

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

Für die Unterstützung bei meiner Diplomarbeit möchte ich mich bedanken bei:

Meiner Betreuerin Univ. Ass. Dipl.-Ing. *Pegah Farshidnia*, die mir zum Thema Glasbau in vielen Dingen eine große Hilfe war und mich stets bestmöglich unterstützte.

Herrn *Harald Wanke* von der Alukönigstahl GmbH, von dem mir zahlreiche Unterlagen über Pressleistensysteme zur Verfügung gestellt wurden.

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien (5. OG) aufgestellt und zugänglich (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (5th floor) on the open access shelves (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

BEMESSUNG VON ORTHOGONAL, LINIENFÖRMIG DURCH STAHELEMENTE UNTERSTÜTZTEN GLASKONSTRUKTIONEN

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas KOLBITSCH

E 206

Institut für Hochbau und Technologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

WERNER HOCHHAUSER

Mat.-Nr. 9925858

Rathausplatz 4, 4560 Kirchdorf an der Krems

Wien, im November 2006

Für meine Eltern:

„Wenn ich weiter als andere gesehen habe, so deshalb, weil ich auf den Schultern von Riesen stand.“

(Sir Isaac Newton)

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit behandelt die Dimensionierung von Stahl-Glas-Konstruktionen, mit dem Ziel dem Leser die Bemessung von orthogonal, linienförmig durch Stahlelemente unterstützten Glaskonstruktionen näher zu bringen. Der textliche Teil beginnt mit einer Zusammenstellung gängiger Ausgangs- und Veredelungsprodukte und führt über zur Spezialanwendung Mehrscheiben-Isolierverglasung. Neben den Materialeigenschaften von Stahl und Glas werden die Anforderungen, die an Verbindungselemente zufolge der Unterschiede der verwendeten Materialien gestellt werden, erörtert. Weiters diskutiert diese Arbeit die Nachweisführung von Glasscheiben unter Plattenbeanspruchung sowie die Dimensionierung von Stahlträgern beliebiger Querschnittsform über die Berechnung des erforderlichen Flächenträgheitsmoments zweiten Grades zur Einhaltung der zulässigen Durchbiegungen.

Zusätzlich beinhaltet diese Diplomarbeit ein auf MS Excel XP basierendes Bemessungsprogramm für einfache orthogonale Stahl-Glas-Konstruktionen. Das Programm eignet sich besonders für die Vorbemessung nicht absturzsichernder, begeh- oder befahrbarer Tragwerke aus Verbundsicherheitsgläsern und Mehrscheiben-Isolierverglasungen. Unabhängig vom gewählten Scheibenaufbau erfolgt die Lagerung der Glasplatten dabei stets allseitig linienförmig. Die stählerne Unterkonstruktion kann als eine Reihe von Kragträgern oder beidseitig, gelenkig gelagerter Träger ausgeführt werden. Wenn erforderlich, besteht die Möglichkeit ein weiteres unterstützendes Tragwerk aus wiederum parallel verlaufenden Stahlträgern anzuordnen.

Resümierend kann festgehalten werden, dass diese Diplomarbeit einen Einblick in die Berechnung einfacher Stahl-Glas-Konstruktionen ermöglicht.

Abstract

This diploma thesis discusses the dimensioning of steel-glass-constructions with the aim of making the reader sensitive to the design of orthogonally and linearly by steel elements supported glass-constructions. The written part shows the different types and the peculiar characteristics of basic and processed glasses, and leads over to the special application of insulation glass. It treats both the material properties of glass and steel, and derives the essential demands on the fastening elements from the differences between those two used materials. Furthermore, this paper discusses the verification of glass panes subject to surface loading as well as the verification of steely beams of arbitrary cross-sectional form, via the calculation of the second moment of area, to keep the conditions of allowed deflections.

Additionally, this diploma thesis includes a dimensioning program for simple, rectangular steel-glass-constructions based on MS Excel XP. The program is especially suited to predesign not accessible constructions in structural engineering. It accommodates the assembly of laminated safety glass as well as insulation glass. Independent of which type is chosen, the support of glass panes will be carried out as a four-sided hinge bearing. As far as the steely substructure is concerned, the program allows calculating the construction as a row of overhanging beams or two-sided hinged beams. If required, another supporting structure - again consisting of steel beams - can be arranged.

Summarizing, it may be said that this diploma thesis provides an insight into the calculation of simple steel-glass-constructions.

Kurzzeichen und deren Bedeutung

Grundsätzlich sind Kurzzeichen sowie deren Bedeutung stets vor oder nach ihrer Verwendung zusammengestellt. Die wichtigsten seien nachfolgend aufgelistet und benannt.

Große lateinische Buchstaben

A	Auflagerreaktion, Seehöhe
B	Tragwerksbreite
D	Winddruck
E	Elastizitätsmodul, Schneelast
G	Schubmodul, ständige Einwirkung
H	Höhe
J	Flächenträgheitsmoment zweiten Grades
L	Tragwerkslänge
M	Biegemoment
Q	Einzellast, veränderliche Last
R	Widerstand
S	Windsog, Einwirkung, Schwerpunkt
T	Temperatur
ΔT	Temperaturwechselbeständigkeit
W	Windlast
Z	Zonenwert

Kleine lateinische Buchstaben

a	Achsabstand
a*	charakteristische Kantenlänge
b	Breite, Glasplattenbreite
c _p	Differenzdruckbeiwert
d	Dicke, Querschnittshöhe
d*	Ersatzdicke
f	Durchbiegung
f _c	Druckfestigkeit
f _{ft}	Biegezugfestigkeit
f _k	charakteristische Festigkeit
g	Streckenlast, Flächenlast
h	Dicke, Querschnittshöhe, Glasplattenhöhe
l	Länge
p	Druck, Luftdruck
p ₀	resultierender isochorer Druck
q	Streckenlast, Flächenlast, Staudruckwert
s	Schneelast
t	Zeit
w	Durchbiegung, Windlast

Griechische Buchstaben

α	Winkel, Wärmeausdehnungskoeffizient
Δ	Differenz
δ	Anteil an der Gesamtbiegesteifigkeit
γ	Teilsicherheitsbeiwert
ε	Dehnung
ε_u	Bruchdehnung
ε_y	Fleißdehnung
μ	Querdehnzahl, Formbeiwert
ν	Poisson'sche Zahl
π	Kreiszahl
ρ	Dichte
σ	Spannung
ψ	Kombinationsbeiwert

Indices

a	außen
d	Designwert, Bemessungswert
e	außen, extern
g	gesamt, Glastafel
i	innen, intern
n, \perp	normal
o	oben, Konstruktionsoberkante
p	Pressleiste
u	unten, Konstruktionsunterkante
v	vertikal
II	Tragwerk der zweiten Ebene
III	Tragwerk der dritten Ebene
erf	erforderlich
max	maximal
min	minimal
met	meteorologisch
PVB	Polyvinylbutyral
SZR	Scheibenzwischenraum
vorh	vorhanden
zul	zulässig

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Der Baustoff Glas	11
2.1	Floatglas	11
2.2	Veredelungsprodukte	15
2.3	Verbundgläser	17
2.4	Verglasungsarten und experimentelle Nachweise	21
2.5	Nachweisführung	22
2.6	Berechnungsansätze	25
2.7	Mehrscheiben-Isolierverglasungen und ihre Nachweisführung	31
3	Der Baustoff Stahl	35
3.1	Materialeigenschaften	35
3.2	Berechnungsmethode	37
4	Das Verbindungselement	39
4.1	Verbindungstechniken	39
4.1.1	Punktförmige Lagerung mittels Reibverbindung	39
4.1.2	Punktförmige Lagerung mittels Lochleibungsverbindung	40
4.1.3	Linienförmige Lagerung als Klebeverbindung	41
4.1.4	Linienförmige Lagerung mittels Pressleisten	42
4.2	Fugenausbildung, Dichtung und Klotzung	44
4.3	Bemessungsmethode am Beispiel „System FW 50 ⁺ “ Schüco	46
5	Das Bemessungsprogramm	48
5.1	Normative Grundlagen	48
5.2	Anwendungsgrenzen	49
5.3	Bedienungsanleitung	49
5.4	User-Manual und Formelapparat	50
5.5	Anwendungsbeispiele	66
5.5.1	Geneigte Mehrscheiben-Isolierverglasung	66
5.5.2	Frei stehende Wand	70

6	Zusammenfassung	73
7	Anhang	75
7.1	Statische Werte für Riegel- und Pfostenprofile „System FW 50 ⁺ “ Schüco	75
7.2	Quellenverzeichnis	78
7.2.1	Bücher und Schriften	78
7.2.2	Normen	79
7.2.3	Quellen aus dem Internet	80
7.2.4	Abbildungen	81
7.2.5	Tabellen	82

1 Einleitung

Ägypten, Mesopotamien oder die Levanteküste? Uneins ist man sich auch heute noch, welcherorts die erste Glasproduktion durch Menschenhand stattgefunden haben könnte. Fest steht, dass die Entwicklungsgeschichte von Glas vor etwa 7000 Jahren, am Ende der jüngeren Steinzeit, begann. Die Menschheit konnte sich erstmals die Wirkung des Feuers für technische Zwecke nutzbar machen und begann keramische und metallurgische Verfahren zu entwickeln. Aus dieser Zeit stammen auch die ersten glasierten Töpferwaren. Um das Jahr 2000 vor Christus dürfte es dann den Hochkulturen der Ägypter, Babylonier und Assyrer etwa zeitgleich gelungen sein, die ersten Perlen und kleineren Gefäße aus Glas herzustellen. Glas ist somit einer der ältesten künstlich hergestellten Werkstoffe unserer Zeit.

Nach Meinung von Historikern sollte das erste Glas aber eher als Zufallsprodukt entstanden sein. Im ersten Jahrhundert nach Christi Geburt schildert Plinius der Ältere eine Landung phönizischer Seefahrer an der syrischen Küste. Als die Männer ein Lagerfeuer im Wüstensand entfachen und keine geeigneten Steine als Untersätze für Töpfe finden, verwenden sie Sodablöcke, mit welchen ihr Schiff beladen war. Am Morgen darauf entdecken sie in der Asche einen lichtdurchlässigen, hellen Stoff. Der Legende nach reagierte das abgeschmolzene Soda unter großer Hitze mit dem Wüstensand und ließ so das erste Glas entstehen.

Chronologisch fortfahrend erreichte die Glasproduktion kurz vor Beginn unserer Zeitrechnung einen weiteren Höhepunkt. Die Entwicklung des Glasblasens mit der Glasmacherpfeife ermöglichte nun die Herstellung durchsichtigen Glases in vielfältiger Form.

Einen starken Einbruch erlitt die Glasmacherkunst durch den Zerfall des römischen Reiches. Alleine Byzanz konnte sich dieser Entwicklung widersetzen und etablierte sich als Zentrum des Glasmacherhandwerks.

Erst ab dem Mittelalter gelang es die Glasherstellung wieder zu forcieren, was dazu führte, dass im europäischen Raum etwa ab dem Jahre 1000 nach Christus die ersten gläsernen Fenster hergestellt werden konnten. Der Schutz vor Wind und Wetter bei gleichzeitiger Lichtdurchlässigkeit gilt als Meilenstein in der Evolution des Baustoffs Glas. Seit damals erweitert sich nun die Palette der Einsatzmöglichkeiten von Gläsern kontinuierlich und ist im Status quo als raumabschliessendes oder füllendes Element fest im kollektiven Gedächtnis verankert.

Vor allem in den letzten Jahrzehnten gewinnt aber Glas im Bauwesen auch als tragendes Element mehr und mehr an Bedeutung. Die Tatsache durch Stützen und Träger hindurch sehen zu können, birgt eine gewisse Unsicherheit und übt gerade deshalb großen Reiz auf viele Interessierte aus. Die Möglichkeit der Farbgebung und Gestaltung sowie Wirtschaftlichkeit und Zweckmäßigkeit in bauphysikalischen Belangen führten dazu, dass Glas in der modernen Architektur zum unverzichtbaren Element avancierte.

Leider steht jedoch bei vielen Baubeteiligten dem großen Interesse an konstruktivem Glasbau ein ebenso großer Mangel an soliden Kenntnissen gegenüber. Schließlich mag der Baustoff Glas zwar hochfest und hochbelastbar sein, kann aber keinesfalls als gutmütig bezeichnet werden. Seine Empfindlichkeit gegen Oberflächenschädigungen und die fehlende Fähigkeit der plastischen Umlagerung von Spannungen verzeiht keinerlei Fehler bei der Planung und Ausführung von Glasbauwerken.

Ziel dieser Arbeit soll es daher sein den interessierten Leser auf die Eigenschaften des Baustoffs Glas und deren Bedeutung für die Verbindungstechnik zu sensibilisieren, die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten im konstruktiven Ingenieurbau zu erläutern und vor allem die Unterschiede zu Stahl aufzuzeigen, unter dessen Einbezug im Hochbau transparente und immer filigranere Konstruktionen verwirklicht werden.

Diesem Schriftstück ist ein MS Excel-Programm beigelegt, das die Bemessung von einfachen Stahl-Glas-Konstruktionen ermöglichen soll. Als Motivation für die Entwicklung dieses Programms seien vor allem die Wirtschaftlichkeit bei der Verwendung von Excel-Tabellen im Allgemeinen sowie die Vereinfachung von Bemessungen für den Anwender zu nennen. Zeitersparnis für den planenden Ingenieur sowie Flexibilität bei

der Umgestaltung von bereits Entworfenem zählen neben der Übersichtlichkeit von Tabellenberechnungen ebenfalls zu den dominanten Stärken.

Diese Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel, die sich fortlaufend mit folgenden Themen auseinandersetzen:

In Kapitel 2 wird zuerst ein Überblick über Floatglas, typische Veredelungsprodukte und Verbundgläser im Bauwesen geschaffen. Eine Zusammenstellung üblicher Verglasungsarten und experimenteller Nachweise findet im vierten Unterpunkt dieses Kapitels Eingang. Die Vorstellung der Nachweisführung von Glaskonstruktionen und gängigen Berechnungsansätzen führt schließlich über zum Unterkapitel „Mehrscheiben-Isolierverglasungen und ihre Nachweisführung“, welches die Besonderheit des Scheibenzwischenraums behandelt.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit dem Baustoff Stahl, erläutert seine Materialeigenschaften und zeigt das Konzept der im MS Excel-Programm angewendeten Bemessungsmethode auf.

Die Verbindungsmöglichkeiten zwischen den Baustoffen Stahl und Glas werden in Kapitel 4 behandelt, welches durch einen kurzen Abriss von den in der Praxis verwendeten Verbindungstechniken eröffnet wird. Der Fugenausbildung, Dichtung und Klotzung wird im zweiten Unterpunkt Rechnung getragen. Abgerundet wird Kapitel 4 durch die Vorstellung der im Programm angewendeten Bemessungsmethode am Beispiel „System FW 50⁺“ der Firma Schüco.

