	21	3,53	31,503	39,22	16,890	1689,0	100,00	80,33
15	8	15,723	16,098	23	3,58	30,789	39,21	17,218	1725,0	99,81	78,52
15	10	16,355	17,078	25	3,63	29,767	39,20	17,865	1787,0	99,97	75,93
15	12	17,216	18,445	27	3,68	28,392	39,19	18,699	1872,0	99,89	72,44
15	15	18,899	21,213	30	3,75	26,048	39,17	20,403	2041,5	99,94	66,50
19	4	19,059	19,088	23	3,58	32,205	39,16	20,912	2092,0	99,96	82,23
19	5	19,115	19,172	24	3,60	32,190	39,16	20,930	2093,4	99,98	82,20
19	6	19,197	19,297	25	3,63	32,107	39,16	20,948	2097,0	99,89	81,98
19	8	19,461	19,696	27	3,68	31,811	39,16	21,133	2116,0	99,87	81,23
19	10	19,882	20,338	29	3,73	31,279	39,15	21,493	2152,0	99,87	79,89
19	12	20,478	21,259	31	3,78	30,514	39,15	22,052	2207,0	99,92	77,94
21	5	21,094	21,141	26	3,65	32,392	39,14	22,996	2299,7	100,00	82,76
21	4	21,048	21,072	25	3,63	32,383	39,14	22,992	2299,8	99,98	82,74
21	6	21,162	21,243	27	3,68	32,337	39,14	22,984	2301,0	99,88	82,62
21	8	21,380	21,573	29	3,73	32,175	39,14	23,149	2315,1	99,99	82,21
19	15	21,711	23,208	34	3,85	28,981	39,13	23,246	2325,1	99,98	74,05
21	10	21,730	22,105	31	3,78	31,755	39,13	23,361	2341,0	99,79	81,15
21	12	22,232	22,875	33	3,83	31,216	39,13	23,861	2386,2	99,99	79,78
21	15	23,292	24,530	36	3,90	29,970	39,12	24,804	2483,0	99,90	76,62
19	19	23,938	26,870	38	3,95	26,493	39,11	25,380	2541,0	99,88	67,74
21	19	25,261	27,706	40	4,00	27,882	39,10	26,703	2671,0	99,97	71,31
21	21	26,458	29,698	42	4,05	26,731	39,09	27,852	2786,0	99,97	68,39

Tabelle 4.3: Optimierung von zweiseitig gelagerten Verbundglas aus ESG mit einer Breite von 1000 mm

Spannungen sowie die zulässigen Verformungen iterativ mit den in Kapitel 3.C vorgestellten Formeln berechnet, Tabelle 4.3. Die Formbeiwerte nehmen für zwei-seitig gelagerte Platten mit einem Seitenverhältnis (a/b) von annähernd $a/b = 0$, für k_1 den Wert 0.75 und für k_4 den Wert 0.148 an. Als Material wurde ein ESG aus Floatglas mit einer charakteristischen Festigkeit von 120 N/mm² nach Tabelle 3.2 angenommen. Für alle Berechnungen konnte festgestellt werden, dass für dieses Material die Verformung die ausschlaggebende Größe darstellt, wobei im Mittel eine Ausnutzung von 99,97% erreicht wurde. Die zulässigen Spannungen hingegen sind im Mittel lediglich zu 74,67% ausgelastet.

Für die folgenden Berechnungen der KS-Glasplatten wird, um den Berechnungsaufwand gering zu halten, auf eine nichtlineare Berechnung verzichtet. Im Vergleich zum Verbundglas wurden eine KS-Glasplatten diskretisiert und die Spannweite zur gegebenen Belastung unter Berücksichtigung des Eigengewichtes optimiert. Die Berechnungsergebnisse wurden in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

KSG										
h	h	heff w	hges.	3 KN/m ² + Fg	vorh. Sigma	zul. Sigma	w	L	W	Sigma
mm	mm	mm	mm	KN/m ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	%	%
4	4	5,040	8	3,20	28,96	39,43	7,40	770	96,10	73,45
10	10	12,599	20	3,50	30,6	39,19	18,77	1870	100,39	78,08
12	12	15,119	24	3,60	31,33	39,15	22,25	2220	100,22	80,03
15	15	18,899	30	3,75	32,24	39,09	27,44	2736	100,30	82,47
19	19	23,938	38	3,95	33,14	39,04	34,01	3400	100,03	84,90

Tabelle 4.4, Optimierung von KSG aus ESG

Um das mögliche Einsparpotenzial von KS-Glas abschätzen zu können, wird die effektive Dicke von VG und KSG gegen die erreichte Spannweite graphisch aufgetragen. Beide Systeme verfügen über ein annähernd lineares Verhältnis von effektiver Dicke zur Spannweite.

Die jeweiligen linearen Näherungsformeln sind in Abb. 4.62 angegeben. Um die Glaserparnis durch KS-Glas für eine beliebige Schichtdicke aus zwei Einzelscheiben zu ermitteln, muss zunächst die effektive Dicke, $h_{\text{eff.w}}$, des Laminates ohne Berücksichtigung des KS-Verbundes berechnet werden. Sie kann auch aus Tabelle 4.5 abgelesen werden.

Wird diese Dicke in die Formel für KS-Glas eingesetzt, wird die entsprechende KSG- Verformung ermittelt. Mit dieser Verformung kann über die Formel für VG die effektive Vergleichsdicke einer Verbundglasscheibe berechnet werden. Mit der ermittelten Vergleichsdicke dieser Scheibe kann in Tabelle 4.5 anschließend der erforderliche Schichtaufbau ermittelt werden. Das Verhältnis der Gesamtglasdicken von VG zu KSG entspricht dem tatsächlichen Einsparpotenzial von KS-Glas.

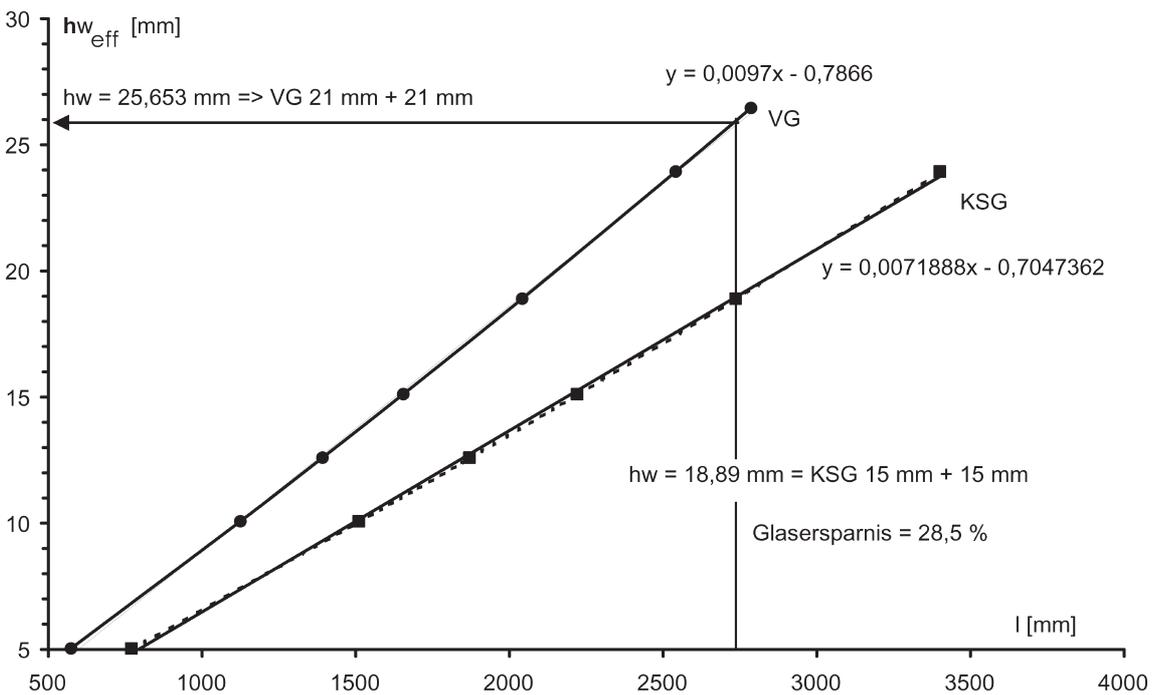


Abb. 4.62; Potenzial von KSG aus ESG

Beispiel

Die berechnete effektive Dicke einer 2*15mm KS-Glasscheibe ohne Schubverbund beträgt 18,89mm. Sie erreicht als KS-Glas bei der gewählten Standardbelastung zuzüglich des Eigengewichtes eine maximale Spannweite von 2725 mm. Diese Spannweite ist erst mit einer Verbundglasscheibe ohne Schubverbund mit einer Vergleichsdicke von 25,653mm zu erreichen. Aus Tabelle 4.5 kann nun der nächstgrößere Wert abgelesen werden. Die effektive Dicke einer vergleichbaren VG-Scheibe beträgt dann 26,458mm mit einem Schichtaufbau von zwei mal 21mm. Die Berechnungen ergeben demnach, dass bei der gewählten Belastung eine 30mm KS-Glasscheibe der Steifigkeit einer 42mm Verbundglasscheibe entspricht. Die Gewichtersparnis beträgt 0,3 KN/m². Bei einem Eigengewicht von 1.05 KN/m² entspricht das einer Glasparsnis von rund 28,5%.

h eff. w	4	5	6	8	10	12	15	19	21		mm
21	21,048	21,094	21,162	21,380	21,730	22,232	23,292	25,261	26,458		
19	19,059	19,115	19,197	19,461	19,882	20,478	21,711	23,938		29,698	21
15	15,094	15,183	15,313	15,723	16,355	17,216	18,899		26,870	27,706	19
12	12,146	12,283	12,481	13,084	13,973	15,119		21,213	23,208	24,530	15
10	10,209	10,400	10,674	11,478	12,599		16,971	18,445	21,259	22,875	12
8	8,320	8,604	8,996	10,079		14,142	15,078	17,078	20,338	22,105	10
6	6,542	6,986	7,560		11,314	12,296	13,663	16,098	19,696	21,573	8
5	5,739	6,300		8,485	9,539	11,027	12,728	15,473	19,297	21,243	6
4	5,040		7,071	7,539	8,923	10,607	12,426	15,275	19,172	21,141	5
		5,657	6,148	6,831	8,485	10,315	12,220	15,142	19,088	21,072	4
mm		4	5	6	8	10	12	15	19	21	h eff. Sigma

Tabelle 4.5; effektive Dicke für zwei Einzelscheiben

Gleichwohl zum VG wurden die KS-Glasplatten über die Durchbiegung optimiert. Die mittlere Ausnutzung hierzu beträgt 99,48%, wohingegen die Spannungen im Vergleich zum VG eine etwas höhere mittlere Ausnutzung von etwa 79,4% erfahren. Insofern die berechneten Spannungen von den tatsächlichen abweichen, verbleibt eine „Reserve“ von annähernd 20%. Erwähnenswert ist auch, dass die verwendete lineare Berechnungsmethode generell zu größeren Spannungen und Verformungen führt. Werden die KS-Glasscheiben mit einem umlaufenden Koppелеlement versehen, ist das Einsparpotenzial etwas höher. Dazu wurden wiederum die KS-Glasplatten mit einem Meter Breite aus der vorangegangenen Studie bezüglich der Spannweite zur gegebenen Belastung unter Berücksichtigung des Eigengewichtes optimiert. Das KS-Element wurde umlaufend eingefügt. Die Berechnungsergebnisse wurden in Tabelle 4.6 zusammengefasst. Bei einem umlaufenden KS-Element in zweiseitig gelagerten Platten treten die größten Spannungen im Randbereich über den Auflagern auf. Für das KS-Glas mit umlaufendem Randverbund kann nun mit den Gleichungen der Regressionsgeraden, Abb. 4.63, das Einsparpotential analog zur den vorherigen Berech-

KSG- umlaufend										
h	h	heff w	hges.	$\frac{3}{m^2} KN/m^2 + F_g$	vorh. Sigma	zul. Sigma	w	L	W	Sigma
mm	mm	mm	mm	KN/m ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	%	%
4	4	5,040	8	3,20	28,79	39,41	8,14	816	99,75	73,05
10	10	12,599	20	3,50	30,45	39,23	20,50	2052,6	99,88	77,63
12	12	15,119	24	3,60	31,36	39,16	24,66	2463,2	100,1	80,07
15	15	18,899	30	3,75	31,98	39,06	30,78	3085	99,77	81,87
19	19	23,938	38	3,95	32,85	39,00	38,63	3885	99,43	84,23

Tabelle 4.6; Optimierung von KSG aus ESG mit umlaufendem KS-Element

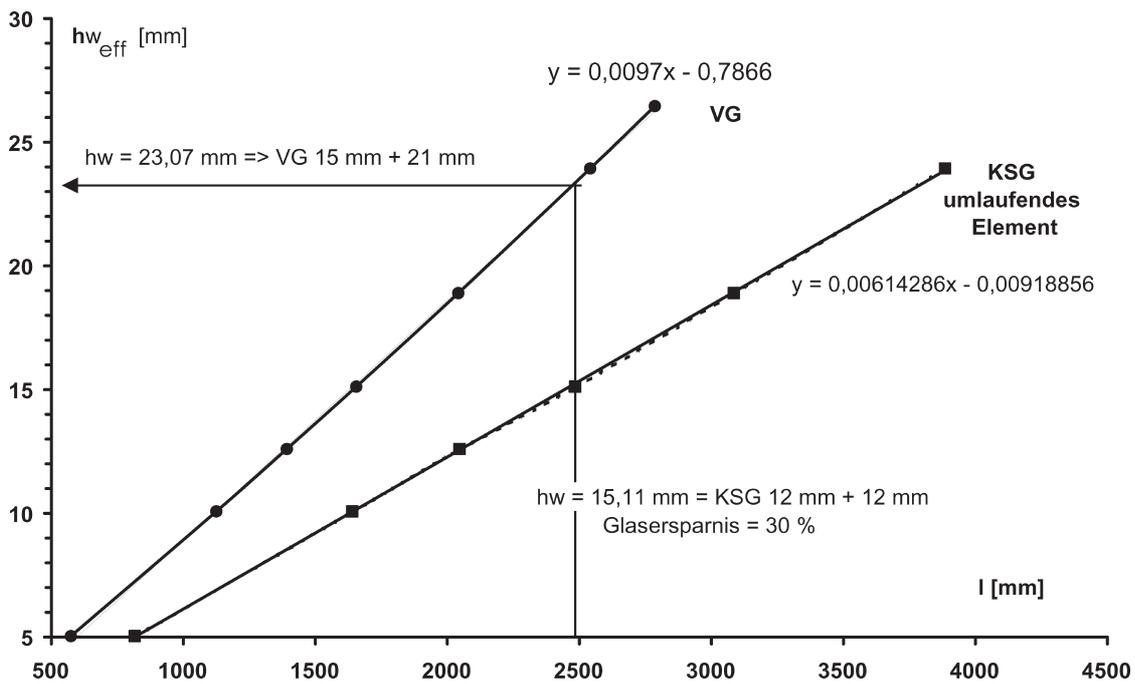


Abb. 4.63; Potenzial von KSG mit umlaufendem KSE aus ESG

nungen, wie sie zu Abb. 4.62 durchgeführt worden sind, bestimmt werden. Für eine 2 * 12 mm KS-Glasscheibe aus ESG ergibt sich demnach ein Einsparpotenzial von rund 30%. Mit einer vorsichtigen Abschätzung kann angenommen werden, dass zweiseitig gelagerte KS-Glasscheiben aus ESG eine **Gewichtersparnis von etwa 20% - 30%** ermöglichen; vergleiche hierzu Tabelle 4.7.

KSG			KSG				Gewichts- ersparnis	KSG- umlaufend				Gewichts- ersparnis
h	h	heff w	verg. heff w	gewählt. heff w	VG h	h ges.		verg. heff w	gewählt. heff w	VG h	h ges.	
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	mm	4+8	mm	%
4	4	5,040	6,964	6,986	5+6	11	27,27	7,186	7,56	6+6	12	33,33
10	10	12,599	17,164	17,216	12+15	27	25,93	19,12	19,20	6+19	25	20,00
12	12	15,119	20,567	21,711	15+19	34	29,41	23,10	23,29	15+21	36	33,33
15	15	18,899	25,665	26,458	21+21	42	28,57	29,07	drei Scheiben			
19	19	23,938	32,465	drei Scheiben				37,03	drei Scheiben			

Tabelle 4.7; Einsparpotenziale der KS-Elementanordnung im Vergleich (Ergebnisse aus Tabelle 4.4 und 4.6 im Vergleich)

Durch einen direkten Vergleich der erreichten Spannweiten in Tabelle 4.8, kann gesagt werden, dass die KS-Glaskonstruktion aus ESG etwa **125%** der Spannweite von herkömmlichen Verbundgläsern bei gleicher Gesamtdicke ermöglicht.

h = mm	h = mm	KSG mm	VG mm	%
4	4	770	574	125,45
10	10	1870	1392	125,56
12	12	2220	1655	125,45
15	15	2736	2041,5	125,38
19	19	3400	2541	125,26

Tabelle 4.8; Spannweitenzuwachs durch KSG aus ESG

4.E.1 KS-GAS ALS VERBUNDSICHERHEITSGLAS

Im Gegensatz zu Verbundglas wird für Verbundsicherheitsglas eine gewisse Resttragfähigkeit gefordert. Hierzu wird die Verwendung von Floatglas oder teilvorgespanntem Glas erforderlich, siehe Kapitel 2.C.4 und 2.E.2. Um nun Aussagen zum Potenzial von KS-Glas mit Sicherheitseigenschaften zu ermöglichen, wurden äquivalente Berechnungen zu vorangegangenen Studien mit der in Tabelle 3.2 angegebenen Festigkeit von Floatglas (45 N/mm²) durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse werden in den Tabellen 4.9 und 4.10 dargestellt.

VSG aus Floatglas										
h	h	heff w	hges.	$\frac{3 \text{ KN/m}^2}{+F_g}$	vorh. Sigma	zul. Sigma	w	L	W	Sigma
mm	mm	mm	mm	KN/m ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	%	%
4	4	5,65685	8	3,20	7,07	7,08	0,47	307,1	15,31	99,96
8	8	11,3137	16	3,40	6,89	6,89	0,84	588,3	14,29	100,00
10	10	14,1421	20	3,50	6,83	6,84	1,00	721,5	13,90	99,91
12	12	16,9706	24	3,60	6,79	6,79	1,16	851,0	13,57	99,94
15	15	21,2132	30	3,75	6,73	6,74	1,36	1038,0	13,14	99,91
19	19	26,8701	38	3,95	6,68	6,68	1,61	1276,0	12,65	99,94
21	21	29,6985	42	4,05	6,66	6,66	1,73	1390,5	12,43	99,96

Tabelle 4.9; Optimierung von VSG aus Floatglas

KSG aus Floatglas										
h	h	heff Sigma	hges.	$\frac{3 \text{ KN/m}^2}{+F_g}$	vorh. Sigma	zul. Sigma	w	L	W	Sigma
mm	mm	mm	mm	KN/m ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	%	%
4	4	5,656	8	3,20	6,96	7,02	0,40	380,0	10,61	99,20
10	10	14,142	20	3,50	6,75	6,79	0,92	872,0	10,53	99,45
12	12	16,971	24	3,60	6,73	6,74	1,06	1024,0	10,30	99,80
15	15	21,213	30	3,75	6,67	6,69	1,25	1259,0	9,93	99,73
19	19	26,870	38	3,95	6,62	6,63	1,47	1550,0	9,49	99,81
21	21	29,698	42	4,05	6,62	6,61	1,65	1700,0	9,71	100,18

Tabelle 4.10; Optimierung von KSG aus Floatglas

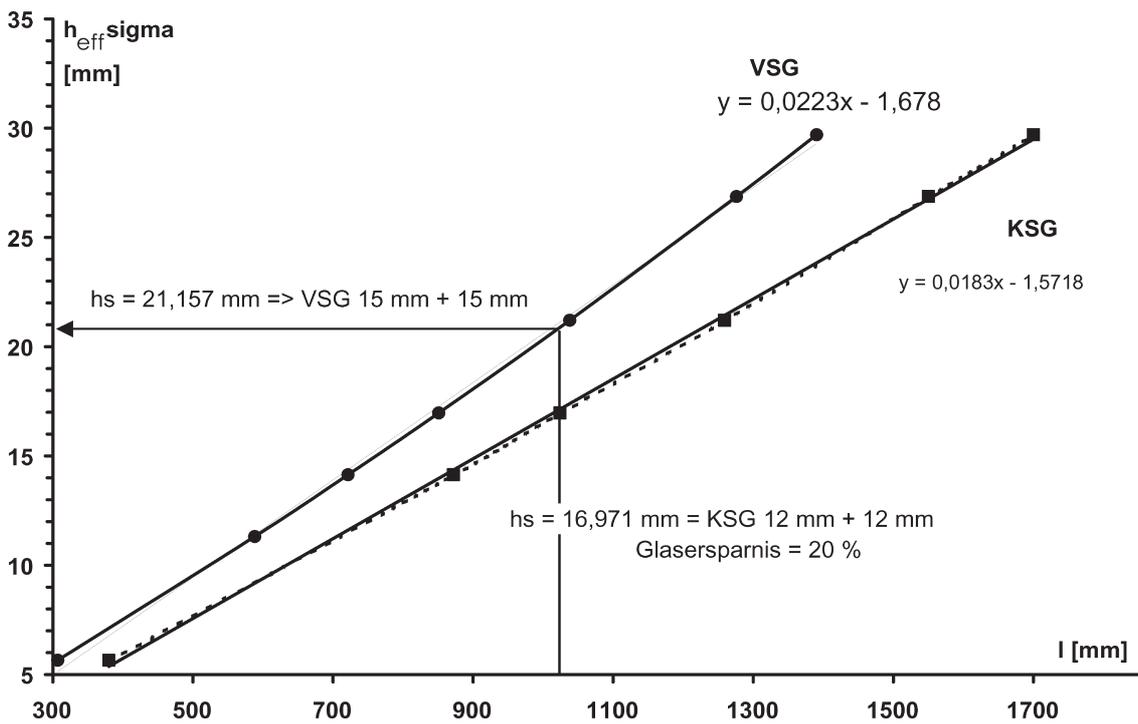


Abb. 4.64; Potenzial von KSG aus Floatglas (ohne Vorspannung)

KSG aus Floatglas bietet, obwohl relativ geringe zulässige Zugfestigkeit nach preNorm 13474 vorliegen, ein gutes Einsparpotenzial. Die zulässigen Spannungen ermöglichen eine **Gewichtersparnis für KSG mit Resttragfähigkeit von ca. 20%**, verg. Abb. 4.64. KS-Glas aus nicht vorgespanntem Floatglas ermöglicht außerdem eine **mindestens 15% größere Spannweite** bei gleicher Laminatdicke. Die Verwendung von Materialien mit höheren zulässigen Spannungen, insbesondere für die Glasscheibe auf der lastabgewandten Seite, liegt deshalb nahe. Da umlaufende KSE zu noch besseren Ergebnissen führen, wird hier auf eine weitere Betrachtung verzichtet.

h = mm	h = mm	KSG mm	VG mm	%
4	4	380,0	307,1	119,18
10	10	872,0	721,5	117,26
12	12	1024,0	851,0	116,89
15	15	1259,0	1038,0	117,55
19	19	1550,0	1276,0	117,68

Tabelle 4.11; Spannweitzuwachs durch KSG aus Floatglas

Teilvorgespanntes Glas bietet nach Tabelle 2.13 eine gute Resttragfähigkeit und wird darüber hinaus in Tabelle 3.2, 2 mit einer Prüffestigkeit von 70 N/mm² angegeben. Gegenwärtig gelten jedoch noch die in den technischen Richtlinien

festgelegten, weitaus höheren zulässigen Spannungen als die ermittelten Spannungen. Eine Berechnung nach TRLV führt demnach zu einer besseren Ausnutzung des KS-Glases. Die Einbeziehung der Bruchmechanik, so wie sie in der preNorm 13474 vorgeschlagen wurde, führt also zu erheblich dickeren Gläsern. Um nun abschließend KS-Glas auch hinsichtlich der noch gültigen zulässigen Spannungen abschätzen zu können, wurde eine vergleichende Analyse unter der Verwendung der in Tabelle 4.12 (nach TRLV) angegebenen zulässigen Spannungen für Floatglas im Überkopfbereich durchgeführt.

Zulässige Spannungen nach TRLV in [N/mm ²]		
	Überkopfverglasung	Vertikalverglasung
ESG aus Spiegelglas	50	50
ESG aus Gussglas	37	37
Emailliertes ESG aus Spiegelglas*	30	30
Spiegelglas	12	18
Gussglas	8	10
VSG aus Spiegelglas	15(25**)	22,5

* Emaille auf der Zugseite
 ** gilt für die untere Scheibe einer ÜKV aus Isolierglas im Versagensfall der oberer Scheibe

Tabelle 4.12; zulässige Spannungen nach TRLV

VSG aus Floatglas nach TRLV										
h	h	heff Sigma	hges.	3 KN/m^2 + Fg	vorh. Sigma	zul. Sigma	w	L	W	Sigma
mm	mm	mm	mm	KN/m ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	%	%
4	4	5,657	8	3,20	15,00	15	2,11	447,2	47,27	99,99
8	8	11,314	16	3,40	14,99	15	3,97	867,4	45,81	99,93
10	10	14,142	20	3,50	15,00	15	4,83	1069,0	45,20	99,99
12	12	16,971	24	3,60	14,99	15	5,63	1264,4	44,52	99,92
15	15	21,213	30	3,75	15,00	15	6,76	1549,0	43,66	99,98
19	19	26,870	38	3,95	15,00	15	8,14	1912,0	42,55	100,00
21	21	29,698	42	4,05	15,00	15	8,77	2087,0	42,02	100,00

Tabelle 4.13; Optimierung von VSG aus Floatglas nach TRLV

Die Berechnungen zeigen, dass erwartungsgemäß eine höhere VSG-Spannweite und wiederum eine Erhöhung des Spannweitenzuwachses durch KS-Glas erzielt werden konnte.

KSG aus Floatglas nach TRLV											
h	h	heff Sigma	hges.	3 KN/m^2 + Fg	vorh. Sigma	zul. Sigma	w	L	W	Sigma	
mm	mm	mm	mm	KN/m ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	%	%	
4	4	5,657	8	3,20	14,98	15	1,95	557,0	35,01	99,87	
10	10	14,142	20	3,50	14,89	15	4,42	1305,0	33,87	99,27	
12	12	16,971	24	3,60	15,00	15	5,22	1545,0	33,75	100,00	
15	15	21,213	30	3,75	14,97	15	6,14	1883,0	32,61	99,80	
19	19	26,870	38	3,95	14,98	15	7,51	2333,0	32,18	99,87	
21	21	29,698	42	4,05	14,99	15	8,23	2543,0	32,36	99,93	

Tabelle 4.14; maximale Spannweite für KSG aus Floatglas (nach TRLV)

h = mm	h = mm	KSG mm	VG mm	%
4	4	557,0	447,2	119,71
10	10	1305,0	1069,0	118,08
12	12	1545,0	1264,4	118,16
15	15	1883,0	1549,0	117,74
19	19	2333,0	1912,0	118,05

Tabelle 4.15; Spannweitzuwachs durch KSG aus Floatglas (nach TRLV)

Es kann festgestellt werden, dass durch die Verwendung von KS-Glasscheiben bei einer Berechnung nach TRLV eine **Ertüchtigung um etwa 17%** gegenüber herkömmlichen Verbundglasscheiben erzielt werden kann, Tabelle 4.15. Darüber hinaus kann von einer **Gewichtersparnis von etwa 25%** ausgegangen werden, verg. Abb. 4.65.