Das MS Excel-Programm wird in Kapitel 5 näher erläutert. Das notwendige Wissen über normative Grundlagen und Anwendungsgrenzen wird dem Leser ebenso vermittelt wie die ordnungsgemäße Bedienung des Programms. Eine ausführliche Beschreibung des verwendeten Formelapparats und eine Darstellung der getroffenen Annahmen erfolgt im User-Manual. Der Rechenvorgang wird schließlich anhand zweier Anwendungsbeispiele dargestellt.

In Kapitel 6 kommt es zu einer Zusammenfassung und Schlussfolgerung dieser Arbeit. Schließlich umfasst Kapitel 7 die Angabe der statischen Werte für Riegel- und Pfostenprofile für das „System FW 50⁺“ der Firma Schüco ebenso wie eine Aufstellung der verwendeten Literatur, Normen und Quellen aus dem Internet sowie der eingearbeiteten Abbildungen und Tabellen.

2 Der Baustoff Glas

2.1 Floatglas

„Nimm 60 Teile Sand, 180 Teile Asche aus Meerespflanzen und 5 Teile Kreide und du erhältst Glas.“ (Wikipedia, /19/), heißt es in einer mit 650 vor Christus datierten, scheinbar simplen Rezeptur der Bibliothek des assyrischen Königs Assurbanipal. Doch ist Glasherstellung tatsächlich so einfach?

Der vom germanischen Ausdruck „glasa“ für „das Glänzende“ abgeleitete Begriff beschreibt aus chemischer Sicht ein Schmelzprodukt amorpher Struktur. Die Amorphie oder Formlosigkeit eines Stoffes resultiert dabei aus dem Faktum, dass Glas beim Abkühlen nicht kristallisieren kann. Bei der Erstarrung der Schmelze bilden sich zwar Kristallisationskeime, für den Kristallisationsprozess selbst verbleibt jedoch nicht ausreichend Zeit. Das erstarrende Material ist bald zu viskos und die Bewegungsmöglichkeit der einzelnen Elementarbausteine zu gering, um noch in den Ordnungszustand eines Kristallgitteraufbaus übergehen zu können. Dies ist auch der Grund, warum gerne vom „ungeordneten“ Zustand gesprochen wird.

Im Vergleich zu kristallartigen Strukturen gleicher Zusammensetzung befindet sich Glas beim Abkühlen zwischen Schmelz- und Transformations- beziehungsweise Einfriertemperatur im sogenannten metastabilen Bereich der unterkühlten Schmelze (Abbildung 1), wobei der stabile Zustand der kristallinen Struktur entsprechen würde. Unterhalb der Transformationstemperatur entspricht das Temperatur-Ausdehnungsverhalten von Glas wiederum jenem der kristallartigen Struktur gleicher Zusammensetzung.

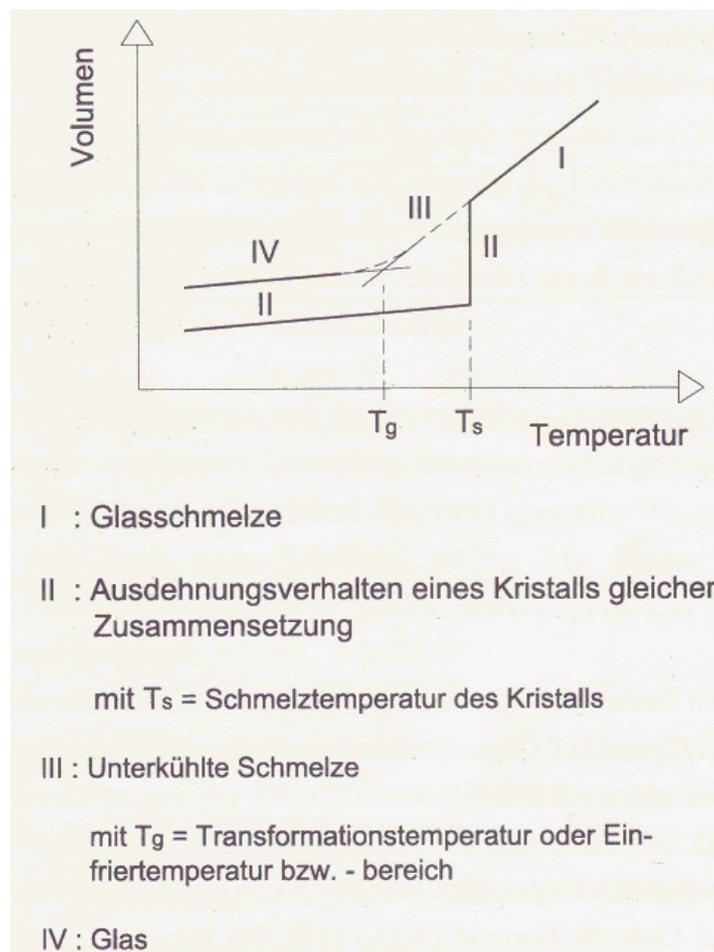


Abbildung 1: Thermisches Ausdehnungsverhalten von Glas (Sedlacek, S. 11, [27])

Genau genommen ist die Transformationstemperatur aber kein exakt definierter Wert. Sie steht in Zusammenhang mit der Abkühlgeschwindigkeit und ist als jene Temperatur definiert, bei der die Viskosität einen Wert von etwa 10^{12} Pascalsekunden erreicht. In der Praxis wird deshalb richtigerweise vom Transformations- oder Einfrierbereich gesprochen.

Obwohl man Glas in der Thermodynamik gerne als „gefrorene, unterkühlte Flüssigkeit“ bezeichnet, sollte trotz des nicht definierten Schmelzpunktes Abstand vom Begriff „Flüssigkeit“ genommen werden. Glas ist ein Festkörper, der sich wie andere kristalline Stoffe ständigen Belastungen entziehen kann. Man spricht dabei auch vom Effekt des Kriechens, welchem vor allem im Betonbau große Bedeutung zukommt. Im Zusammenhang mit Glasscheiben kann Kriechen dazu führen, dass sich Glas der Einwirkung Eigengewicht entzieht und sich so der im Volksmund hinlänglich als „fließende Glasscheibe“ bezeichnete Zustand einstellen kann.

Gemäß ÖNORM B 3716-1 unterscheidet man drei Arten von Glas: das Erdalkali-Silicatglas, das Borosilicatglas und das am weitesten verbreitete Kalk-Natron-Silicatglas.

„Borosilicat-Gläser enthalten weniger Alkalien (Na_2O) und Erdalkalien (CaO und MgO) und statt dessen 7 bis 15 Gew.-% Boroxid (B_2O_3).“ (Sedlacek, S. 12, [27]). Wegen dem geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten weist Borosilicatglas eine höhere Temperaturwechselbeständigkeit als Kalk-Natron-Silicatglas auf. Beachtet man aber die Tatsache, dass Kalk-Natron-Silicatglas wegen der „reineren“ Zusammensetzung einen geringeren Schmelzpunkt aufweist, damit weniger Energie zur Bearbeitung dieser Gläser benötigt wird und deshalb ihre Produktion im Allgemeinen als billiger anzusehen ist, wird verständlich, warum Kalk-Natron-Silikatgläser den Markt beherrschen. Abgesehen davon sind Boroxide bedeutend schwerer anzufinden als Alkalien und Erdalkalien.

Den weitaus größten volumsbezogenen Anteil bei der Zusammensetzung von Glas hält mit etwa 73 Prozent jedoch Sand, der hauptsächlich aus Siliziumdioxid SiO_2 besteht (Abbildung 2).

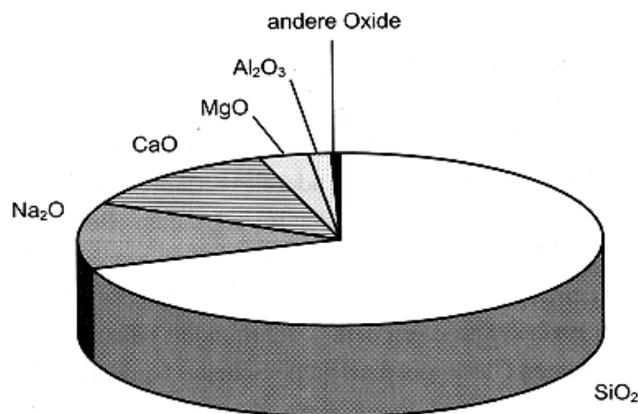


Abbildung 2: Zusammensetzung von Floatglas (Siebert, S. 9, [29])

„Die Schmelztemperatur von Sand (1700 °C) kann durch Zugabe von Flussmitteln [...], heute kommt meist – aus Kochsalz und Kalk preisgünstig hergestelltes – Soda (Natriumcarbonat Na_2CO_3) zum Einsatz“ (Siebert, S. 9, [29]), gesenkt werden. Das „ Na_2O wird in das Glas eingebaut während sich CO_2 verflüchtigt. Zur Erhöhung der chemischen Beständigkeit und Härte wird Kalk (Calciumcarbonat CaCO_3) dem Gemenge zugegeben; es verbleibt Calciumoxid (CaO) im Glas, CO_2 verflüchtigt sich wiederum. In Flachgläsern wird das Calciumoxid (CaO) zum Teil durch Magnesiumoxid (MgO) ersetzt, das im Rohstoff Dolomit ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) mit Kalk verbunden ist und die Schmelztemperatur herabsetzt.“ (Siebert, S. 9f, [29]). Zur Erlangung „verbesserter chemischer Resistenz und erhöhter Zähigkeit

bei tiefen Temperaturen wird Tonerde (Al_2O_3) beigegeben, meist in Form von Feldspat (z.B. $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Wird Calciumoxid z.T. durch Bleioxid oder Bortrioxid ersetzt, ergibt sich Blei(kristall)glas oder Borosilicatglas.“ (Siebert, S. 10, [29]).

Floatglas ist ein Flachglas, das nach dem im Jahr 1959 von der Firma Pilkington entwickelten Floatverfahren (Abbildung 3) hergestellt wird. „Das flüssige Glasgemenge wird kontinuierlich bei einer Temperatur von etwa 1600°C in eine erste Kammer gefüllt. In einer zweiten Kammer befindet sich flüssiges Zinn. [...] Das flüssige Glas schwimmt auf der spiegelglatten Zinnoberfläche und kühlt über eine Länge von 70m von etwa 1000°C auf 600°C ab. Glas hat keinen Schmelzpunkt, sondern geht bei Abkühlung kontinuierlich von einem flüssigen in einen teigigen und dann festen Zustand über. Der Transformationsbereich vom teigigen zum festen Zustand liegt bei etwa 640°C . In der darauffolgenden Kammer wird das Glas über Rollen kontinuierlich gezogen und kühlt dabei weiter ab. Mit der Ziehgeschwindigkeit kann die Glasstärke gesteuert werden. Anschließend wird das Floatglas geschnitten und gelagert.“ (Ofner, S. 2, /17/).

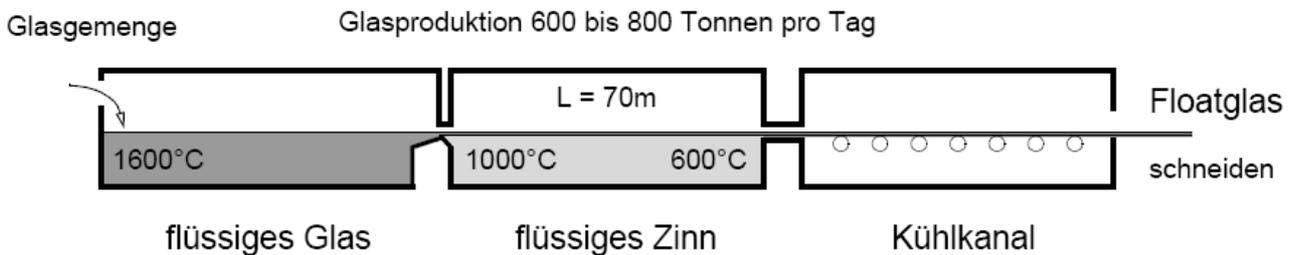


Abbildung 3: Floatverfahren (Ofner, S. 2, /17/)

Betreff der mechanischen Eigenschaften von Floatglas sei festzuhalten, dass das lineare Spannungs-Dehnungsverhalten des spröden Werkstoffs Glas sich von jenem des Baustoffs Stahl dahingehend unterscheidet, dass sich kein horizontales Fließplateau einstellen kann. Erreicht das duktile Material Stahl seine gütenabhängige Fließdehnung, können Spannungsspitzen durch sein linear elastisch-plastisches Spannungs-Dehnungsverhalten umgelagert werden (Abbildung 4). Beim Baustoff Glas ist dies nicht möglich, da beim Erreichen einer Dehnung von etwa 0,1% sofort Bruch eintritt (Abbildung 5).

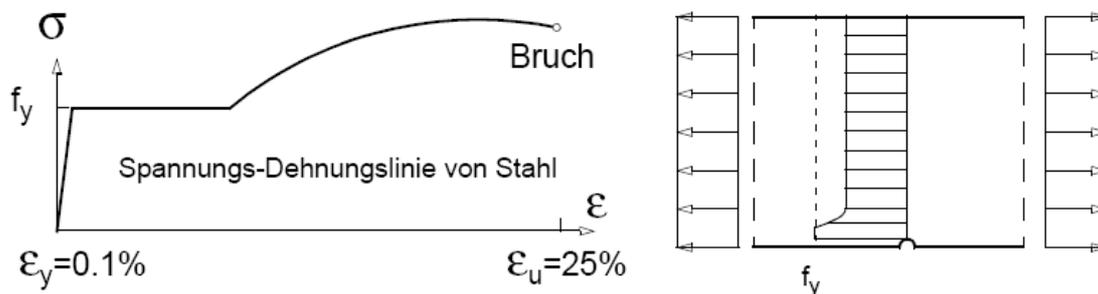


Abbildung 4: Zugstab aus Stahl mit Kerbe (Ofner, S. 3, /17/)

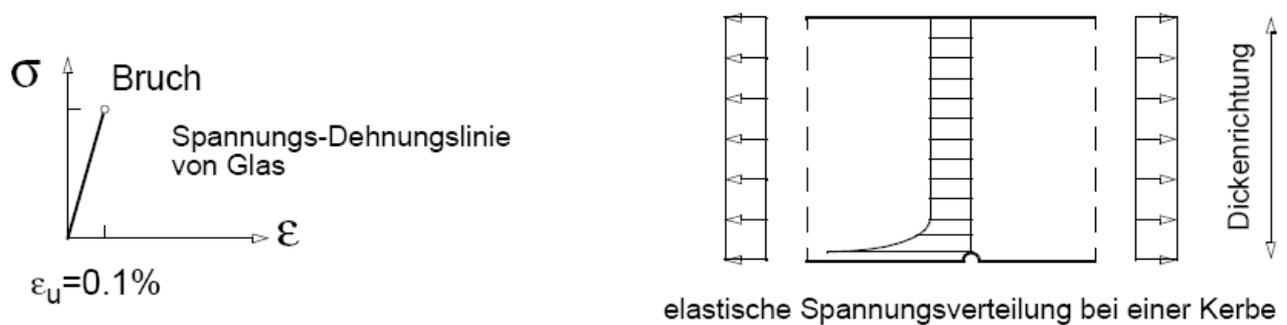


Abbildung 5: Zugstab aus Glas mit Kerbe (Ofner, S. 3, /17/)

Beim spröden Material Glas sind nach der Elastizitätstheorie die resultierenden Spannungen am Kerbgrund von Oberflächenschädigungen bedeutend größer als die theoretische Durchschnittsspannung, die sich aus der Division von Zugkraft durch Nettofläche ergibt. Oberflächenschädigungen reduzieren die Traglast von Gläsern erheblich, da die sich einstellende Spannungsspitze die zulässige Zugspannung übersteigen kann. Die Folge davon sind vom Kerbgrund ausgehende, rasch anwachsende Risse, die schlussendlich zum Versagen des Bauteils führen.