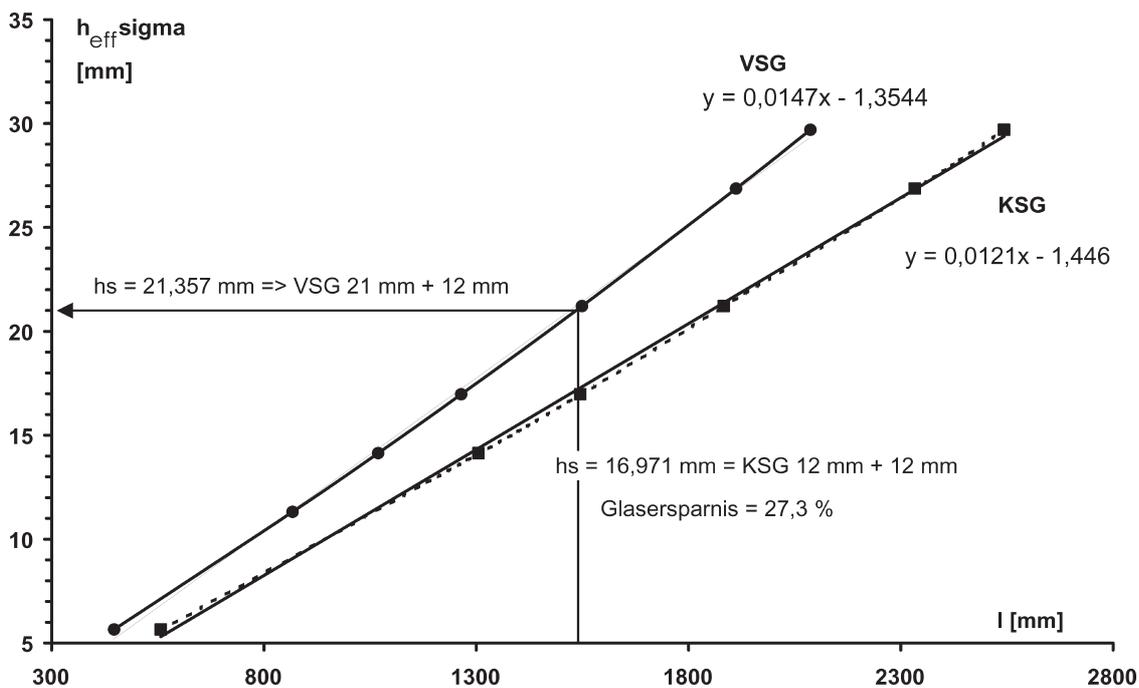


Abb. 4.65; Potenzial von KSG aus Floatglas (nach TRLV)

5 VERWENDUNGSSCHANCEN

Die Koppelung von Verbundglasscheiben im Randbereich ermöglicht weitere, über die übliche Verwendung von Fensterglas hinausgehende Konstruktionen. Zum einen bietet sich die Chance, vergleichbar mit der in Kapitel 2.E.1.B vorgestellten Methode zum Einprägen von Krümmung in gießharzgefüllte Glaslamine, zu einem vergleichbaren Verfahren an. Hierbei wird über die Kopplung der Glasplatten im Randbereich ein Vorspannzustand der Scheiben erzielt. Ziel ist es, die Scheiben derart vorzukurven, dass sie über ein deutlich verbessertes Tragverhalten verfügen. Zum anderen wurden aus der in Kapitel 4. A dargestellten Querkontraktionsbehinderung der Zwischenschicht weiterführende Konstruktionen entwickelt, welche in diesem Kapitel vorgestellt werden.

5.A KALTES KRÜMMEN

Im weiteren Verlauf wird die Möglichkeit zur Einprägung von Krümmungen mittels der KS-Konstruktionen vorgestellt und das Tragverhalten von gekrümmten Scheiben experimentell und rechnerisch untersucht. Glas wird gekrümmt, indem es auf ca. 600°C erhitzt wird und so thermoplastisch in Form gezogen, gebogen oder auch geblasen werden kann. So lassen sich nahezu alle Biegelinien bzw. Formen spannungsfrei realisieren. Gekrümmte Scheiben und insbesondere doppelt gekrümmte Scheiben, wie z.B. Systeme in Form einer Kuppel, verfügen über eine sehr hohe Steifigkeit. Diese nimmt bei zunehmender Last überproportional ab, Abb. 5.1 links. Es entwickelt sich eine Gewölbewirkung, indem die in den Scheiben radial wirkenden Druckkräfte mit einem umlaufenden Ring von Zugkräften im Gleichgewicht stehen, Abb. 5.1 rechts. Bei größeren Belastungen kann es neben dem Glasbruch auch zum Stabilitätsversagen, d.h. zum plötzlichen Durchschlagen der Scheibe kommen.

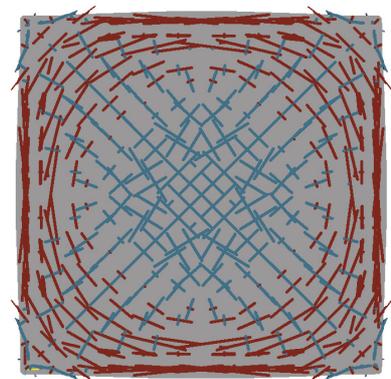
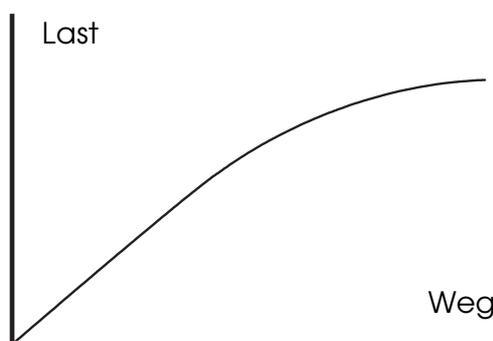


Abb. 5.1; Kuppel-effekt

In ebenen Glasscheiben hingegen überwiegen zunächst Biegedruckspannungen an der Oberseite und Biegezugspannungen an der Unterseite. Ab einer Verformung etwa über die Scheibendicke hinaus, gleitet das System von einem Biegesystem hin zu einem Membransystem. Die Biegespannungen werden von den Membranspannungen überlagert. Die Steifigkeit der Scheiben nimmt mit steigender Belastung überproportional zu, Abb. 5.2 links, sodass die Tragwirkung in der Glasfläche der eines Tennisschlägers ähnelt. In der Fläche überwiegen radial wirkende Zugkräfte, die mit einem Druckring am Rand im Gleichgewicht stehen, Abb. 5.2 rechts. Die Membrankräfte können auch als Umkehrung der oben beschriebenen Gewölbewirkung angesehen werden.

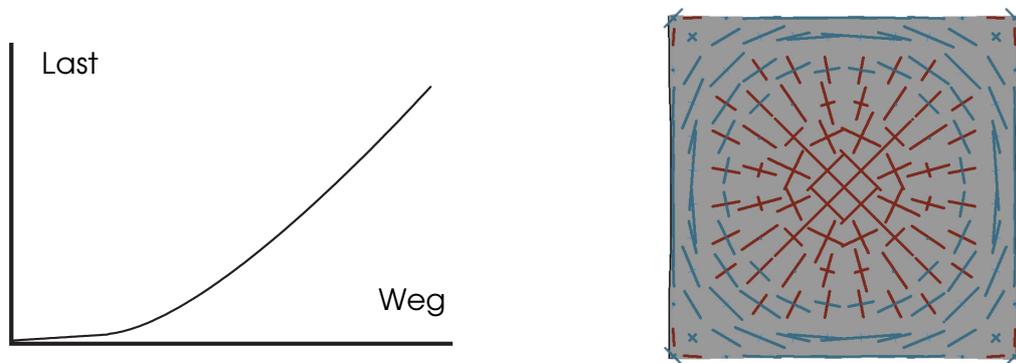


Abb. 5.2; Membrantragverhalten

Der Verformungszustand zweier Einzelscheiben, kann durch ein am Rand der Scheibe befindliches Kopperelement „festgehalten“ werden, indem das Element erst im verformten Zustand „aktiviert“ wird. Dabei werden die zu V(S)G laminieren Einzelscheiben vor Applizierung bzw. Aktivierung des Kantenschubverbundes bis in den Membranzustand gekrümmt. Nach der Aktivierung des Kantenschubverbundes federt die Scheibenkonstruktion beim Entlasten bzw. Lösen aus der Biegeform etwas zurück, Abb. 5.3.

Einprägen der Form

Rückfedern

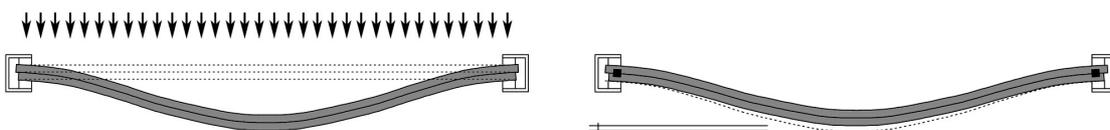


Abb. 5.3; kaltes Krümmen

Die resultierende Verformungsfigur ist eine Kombination aus Plattenverformung und der KS-charakteristischen Biegelinie. In die Scheiben wird mit der Verformung auch eine Vorspannung eingeprägt. Diese Vorspannung wird bei einer Belastung in entgegengesetzter Richtung von den Spannungen aus der Gewölbewirkung überlagert.

5.A.1 VERSUCHSKÖRPER

Es wurde ein erster Versuchskörper mit 1000 mm x 1000 mm und 2 x 4 mm Floatglas hergestellt. Die KS-Elemente bestehen aus 25 mm x 4 mm Floatglas und sind umlaufend mit einem Randabstand von 5 mm eingeklebt. Zur Verklebung wird der Strukturklebstoff (Loctite 3421A&B) der Firma Hysol verwendet. In den Scheibenzwischenraum wurde ausschließlich im Zentrum eine 60 * 60 mm Trennschicht bestehend aus 2 * 2 mm Plexiglas eingelegt, um die im Angriffspunkt der Belastung wirkende Last auf beide Scheiben zu übertragen.

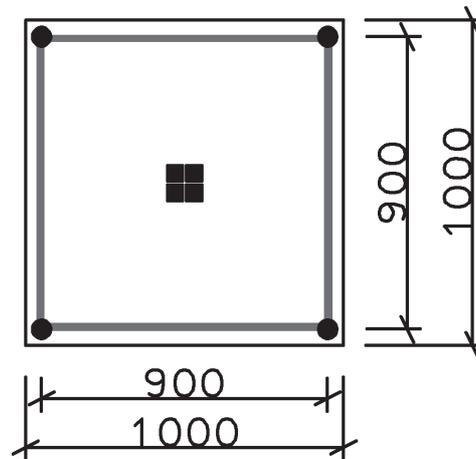


Abb. 5.4; Versuchskörper zum kalten Krümmen

5.A.2 MODELLBILDUNG

Für den Versuchskörper wurde ein Berechnungsmodell mit dem FE-Programm Esa-Prima Win 3.6 erstellt. Die Netzaufteilung mit 25 * 25 mm und die Materialkennwerte entsprechen den Basismodellen. Der eingelegte Glasstreifen am Rand hat eine versteifende Auswirkung, welche im FE-Modell berücksichtigt werden muss. Deshalb wurden die KS-Abstandselemente geteilt und mit einem umlaufenden 25 * 4 mm Glasstreifen

verbunden, Abb. 5.5 links. Die Elemente selbst sind während des Krümmens gelenkig gelagert und an den Schwerachsen der Glasplatten angeschlossen.

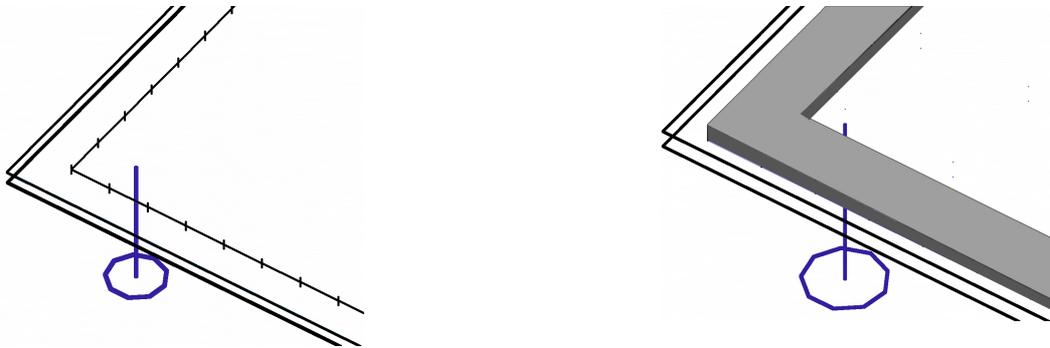


Abb. 5.5; KSE-Definition im FE-Modell

Die Platten werden wieder mittig in horizontaler X- und Y-Richtung gehalten und um die Z-Achse gegen Rotation gesichert, Abb. 5.6 links. In den Scheibenzwischenraum wurde ausschließlich im Zentrum eine 60 * 60mm Trennschicht bestehend aus 2 * 2 mm Plexiglas eingelegt. Diese Trennschicht wurde mit Abstandsstäbchen nachgebildet. Die Belastung erfolgt in sechs Laststufen von je 0.1 kN (10kg) im Scheibenzentrum, Abb. 5.6 rechts.

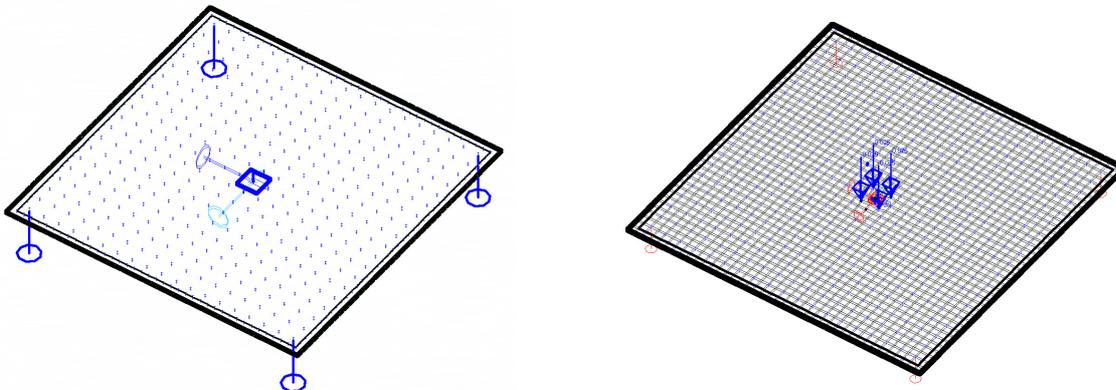


Abb. 5.6; Plattenlagerung und Lastbild

5.A.3 EXPERIMENT UND AUSWERTUNG

Es wurde eine auf vier Punkten gelagerte Scheibe, nach Abb. 5.4, bis zur vollständigen Aushärtung des Klebers (36 Stunden) mit 0.6 kN belastet. Die Belastung erfolgte in sechs Laststufen von je 10 kg (0.1 kN) und wurde durch geeichte Gewichtskörper aus Stahl eingebracht. Die Durchbiegung wurde mittels eines Wegaufnehmers in der Feldmitte gemessen. Bei der Entlastung wurde ein Rückfedern von 0.27 mm gemessen. Die eingeprägte Stich der Vorkrümmung beträgt 1,36 cm.