Die wichtigsten Parameter von Floatglas sind im Vergleich zum Baustoff Stahl nachfolgend zusammengestellt (Tabelle 1).

Material		Floatglas	Stahl
Dichte	ρ	2500 kg/m ³	7850 kg/m ³
Elastizitätsmodul	E	70.000 N/mm ²	210.000 N/mm ²
Poissonzahl	ν	0,23	0,3
Wärmeausdehnungskoeffizient	α	$9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Temperaturwechselbeständigkeit	ΔT	30 - 40 °C	
Druckfestigkeit	f_c	700 - 900 N/mm ²	$f_y = 235 \text{ N/mm}^2, f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ für S235
Biegezugfestigkeit	f_{ft}	45 N/mm ²	
Bruchdehnung	ϵ	0,06 - 0,17 %	25%

Tabelle 1: Materialkennwerte von Floatglas und Stahl gemäß /17/

Floatglas besitzt demnach etwa ein Drittel der Dichte und ein Drittel des Elastizitätsmoduls von Stahl. Trotzdem zeichnet es sich durch eine weit höhere Druckfestigkeit aus, die jedoch ihrerseits durch eine relativ geringe Biegezugfestigkeit überschattet wird. Die aufnehmbare Zugfestigkeit ist, wie bereits erwähnt, aber „genaugenommen keine Materialkonstante, sondern eine von der Schädigung der Glasoberfläche abhängige Größe“ (Ofner, S. 4, /17/). „Die theoretische Zugfestigkeit von Glas beträgt etwa 5000 bis 8000 N/mm², also ein Vielfaches von der aus Versuchen ermittelten Biegezugfestigkeit einer Probe mit üblichen Oberflächendefekten.“ (Ofner, S. 3, /17/).

Die Temperaturwechselbeständigkeit beschreibt die größtmögliche thermische Differenz innerhalb einer gläsernen Scheibe, bei der noch kein Bruchversagen zufolge Wärmeausdehnung erwartet werden muss. Partielle Verschattung oder thermische Beanspruchung durch Heizanlagen können hierfür die Ursache sein.

Primär wegen des geringeren Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten des spröden Baustoffs Glas ist beim Zusammenbau mit Stahl eine möglichst zwangungsfreie Verbindung anzustreben.

2.2 Veredelungsprodukte

Das herkömmliche Floatglas kann die vielen Anforderungen, die heute an moderne Verglasungen gestellt werden, nicht erfüllen. Fehlende Resttragfähigkeit und ungenügende Wärmedämmung zählen neben unzureichendem Schall- und Brandschutz zu den wichtigsten Gründen, warum entsprechend solcher Anforderungen Floatglas nach seiner Herstellung einem Veredelungsprozess unterzogen werden muss.

Diese Veredelung kann sich erstens auf eine veränderte Wärme- und Strahlungsdurchlässigkeit beziehen. Zu diesem Zwecke wird „Flachglas mit metallischen oder oxidischen Schichten belegt, so dass bei ausreichender Lichtdurchlässigkeit durch die hohe Reflektivität der Edelmetalle und Interferenzvorgängen an hochbrechenden Schichten ein Teil der wärmewirksamen solaren Strahlung nicht durch die Gläser“ (Siebert, S. 13, [29]) dringen kann.

Zweitens kann durch „die Produktion von Verbunden aus mehreren Gläsern, gegebenenfalls mit Scheibenzwischenraum, [...] Wärmedämmung sowie Schall- und Brandschutz verbessert und (Rest-) Tragsicherheit vergrößert werden. Dabei ist zu unterscheiden zwischen im Randbereich verbundener Isolierverglasung (wobei die einzelnen Schichten auch aus Verbundglas bestehen können) und verschiedenen Arten Verbundglas.“ (Siebert, S. 13, [29]).

Drittens besteht die Möglichkeit mittels Siebdrucktechnik Farbe aufzutragen. „Es ist zu unterscheiden zwischen thermisch durch Erhitzen zu fixierenden Keramikfarben (Emaillierung) und selbsttrocknender Zweikomponentenfarbe. [...] Neben dem Erzielen spezieller optischer und gestalterischer Effekte kann durch die eben genannten Änderungen der Oberfläche die Rutsicherheit z.B. für begehbares Glas verbessert werden.“ (Siebert, S. 14, [29]).

Und viertens können, um „den Widerstand gegen mechanische oder thermische Beanspruchungen zu verbessern, die Tragfähigkeit zu erhöhen oder ein spezielles Bruchbild zu erreichen, [...] Gläser vorgespannt“ (Siebert, S. 14, [29]) werden. In der Baupraxis findet vereinzelt die chemische Vorspannung, zum größten Teil jedoch die thermische Vorspannung Anwendung.

Bei der chemischen Vorspannung „werden durch Ionenaustauschvorgänge an der Oberfläche, z.B. bei Kalk-Natron-Silicatglas kleinere Natrium-Ionen gegen die ca. 30 % größer Kalium-Ionen ausgetauscht, und somit eine Vorspannung erzielt.“ (Wörner, S. 15, [31]).

Zur thermischen Vorspannung von Gläsern wird das Ausgangsprodukt Floatglas bis auf 640 °C erhitzt und anschließend mittels Anströmung durch Luft abgekühlt (Abbildung 6).

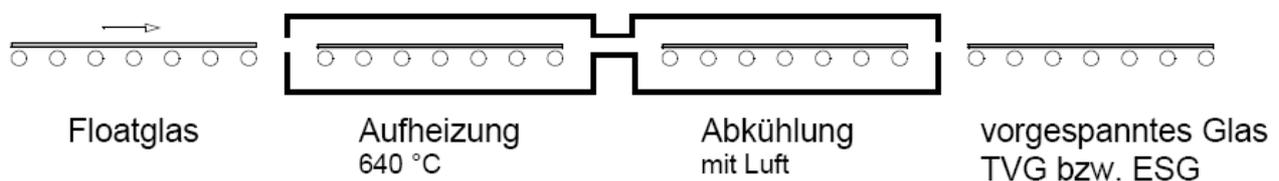


Abbildung 6: Thermische Vorspannung von Glas (Ofner, S. 5, /17/)

Die oberflächennahen Zonen kühlen „dabei im Vergleich zum Glaskern zuerst ab, gewinnen an Festigkeit und ziehen sich bei fortschreitender Abkühlung zusammen. Der Glaskern ist zu diesem Zeitpunkt noch teigig und verformt sich daher ohne nennenswerten Widerstand mit den Glasoberflächen. In weiterer Folge kühlt auch der Glaskern ab, gewinnt an Festigkeit und zieht sich bei fortschreitender Abkühlung ebenfalls zusammen. Die bereits abgekühlten und festen Glasoberflächen leisten dieser Verformung jedoch nun einen Widerstand. Die Folge sind Druckspannungen an den Glasoberflächen und Zugspannungen im Glaskern.“

(Ofner, S. 5, /17/) (Abbildung 7). Die Höhe der inneren Vorspannkraft kann dabei über die Abkühlgeschwindigkeit reguliert werden. Durch schnelles Abkühlen gewinnt man das sogenannte Einscheibensicherheitsglas ESG und durch langsames Abkühlen gelingt eine teilweise Vorspannung der Floatglasscheibe. Das entstehende Produkt wird demnach teilvorgespanntes Glas TVG genannt.

Die charakteristischen Festigkeitswerte und Teilsicherheitsbeiwerte ergeben sich dabei gemäß Tabelle 4 und Tabelle 7 der ÖNORM B 3716-1 für Floatglas, Einscheibensicherheitsglas (ESG) und teilvorgespanntes Glas (TVG) folgendermaßen (Tabelle 2).

Glasart		Floatglas	TVG	ESG
Charakteristische Festigkeit	f_k	45 N/mm ²	70 N/mm ²	120 N/mm ²
Teilsicherheitsbeiwerte	γ_m	1,5	1,5	1,5

Tabelle 2: Charakteristische Festigkeit und Teilsicherheitsbeiwerte von Floatglas, TVG und ESG gemäß [38]

Die eben erläuterte Vorspannung resultiert in einem Eigenspannungszustand, da die über die Dicke integrierte Spannungsverteilung keine Schnittgröße ergibt (Abbildung 7).

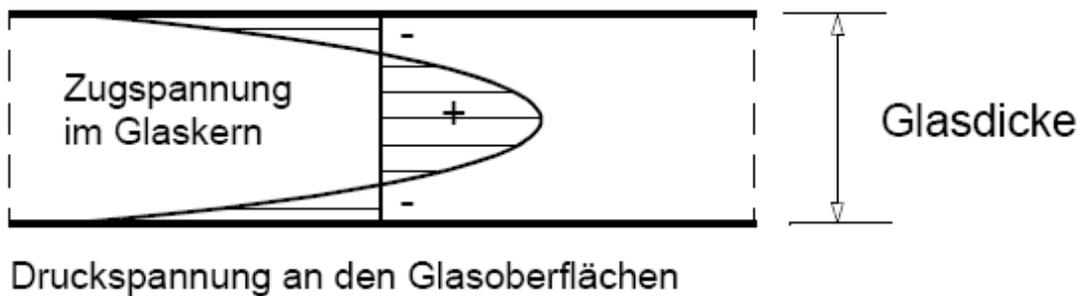


Abbildung 7: Eigenspannung in thermisch vorgespanntem Glas (Ofner, S. 5, /17/)

Unter Biegebeanspruchung wird dann der im thermisch vorgespannten Glas wirkende Eigenspannungszustand den Schnittgrößen infolge äußerer Beanspruchung überlagert. Die resultierende Zugspannung an der Glastafelunterkante ergibt sich so als Differenz des Minuenden „Spannung aus Biegebelastung“ und des Subtrahenden „Eigenspannung“ (Abbildung 8). Die abermals erhöhten Druckspannungen an der Tafeloberkante stellen dank der hohen Druckfestigkeit von Glas keine Gefahr im Sinne der Bauteilsicherheit dar und die sich nun im Inneren befindlichen Zugspannungen gelten als wenig problematisch, da Oberflächenschädigungen im Allgemeinen diese tiefer liegenden Zonen nicht erreichen.

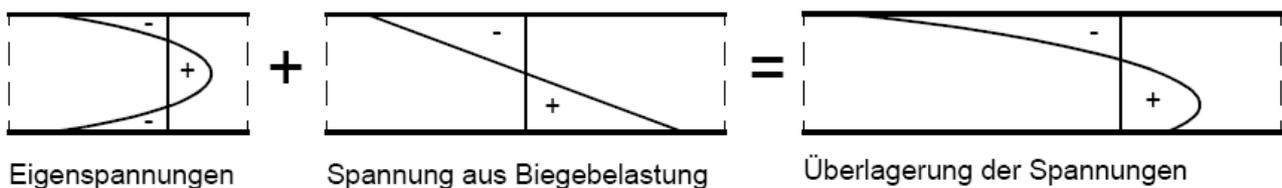
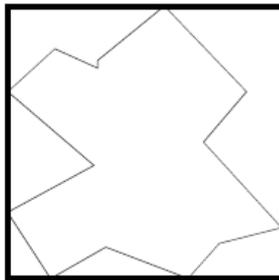


Abbildung 8: Spannungen über die Glasdicke in ESG oder TVG bei Biegebeanspruchung (Ofner, S. 5, /17/)

Allerdings ist hierbei zu beachten, dass thermisch vorgespanntes Glas nicht mehr weiterverarbeitet werden kann, da die überdrückten Randzonen durch Bohren oder Schneiden verletzt und letztendlich wieder Bauteilversagen eintreten würde.

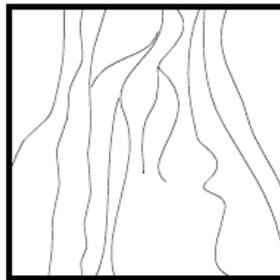
Kommt es infolge äußerer Einwirkungen dennoch zum Bruch der Glasscheibe, so wird die durch den Vorspannungsvorgang eingelagerte elastische Energie wieder freigesetzt. Ein höherer Eigenspannungszustand resultiert dann in einer größeren Anzahl an Bruchlinien und somit in einer kleineren Krümelgröße (Abbildung 9). Je größer und je spitzer die Splitter, desto größer ist die Verletzungsgefahr.

Floatglas



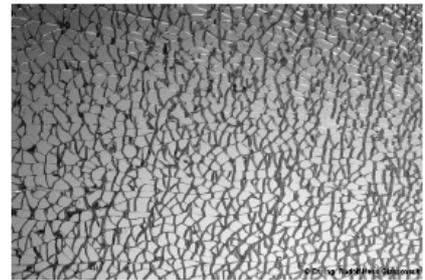
spitze Splitter
kein Sicherheitsglas

TVG



Radialbrüche
von Kante zu Kante
kein Sicherheitsglas

ESG



kleine Krümel
Sicherheitsglas

Abbildung 9: Bruchbilder von Floatglas, TVG und ESG (Ofner, S. 5, /17/)

2.3 Verbundgläser

Unabhängig von der Splittergröße und der daraus resultierenden Gefahr, haben alle oben dargestellten Varianten eines gemeinsam: Kommt es zum Bruch, können sich Partikel aus dem zerstörten Gefüge lösen und darunter liegende Bereiche gefährden. Dies lässt sich durch den Verbund zweier Scheiben über eine Zwischenschicht aus Polyvinylbutyral oder Reaktionsharzen unterbinden.

Erfolgt die Verbindung der Scheiben durch „Reaktionsharze in einer Stärke von 1 mm bis 4 mm“ (Wörner, S. 17, [31]), so spricht man von Verbundglas. „Technische Vorteile bei der Herstellung und Spezialanwendungen (z.B. Verbundglas mit innenliegenden Solarzellen) machen den Einsatz [...] interessant. Will man beispielsweise schmale, lange Gläser herstellen, die mit Bohrungen versehen werden sollen, können mit Gießharzen die Toleranzen im Bohrungsbereich besser minimiert werden als beim Laminierungsprozess von VSG.“ (Wörner, S. 17, [31]).

Die Abkürzung VSG steht für Verbundsicherheitsglas und beschreibt den Verbund von mindestens zwei Einscheibensicherheitsgläsern, teilvorgespannten Gläsern oder Floatglasscheiben mittels Polyvinylbutyral, welches der Gruppe der Polyvinylacetale zugehörig ist, in Folienform.

Um eine einwandfreie Verklebung der Einzelscheiben zu erlangen, wird nach Zusammenlegen und Verpressen der Elemente eine mehrstündige Behandlung im Autoklav unter Druck- und Temperaturbeanspruchung vorgenommen (Abbildung 10).

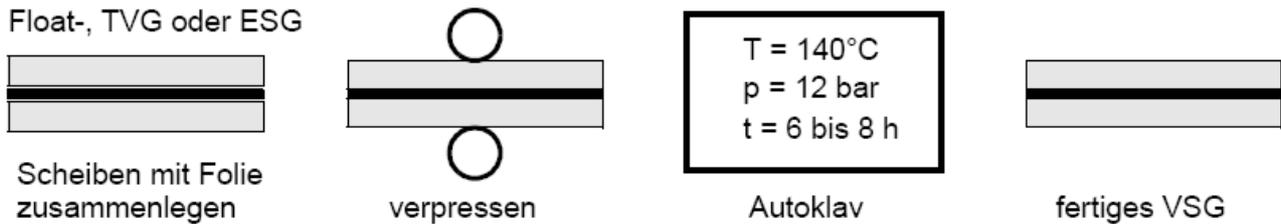


Abbildung 10: Herstellung von Verbundsicherheitsglas mit PVB-Folie (Ofner, S. 5, /17/)

Den Folien verdankt man dann nach einem Glasbruch eine gewisse Resttragfähigkeit, da die Partikel des zerstörten Gefüges für unbestimmte Zeit an der Folie kleben bleiben. Das Bruchverhalten des in Abbildung 9 noch mit „kein Sicherheitsglas“ attribuierten Floatglases respektive teilvorgespannten Glases stellt sich unter Zusammenwirken mit Polyvinylbutyral als günstig heraus. Die großen Splitter erhöhen durch ihre Biegesteifigkeit die Gesamtbiegesteifigkeit der zerbrochenen Glasscheibe und können als mittragend angesehen werden. Im Vergleich dazu büßt VSG aus ESG an Resttragfähigkeit ein. De facto steuern die kleinen Krümel des ESG wenig zur Gesamtbiegesteifigkeit des zerstörten VSG bei und ein Durchhängen ähnlich einer textilen Membran ist die Folge. Ein Ausreißen aus Punkthalterungen beziehungsweise ein Ausgleiten aus linienförmigen Lagerungen wird so immer wahrscheinlicher.

Um die Resttragfähigkeit von VSG aus ESG zu vergrößern, kann die Dicke der Polyvinylbutyral-Folien, kurz PVB-Folien, erhöht werden. Geringere Zugspannungen pro Folienquerschnittsfläche und somit ein geringerer Durchhang des zersprungenen Verbundsicherheitsglases können so erreicht werden. Die PVB-Folien sind allerdings nur in Stärken von 0,38 Millimetern oder einem Vielfachen davon, bis zu Dicken von 2,28 mm lieferbar.

Die gemäß ÖNORM B 3716-1 geforderte Folienreifestigkeit beträgt für PVB bei einer Raumtemperatur von 23°C etwas mehr als 20 N/mm². Die erforderliche Bruchdehnung liegt unter denselben Bedingungen bei über 250%.

Sollte es bei Verbundsicherheitsgläsern, welche sich in speziellen Anwendungsfällen aus bis zu zehn verklebten Einzelscheiben zusammensetzen können, zu einer sichtbaren Eintrübung kommen, so kann davon ausgegangen werden, dass sich eine oder mehrere Verbindungsfolien von den Tafелеlementen abgelöst haben.

Den PVB-Folien wird im übrigen auch die Aufgabe zuteil, die Schubkräfte zwischen den Einzelscheiben bestmöglich zu übertragen. Ausgeprägtes Kriechverhalten und Temperaturabhängigkeit wirken sich dabei negativ auf das Verhalten der PVB-Folien und daraus resultierend auf die Verbundwirkung des VSG aus. Um stark unsicherheitsbehaftete Berechnungen zu umgehen, sind im Rahmen der Nachweisführung von Verbundglas respektive Verbundsicherheitsglas zwei Grenzfälle zu betrachten, denn das tatsächliche „Tragverhalten von Verbundglas liegt zwischen dem bei „starrem“ Verbund und dem ohne Verbund“ (Bucak, S. 533, [4]) (Abbildungen 11 und 12).



Abbildung 11 und 12: Verformung einer Verbundglasscheibe bei vollem Schubverbund (links) und bei fehlendem Schubverbund (rechts) (Wörner, S. 153f, [31])

Die Verteilung der resultierenden Spannungen unter Biegebeanspruchung für vollen, teilweisen und fehlenden Verbund wird nachfolgend am zweischiebigen VSG (Abbildungen 13 bis 15) dargestellt.

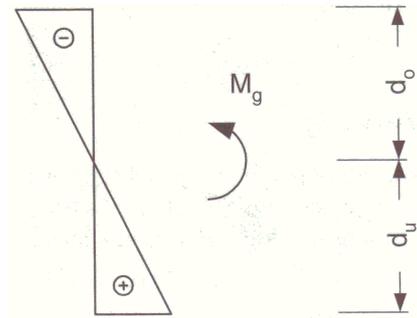


Abbildung 13: Spannungsverteilung bei vollständigem Schubverbund (Wörner, S. 154, [31])

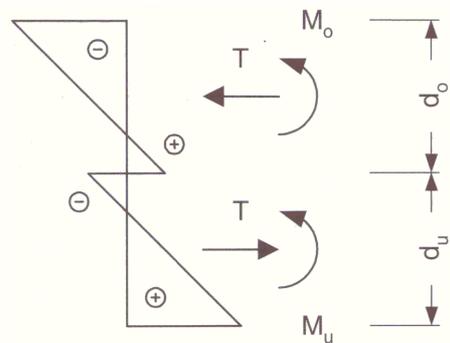


Abbildung 14: Spannungsverteilung bei teilweiseem Schubverbund (Wörner, S. 155, [31])

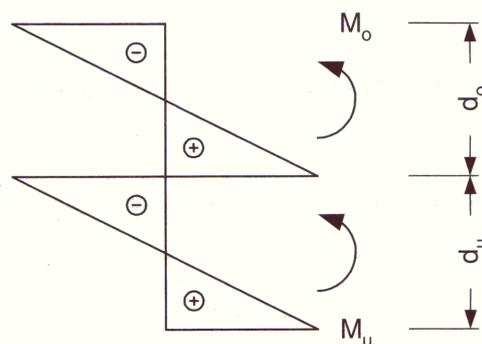


Abbildung 15: Spannungsverteilung ohne Schubverbund (Wörner, S. 155, [31])

„Bei vollem Schubverbund verhalten sich die beiden Scheiben des VSG wie ein monolithischer Aufbau. Die Biegespannungen und Verformungen der Scheibe können unter Ansatz der gesamten Querschnittshöhe ermittelt werden. Ohne Schubverbund verteilt sich die Belastung auf die beiden Einzelscheiben entsprechend dem Verhältnis der einzelnen Biegesteifigkeiten zur gesamten Biegesteifigkeit.“ (Wörner, S. 154, [31]). Aufgrund des Faktums, dass im Grenzfall „ohne Verbund“ die Tragwirkung innenliegender Scheiben immer erst durch die Deformation der äußeren respektive oberhalb liegenden Glastafel aktiviert wird, müssen zur Berechnung der Verformungen des VSG ideale Ersatzdicken angesetzt werden. Gemäß Formel (A.6) der ÖNORM B 3716-1 ergibt sich die ideale Ersatzdicke zu:

$$d^* = (d_1^3 + d_2^3 + \dots)^{1/3} \quad (1)$$

Für den Grenzfall „ohne Verbund“ müssen dann zur Ermittlung der Biegespannungen der Glasplatten jene Belastungsanteile an einer Einzelscheibe angesetzt werden, die sich durch Aufteilung der Last entsprechend den Anteilen am Gesamtwiderstandsmoment ergeben. Im Rahmen des Bemessungsprogramms werden aus Gründen der Vereinfachung die Polyvinylbutyral-Folien als dicken- und gewichtslos angesehen.

Mit den Methoden der Statik können auf diesem Wege die beiden Grenzfälle „kein Verbund“ und „voller Verbund“ berechnet und untersucht werden. Gegebenenfalls sind auch Membrantragwirkungen (Abbildung 16) zu berücksichtigen, die infolge Deformation der teils extrem dünnen Bauelemente aktiviert werden können.

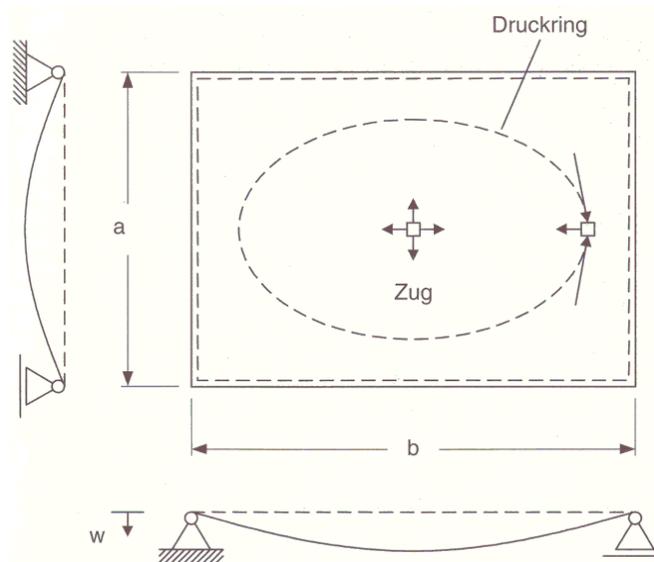


Abbildung 16: Aktivierung von Membrantragwirkung bei großen Verformungen von vierseitig linienförmig gelagerten Scheiben (Wörner, S. 167, [31])

„Interessante Effekte wie die Tatsache, dass bei speziellen Kombinationen von Geometrie und Beanspruchung der Grenzfall „zwei lose Platten“ eine höhere Tragfähigkeit aufweist als die „monolithische Platte“ mit einer Dicke entsprechend der Summe der Einzeldicken, sind dabei zu berücksichtigen.“ (Siebert, S. 80, [29]).

Im Gegensatz zu Mehrscheiben-Isolierverglasungen, für welche ohnehin eine Untersuchung beider Grenzfälle gefordert wird, darf bei der Bemessung von nicht isolierenden Gläsern grundsätzlich kein Schubverbund angesetzt werden. Im Rahmen des Bemessungsprogramms wird jedoch auch für solche Gläser eine Berechnung beider Grenzfälle durchgeführt, um der eben erwähnten „speziellen Kombination von Geometrie und Beanspruchung“ Tribut zu zollen.

2.4 Verglasungsarten und experimentelle Nachweise

Im Allgemeinen unterscheidet man Verglasungen nach der zu erfüllenden Funktion und dem Neigungswinkel der Konstruktion (Abbildung 17). Verglasungen werden demnach gemäß /4/ in

1. *Überkopfverglasungen*
2. *Vertikalverglasungen*
3. *Absturzsichernde Verglasungen*
4. *Begehbare Glas*

unterteilt.

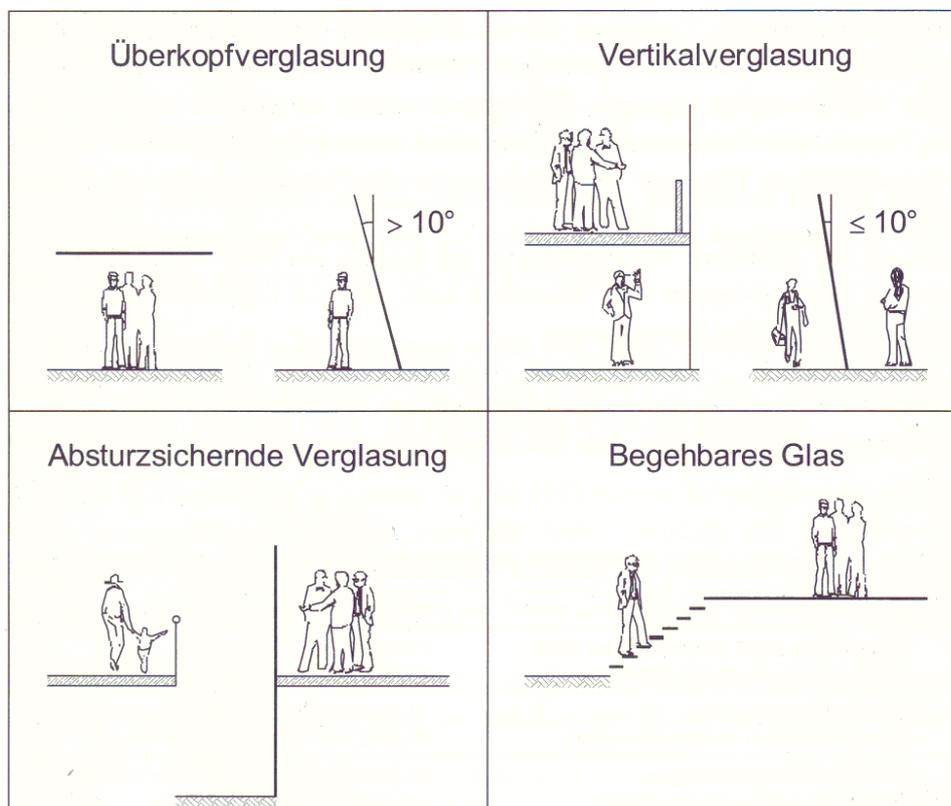


Abbildung 17: Bezeichnung von Verglasungen gemäß /4/ (Siebert, S. 3, [29])

Die ÖNORM B 3716-2 trifft gemäß Kapitel 4 eine etwas differierende Begriffsbestimmung: „Horizontalverglasungen sind Verglasungen, deren Neigung $> 15^\circ$ aus der Vertikalen beträgt. [...] Vertikalverglasungen sind Verglasungen, deren Neigung $\leq 15^\circ$ aus der Vertikalen beträgt.“ (ÖNORM B 3716-2, S. 4, [39]). Weiters heißt es dort: „Sofern geneigte Fassaden ein zusätzliches Risiko für darunterliegende Verkehrsbereiche darstellen und eine Belastung durch Schneeanhäufung möglich ist (zB Shed-Verglasungen), sind diese als Horizontalverglasungen einzustufen.“ (ÖNORM B 3716-2, S. 4, [39]). Das Bemessungsprogramm basiert unter anderem auf dieser ÖNORM, weshalb im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Definitionen gemäß ÖNORM B 3716-2 verwendet werden.

„Mit jeder Verglasungsart sind spezielle Anforderungen verbunden.“ (Ofner, S. 15, /17/):

So wird beispielsweise bei begehbaren Verglasungen neben den rechnerischen Nachweisen auch ein Nachweis gegen „Harten Stoß“ gefordert. Der Nachweis gegen „Harten Stoß“ zählt zu den experimentellen Versuchen und ist bei der „Zulassung im Einzelfall“ (ZiE) von begehbaren Gläsern erforderlich. Hierbei wird aus einer Höhe von 800 Millimetern ein 40 kg schwerer, harter Stoßkörper fallen gelassen, an dessen Aufprallende eine Sechskantschraube M8 eingesetzt ist. Zusätzlich der zur Hälfte angesetzten Bemessungsverkehrslast muss die begehbare Verglasung dieser Einwirkung widerstehen können.