(gemessen vom Auflager ausgehend). Bei einer punktuellen Lagerung können sich die Ränder frei verformen und nehmen eine deutlich sichtbare Krümmung an.

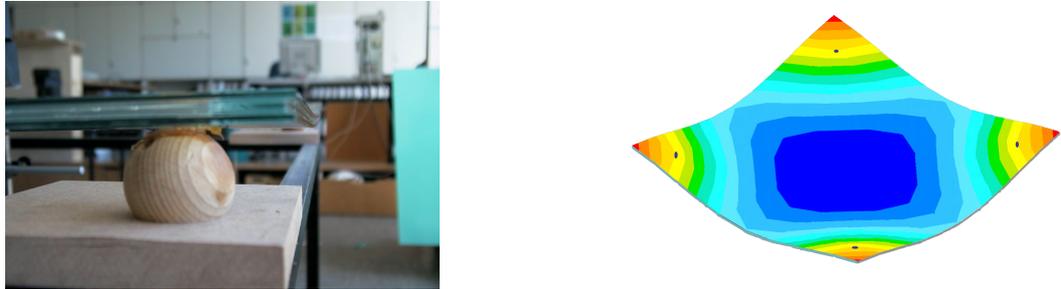


Abb. 5.7; Randkrümmung

Abb. 5.8 zeigt das Lastverformungsverhalten der Einzelscheiben während der Verformung und das Verformungsverhalten der vorgekrümmten KS-Scheibe. Die Anfangsverformung der gekrümmten Scheibe aus Eigengewicht wurde nicht erfasst. Die Ergebnisse von Berechnung und Messung zum „Einprägen der Form“ sind in Abb. 5.8 gegenübergestellt und zeigen eine ausreichende Übereinstimmung.

Die Verformungen des Prüfkörpers konnten mit dem gewählten Modell gut abgebildet werden. Ein Membrantragverhalten wie bei vierseitig gelagerten Scheiben konnte nicht beobachtet werden, jedoch deutet sich ein Kuppel-effekt an.

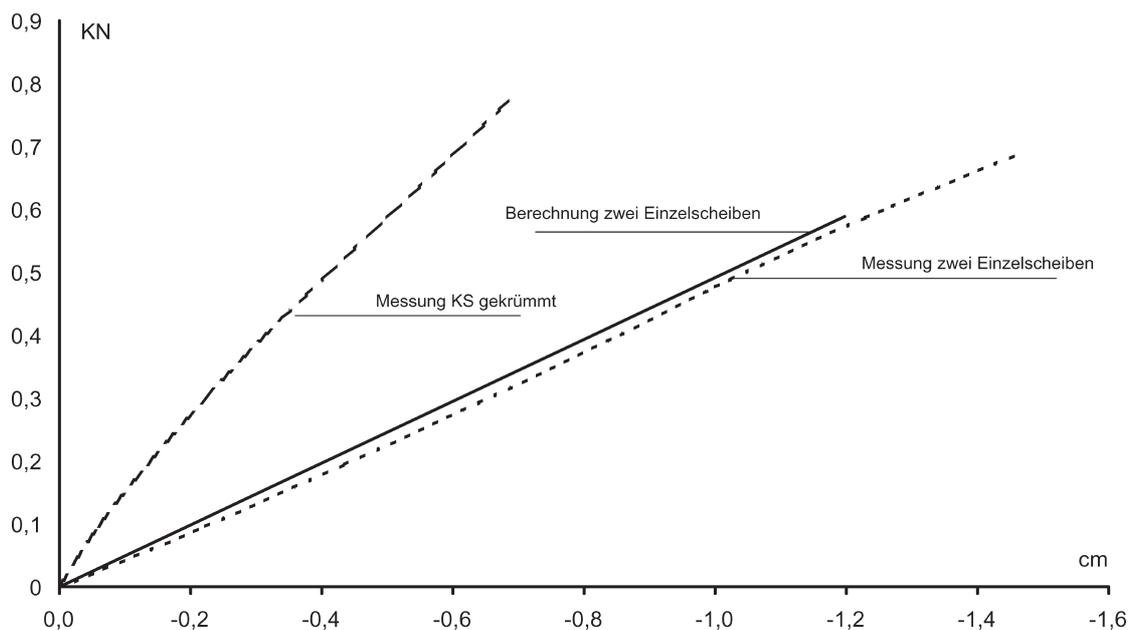


Abb. 5.8; Vergleich von Messung und Berechnung

Bei der Betrachtung der Verformung in der Scheibe, Abb. 5.9, wird das Tragverhalten einer vierpunktgelagerten und gekrümmten Scheibe, unter einer punktuellen Belastung offensichtlich. Bei einer Punktlast kommt es zu einer „lokalen“ Biegung in der Kuppel. Das spiegelt auch die Lastverformungskurve in Abb. 5.8 wider, welche zunächst mit einer hohen Steifigkeit startet und dann schnell in ein annähernd lineares Verhalten mit etwas geringerer Steifigkeit übergeht. Die punktgelagerte kalt gekrümmte KS-Scheibe trägt lediglich das Doppelte der Last der Einzelscheiben.

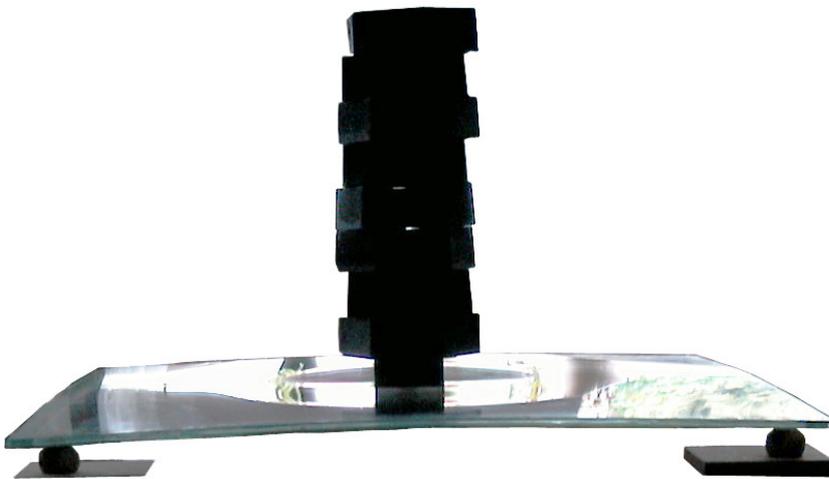


Abb. 5.9; Verformung unter einer Punktlast

Werden die Scheiben dagegen mit einer Flächenlast beaufschlagt und die Form liniengelagert eingepreßt, kommt es zu einer deutlichen Effizienzsteigerung der Konstruktion. Die kalt gekrümmten Scheiben tragen dann die Lasten ähnlich wie zwei übereinander liegende Kuppeln über ihre Gewölbewirkung ab. Das führt zu einer Steifigkeit, die mit der einer gekrümmten monolithischen Scheibe gleicher Gesamtdicke annähernd übereinstimmt. In Abb. 5.10 ist das Lastverformungsverhalten dieser Systeme im Vergleich dargestellt.

Diese gewölbten und vorgespannten Scheiben verfügen über deutlich verbesserte Trag- und Verformungseigenschaften. Das Tragverhalten gekrümmter Scheiben konnte mittels FE-Analysen beschrieben werden. „Das Diagramm zeigt den Vergleich des Lastverformungsverhaltens von fünf verschiedenen Konstruktio-

nen gleicher Längenabmessungen und gleicher Gesamtdicke. Die herkömmliche ebene Verbundglasscheibe kann nur geringe Lasten aufnehmen und verfügt (bei Ausfall der Schubsteifigkeit der Folie) über die geringste Steifigkeit. Die

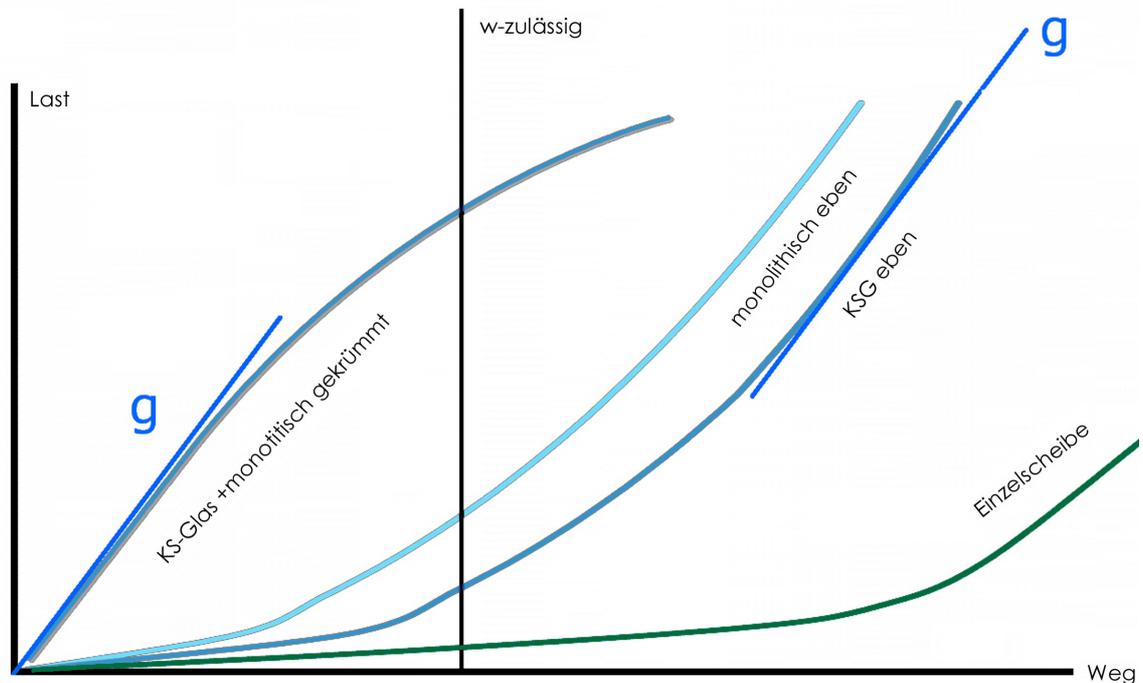


Abb. 5.10; Potenzial von kalt gekrümmten KS-Glas (Flächenlast)

ebene KSG-Scheibe kann deutlich größere Lasten tragen, erreicht aber nicht das Tragverhalten einer monolithischen gleich dicken Glasscheibe. Diese Scheibe wäre für den Einsatz als Sicherheitsglas wie z.B. das VSG für Überkopferverglasung allerdings nicht geeignet, da sie wegen fehlender Folie über keine Resttragfähigkeit im gebrochenen Zustand verfügt.

Die gekrümmte KSG-Scheibe verformt sich fast identisch wie eine entsprechend heiß verformte monolithische Scheibe. "Entscheidend ist die mögliche Lastaufnahme bei Erreichen der zulässigen Verformung. Die ebene KSG-Scheibe trägt etwa das Doppelte der VSG-Einzelscheibe, die gekrümmte das 8-fache", (75). Zur Verdeutlichung der Spannungsentwicklung in gekrümmten KS-GLäsern werden im Folgenden; Abb. 5.11 die Spannungsquerschnitte der einzelnen Verformungsstadien des Vorspannprozesses einer mit einer Flächenlast beaufschlagten Scheibe in Feldmitte aufgezeichnet. Die resultierende Vorkrümmung

entspricht in etwa $1/100$. Auf Grund der Komplexität der räumlichen Spannungsverläufe haben sie jedoch nur hypothetischen Charakter. Bei der Verwendung von thermisch vorgespannten Gläsern, wie z.B. TVG, müssen auch die Druckvorspannungen der Gläser Berücksichtigung finden.

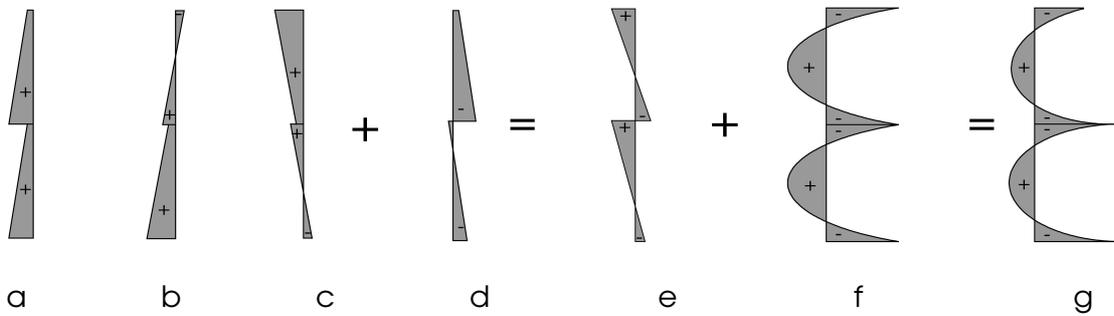


Abb. 5.1; Entwicklung des Spannungsquerschnittes im Scheibenzentrum einer kalt gekrümmten KS-Glasscheibe

- a = belasten von zwei Einzelscheiben
- b = aktivieren der KS-Elemente und entlasten der KS-Scheibe
- c = herumdrehen (Vorspannzustand)
- d = belasten
- e = resultierende Spannung
- f = thermische Vorspannung
- g = resultierende Spannung im Belastungszustand einer kalt gekrümmten TVG-Scheibe

Insofern die Scheibe nicht durch ein Stabilitätsversagen in der Kuppel kollabiert, kann es zur Überschreitung der aufnehmbare Zugspannung kommen, so dass die Scheibe bricht. Wie verhält es sich dann mit dem Resttragverhalten einer kalt gekrümmten Scheibe?