Liegen gemäß [40] absturzgefährliche Stellen vor, so sind absturzsichernde Verglasungen anzuordnen, welche dem experimentellen Nachweis „Weicher Stoß“ zu unterziehen sind. „Bei einem weichen Stoßversuch (Pendelschlagversuch) prallt ein verformbarer Stoßkörper großer Masse (Doppelreifen 50kg, Innendruck 4bar) auf das Glas. Die Fallhöhen betragen je nach Anwendung 900mm, 700mm oder 450mm. Der Versuch simuliert das Hineinfallen einer Person.“ (Ofner, S. 32, /17/). Die experimentellen Nachweise sind dabei von einer akkreditierten Prüfstelle zu vollziehen.

Zusätzlich kann bei allen Verglasungsarten aus ESG ein Nachweis im Sinne des „Heat-Soak-Tests“, zu Deutsch „Heißlagerungstest“, erforderlich werden, der einem speziellen Problem von Einscheibensicherheitsgläsern entgegenwirken soll. In ESG finden sich aus herstellungstechnischen Gründen Verunreinigungen wie Nickel-Sulfid-Einschlüsse, die „sich im Laufe der Zeit durch Phasenumwandlung von α -NiS in β -NiS im Volumen um ca. 4 %“ (Wörner, S. 12, [31]) vergrößern können. „Hinzu kommt, dass der größere Temperatúrausdehnungskoeffizient von NiS gegenüber Glas bei Temperaturerhöhung zu inneren Spannungen führt. Trifft dies lokale Spannungserhöhung nun mit der infolge des Vorspannprozesses vorhandenen hohen Zugspannung im Glasinneren zusammen, kann es zu einer Überschreitung der Glasfestigkeit und damit zu einem sogenannten Spontanbruch kommen.“ (Wörner, S. 12, [31]). Um dieses Risiko vorzeitig auszuschalten, wird mittels neuerlicher Wärmebehandlung über etwa 8 Stunden bei 290°C das NiS-Wachstum derart beschleunigt, sodass ein möglicher Spontanbruch bereits im sogenannten Heißlagerungssofen eintritt. Derart geprüfetes Einscheibensicherheitsglas wird in der Praxis als ESG-H bezeichnet.

Für die im Bemessungsprogramm verwendeten Scheibenaufbauten können die beiden erstgenannten Nachweise allerdings entfallen, da ohnehin keine begehbaren oder absturzsichernden Verglasungen bemessen werden können.

2.5 Nachweisführung

Grundsätzlich erfolgt die Nachweisführung gemäß dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept unter reiner Plattenbeanspruchung. Dies bedeutet, dass sowohl der Einwirkungs- als auch der Widerstandsseite Teilsicherheitsbeiwerte zugewiesen werden. Der zu erbringende Nachweis reduziert sich dann auf Formel (1) der ÖNORM B 3716-1:

$$S_d \leq R_d \quad (2)$$

Die Variable S_d beschreibt hierbei den Bemessungswert der Beanspruchung und R_d den Bemessungswert des Widerstandes.

Sowohl für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch der Gebrauchstauglichkeit können die zulässigen Spannungen gemäß Abschnitt 9.2 beziehungsweise die zulässigen Durchbiegungen gemäß Tabelle 3 der ÖNORM B 3716-1 auf einfachem Wege ermittelt werden.

Zur Ermittlung des Designwerts der zulässigen Spannungen gibt ÖNORM B 3716-1 folgende Formel an:

$$R_d = f_k * k_{mod} * k_b / \gamma_m \quad (3)$$

Hierbei bedeuten die Kurzzeichen:

- R_d Bemessungswert des Widerstandswerts
- f_k charakteristische Festigkeit
- k_{mod} Abminderungsfaktor für die Einwirkungsdauer
- k_b Abminderungsfaktor für die Art der Beanspruchung
- γ_m Teilsicherheitsbeiwert des Widerstandes

In untenstehender Tafel (Tabelle 3) wurden die zulässigen Spannungen gemäß Formel (3) für Floatglas, TVG und ESG ausgewertet.

Glasart	charakteristischer Festigkeitswert f_k	k_{mod} für lange Einwirkungsdauer	k_b für Plattenbeanspruchung	Teilsicherheitsbeiwert γ_m	zulässige Spannung σ
Floatglas	45 N/mm ²	0,6	1,0	1,5	18 N/mm ²
TVG	70 N/mm ²	1,0	1,0	1,5	46,66 N/mm ²
ESG	120 N/mm ²	1,0	1,0	1,5	80 N/mm ²

Tabelle 3: Zulässige Spannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Floatglas, TVG und ESG gemäß [38]

Und in der nachfolgenden Zusammenstellung (Tabelle 4) finden sich die entsprechend ÖNORM B 3716-1 zulässigen Durchbiegungen für die Verglasungsarten (siehe Punkt 2.4) Horizontal- und Vertikalverglasungen in Abhängigkeit der Isoliereigenschaften (siehe Punkt 2.7).

Verglasungsart	Lagerung	Horizontalverglasung	Vertikalverglasung
nicht isolierende Verglasung	vierseitig	1/100 der Scheibenstützweite in Haupttragrichtung	keine Anforderungen
Isolierverglasung	vierseitig	1/100 der Scheibenstützweite in Haupttragrichtung	Durchbiegungsbegrenzungen des Isolierglasherstellers beachten

Tabelle 4: Zulässige Durchbiegungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für Horizontal- und Vertikalverglasungen in Abhängigkeit der Isoliereigenschaften gemäß [38]

Die Berechnung der Einwirkungsseite (S_d) wirft jedoch die Frage auf, welche Kombinationen von Belastungen und welche Teilsicherheitsbeiwerte gemäß ÖNORM EN 1990 zu berücksichtigen sind. Unter Vernachlässigung von Vorspannkräften ergibt sich für die sogenannte „Grundkombination“ die Formel (6.10) der ÖNORM EN 1990 sinngemäß zu:

$$S_d = \Sigma (\gamma_{G,j} * G_{k,j}) + \gamma_{Q,1} * Q_{k,1} + \Sigma (\gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * Q_{k,i}), \text{ mit } j \geq 1 \text{ und } i > 1 \quad (4)$$

Gemäß Tabelle A.1.2(A) der selbigen Norm werden für einen kombinierten Nachweis (Nachweis der Bauteile und des statischen Gleichgewichts) folgende Teilsicherheitsbeiwerte für ungünstige Wirkung vorgeschlagen:

$$\gamma_{G,j,sup} = 1,35 \quad (5)$$

$$\gamma_{Q,1} = 1,5 \quad (6)$$

$$\gamma_{Q,i} = 1,5 \quad (7)$$

Unter Verwendung der Tabelle A.1.1 der ÖNORM EN 1990 können dann die begleitenden, veränderlichen Einwirkungen kombiniert werden. In Abhängigkeit dieses Kombinationsergebnisses, der dominierenden Einwirkung ($Q_{k,1}$) und der ständigen Lasten kann so der Designwert der Beanspruchungen errechnet werden. In der untenstehenden Tafel (Tabelle 5) findet sich eine Zusammenstellung der hierfür benötigten, einwirkenden Lasten.

Art der Einwirkung	Bezeichnung der Einwirkung	Kurzzeichen	Einheit	Ermittlung gemäß...	Wirkungsrichtung	Bemerkung
ständig	charakteristisches Eigengewicht	G_k	$[\text{kN}/\text{m}^2]$	ÖNORM B 1991-1-1	vertikal	Das Eigengewicht der Stahlkonstruktionen wird im Programm vernachlässigt
veränderlich	charakteristische Nutzlast	Q_k	$[\text{kN}/\text{m}^2]$	ÖNORM B 1991-1-1	vertikal	
veränderlich	charakteristische Windlast	$D_k + S_k$	$[\text{kN}/\text{m}^2]$	ÖNORM B 4014-1	normal	Winddruck und -sog werden als eine Beanspruchung betrachtet
veränderlich	charakteristische Schneelast	E_k	$[\text{kN}/\text{m}^2]$	ÖNORM B 1991-1-3	vertikal	

Tabelle 5: Lastaufstellung für nicht isolierende Verglasungen

Nun bleibt noch die Frage, welche der oben angeführten Einwirkungen als dominant anzusehen ist. „Bei Glas ist nicht notwendigerweise die Einwirkung mit dem höchsten Nennwert dominant, da die Bruchfestigkeit von der Andauer der Einwirkung abhängt“ (Sedlacek, S. 194, [27]). Demnach wäre gemäß Formel (6.10) der ÖNORM EN 1990 jene veränderliche Einwirkung als dominant anzusehen, die die höchste Bruchwahrscheinlichkeit in sich birgt. Wegen der daraus resultierenden Unsicherheiten und aus Gründen der Vereinfachung wurde auf die Formel (9.13) sowie Formel (9.14) der ÖNORM ENV 1991-1 zurückgegriffen. Aus Tabelle 9.2 der selbigen Norm erhält man einen Teilsicherheitsbeiwert für ungünstig wirkende, ständige Lasten (Tragwerksversagen oder Versagen der tragenden Bauteile) von

$$\gamma_{G_{\text{sup}}} = 1,35 \quad (8)$$

Diese Annahme wird durch Formel (13.1) respektive Formel (13.2) in „Glas im Konstruktiven Ingenieurbau“ (Sedlacek, S. 194, [27]) verifiziert. Die Berechnung der einwirkenden Lasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit kann also für eine veränderliche Einwirkung sinngemäß zu

$$S_d = \Sigma (1,35 * G_{G_j}) + 1,5 * Q_{k_i}, \text{ mit } j \geq 1 \text{ und } i = 1 \quad (9)$$

und für mehrere veränderliche Einwirkungen zu

$$S_d = \Sigma (1,35 * G_{G_j}) + 1,35 * \Sigma (Q_{k_i}), \text{ mit } j \geq 1 \text{ und } i \geq 1 \quad (10)$$

angegeben werden. Die Variable G steht hierbei für ständige und Q für veränderliche Einwirkungen.

Auf eine erneute Ermittlung der einwirkenden Lasten für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit mit abgeminderten Sicherheitsfaktoren respektive für die Lastaufstellung der zu berechnenden Stahlbauteile wird im Bemessungsprogramm aus Gründen der Vereinfachung verzichtet. Die Einwirkungen werden gemäß Gleichungen (9) und (10) beibehalten.

Der Weg der Last kann folgendermaßen beschrieben werden: Die charakteristische Bemessungsflächenlast, die sich aus den Anteilen „ständige Lasten“ (Eigengewicht) und „veränderliche Lasten“ (Wind-, Schnee- und Nutzlast) zusammensetzt, wird gemäß Formel (9) respektive Formel (10) mit Kombinations- und Teilsicherheitsbeiwerten versehen. Der sich so ergebende Designwert ist jene Einwirkung, die von den Glastafeln als Plattenbeanspruchung aufgenommen werden muss. Windlasten und, bei Mehrscheiben-Isolierverglasungen, die Einwirkung zufolge dem resultierenden isochoren Druck (siehe Punkt 2.7) werden im Rahmen der Lastaufstellung stets als normal auf die Konstruktion wirkend angenommen. Bei allen vertikal wirkenden Beanspruchungen wird ausschließlich die Komponente der Plattenbeanspruchung über simple Winkelfunktionen (Formel (37), Seite 56) ermittelt und berücksichtigt. Der sich so ergebende Designwert ist jene Einwirkung, die von den Glastafeln als Plattenbeanspruchung aufgenommen werden muss. Die charakteristischen Festigkeitswerte des Baustoffs Glas werden dabei mit Abminderungsfaktoren versehen, um die Sicherheit gegen Versagen weiter zu erhöhen. Die allseitig linienförmig gelagerten Gläser nehmen die Einwirkungen auf und leiten die Lasten über Plattentragwirkung zu den Auflagern. Für die Anpressprofile, die auch als Pfosten-Riegelkonstruktionen angesehen werden können, ergibt sich nun die Beanspruchung als Streckenlast. Vom Bemessungsprogramm wird dann das erforderliche Flächenträgheitsmoment zweiten Grades zu Einhaltung der zulässigen Durchbiegungen der maßgebenden Pressleiste ermittelt. Den Pressleisten, die entweder über ihre gesamte Länge oder nur an ihren Enden auf Stahlträgern beliebiger Querschnittsform gelagert sind, kann im MS Excel-Programm über die Eingabe eines Elastizitätsmoduls jedes beliebige Material zugeordnet werden. Der weitere Weg der Last führt dann in das stählerne Tragwerk. Dabei übernimmt jeder Träger den ihm gemäß der Einflussbreite (Achsabstand der Träger) zugewiesenen Lastanteil. Für die sich daraus ergebende Linienlast wird dann abermals das erforderliche Flächenträgheitsmoment zweiten Grades zur Einhaltung der zulässigen Durchbiegungen in Trägermitte berechnet. Entspricht das geforderte Trägheitsmoment nicht den Vorstellungen des Anwenders, so kann zur Unterstützung des lastaufnehmenden Stahltragwerks ein weiteres Tragwerk aus einer Reihe von dazu normal verlaufenden Stahlträgern angeordnet werden. Für sie ergibt sich die Beanspruchung dann als Punktlast, die durch das darüber liegende System eingetragen werden. Wiederum erfolgt dann die Berechnung des erforderlichen Flächenträgheitsmoments zweiten Grades zur Einhaltung der zulässigen Durchbiegungen. Bezüglich der Auflagern wird in beiden Fällen davon ausgegangen, dass die Einwirkungen der gelenkigen Lagerung übernommen werden können.

2.6 Berechnungsansätze

Der eben erläuterte Weg der Last impliziert indirekt die Voraussetzung, dass die lastaufnehmenden und lastabtragenden Bauteile den daraus resultierenden Beanspruchungen widerstehen können. Es stellt sich deshalb die Frage nach der Methode zur Ermittlung der Auswirkungen der Einwirkungen. In Tabelle 6-4 in „Glas im konstruktiven Ingenieurbau“ (Bucak, S. 547, [4]) werden hierfür folgende Berechnungsansätze vorgeschlagen:

- Lineare Plattentheorie mittels Finiter Elemente – Methoden
- Berechnung über die Tafelwerte von Beyle
- Berechnung über die Bach'sche Plattenformel
- Berechnung über Czerny-Tafeln
- Nichtlineare Berechnung mittels Finiter Elemente – Methoden
- Allgemeine nichtlineare Berechnung

„Bei der Beanspruchung von Glasplatten durch Lasten senkrecht zur Plattenebene treten in der Regel große bis sehr große Durchbiegungen, bezogen auf die Plattendicke, auf. Die auftretenden Verformungen können ein Vielfaches der Plattenstärke betragen. Da lineare Plattentheorien aber ihre Gültigkeit nur bis zu einer Durchbiegung von $f \approx d$ behalten, liefern sie für größere Verformungen Ergebnisse, die in der Regel zwar auf der sicheren Seite liegen, aber unwirtschaftlich und wenig aussagekräftig bezüglich des tatsächlichen Sicherheitsniveaus sind. Für die Bemessung von Glasplatten mit großen Verformungen ist es daher wichtig, das tatsächliche Tragverhalten möglichst zutreffend, mit allen Spannungs- und Verformungszuständen, nach Theorie höherer Ordnung zu erfassen.“ (Bucak, S. 548f, [4]).