Üblicherweise wird VSG aus TVG oder Floatglas hergestellt. Verwendet man ESG, kommt es im Bruchzustand nur einer der Scheiben zu einer Verformung. Die einzelnen kleinen Bruchstücke dehnen sich nach dem Sprung aus und vergrößern annähernd kontinuierlich die Oberfläche der gebrochenen Scheibe. Brechen dagegen beide Scheiben, wird der Effekt kompensiert. Eine einzelne gebrochene thermisch vorgespannte Scheibe drückt die Verbundplatte jedoch in die Form einer Kugelkalotte. Dieses Verhalten konnte bei einer zerbrochenen Verbundglas-

-scheibe aus ESG festgestellt werden. Der Stich der vorher planen 1.5m * 0.77m Scheibe betrug nach dem Bruch einer Scheibe in Feldmitte bereits etwa 24mm. Wäre die Scheibe in der Fläche belastet worden, hätte die Kalotte sich höchstwahrscheinlich zusätzlich zur Durchbiegungsrichtung ausgeformt. Bei gekrümmten Scheiben bewirkt die Bruchdehnung der Splitter hingegen eine Erhöhung des Stiches also in Richtung der Vorkrümmung und wirkt somit der Last entgegen. Darüber hinaus ist völlig unklar, inwieweit ein Stabilitätsversagen der Scheiben von der mechanischen Vorspannung des Glases und der eingepprägten Form abhängig ist und inwieweit der Kantenschubverbund im Bruchzustand aufrechterhalten wird. Untersuchungen hierzu wurden noch nicht durchgeführt und werden für zukünftige Forschung relevant werden.

5.A.4 VERWENDUNGSKONZEPT

Da sich beim Einprägen von Krümmungen mittels des Kantenschubverbundes ein gewisses Rückfederverhalten der Scheiben ergibt, lassen sich Krümmungen des Scheibenrandes nicht vermeiden. So ist das Durchbiegungsverhalten und der Spannungszustand der Scheiben insbesondere von der Elastizität der Auflagen in einer Biegevorrichtung abhängig. Das folgende Bild zeigt etwas überhöht die Entwicklung der Auflagerreaktionen einer 5mm Dicken 2*2m Scheibe (1KN/m² Last) unter a. unverschieblich, b. elastischer und c. sehr weicher Bettung.

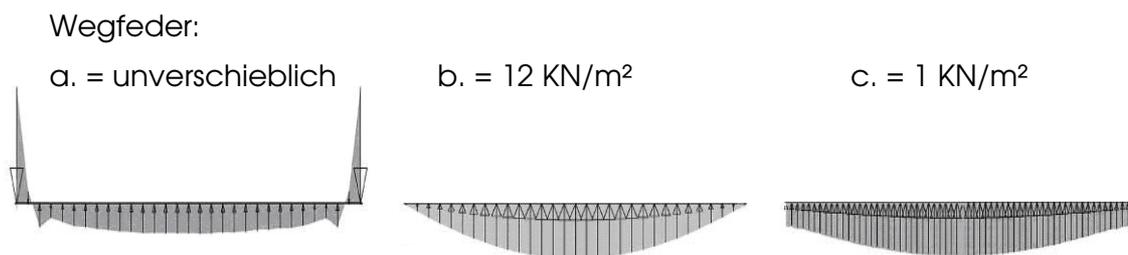


Abb. 5.12;

Auflagerreaktionen einer Platte in unterschiedlich weicher Linienbettung

Aus der Verteilung, Richtung und Größe der Auflagerreaktionen lassen sich die Biegelinien des Randes ableiten. Die Spannungen im Randbereich stehen u.a. in Zusammenhang mit den Biegelinien und sind hinsichtlich der Bruchfestigkeit von Glasscheiben von besonderem Interesse. Die nachfolgende Tabelle zeigt exemplarisch die Spannungs- und Durchbiegungsentwicklung einer Glasscheibe

auf unterschiedlich elastischen Bettungen (FE-Studie). In Abhängigkeit von der Lagerung, von a. = fest bis zu c. = sehr weich, steigt die Feldspannung an, während die Randspannung überproportional abnimmt.

Lagerung	a.	b.	c.
δ Feld unten in N/mm ²	7,34	8,63	9,82
δ Rand in N/mm ²	3,72	0,55	0,44
$\delta R/\delta F$ Proportionalitätsfaktor	0,51	0,063	0,045
W Feld in mm bereinigt = Relativverformung	7,3	13,06	18,22
W Rand in mm (bereinigt)	-	4,85	9,45
W Feld / W Rand (bereinigt)	-	0,37	0,52

Tabelle 5.1

Das Zusammenspiel von Scheibenbettung (Auflagerelastizität), Lasteinleitung und den daraus resultierenden Spannungen und Krümmungen wurde mit dieser Untersuchung exemplarisch qualitativ beschrieben. Sie soll einen ersten Hinweis für ein zu entwickelndes Herstellungsverfahren geben.

Eine Verwendungsmöglichkeit von gekrümmten Scheiben generell liegt in einer Niederdruckisoliereinheit. Ziel ist es, zwei gegensinnig gekrümmte Scheiben mittels elastischer Spacer zu beabstanden und den entstehenden Hohlraum insoweit zu evakuieren, dass die Scheiben annähernd plangezogen werden.

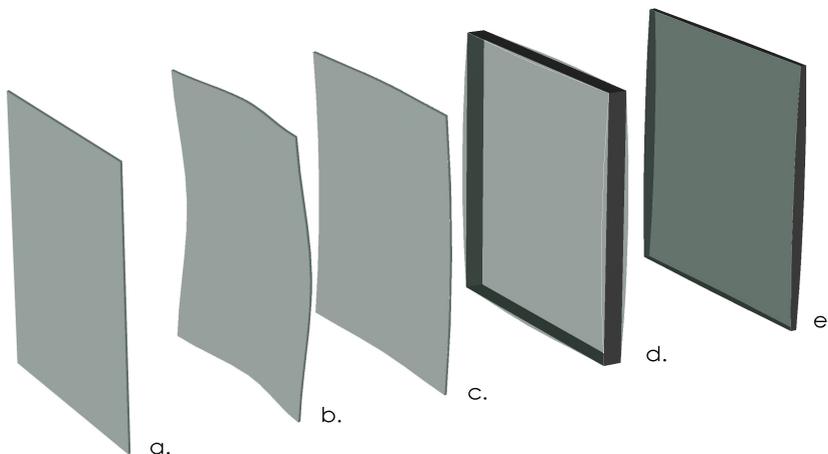


Abb. 5.13; Herstellungsprozess von Niederdruckisolierverglasung

Ein späterer Herstellungsprozess sollte dabei im Wesentlichen in den folgenden Prozessschritten erfolgen.

- a. Herstellung der KS-Glas Einzelscheiben
- b. Kaltes Krümmen der KS-Glas Einzelscheiben
- c. Entlasten und Rückfedern der Einzelscheiben
- d. Montage der Isolierglasscheibe, Spacer
- e. Verfüllen und Evakuieren der Isolierglasscheibe zu NDI

„Planebene“ Scheiben von Isolierglas werden bei ungünstigem Luftdruck (Klimalast) nach Innen gedrückt. Dabei kann es insbesondere bei großen Scheiben, neben den optischen Beeinträchtigungen durch die entstehenden Krümmungen, zum Kontakt der Scheiben kommen (Kältebrücke). Innen liegende bewegliche Sonnenschutzlamellen können dadurch eingeklemmt werden. Sie werden so an ihrer Bewegung gehindert.

Durch die höhere Steifigkeit, auf Grund der Gewölbewirkung in den kalt gekrümmten Scheiben, könnte dieses Problem gelöst werden, da die Scheiben nicht mehr nach innen einfallen. In sogenannten Lochfassaden spielt die Ebenheit der Fensterscheiben eine sekundäre Rolle, wohingegen großflächige Glasfassaden auf Grund von Unebenheiten der Einzelscheiben deutlich an optischer Qualität verlieren können. Das Seitenverhältnis ist neben der Lagerung entscheidend für die Entwicklung des Membrantragverhaltens und damit auch für die Effektivität des Kuppel-effektes.

Aus den Betrachtungen zum Seitenverhältnis von vierseitig gelagerten Platten, in Kapitel 3.B Abb. 3.14, wird ersichtlich, dass die Berücksichtigung von Membrantrageffekten selbst für relativ schmale Scheiben als sinnvoll erscheint. Da der Membrantrageffekt als invertierter Kuppel-effekt verstanden werden kann, erscheint die Verwendung von kalt gekrümmten Scheiben für alle üblichen Scheibenformate als angebracht; insbesondere jedoch ab einem Seitenverhältnis von 0.3 oder höher, da etwa ab einem Seitenverhältnis von 0.3 der Membrantrageffekt deutlich überproportional zunimmt.

5.B NEUE FÜGUNGEN

Bei der Auseinandersetzung mit den Konstruktionsmöglichkeiten, einen wirkungsvollen und möglichst einfach herzustellenden Kantenschubverbund zu entwickeln, entstand die Idee der inkompressiblen Verbindung. Darauf aufbauend sind einige weitere Ansätze für den zukünftigen konstruktiven Glasbau entstanden. Diese Überlegungen werden in diesem Kapitel vorgestellt und diskutiert.

In Abb. 5.14 links ist ein mögliches Beispiel für einen VSG-Klemmhalter, welcher auf der Haftreibung und einer konstruktiven inneren Behinderung der Querkontraktion (IK) in der Zwischenschicht beruht. Durch die partielle Pressung sind die Scheiben gelenkig gelagert. Die Vorspannkraft des Klemmhalters wird auf die Scheiben übertragen. Die Zwischenschicht tendiert dazu, der Druckkraft auszuweichen, also zu kriechen. Die eingelegten Ringe können so ausgeführt werden, dass sie den Druck übertragen oder einen inkompressiblen Bereich in der Fuge schaffen.

So lange die Ringe den Druck nicht selbst übertragen, werden die Scheiben durch die Haftreibung der Klemmhalter in ihrer Position gehalten. Diese Konstruktion ist jedoch auf zwei Scheiben begrenzt, da eine mittlere Scheibe zwar über den inkompressiblen Bereich den Druck übertragen kann, aber dennoch aufgrund der Fließeigenschaft der Zwischenschicht aus ihrer Ruhelage gleiten könnte. Insofern die eingelegten Ringe auch schubfest ausgeführt werden, können auch Schubkräfte übertragen werden, womit eine Mittelscheibe in ihrer Position fixiert wäre.

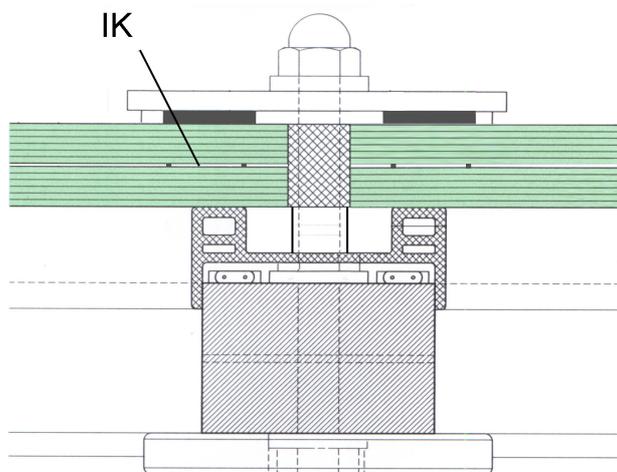


Abb. 5.14; Klemmverbindung für VSG und VG

Eine weitere Überlegung zum Fügen von Glas besteht darin, Glasscheiben nicht, wie sonst üblich, als Tafel oder als Schwert (Träger aus Verbundglasscheiben) flächig einzusetzen, sondern wie Bücher in einem zusammengedrückten Bücherstapel anzuordnen. Hierbei werden die Stahleinlagen, oder besser Zugbänder, gegen eine Kopfplatte vorgespannt, welche den Scheibenstapel mit einer Druckvorspannung belastet. Abb. 5.15 stellt vereinfachend den Vorspannzustand und die Spannungsüberlagerung eines biegebeanspruchten „Stapelglassträgers“ dar.

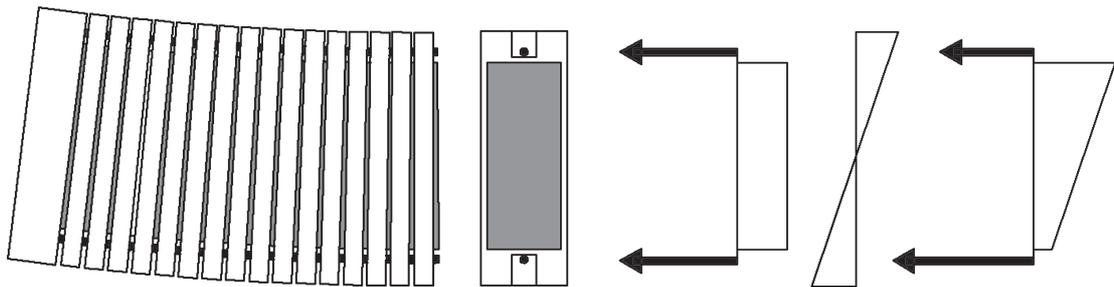


Abb. 5.15; Spannungsverteilung in einem Stapelglasbalken

Glas hat eine Druckfestigkeit von etwa 30 KN/cm^2 , (Theoretisch über 90 KN/cm^2). Beton dagegen gibt es in Druckfestigkeitsklassen von ca. 1 KN/cm^2 bis 6 KN/cm^2 . Glas hat also die 5 bis 30 fache Betondruckfestigkeit und kommt damit in den Festigkeitsbereich von Stahl. Dagegen hat Glas, vergleichbar mit Beton, eine sehr geringe Zugfestigkeit. Deshalb sollte es analog zum Stahlbeton mit „vorgespannten Einlagen“ aus Stahl versehen werden.