Da dies den Rahmen dieser Arbeit bei weitem übersteigen würde, wurden die zulässigen Durchbiegungen mit der Plattendicke beschränkt und im Bemessungsprogramm entsprechend angewendet. Im Folgenden werden die angegebenen linearen Berechnungsvarianten unter Ausschluss Finiter Elemente – Methoden für Glasscheiben, welche aufgrund der Isotropie des Materials grundsätzlich als drillsteif anzusehen sind, kurz vorgestellt.

Variante „Czerny-Tafeln“:

Czerny gibt für gleichmäßig vollbelastete, vierseitig einspannungsfrei gelagerte Rechteckplatten unter Zugrundelegung einer Querdehnungszahl von $\mu = 0$ folgende Zusammenstellung (Tabelle 6) an:

$l_y : l_x$	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50
$m_{x,m} =$	27,2	24,5	22,4	20,7	19,1	17,8	16,8	15,8	15,0	14,3	13,7
$m_{y,max} =$	27,2	27,5	27,9	28,4	29,1	29,9	30,9	31,8	32,8	33,8	34,7
$m_{xy,e} = \pm$	21,6	20,6	19,7	19,0	18,4	17,9	17,5	17,1	16,8	16,5	16,3
$R_e =$	10,8	10,3	9,85	9,5	9,2	8,95	8,75	8,55	8,4	8,25	8,15
$q_{x,rm} = \pm$	2,96	2,87	2,78	2,71	2,64	2,58	2,52	2,47	2,43	2,39	2,36
$\bar{q}_{x,rm} =$	2,19	2,15	2,11	2,07	2,04	2,02	2,00	1,98	1,97	1,96	1,95
$q_{y,rm} = \pm$	2,96	2,92	2,89	2,86	2,84	2,82	2,80	2,78	2,76	2,75	2,75
$\bar{q}_{y,rm} =$	2,19	2,14	2,09	2,05	2,02	1,99	1,96	1,94	1,92	1,90	1,89
$f_m = \frac{p \cdot l_x^4}{E \cdot d^3}$	0,0487	0,0536	0,0584	0,0631	0,0678	0,0728	0,0767	0,0809	0,0850	0,0890	0,0927

$l_y : l_x$	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,00
$m_{x,m} =$	13,7	13,2	12,7	12,3	11,9	11,5	11,3	11,0	10,8	10,6	10,4
$m_{y,max} =$	34,7	35,4	36,1	36,7	37,3	37,9	38,5	38,9	39,4	39,8	40,3
$m_{xy,e} = \pm$	16,3	16,1	15,9	15,7	15,6	15,5	15,4	15,3	15,3	15,2	15,1
$R_e =$	8,15	8,05	7,95	7,85	7,8	7,75	7,7	7,65	7,65	7,6	7,55
$q_{x,rm} = \pm$	2,36	2,33	2,30	2,27	2,25	2,23	2,21	2,19	2,18	2,16	2,15
$\bar{q}_{x,rm} =$	1,95	1,94	1,93	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92
$q_{y,rm} = \pm$	2,75	2,74	2,73	2,73	2,73	2,72	2,72	2,71	2,71	2,70	2,70
$\bar{q}_{y,rm} =$	1,89	1,88	1,87	1,86	1,85	1,84	1,83	1,82	1,82	1,82	1,82
$f_m = \frac{p \cdot l_x^4}{E \cdot d^3}$	0,0927	0,0963	0,0997	0,1029	0,1060	0,1093	0,1118	0,1145	0,1169	0,1195	0,1215

Tabelle 6: Ermittlung von Spannungen und Deformation einer gleichmäßig belasteten, gelenkig gelagerten Rechteckplatte (Czerny, S. 315, [6])

Hierbei bedeuten die Variablen:

l_y	lange Seite der Rechteckplatte
l_x	kurze Seite der Rechteckplatte
p	gleichmäßige Vollbelastung
$m_{x,m}$	Feldmoment m_x in Plattenmitte
$m_{y,max}$	größtes Feldmoment m_x im Plattenmittenschnitt
$m_{xy,e}$	Drillmoment m_{xy} im Platteneck
R_e	Einzelkraft im Platteneck. Zugkraft +, Druckkraft -

$q_{x,rm}$	Querkraft q_x in Randmitte
$q_{x,rm,quer}$	Stützkraft $q_{x,quer}$ in Randmitte
$q_{y,rm}$	Querkraft q_y in Randmitte
$q_{y,rm,quer}$	Stützkraft $q_{y,quer}$ in Randmitte
f_m	Durchbiegung unter Voraussetzung eines homogenen Plattenquerschnitts in Plattenmitte

Variante „Tafelwerte von Beyle“:

Mit den unten angeführten Tafeln (Tabelle 7 und 8) kann die Bemessung von rechteckigen, 2- oder 4-seitig linienförmig gelagerten Glasplatten unter konstanter Flächenlast auf Basis einer Querkontraktionszahl von $\mu = 0,23$ erfolgen.

t	3	4	5	6	8	10	12	15	19
A_t	83,33	46,88	30,00	20,83	11,72	7,50	5,21	3,33	2,08
C_t	77,50	32,70	16,74	9,69	4,09	2,09	1,21	0,62	0,31

Tabelle 7: Tafel zur Ermittlung der Beiwerte A_t und C_t (Bucak, S. 542, [4])

ε	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90
κ_w	0,31	0,37	0,43	0,49	0,54	0,59	0,64	0,68	0,72	0,75
κ_σ	0,37	0,43	0,49	0,54	0,59	0,64	0,68	0,72	0,75	0,78

ε	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90
κ_w	0,78	0,80	0,83	0,85	0,87	0,88	0,90	0,91	0,92	0,93
κ_σ	0,81	0,83	0,84	0,86	0,88	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94

ε	3,00	3,10	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60	3,70	3,80	3,90
κ_w	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98
κ_σ	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98

ε	4,00	5,00	6,00	10,00	50,00
κ_w	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
κ_σ	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabelle 8: Tafel zur Ermittlung der Beiwerte κ_w und κ_σ (Bucak, S. 542, [4])

Die maximale Spannung ergibt sich dann gemäß Formel (6-1) aus „Glas im konstruktiven Ingenieurbau“ ([4]) zu:

$$\sigma = \kappa_\sigma * A_t * q * l^2 \quad (11)$$

und die resultierende Durchbiegung gemäß Formel (6-2) zu:

$$w = \kappa_w * C_t * q * l^4 \quad (12)$$

Hierin bedeuten die Variablen:

σ	maximale Spannung in [kN/m ²]
w	maximale Durchbiegung in [mm]
A_t	dimensionsbezogener Beiwert
C_t	dimensionsbezogener Beiwert
q	Flächenlast in [kN/m ²]
l	Stützweite in [m]
t	Glasdicke in [mm]
a	lange Kante in [m]
b	kurze Kante in [m]
ε	Seitenverhältnis a/b
κ_σ	Beiwert in Abhängigkeit von ε
κ_w	Beiwert in Abhängigkeit von ε

Variante „Bach´sche Plattenformel“:

Die Bach´sche Plattenformel basiert auf einer Querszahl von $\mu = 0,3$ und kann mit Hilfe untenstehender Tafel (Tabelle 9) und den anschließend angegebenen Formeln für die Berechnung von rechteckigen, frei aufliegenden Platten (Abbildung 18) herangezogen werden.

a/b	ψ	φ_x	φ_y	ξ
1,0	0,71	1,15	1,15	0,26
1,5	1,35	1,20	1,95	0,34
2,0	1,77	1,11	2,44	0,37
3,0	2,14	0,97	2,85	0,37
4,0	2,24	0,92	2,96	0,38
∞	2,28	0,90	3,00	0,38

Tabelle 9: Tabellenwerte zur Anwendung der Bach´schen Plattenformel
(Meyer zur Capellen, S. 435, [19])

Die resultierenden Spannungen σ in x- beziehungsweise y-Richtung und die zu erwartenden Durchbiegungen f ergeben sich entsprechend „Festigkeitslehre“ (Meyer zur Capellen, S. 435, [19]) zu

$$\sigma_x = \varphi_x p b^2 / h^2 \quad (13)$$

$$\sigma_y = \varphi_y p b^2 / h^2 \quad (14)$$

$$f = \psi p b^4 / E h^3 \quad (15)$$

Um ein Abheben der Kanten zu unterbinden, können in den Eckbereichen negative Auflagerkräfte A angeordnet werden.

$$A = -\xi p b^2 \quad (16)$$

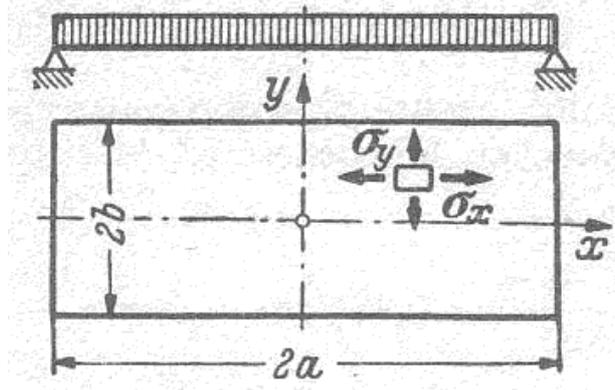


Abbildung 18: Frei aufliegende Platte (Meyer zur Capellen, S. 436, [19])

Hierbei bedeuten die Variablen:

σ_x	maximale Spannung in x-Richtung
σ_y	maximale Spannung in y-Richtung
f	größte Durchbiegung
A	erforderliche negative Auflagerkraft in den Ecken, um Abheben zu vermeiden
p	gleichmäßige Flächenlast
a	halbe Länge der langen Kante
b	halbe Länge der kurzen Kante
h	Plattendicke
E	Elastizitätsmodul
ψ	Beiwert in Abhängigkeit von a/b
φ_x	Beiwert in Abhängigkeit von a/b
φ_y	Beiwert in Abhängigkeit von a/b
ξ	Beiwert in Abhängigkeit von a/b
κ_w	Beiwert in Abhängigkeit von ε

Weitere Erläuterungen zur Bach'schen Plattenformel finden sich in [2] sowie in [9], und die Behandlung von Flächentragwerken im Allgemeinen erfolgt ausführlich in [8], [17] und [18].

Da bei der Variante „Czerny-Tafeln“ nur Platten mit einem Seitenverhältnis von bis zu 2,0 berechnet werden können, schied diese Methode bei der Suche nach einem geeignetem Berechnungsverfahren für das Bemessungsprogramm vorzeitig aus. Die Variante der „Tafelwerte von Beyle“ gibt zwar genügend Seitenverhältniswerte an, ist jedoch bezüglich der verfügbaren Werte für Plattendicken stark eingeschränkt. Im Bemessungsprogramm wurde daher auf die Variante „Bach'sche Plattenformel“ zurückgegriffen, wobei die Berechnung der negativen Auflagerkraft vernachlässigt wurde.

Aufgrund der Tatsache, dass die Variante der „Bach'schen Plattenformel“ auf einer Querdehnungszahl von $\mu = 0,3$ basiert, muss nun noch die Frage geklärt werden, welcher Fehler hierbei durch die Abänderung der Poissonzahl von $\mu = 0,23$ auf $\mu = 0,3$ begangen wird. Girkmann gibt gemäß Gleichung (513) in [8] die nachstehende Formel für die Lösung der Biegefläche einer allseitig gelenkig gelagerten Rechteckplatte unter gleichförmig verteilter Vollbelastung an.

$$w(x, y) = \frac{16p}{K\pi^6} \sum_m \sum_n \frac{\sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}}{m n \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \quad (17)$$

$$(m = 1, 3, 5, \dots; n = 1, 3, 5, \dots)$$

Gemäß Formel (399) aus [8] ergibt sich die in Gleichung (17) angeführte Plattensteifigkeit K zu:

$$K = \frac{E h^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (18)$$

Für den Divisor K aus Gleichung (17) besteht somit eine Abhängigkeit von der Querdehnungszahl μ , welche für die Werte $\mu = 0,23$ und $\mu = 0,3$ zu folgenden Ergebnissen führt:

$$K(\mu = 0,30) = 0,091575 \times E \times h^3 \quad (19)$$

$$K(\mu = 0,23) = 0,087988 \times E \times h^3 \quad (20)$$

Durch Division ergibt sich der Verhältniswert zu:

$$\frac{K(\mu = 0,30)}{K(\mu = 0,23)} = \frac{0,091575 \times E \times h^3}{0,087988 \times E \times h^3} = 1,04077 \quad (21)$$

Der für die Lösung der Biegefläche in Kauf genommene Fehler liegt damit zwar auf der unsicheren Seite, erscheint aber mit einer Abweichung von etwa 4,077 Prozent vernachlässigbar klein.

Die in den Gleichungen (17) bis (21) verwendeten Variablen bedeuten hierbei:

a	kurze Kantenlänge
b	lange Kantenlänge
E	Elastizitätsmodul
h	Plattendicke
K	Plattensteifigkeit
p	konstante Flächenlast
w	Durchbiegung
μ	Querdehnungszahl

2.7 Mehrscheiben-Isolierverglasungen und ihre Nachweisführung

Den isolierenden Gläsern, genauer den Mehrscheiben-Isoliergläsern, sei an dieser Stelle ein eigener Unterpunkt gewidmet, da sie sich von allem bisher Beschriebenen durch ihre spezielle Bauart unterscheiden: Sie weisen einen Scheibenzwischenraum auf.

Mehrscheiben-Isoliergläser setzen sich stets aus mindestens zwei oder mehreren Glasscheiben zusammen, die durch den sogenannten Scheibenzwischenraum voneinander getrennt respektive durch diesen verbunden sind. Sie dienen dem Luftschallschutz ebenso wie dem Sonnen- und Wärmeschutz. Wurden zu Beginn der Entwicklung von Mehrscheiben-Isoliergläsern, vor rund 50 Jahren, zunächst luftgefüllte und randverschweißte Glasscheiben verwendet, können heute alle möglichen Glasprodukte über Randstege zu Mehrscheiben-Isolierverglasungen verbunden werden (Abbildung 19).

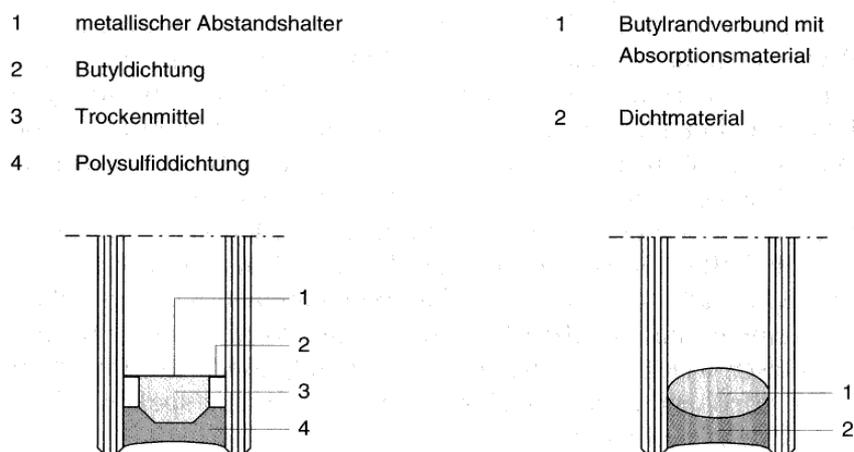


Abbildung 19: Aufbau von Isoliergläsern (Wörner, S. 18, [31])

Gemäß Tabelle A.3 der ÖNORM B 3716-1 kann die Dicke des weitgehend dampfdicht abgeschlossenen, gas- oder luftgefüllten Scheibenzwischenraums, kurz SZR, 10, 12, 14 oder 16 Millimeter betragen. Der SZR dient beispielsweise bei Füllung mit Edelgasen einem verbesserten Luftschallschutz.