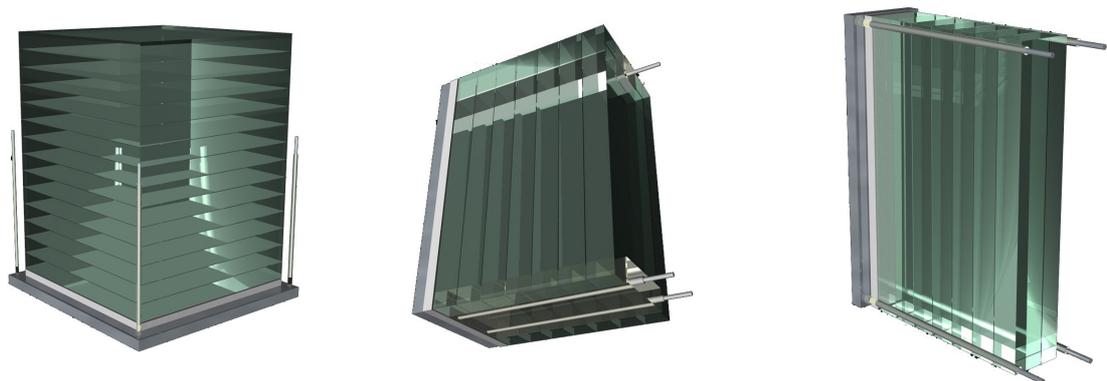


Abb. 5.16; Stapelglasstütze und Stapelglasbalken

Die Zugelemente können außerhalb oder innerhalb dieser Stapelscheiben verlaufen, Abb. 5.17. Mit neuen Lasern zur Glaskonfektionierung werden aufwendige Polier und Schleifprozesse der Kanten überflüssig, vgl. 2.C.2, sodass diese

Verfahren eine wirtschaftliche Produktion der kleinteiligen Stapelgläser ermöglichen. Die Tragfähigkeit dieser Konstruktion ist dabei nicht von der Unverletztheit der einzelnen Scheiben abhängig, da selbst gebrochene Scheiben auf Grund der Haftreibung in ihrer Position verbleiben. Ein Resttragverhalten muss für diese Glaskonstruktion ebenfalls nicht nachgewiesen werden, da das Tragverhalten des Systems im Wesentlichen von der Zugfestigkeit des Stahls abhängt und ein Spontanbruchverhalten, wie es bei Glasscheiben auftritt, nicht relevant ist. Um Glaskonstruktionen auf diese Weise zu konzipieren, müssen grundsätzliche Bedingungen eingehalten werden. Glas darf wegen seiner bruchmechanischen Eigenschaften keine härteren Materialien direkt berühren. Es wird deshalb in der Regel mit Trennschichten aus dauerelastischen Kunststoffen verklebt bzw. elastisch in seinen Auflagerpunkten gebettet, vgl. 3.A. Die Stahleinlagen werden deshalb entweder eingegossen oder verlaufen in einem Kunststoffmantel.

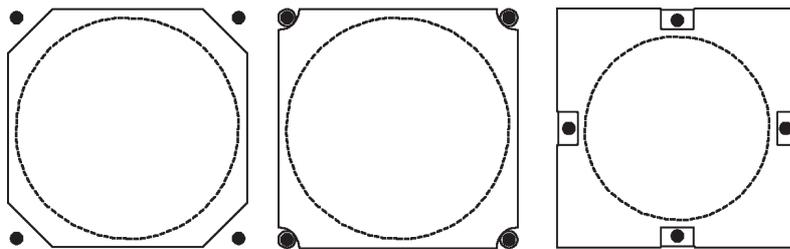


Abb. 5.17; mögliche Anordnung der Vorspannglieder in Stapelglasstützen

In Abb. 5.18 sind mögliche Ausführungsbeispiele einer inneren konstruktiven Querkontraktionsbehinderung dargestellt. Links ist eine für eine Stütze geeignete Anordnung der Schnüre dargestellt, und rechts ist eine mögliche Anordnung für einen Balken zu sehen:

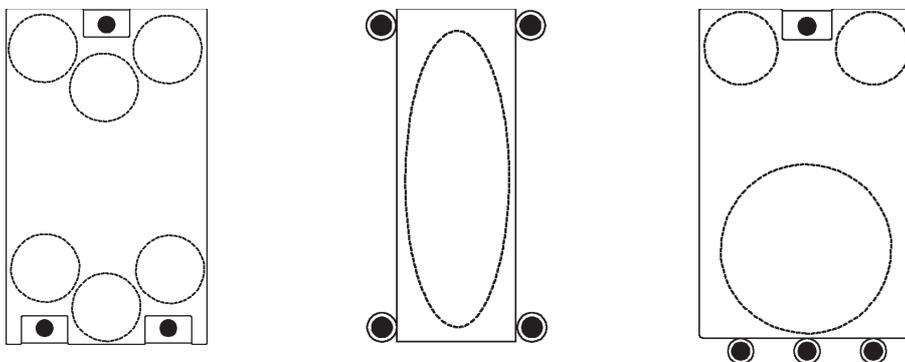


Abb. 5.18; mögliche Anordnung von Vorspanngliedern und Kompressionsschnüren in Stapelglasbalken

Die gestapelten Scheiben selbst benötigen auf jeden Fall eine „weiche“ Trennlage, um sie vor Bruch zu schützen. Diese Trennlage kann aus den unterschiedlichsten Materialien hergestellt sein. Neben Kunststoffen sind auch weiche Metallfolien wie z.B. Aluminium oder Gewebe als Zwischenlage denkbar.

Die Umschnürung von unter Druck stehenden Elastomeren kann auch durch eine umlaufende Konstruktion, z.B. aus Glasscheiben, realisiert werden. Dieses „Einpacken“ kann als konstruktive äußere Behinderung der Querkontraktionen bezeichnet werden, vgl. 2.D.3.D, und führt zu einem eingeschränkten Fließverhalten der eingefüllten Zwischenschichten; wie sie z.B. aus Gießharzen realisiert werden. Hierzu werden eventuell autonachspannende Maßnahmen erforderlich, wie z.B. die Aufhängung der Spannglieder in Federn.

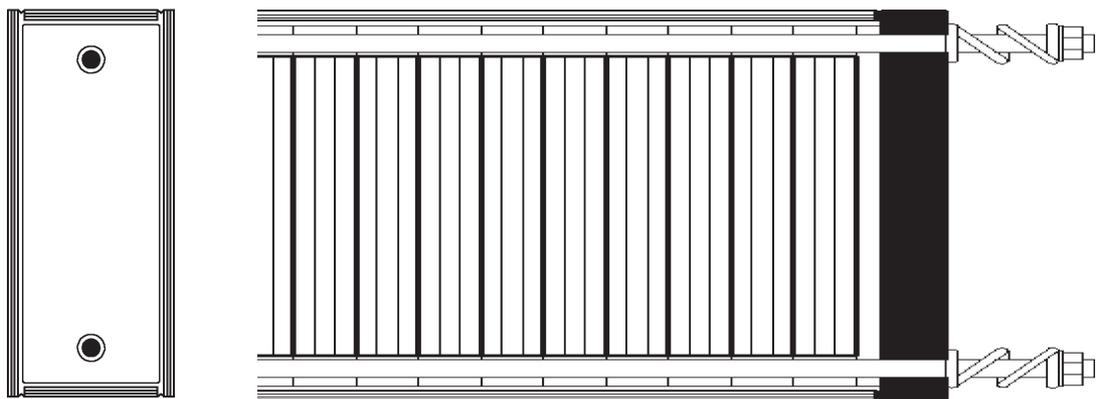


Abb. 5.19; Äussere Querkontraktionsbehinderung mit Spannfedern

Mit Glasstapelträgern eröffnen sich neue gestalterische Möglichkeiten. Es werden transparente bzw. transluzente und weitaus schlankere Träger und Stützen (als sie im Stahlbetonbau erforderlich sind) aus Glas ermöglicht, ohne auf die Bruchmechanik, vgl. 2.B, von Glas Rücksicht nehmen zu müssen.

Die Zwischenlagen selbst können transparent bis transluzent, eingefärbt oder sogar lichtlenkend ausgeführt werden. Biegesteife Anschlüsse, Gitterroste, Auskragungen, eingespannte Stützen bis hin zu Rahmenkonstruktionen erscheinen mit Glasstapelträgern und Stützen konzipierbar. Glasstapelträger könnten wie Stahlbetonfertigteiltailbalken eingesetzt werden. Wegen der hohen Druckfestigkeit der Konstruktion können die Glasstapelkonstruktionen extrem schlank ausgeführt werden und so ein hohes Maß an Transparenz, vergleichbar mit der von Glaschwertern, erreichen.

Auf Grund der möglichen extrem schlanken Bauweise, verfügt die Glasstapelkonstruktion über gänzlich andere optische Eigenschaften als herkömmliches, in Form von Scheiben oder Tafeln verwendetes Glas. Die neuen Konstruktionen besitzen eine blickwinkelabhängige Transparenz.

Fällt der Blick orthogonal auf die Glaskanten, erscheint der Träger, unter der Voraussetzung einer optimalen Oberfläche, völlig transparent. In davon abweichenden Blickwinkeln wirkt die Konstruktion transluzent prismatisch bis undurchsichtig. Diese Eigenschaft lässt sich durch die verwendeten Zwischenschichten steuern.

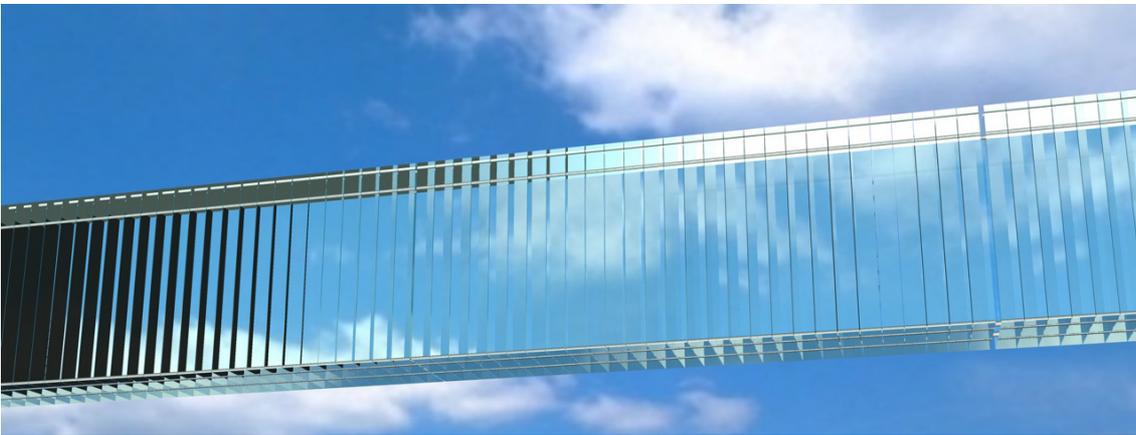


Abb. 5.20; extrem schmaler Stapelglasbalken

Dabei hat die Kantenqualität bei diesen vorgespannten Konstruktionen ausschließlich optischen Ansprüchen zu genügen, da die Bruchmechanik und damit die Oberflächenbeschaffenheit für das Tragverhalten des Verbundes unerheblich ist. Das Erscheinungsbild der Träger und Stützen lässt sich also durch die Oberfläche der Kanten beliebig beeinflussen und gestalten. Die Oberflächen können darüber hinaus auch lichtlenkend geschliffen werden (Prismen).

Hier verbergen sich viele Möglichkeiten, das Erscheinungsbild der Oberfläche und damit des Trägers zu optimieren. Die optischen Eigenschaften der Glaskanten bzw. der Bauteile, sei es als Träger oder als Stütze, können auch zur Beleuchtung genutzt werden, indem in die Konstruktion Lichtquellen integriert und die Kanten eventuell lichtlenkend ausgeführt werden. Abb. 5.21 zeigt von innen illuminierte Stapelkonstruktionen und eine mögliche prismatische Ausführung der Glaskanten zur Lichtlenkung.

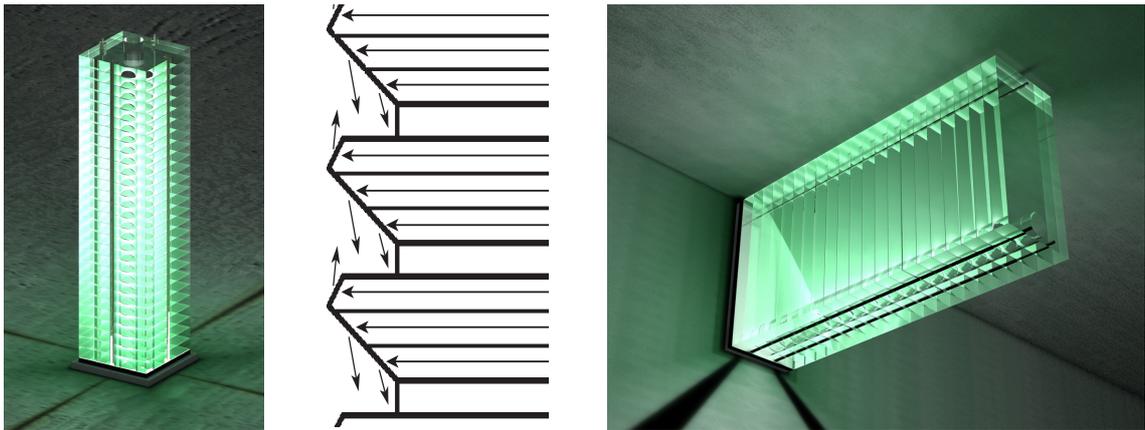


Abb. 5.21; Illumierte und Lichtlenkende Stapelgläser

Ein mögliches Beispiel zur Anwendung stellt ein Verbandträger dar. Hier werden ebenfalls normal zur Scheibenfläche Druckkräfte durch Spannglieder von außen angelegt, Abb. 5.22 links. Die Scheiben sind nun derart aufeinander gepresst, dass ein Herausziehen der inneren Scheibe oder ein „Kriechen“ einer der Scheiben verhindert wird. Auf Grund der Haftreibung können außerdem Zugkräfte über die Kopfplatten der Spannglieder übertragen werden.