Stark verbessert können auch die sonnen- und wärmeschutztechnischen Isoliereigenschaften durch zusätzliche Beschichtungen mit Kupfer, Gold oder Silber werden. Ein „hohes Transmissionsvermögen im sichtbaren Spektralbereich und ein hohes Reflexionsvermögen im Infrarotbereich“ (Wörner, S. 39, [31]) zeichnet diese Metalle aus.

Für isolierende Gläser gelten hinsichtlich der Nachweisführung die gleichen Anwendungsbedingungen wie bei Verbundsicherheitsglas. Bezüglich der Lastaufstellung (Tabelle 10) wird jedoch davon ausgegangen, dass es sich immer um mehr als eine veränderliche Einwirkung handelt. Begründet wird dies dadurch, dass Mehrscheiben-Isoliergläser zum einen stets durch die veränderliche Einwirkung „resultierender isochorer Druck“ und zum anderen zumindest durch eine weitere veränderliche Einwirkung (Wind, Schnee oder Nutzlast) beansprucht werden, was im Normalfall in der Natur der Sache liegen sollte.

Art der Einwirkung	Bezeichnung der Einwirkung	Kurzzeichen	Einheit	Ermittlung gemäß...	Wirkungsrichtung	Bemerkung
ständig	charakteristisches Eigengewicht	G_k	[kN/m ²]	ÖNORM B 1991-1-1	vertikal	Das Eigengewicht der Stahlkonstruktionen wird im Programm vernachlässigt
veränderlich	charakteristische Nutzlast	Q_k	[kN/m ²]	ÖNORM B 1991-1-1	vertikal	
veränderlich	charakteristische Windlast	$D_k + S_k$	[kN/m ²]	ÖNORM B 4014-1	normal	Winddruck und -sog werden als eine Beanspruchung betrachtet
veränderlich	charakteristische Schneelast	E_k	[kN/m ²]	ÖNORM B 1991-1-3	vertikal	
veränderlich	resultierender isochorer Druck	p_0	[kN/m ²]	ÖNORM B 3716-1	normal	

Tabelle 10: Lastaufstellung für Mehrscheiben-Isolierverglasungen

Die Ermittlung des Designwerts der Beanspruchungen erfolgt somit gemäß Formel (10):

$$S_d = \Sigma (1,35 * G_{Gj}) + 1,35 * \Sigma (Q_{ki}), \text{ mit } j \geq 1 \text{ und } i \geq 1 \quad (10)$$

Außerdem „ist zusätzlich die Wirkung von Druckdifferenzen aus Veränderung der Temperatur, des meteorologischen Luftdrucks und der Höhendifferenz von Herstellungs- und Einbauort (sog. Klimlasten), sowie die Kopplung der Glasscheiben durch das eingeschlossene Gasvolumen (sog. „Kisseneffekt“) zu berücksichtigen“ (Siebert, S. 129, [29]) (Abbildung 20).

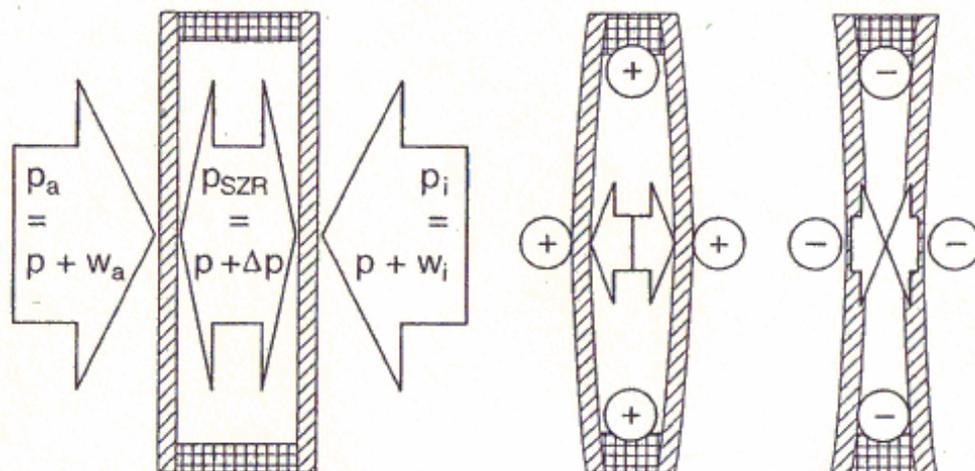


Abbildung 20: Belastungs- und Verformungsverhalten von Mehrscheiben-Isolierglas (Bucak, S. 556, [4])

Kommt es infolge der oben angeführten Klimlasten zu einer relativen Zunahme des Drucks im Scheibenzwischenraum, resultiert dies in einer „Auswölbung“ der Scheiben. Umgekehrt kann ein im

Vergleich zum Umgebungsdruck herrschender Unterdruck zu einer „Einwölbung“ der Scheibenelemente führen. Ähnliche Effekte kann man bei der Belastung nur einer Scheibe zum Beispiel durch Winddruck feststellen. Der gasgefüllte Zwischenraum regt dann die zweite Scheibe zum Mittragen an (Abbildung 21).

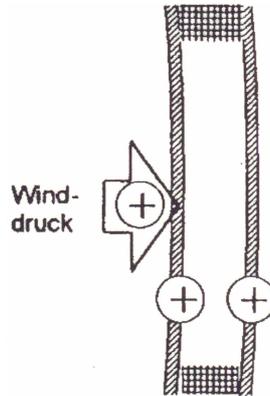


Abbildung 21: Mitwirkung der zweiten Scheibe
(ÖNORM B 3716-1, S. 14, [38])

Dies bedeutet, dass alle einwirkenden Lasten entsprechend der Einzelsteifigkeiten der Scheiben und abhängig von der Dicke des Scheibenzwischenraums auf beide Scheibenelemente aufgeteilt werden können.

Anhang A der ÖNORM B 3716-1 gibt hierfür ein zulässiges Berechnungsverfahren für allseitig gelagerte, rechteckige Isolierglasscheiben an (Tabelle 11). Die Variable b beschreibt im Laufe der folgenden Berechnungen die längere und a die kürzere Kantenlänge in Millimetern.

Lastangriff auf	Einwirkung	Lastanteile auf äußere Scheibe	Lastanteile auf innere Scheibe
äußere Scheibe	Wind w_a	$(\delta_a + \varphi * \delta_i) * w_a$	$(1 - \varphi) * \delta_i * w_a$
	Schnee s	$(\delta_a + \varphi * \delta_i) * s$	$(1 - \varphi) * \delta_i * s$
innere Scheibe	Wind w_i	$(1 - \varphi) * \delta_a * w_i$	$(\varphi * \delta_a + \delta_i) * w_i$
beide Scheiben	isochorer Druck p_0	$-\varphi * p_0$	$+\varphi * p_0$

Tabelle 11: Verteilung der Einwirkungen gemäß [38]

Nutz- und Eigenlasten werden im Rahmen des Bemessungsprogramms wie Schneelasten behandelt. Die Variablen δ_a und δ_i stehen dabei für die Anteile der Einzelscheiben an der Gesamtbiegesteifigkeit und können entsprechend den Formeln (A.1) und (A.2) der ÖNORM B 3716-1 berechnet werden:

$$\delta_a = d_a^3 / (d_a^3 + d_i^3) \quad (22)$$

$$\delta_i = d_i^3 / (d_a^3 + d_i^3) = 1 - \delta_a \quad (23)$$

Die Variable d_a entspricht hierbei der Dicke der äußeren, d_i der Dicke der inneren Scheibe und d_{SZR} der Dicke des Scheibenzwischenraums. Abhängig vom Beiwert B_V gemäß folgender Tafel (Tabelle 12)

a/b	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
B _v	0,0194	0,0237	0,0288	0,0350	0,0421	0,0501	0,0587	0,0676	0,0767	0,0857

 Tabelle 12: Beiwert B_v gemäß [38]

kann dann über die Ermittlung der charakteristischen Kantenlänge a^* gemäß Formel (A.3) der ÖNORM B 3716-1

$$a^* = 28,9 * [(d_{SZR} * d_a^3 * d_i^3) / ((d_a^3 + d_i^3) * B_v)]^{(1/4)} \quad (24)$$

der Faktor φ entsprechend Formel (A.4) des Anhangs A zu

$$\varphi = 1 / [1 + (a / a^*)^4] \quad (25)$$

angegeben werden.

„Der isochore Druck p_0 im Scheibenzwischenraum (Druck bei gleich bleibendem Volumen) ergibt sich wie folgt aus den klimatischen Veränderungen:

$$p_0 = c_1 * \Delta T - \Delta p_{met} + c_2 * \Delta H \quad (26)$$

$$\text{mit } c_1 = 0,34 \text{ kPa/K} \quad (27)$$

$$\text{und } c_2 = 0,012 \text{ kPa/m}'' \quad (28)$$

(ÖNORM B 3716-1, S. 10, [38]). Stehen hierbei keine Angaben zur Berechnung des resultierenden isochoren Drucks zur Verfügung, können die Mindestwerte für die klimatischen Einwirkungen gemäß Tabelle 2 der ÖNORM B 3716-1 (Tabelle 13) verwendet werden.

Einwirkungskombination	ΔT in K	Δp_{met} in kN/m ²	ΔH in m	p_0 in kN/m ²
Sommer	+20	-2	+600	+16
Winter	-25	+4	-300	-16

 Tabelle 13: Rechenwerte für klimatische Einwirkungen und den resultierenden isochoren Druck p_0 gemäß [38]

Eine Erläuterung der in Tabelle 8 angegebenen Mindestwerte für klimatische Einwirkungen findet sich im Unterpunkt B.1 der ÖNORM B 3716-1.

3 Der Baustoff Stahl

3.1 Materialeigenschaften

Stahl ist eine Legierung des Eisens mit maximal zwei Volumsprozent Kohlenstoff und anderen nichtmetallischen und metallischen Elementen. Das nachfolgend abgebildete Ablaufschema (Abbildung 22) kennzeichnet die Grundzüge der Stahlherstellung.

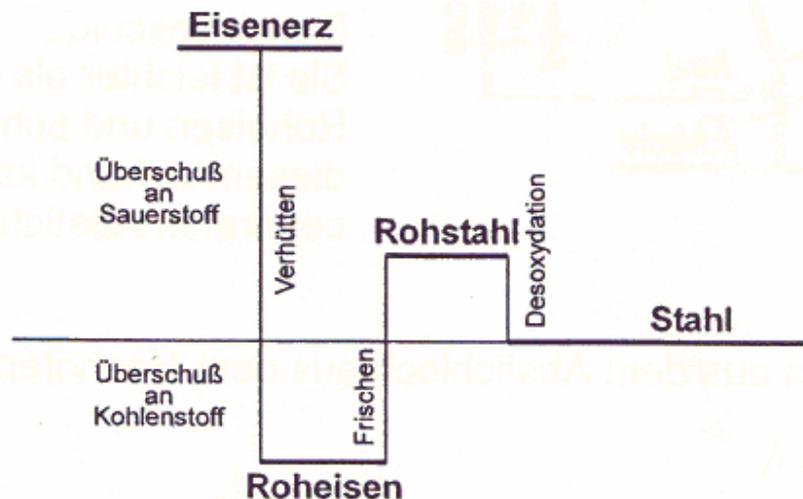


Abbildung 22: Ablaufschema der Stahlherstellung (Fink, Bl. 2.1/2, [7])

„Eisenerze [...] werden im Hochofen oder durch Direktreduktion zu Roheisen [...] reduziert. Durch Frischen (= Verbrennen des im Roheisen enthaltenen überschüssigen Kohlenstoffs) wird aus Roheisen Stahl erzeugt. Das erfolgt heute nach dem Sauerstoffblasverfahren (LD-Verfahren) oder im Elektroofen.“ (Ramberger, S. 22, [21]). Der dadurch gewonnene Rohstahl oder „unberuhigter Stahl“ wird durch Desoxydation (= Zugabe von Ferromangan und Ferrosilizium zum Abbinden des Restsauerstoffs) zu „nicht unberuhigtem Stahl“ weiterverarbeitet. Durch das Beimengen von stickstoff- und sauerstoffbindendem Aluminium zur Schmelze entsteht „voll beruhigter Stahl“, welcher anschließend in Blöcken oder im Strang kontinuierlich vergossen werden kann.

Von allen anderen Massenbaustoffen hebt sich Stahl durch seinen großen Elastizitätsmodul, seine hohe Festigkeit und sein herausragendes Verhältnis von aufnehmbarer Einwirkung zu Konstruktionsgewicht ab. Gerade deshalb ermöglichen tragende Elemente aus Stahl eine größere Schlankheit als andere Baustoffe, die nicht zuletzt positiven Einfluss auf die kostbare Nutzhöhe und Nutzfläche hat.

In Kombination mit dem transparenten Baustoff Glas entwickelten sich Häute aus Stahl und Glas zum unverzichtbaren Element der Architektur und zählen im Status quo zu den exklusivsten Dach- und Fassadenkonstruktionen der jüngeren Zeit (Abbildung 23). Fertigteilmbauten aus Stahl benötigen im Hochbau wegen ihrer herausragenden Wärmeleitfähigkeiten zwar meist einen baulichen Brand- sowie auf Grund ihrer Reaktionsfreudigkeit mit Sauerstoff und Feuchtigkeit zu Eisenoxid und -hydroxid (Rost) ausreichenden Korrosionsschutz, weisen aber dennoch die meist gesicherte Güte auf und suchen ihresgleichen bei großen Spannweiten und Schlankheiten.



Abbildung 23: Mineralbad in Bad Cannstatt (Knaack, S. 93, [11])

Konstruktionselemente aus Stahl sind in verschiedensten Querschnittsformen erhältlich und zeichnen sich durch ein außergewöhnliches plastisches Materialverhalten (Abbildung 24) aus.