Abb. 5.22; Detailausbildung eines biegesteifen Anschlusses

Der Name „Verbandträger“ wurde gewählt, weil die Konstruktion an den Läuferverband im Mauerwerksbau erinnert. Dabei übergreift jede Glasscheibe eine Fuge und wird in der nächsten stirnseitig gestoßen und fixiert. Da Scheiben mit einer maximalen Länge von 6m industriell produziert werden, ergeben sich Feldlängen von bis zu etwa 3m.



Abb. 5.23; Verbandträger

Glaslaminaten besitzen im unteren Belastungsbereich ein vom Schubverbund der Trennlage abhängiges Tragverhalten, welches bei steigender Belastung durch das nichtlineare Verhalten der dünnen Platten bzw. durch den Membraneffekt stark beeinflusst wird. Es konnte eine gute Übereinstimmung der diskretisierten FE-Modelle mit der nichtlinearen Plattentheorie nachgewiesen werden. Die Modelle zeigen, dass der Ort der größten Zugspannungen in vierseitig gelagerten Glaslaminaten ohne Schubverbund zu den Ecken hin auswandert und sich auf der Unterseite der lastabgewandten Platte befindet.

Die Zugspannungen in den KS-Glasscheiben sind abhängig von der Steifigkeit bzw. von dem Schubmodul des Elementes. Es konnte gezeigt werden, dass schon bei relativ geringer Festigkeit die KS-Elemente einen mittleren Schubverbund erzeugen, und dass die Spannungen am Element bei steigender Schubfestigkeit oberhalb der Feldspannungen liegen können. Bei großen Verformungen jedoch dominiert das Membrantragverhalten in vierseitig gelagerten Scheiben, sodass die größere der beiden Spannungen im Feld zu erwarten ist. Bemerkenswert ist jedoch, dass bei einem umlaufenden KS-Element in vierseitig gelagerten Platten die größten Spannungen in Form von Tangentialspannungen an den Ecken der unteren Platte auftreten. In diesem Bereich können durch Aussparung der KS-Elemente Spannungsspitzen abgebaut werden, ohne das Gesamttragverhalten wesentlich zu beeinflussen.

Im Gegensatz zu vierseitig gelagerten Platten kann bei einer zweiseitig gelagerten Platte auf eine nichtlineare Berechnung verzichtet werden. Umlaufende Elemente sind gegenüber nur an der Auflagerseite applizierten Elementen zu bevorzugen, da so die bei nicht umlaufenden Elementen auftretenden großen Tangentialspannungen an den Ecken vermieden werden können und da der „steife“ Rand sich positiv auf das Verformungsverhalten der Platte auswirkt. Hierbei beeinflusst das Seitenverhältnis der Platte das Tragverhalten, indem es im Gegensatz zu Platten ohne Versteifung des freien Randes, bei zunehmender Plattenbreite zu einer größeren Verformung kommt. Das ist dadurch zu erklären, dass die Felddurchbiegung in Plattenzentrum im Verhältnis zum Rand größer wird, der Rand also seinen Einfluss im Feld verliert. Bei herkömmlichen Platten biegt sich der Rand etwas stärker durch als das Plattenzentrum.

Die beste Methode, den Kantenschubverbund konstruktiv umzusetzen ist ein Plättchen, z.B. aus Aluminium, in der Zwischenschichtebene mit einem Acrylatkleber einzubinden. Die zulässige Spannung in diesem inneren und damit geschützten Bereich der Scheibe sollte höhere Werte annehmen können, so dass für diesen Bereich eine eigene zulässige Spannung definiert werden könnte. Darüber hinaus sind die entstehenden Spannungen im Verhältnis zu anderen Koppelungen relativ gering. Diese Methode des Einlegens eines Plättchens in die Klebeschichtebene bedingt, dass die Montagegröße der Scheibe vor der Laminierung bekannt ist. Meistens wird die Verbundglasscheibe jedoch von den Veredlungsbetrieben konfektioniert. Hierzu ist es notwendig, den Kantenschubverbund nach der Konfektionierung zu applizieren.

Ein auf die Schnittkante appliziertes U-förmiges Plättchen stellt gegenwärtig die beste Geometrie dar, da so die Spannungsspitzen in das Koppellement gezogen werden können und die Spannungen an der Klebefuge relativ gering ausfallen. Außerdem kann auf diese Weise auch das kalte Krümmen, also das Applizieren eines KS-Elementes auf mechanisch gekrümmte Platten (vorzugsweise doppelt gekrümmte Platten), realisiert werden. Die Kantenqualität ist hierbei besonders zu berücksichtigen. Gelingt es eine Prozesskette zu entwickeln, sollte unbedingt die Lasertechnologie Verwendung finden, da sie zu deutlich höheren Kantenfestigkeiten führt. Eine Bemessung könnte, insofern die Kantenfestigkeit dauerhaft durch das KS-Element sichergestellt werden kann, zwei zulässige Spannungen berücksichtigen. Für das konfektionierbare Floatglas und das TVG würde das bedeuten, dass im Feld die zulässigen Spannungen und am Element die höheren zulässigen Kantenspannungen zu Grunde gelegt werden. Bei der Beanspruchung durch den Kantenschubverbund könnte die Kantenfestigkeit durch den Laserschnitt voll ausgenutzt werden. Darüber hinaus treten die maximalen Zugspannungen zur Zwischenschicht hin auf. Durch diesen „Kunstgriff“ könnten beträchtliche Einsparungen im Bauwesen umgesetzt werden, da Floatglasscheiben mit einer Festigkeit vergleichbar mit der von ESG oder zumindest von TVG berechnet würden.

Mit der vor der Einführung stehenden DIN 18008 „Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln“ wird der Tragfähigkeitsnachweis auf Grundlage der DIN 1055-100 mit dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte erforderlich. Die für die Glasbemessung besonders relevante charakteristische Windlast entspricht dabei dem bisherigen Niveau. Der Bemessungswert wird jedoch um 50% erhöht.

Außerdem wird der Bemessungswert für Floatglas in gewissen Fällen weiter reduziert. Eine Berücksichtigung des Schubverbundes ist weiterhin für ständige Belastungen nicht zulässig. Die neuen Normen können also, vergleichbar mit dem Normenvorschlag prEN 13474, dickere Scheiben oder einen Wechsel von Floatglas auf TVG bzw. ESG erzwingen.

Wie bei den Berechnungen zum Einsparpotenzial gezeigt wurde, ist die Glasqualität entscheidend bei der Optimierung der Scheiben. Für Verbundglas aus ESG wird bei einer zweiseitigen Lagerung die Durchbiegung relevant, und bei Verbundsicherheitsglas aus Floatglas wird die Spannung in Elementnähe bzw. an der Glaskante zur relevanten Größe. Für zweiseitig gelagerte Scheiben ohne Berücksichtigung einer eventuell hochfesten Kante konnte im Vergleich zu herkömmlichen Glaslaminaten eine Gewichtsersparnis von 20% bis zu 30% und eine Vergrößerung der Spannweite von rund 15% bis zu 25%, jeweils in Abhängigkeit von der Glasfestigkeit, ermittelt werden.

Die Leistungsfähigkeit der kalt gekrümmten Scheiben übertrifft planes KS-Glas um ein Vielfaches. Wie eingangs umrissen wurde, ist die Spannweite der Scheiben und damit der Anteil der Fügpunkte an der Gesamtfläche entscheidend für die Transparenz einer Konstruktion. Die Spannweite wird ihrerseits nicht nur durch die Steifigkeit einer Verbundsicherheitsglasscheibe bestimmt, sondern auch durch ihr Resttragvermögen. Das Resttragverhalten von ebenen KS-Glas wurde nicht untersucht. Es wird nach gegenwärtiger Einschätzung dem von herkömmlichem Verbundsicherheitsglas gleichen. Inwieweit das kalte Krümmen der Scheiben die Resttragfähigkeit beeinflusst ist ebenfalls völlig ungeklärt. Die neuen Fügungen im konstruktiven Glasbau, auf Grundlage der Ausbildung von schubfesten bzw. inkompressiblen Bereichen in der Klebeschicht, sind ebenfalls lediglich konzeptionell entwickelt. Sie geben jedoch Anlass, eingepresste Schnüre in zukünftiger Forschung hinsichtlich einer Verwendung als KS-Element und für Klemmverbindungen ausführlich zu studieren. Für die Verwendung von Glaslaminaten mit Kantenschubverbund ergeben sich vielfältige Möglichkeiten.

Diese Studien haben gezeigt, welches Potenzial in dem Kantenschubverbund liegt, so dass sie den Weg bereiten für die zukünftige Forschung und Entwicklung zur Aktivierung des Verbundtragverhaltens von Glaslaminaten.

- (1) Tragendes Glas, Elemente Konzepte Entwürfe, Rob Nijse, Birkhäuser 2003 ISBN 3-7643-6440-8
- (2) Entwurf einer Ganzglasbrücke, Hanno Sastré, 2006
- (3) S. Zschippang/W. Wies/B. Weller/Th. Schadow · Glasdach Mensa und Rektorat der Technischen Universität Dresden; 75, Stahlbau, Heft 6; Ernst & Sohn (2006)
- (4) Mathias Kutterer; Verbundglasplatten, Näherungslösungen zur Berücksichtigung von Schubverbund und Membrantragwirkung, Shaker Verlag, Aachen, 2003.
- (5) K. Schwalbenhofer; H. Sastré: Forschungsbericht zum Tragverhalten von Sandwichglasplatten, Bergische Universität Wuppertal, 2001
- (6) K. Schwalbenhofer; u.a.: Composite Glass, eine neue Verbundglas-technologie, Vision, Heft 4, Bergische Universität Wuppertal, 2003
- (7) Hanno Sastré, Proof of principle zum KS Glas, Bergische Universität Wuppertal, 2005
- (8) Hanno Sastré; Mehr Kraft für VSG, S. 16-17, Glas + Rahmen, ISSN 0342-5142, 2006
- (9) G. Pfaender; Schott Glaslexikon; 3-478-05240-8; mvg-Verlag; 1997
- (10) Rudolf Hohl; Die Entwicklungsgeschichte der Erde, ISBN 3-325-00100-9, 1981
- (11) Werner Sobock u.a.; Glasbauatlas; 3-7643-5944-7; Birkhäuser, 1989
- (12) Sobock u.a. ; Bauen mit Glas; ; WM Baden-Württemberg; 2002
- (13) E. Wagner; Glasschäden; ISBN 3-8167-6696-X, Fraunhofer Verlag, 2005
- (14) Krewinkel, Glasarchitektur; ISBN 3-7643-5649-9; Birkhäuser; 1998
- (15) G. Siebert; Entwurf und Bemessung tragender Beuteile aus Glas; ISBN 3-433-01614-3; Ernst & Soh; 2001
- (16) prEN 572, Glas im Bauwesen: Basisglaserzeugnisse.
- (17) DIN 572-2, Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas - Teil 2: Floatglas; Deutsche Fassung EN 572-2; 1994
- (18) DIN 1249-3; Flachglas im Bauwesen; 1980-2, Spiegelglas.
- (19) Otto Völckers; Bauen mit Glas ; US-W-1116 ; J.Hoffman Verlag Stuttgart, 1948

- (20) Derby, B., Hills, D.A. & Ruiz, C.; 1992; Materials of engineering: A fundamental design approach. Longman, Harlow
- (21) Petzold, Marusch, Schramm; Der Baustoff Glas; 1990; Verlag für Bauwesen; ISBN
- (22) J.Varner, Festigkeit von Glas, Fortbildungskurs 2001 der Hüttentechnischen Vereinigung der deutschen Glasindustrie
- (23) Lawn B.R., 1983; Physics of fracture, Journal of the American ceramic society.
- (24) Ullner, Höhne; Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten und zur Rissalterung von Glas unter dem Einfluss korrosiver Umgebungsbedingungen; 1993; BAM
- (25) Gläser, Dünnfilmtechnologie auf Flachglas; 1999; Verl. K. Hoffman Schorndorf
- (26) Glas, Wasserbeständigkeit von Glasgrie, Prüfverfahren und Klassifizierung, 1985
- (27) Schimker, Döll, Weidemann; Umgebungseffekte beim Bruch von dynamisch beansp. Glasplatten; Glastechnischer Bericht (50); 1977
- (28) Hess Rudolf; Glasträger; Bericht Nr. 20 des Instituts für Hochbautechnik; 1999; ETH Zürich
- (29) Blank, Bemessung von Flachglas auf Bruchmechanischer Grundlage, VDI-Bericht 1527; ISBN3-18-091527-7, 2000
- (30) Weibull, Waloddi, A Statistical Distribution Function of Wide Application, in: Journal of Applied Mechanics 18, 9, pp. 293 (1951)
- (31) DIN 1249-10 Ausgabe: 1990-08 Flachglas im Bauwesen; Chemische und physikalische Eigenschaften
- (32) Michael Haase, Glas trifft Scheibe, Laserjournal, Willey-VCH-Verlag, 2006
- (33) Siegfried Glaser, Entstehung, Inhalte und Erfolge des Projektes „LiST“, www.list-info.de, 2006
- (34) DIN 1249 Teil 11 ;1986-09 Flachglas im Bauwesen; Glaskanten; Begriff, Kantenformen und Ausführung
- (35) prEN 12150, Glas im Bauwesen, thermisch vorgespanntes Kalknatronglas; 2000
- (36) Sedlacek, Blank, Lauf, Güssen; Glas im Konstr. Ingenieurbau; Ernst & Sohn; ISBN 3-433-01745-X; 1999

-
- (37) DIN EN 1863, Glas im Bauwesen, Teilvorgespanntes Kalknatronglas; 2000
- (38) DIN 52292, Teil 2: Prüfung von Glas und Glaskeramik. Bestimmung der Biegefestigkeit; Doppel-Ringversuch an plattenförmigen Proben mit großer Prüffläche; Berlin, 1989
- (39) DIN-EN 1288; Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas
- (40) DIN 52303, Prüfung von Glas und Glaskeramik. Bestimmung der Biegefestigkeit, Prüfung bei zweiseitiger Auflagerung, Berlin, 1984
- (41) Bauen mit Glas, VDI NR. 1572, ISBN 3-18-091527-7
- (42) Jussi Kallioniemi, joints and fastening in steel glass Facades, Diplomarbeit, TU Helsinki, 1999
- (43) Nils Albrecht, Lastabtragungsmechanismen im Lochbereich punktgestützter Glastafeln, Dissertation, TH Karlsruhe, 2004
- (44) <http://www.fn-glas.at/geschichte.htm>, © Fa. Wolfgang Nigischer, 2006
- (45) B. Freytag, Die Glasbeton Verbundbauweise, Dissertation, TU-Graz, 2002
- (46) Weller, Prautzsch, Tasche, Vogt, Jansen; Fügen und Verbinden mit UV ; Stahlbau 75, Heft 6; Ernst & Sohn (2006)
- (47) ETAG 002 (Richtlinie für EU technische Zulassungen (allg. Bauaufs. Zulassungen) für SSGS, bei Verwendung von linieförmigen Silikon-elastomeren Verklebungen. 2002
- (48) Bucak; Hagl; Kleben im Bauwesen; gestern, heute morgen; 75, Stahlbau, Heft 6; Ernst & Sohn (2006)
- (49) DIN 7724, Polymere Werkstoffe, Gruppierung aufgrund ihres mechanischen Verhaltens, 1993
- (50) W. Sobeck, M. Kutterer, Rheologisches Verhalten von PVB im Schubverbund, Forschungsbericht 4/98
- (51) Schnell, Gross, Hauger, Technische Mechanik, Bd. 2. Springer Verlag, ISBN 3-540-64147-5, 1998
- (52) Techen Holger, Fügetechniken für den Glasbau, Dissertation, TU Darmstadt, 1997

- (53) DIN EN 14869-1 , Strukturklebstoffe, Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen, 2004
- (54) DIN 53504, Prüfung von Kautschug und Elastomeren, 1994
- (55) DIN EN ISO 12543, Teil , Glas im Bauwesen; Verbundglas und Verbundsicherheitsglas, 2006
- (56) Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen TRLV, 1998, Mitteilungen des DIBt 6/1998
- (57) DIN EN ISO 12543, Teil 2, Glas im Bauwesen; Verbundglas und Verbundsicherheitsglas, 2006
- (58) Wörner, Schneider, Fink, Glasbau, Grundlagen, Berechnung, Konstruktion, VDI-Springer-Verlag, 2001
- (59) W. Sobeck, Versuche an Verbundsicherheitsgläsern zur Beurteilung der Resttragfähigkeit und des Verbundverhaltens, Uni. Stuttgart, 1998
- (60) Ö. Bucak ; Ch. Schuler; M. Meißner · Verbund im Glasbau – Stahlbau 75, Heft 6; Ernst & Sohn (2006)
- (61) Krauss; Führer; Jürges; Tabellen zur Tragwerkelehre, ISBN: 3481020104; 2003
- (62) Timoshenko & Woinowsky- Krieger, Theory of Plates and shells McGraw-Hill, USA, 1959
- (63) Rudolf Hess, Glasdickenbemessung. Bemessung von Einfach- und Isolierverglasungen unter Anwendung der Membranwirkung bei rechteckplatten großer Durchbiegung. Institut für Hochbautechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. 1986
- (64) Aki Vuolio, Structure Behaviour of Glass Structures in Facades, TU Helsinki, Publication 27, TKK-TER-27, 2003
- (65) Stamm, K.; Witte, H.: Sandwichkonstruktionen – Berechnungen, Fertigung und Ausführung. Springer Verlag Wien, NY 1974
- (66) Sobek, Werner, Grundlagenversuche zum Schubverhalten von PVB Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke, 1999
- (67) DIN EN 12 600, Glas im Bauwesen Pendelschlagversuch, 2003

- (68) Technische Richtlinien für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen, kurz TRAV, vom Deutschen Institut für Bautechnik, 2000
- (69) Entwurf DIN EN 13474-1: Glas im Bauwesen, April 1999
Bemessung von Glasscheiben – Teil 1: Allgemeine Grundlagen für Entwurf, Berechnung und Bemessung. Entwurf DIN EN 13474-2 Mai 2000. Glas im Bauwesen Bemessung von Glasscheiben – Teil 2: Bemessung für gleichmäßig verteilte Belastungen.
- (70) G. Siebert; Möglichkeiten der Bemessung von Bauteilen aus Glas; Stahlbau 75, Heft 6; Ernst & Sohn (2006)
- (71) Mark Porter, Aspects of structural design with Glass, Dissertation, TU Oxford, 2001
- (72) DIN 1288-3 , Glas im Bauwesen Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas; 2000
- (73) Produktbeschreibung, Plexiglas GS, XT, Degussa, FA. Röhm, 2004
- (74) Esa-Prima Win 3.6, online Handbuch , www.scia-online.com, 2006
- (75) Karl Schwalbenhofer; Hanno Sastré; KS-Glas-Flayer zur Industriemesse Hannover, 2006
- (76) Karl Schwalbenhofer; Hanno Sastré; Offenlegungsschrift zum Patent; WO 2007/085368; PCT/EP2007/000360; 2007
- (79) Wolfgang Nigischer; Geschichte des Glases; <http://www.fn-glas.at/geschichte.htm>; 2006
- (78) Knaack, Führer; Wurm ; Konstruktiver Glasbau 2. Neue Möglichkeiten und Techniken Verlagsges. Müller; 2000; ISBN-10: 3481016859
- (79) Sölva; Bardul; Glasbearbeitung; www.ifi.tuwien.ac.at; 2002
- (80) Bildnachweis Download unter : www.tu-dresden.de/biw/news/2006/glas.htm
- (81) Sölva; Bardul; Glasbearbeitung; www.ifi.tuwien.ac.at; 2002
- (82) Knaack; Konstruktiver Glasbau 1; Verlagsges. Müller; 2003; ISBN: 3481014279
- (83) Wurm; Glas als Tragwerk; Birkhäuser; 2007; ISBN-10: 3764376074

8

ABKÜRZUNGEN

a	zweiseitige Plattenlagerung; Spannweite; vierseitig: fixierte Länge
a_r	Risstiefe
b	zweiseitiger Lagerung; Lagerseite; vierseitig: veränderliche Länge
d	Schubverzerrung
d_r	Rissbreite
E	Elastizitätsmodul
ESG	Einscheibensicherheitsglas
f	Geometriefaktor eines Risses
F_d	charakteristischer Wert der gesamten Flächenlast
$F_{g,k}$	charakteristischer Wert der Prüffestigkeit von vorgespanntem Glas
$F_{b,k}$	charakteristischer Wert der Prüffestigkeit von gekühltem Glas
$f_{g,d}$	zulässige effektive Spannung
FEM	Finite Element Methode
F_R	Reibungskraft
F_N	Normalkraft
F_d	charakteristischer Wert der gesamten Flächenlast
g	Gradient
G	Schubmodul
G_c	Risswiderstandskraft
G_r	Rissausbreitungskraft
G_k	charakteristischer Wert einer ständigen Einwirkung
h	Dicke einer Einzelscheibe
h_i	Dicke der Glasschicht i in VG
h_j	Dicke der Glasschicht j in VG
$h_{eff. w}$	effektive Dicke von V(S)G zur Berechn. der Verformung
$h_{eff. \sigma}$	effektive Dicke von V(S)G zur Berechn. der Spannung
K	Kompressionsmodul
k_A	Flächenbeiwert
K_1, K_4	verwendete Konstanten
K_{IC}	Bruchzähigkeit von Glas; Spannungsintensitätsfaktor Bruch
K_I	Spannungsintensitätsfaktor
K_{I0}	unterer Grenzbereich des Spannungsintensitätsfaktor
K_{mod}	Modifikationsfaktor der Lastdauer
KS1	Versuchskörper 500*1000 und 4mm Zwischenschicht
KS2	Versuchskörper 500*1000 und 2mm Zwischenschicht
KS0	FE-Modell des Versuchskörpers KS1 ohne Zwischenschicht
K1 bis K4	Kantenschubelementvariante 1 bis 4

KSG	Kantenschubverbundglas
KSE	Kantenschubverbundelement
p^*	normierte Flächenlast
PVB-Folie	Polyvinylbutyralfolie
Q_k	charakteristischer Wert einer ständigen Einwirkung
Q_k	charakteristischer Wert einer veränderlichen Einwirkung
SSG	structural sealant Glazing
TVG	teilvergesspanntes Glas
VSG	Verbundsicherheitsglas
VG	Verbundglas
w	Durchbiegung; Verformung
w_d	zulässige Durchbiegung
W_{max}	Maximalwert der Durchbiegung
α	Ausdehnungskoeffizient
γ	Verdrehwinkel
γ_M	Teilbeiwert für gekühltes Glas
γ_V	Teilbeiwert für vorgespanntes Glas
γ_n	nationaler Beiwert
γ_Q	Teilbeiwert für veränderliche Einwirkungen
γ_G	Teilbeiwert für ständige Einwirkungen
σ_{th}	maximal aufn. Zugspannung von Kalknatronglas
σ_c	Bruchspannung
σ_{zul}	zulässige Biegezugspannung
σ_{max}	Maximalwert der Zuspannung
σ_{eff}	effektive Zuspannung
Ψ	Kombinationsfaktor der Einwirkungen
η	Viskosität
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz
τ_{zul}	zulässige Schubspannung
μ_H	Reibungskoeffizient
μ	Querkontraktionszahl

DIN 1249-10 Ausgabe: 1990-08

Flachglas im Bauwesen; Chemische und physikalische Eigenschaften

DIN 1249-11: 1986-09

Flachglas im Bauwesen; Glaskanten; Begriff, Kantenformen und Ausführung

DIN 1259-1 Ausgabe: 2001-09

Glas - Teil 1: Begriffe für Glasarten und Glasgruppen

DIN 1259-2 Ausgabe: 2001-09

Glas - Teil 2: Begriffe für Glaserzeugnisse

DIN 1286-2 Ausgabe: 1989-05

Mehrscheiben-Isolierglas, gasgefüllt; Zeitstandverhalten, Grenzabweichungen des Gasvolumenanteils

DIN V 52293-2 Ausgabe: 1988-11

Prüfung von Glas; Prüfung der Gasdichtheit von gasgefülltem Mehrscheiben-Isolierglas; Bestimmung des Gasverlustes mittels Gaschromatographie und Wärmeleitfähigkeitsdetektor

DIN 52294 Ausgabe: 1988-11

Prüfung von Glas; Bestimmung der Beladung von Trocknungsmitteln in Mehrscheiben-Isolierglas

DIN 52338 Ausgabe: 1985-09

Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen; Kugelfallversuch für Verbundglas

DIN EN 572-1 Ausgabe: 1995-01

Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas - Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 572-1: 1994

ISO/DIS 12543-2 Ausgabe: 2003-01

Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 2: VSG

DIN EN 572-2 Ausgabe: 1995-01

Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas - Teil 2: Floatglas; Deutsche Fassung EN 572-2: 1994

DIN EN 572-4 Ausgabe: 1995-01

Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas - Teil 4: Gezogenes Flachglas; Deutsche Fassung EN 572-4: 1994

DIN EN 572-8 Ausgabe: 2002-02

Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas - Teil 8: Liefermaße und Festmaße; Deutsche Fassung prEN 572-8: 2001

DIN EN 572-9 Ausgabe: 2002-02

Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas - Teil 9: Konformitätsbewertung; Deutsche Fassung prEN 572-9:2001

DIN EN 1863-1 Ausgabe: 2000-03

Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Kalknatronglas - Teil 1: Definition und Beschreibung; Deutsche Fassung EN 1863-1: 2000

DIN EN 1863-2 Ausgabe: 2001-09

Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Kalknatron-Silicatglas - Teil 2: Konformitätsbewertung; Deutsche Fassung prEN 1863-2: 2001

DIN EN 12488 Ausgabe: 1996-10

Glas am Bau - Verglasungsrichtlinien - Verglasungssysteme und Anforderungen für die Verglasung; Deutsche Fassung prEN 12488: 1996

DIN EN 12600 Ausgabe: 2003-04

Glas im Bauwesen - Pendelschlagversuch - Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas; Deutsche Fassung EN 12600: 2002

DIN EN 13049 Ausgabe: 1998-02

Fenster - Harter und weicher Stoß - Prüfverfahren, Sicherheitsanforderungen und Klassifizierung; Deutsche Fassung prEN 13049:1997

DIN EN 13424-1 Ausgabe: 1999-04

Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Borosilicatglas - Teil 1: Definition und Beschreibung; Deutsche Fassung prEN 13424-1: 1998

DIN EN 13474-1 Ausgabe: 1999-04

Glas im Bauwesen - Bemessung von Glasscheiben - Teil 1: Allgemeine Grundlagen für Entwurf, Berechnung und Bemessung; Deutsche Fassung prEN 13474-1: 1999

DIN EN 13474-2 Ausgabe: 2000-05

Glas im Bauwesen - Bemessung von Glasscheiben - Teil 2: Bemessung für gleichmäßig verteilte Belastungen; Deutsche Fassung prEN 13474-2: 2000

DIN EN 14178-1 Ausgabe: 2002-02

Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Erdalkalisilikatglas - Teil 1: Floatglas; Deutsche Fassung prEN 14178-1: 2001

DIN EN 14321-1 Ausgabe: 2002-03

Glas im Bauwesen - Thermisch vorgespanntes Erdalkali-Silikat-Einscheibensicherheitsglas - Teil 1: Definition und Beschreibung; Deutsche Fassung prEN 14321-1: 2001

DIN EN 14321-2 Ausgabe: 2002-03

Glas im Bauwesen - Thermisch vorgespanntes erdalkalisches Sicherheitsglas - Teil 2: Konformitätsbewertung; Deutsche Fassung prEN 14321-2: 2001

DIN EN ISO 14439 Ausgabe: 1995-04

Glas im Bauwesen - Anforderungen für die Verglasung - Verglasungsklotze (ISO/DIS 14439:1995); Deutsche Fassung prEN ISO 14439: 1995

DIN EN 14449 Ausgabe: 2002-07

Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Konformitätsbewertung; Deutsche Fassung prEN 14449: 2002