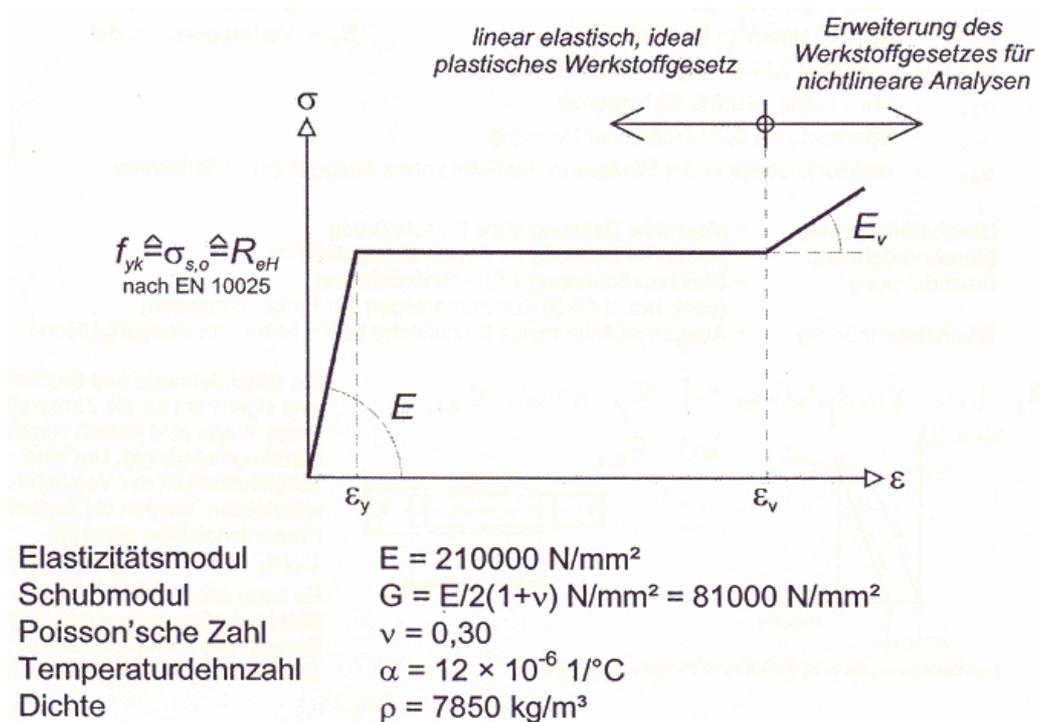


Abbildung 24: Linear elastisch-ideal plastisches Spannungs-Dehnungsverhalten und Materialkennwerte des Baustoffs Stahl (Fink, Bl. 2.3/4, [7])

Die Bemessung von Stahlbauteilen auf Basis der Plastizitätstheorie kann zwar im Rahmen der Verbindung mit Glasbauteilen wegen der dabei resultierenden unzulässigen Verformungen nicht genutzt werden, es können aber dadurch Spannungsspitzen über die Fließgrenze hinaus umgelagert (Abbildung 5) und so nach Elastizitätstheorie stets auf der sicheren Seite liegend berechnet werden.

Im Bemessungsprogramm kann neben den allgemeinen Baustählen auf nichtrostende Stähle, kurz NiRo, zurückgegriffen werden. NiRo weist etwa einen Chromgehalt von 10,5% auf und zeichnet sich durch einen besonders hohen Widerstand gegen chemische Angriffe aus. Seine überaus nützlichen Eigenschaften gehen im Bemessungsprogramm allerdings auf Kosten eines Elastizitätsmoduls von nur 200.000 [N/mm²] ein. Sein verringerter Schubmodul von 77.000 [N/mm²] findet wegen der Vernachlässigung von Querschnittsnachweisen keinen Eingang.

3.2 Berechnungsmethode

Die Berechnung der Stahlbauteile erfolgt im Bemessungsprogramm grundsätzlich auf Basis der ÖNORM B 1993-1-1. Um dem Anwender größtmögliche Freiheit bei der Querschnittsauswahl zu gewähren und aus Gründen der Vereinfachung wurden der Nachweis des statischen Gleichgewichts sowie die Nachweise gegen Bruch, Ausbildung einer kinematischen Kette und Verlust der Stabilität infolge Theorie zweiter Ordnung sowie sämtliche Querschnittsnachweise und die erforderlichen Nachweise bei der Verbindung von Stahlbauteilen untereinander und mit Anschlussbauteilen vernachlässigt. Die Berechnung der stählernen Bauteile reduziert sich also auf die Ermittlung des erforderlichen Flächenträgheitsmoments zweiten Grades zur Einhaltung der zulässigen Deformationen.

Grundsätzlich stehen zur Berechnung der Stahlbauteile die statischen Systeme der beidseitig gelenkig gelagerten Konstruktion und - im Fall eines vertikalen Bauwerks - das der einseitig eingespannten Konstruktion zur Verfügung.

Mit der Variante „beidseitig gelenkige Lagerung“ wurde versucht allgemeinen Hochbaukonstruktionen Rechnung zu tragen. Die vertikal auskragende Konstruktion dient speziell der Berechnung von frei stehenden, nicht absturzsichernden Wänden.

In beiden Fällen wird zuerst die Streckenlast auf Basis der einwirkenden Bemessungsflächenlast und der vorhandenen Einflussbreite ermittelt. Anschließend kann abhängig von der gewählten Stahl- (allgemeine Baustähle oder nichtrostende Stähle) und Lagerungsart das erforderliche Flächenträgheitsmoment zweiten Grades, infolge normal auf die Stabachse wirkender Kräfte, berechnet werden.

Im Falle einer einseitigen Einspannung ergibt sich das erforderliche Flächenträgheitsmoment zweiten Grades gemäß Seite 93 aus „Bautabellen“ ([13]) zu

$$J = (q * l^4) / (8 * E * w) \quad (29)$$

und für beidseitig gelenkige Lagerung entsprechend Seite 95 zu

$$J = (5 * q * l^4) / (384 * E * w) \quad (30)$$

Gesetzt den Fall es handelt sich um ein beidseitig gelenkig gelagertes System, kann bei zu großem erforderlichem Trägheitsmoment zweiten Grades eine orthogonale, unterstützende Konstruktion angeordnet werden.

Abhängig von der Einflussbreite des unterstützenden Systems werden die einwirkenden Einzellasten ermittelt. Gemäß „Bautabellen für Ingenieure“ ([25]) kann dann in Abhängigkeit von der Anzahl ($n-1$) der angreifenden Einzellasten und davon, ob n gerade oder ungerade ist, das erforderliche Trägheitsmoment zweiten Grades der Elemente des Tragwerks der vierten Ebene bestimmt werden. Ist die Anzahl n der Felder, die sich durch Division von der Länge des Tragwerks der dritten Ebene und Achsabstand des Tragwerks der

vierten Ebene ergibt, eine gerade Zahl, so resultiert das erforderliche Trägheitsmoment indirekt (Schneider, S. 4.2, [25]) zu:

$$J = (5 * n * P * I^3) / (384 * E * w) * (1 - 0,8 / n^2) \quad (31)$$

Sei aber n eine ungerade Zahl, so ergibt sich das erforderliche Trägheitsmoment entsprechend selbiger Quelle zu:

$$J = (5 * n * P * I^3) / (384 * E * w) * (1 - 0,8 / n^2 - 0,2 / n^4) \quad (32)$$

Da sich durch Anordnung eines unterstützenden Systems natürlich auch das Flächenträgheitsmoment zweiten Grades des unterstützten Systems wieder ändert, wird eine neuerliche Berechnung für das zweitgenannte System erforderlich.

Aus statischer Sicht ergibt sich das nun mehrfach gelagerte unterstützte Tragwerk zu einem Durchlaufträger, der an seinen Enden gelenkig gelagert ist. Da eine genaue Berechnung dieses statisch unbestimmten Systems den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, musste eine Vereinfachung im Sinne einer feldweisen Betrachtung getroffen werden. Unter Ausschaltung von Querschnittsbetrachtungen wird sich unter konstanter Streckenlast die größte Durchbiegung in den Randfeldern einstellen. Ergo resultiert das erforderliche Trägheitsmoment sinngemäß nach „Bautabellen für Ingenieure“ (Schneider, S. 4.6f, [25]) für ein auf der einen Seite gelenkig und auf der anderen Seite eingespanntes System zu:

$$J = (q * I^4) / (184,6 * E * w) \quad (33)$$

In den Formeln (29) bis (33) bedeuten:

- J Flächenträgheitsmoment zweiten Grades
- q Streckenlast
- E Elastizitätsmodul
- w Durchbiegung

Die zulässigen Durchbiegungen w können gemäß Abschnitt 4.2 der ÖNORM B 4000 folgendermaßen angegeben werden (Tabelle 14):

Statisches System	Maßgebende Stelle der Durchbiegung	Zulässiger Wert der Deformation
beidseitig gelenkig, gelagerter Träger	in Feldmitte	1/500 der Stützweite für Unterzüge
Kragträger (einseitig eingespannt)	am freien Trägerende	1/250 der freien Kraglänge

Tabelle 14: Zulässige Durchbiegungen gemäß [41]

Da Glastafeln grundsätzlich und „insbesondere kleinformatige, steife Scheiben sehr empfindlich auf eine Verwindung der Unterkonstruktion reagieren“ (Wörner, S. 84, [31]), sollten das unterstützte und das dazu orthogonal verlaufende, unterstützende Tragwerk drillsteif verbunden werden, um auftretende Verdrillungen möglichst zu klein zu halten.

4 Das Verbindungselement

4.1 Verbindungstechniken

Die Lagerung von Glastafeln kann im Allgemeinen punktförmig, linienförmig oder als Kombination beider Lagerungsformen erfolgen. Grundvoraussetzung für alle Varianten ist allerdings, dass der Kontakt zwischen Glasbauteilen und härteren Teilen der Unterkonstruktion keinesfalls zugelassen werden darf. Infolge von Deformationen der Konstruktionselemente kann es zu Berührungen kommen, die zu Oberflächenschädigungen und daraus resultierenden Spannungskonzentrationen führen könnten. Auch physikalische oder chemische Wechselwirkungen der eingesetzten Materialien, wie Kontaktkorrosionen, finden so einen Auslöser. Um Zwänge zu vermeiden, sollte außerdem beim Einbau den in der Baupraxis üblicherweise vorhandenen kleineren Ungenauigkeiten und Toleranzen des Rohbaus genügend Aufmerksamkeit geschenkt werden. Zur Einhaltung der nötigen Abstände der eingesetzten Baustoffe und zur Kompensation von Ungenauigkeiten werden weiche Trennelemente angeordnet. In der Baupraxis bewährt haben sich dafür Zwischenschichten aus Gießharzerzeugnissen, „weich geglühten Aluminiumlegierungen (z.B. AlMgPbSi) oder Kunststoffen, wie beispielsweise EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Copolymer), POM (Polyoxymethylen) oder PA6 (Polyamid) [...]. Die Kunststoffe werden zumeist schwarz eingefärbt, um die UV-Beständigkeit zu erhöhen.“ (Wörner, S. 84, [31]).

Linienförmige Lagerungen können mittels Pressleisten oder als Klebeverbindung und die erst seit wenigen Jahren eingesetzten, punktförmigen Lagerungen als Reibverbindung oder Lochleibungsverbindung ausgeführt werden. Der Spannungsverlauf am Bohrungsrand von Punktlagern hängt dabei von den gewählten Zwischenmaterialien ebenso wie von der Glastafelgeometrie, den Abmessungen und der Art der Bohrung ab. Zusätzlichen Einfluss üben auch die Lagerungsart und die weitgehend kleinen, aber dennoch meist vorhandenen Exzentrizitäten aus.

„Für das Fügen von Glas existieren weitere Verbindungstechniken, die jedoch für den Einsatz im konstruktiven Ingenieurbau ungeeignet oder bislang noch nicht näher untersucht worden sind.“ (Wörner, S. 98, [31]). Deshalb werden nachfolgend nur die eben angeführten Varianten erläutert.

4.1.1 Punktförmige Lagerung mittels Reibverbindung

Reibverbindungen kommen ursprünglich aus dem Stahlbau, wobei „Stahlflächen über vorgespannte Schrauben gegeneinander gepresst und über den damit erzeugten Reibschluss Haftkräfte in der Kontaktfläche übertragen“ (Wörner, S. 97, [31]) werden. Sollen nun Gläser über Reibverbindungen gehalten werden, so ist zur Vermeidung des Kontakts von Glas- und Stahlbauteil eine nicht kriechwirksame Reibschicht anzuordnen (Abbildung 25).

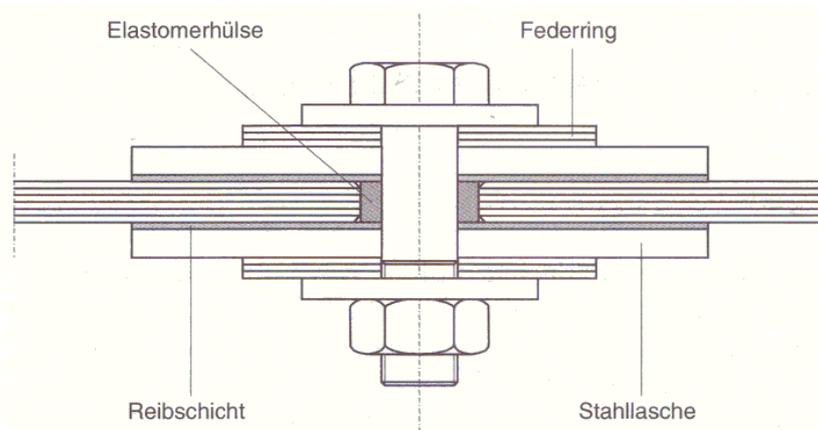


Abbildung 25: Beispiel für eine Reibverbindung (Wörner, S. 97, [31])

Zur Lagerung von Verbund- oder Verbundsicherheitsgläsern sind Reibverbindungen allerdings generell ungeeignet, da sich die kriechwirksamen Zwischenschichten aus Polyvinylbutyral den Belastungen entziehen würden und so ein ordnungsgemäßer Verbund verloren gehen würde.

4.1.2 Punktförmige Lagerung mittels Lochleibungsverbindung

Lochleibungsverbindungen finden ihren Ursprung ebenfalls im Stahlbau und werden wegen ihrer einfachen Handhabung auch im Holzbau seit langer Zeit erfolgreich eingesetzt. „Im Stahlbau kann aufgrund des elastoplastischen Materialverhaltens von Stahl vereinfachend von einer gleichmäßigen Verteilung des Lochleibungsdrucks ausgegangen werden, da sich lokale Spannungsspitzen durch örtliches Plastizieren umlagern.“ (Wörner, S. 96, [31]). Im konstruktiven Glasbau übernehmen zwischen Glasbohrung und Bolzen eingelegte Hülsen die Aufgabe der gleichmäßigen Spannungsverteilung. „Aluminium oder Kunststoffe, wie beispielsweise Teflon oder Polyamid bei vorgefertigten Hülsen oder Epoxid-, Polyester oder Polyurethan bei eingegossenen Hülsen“ (Wörner, S. 97, [31]) können hierfür verwendet werden (Abbildung 26). Hohe Beständigkeit gegen UV-Strahlung und geringe Kriechwirksamkeit sind Eigenschaften, die Hülsenmaterialien unbedingt aufweisen müssen.

„Während liniengelagerte Scheiben aufgrund des klar bestimmbareren Spannungsverlaufs in Platten auch mit einfachen Hilfsmitteln berechnet werden können, bedarf der Nachweis von punktförmig gelagerten Glasscheiben aufwendigerer Berechnungen.“ (Wörner, S. 84, [31]). Im Allgemeinen werden hierfür Finite Elemente Methoden herangezogen.

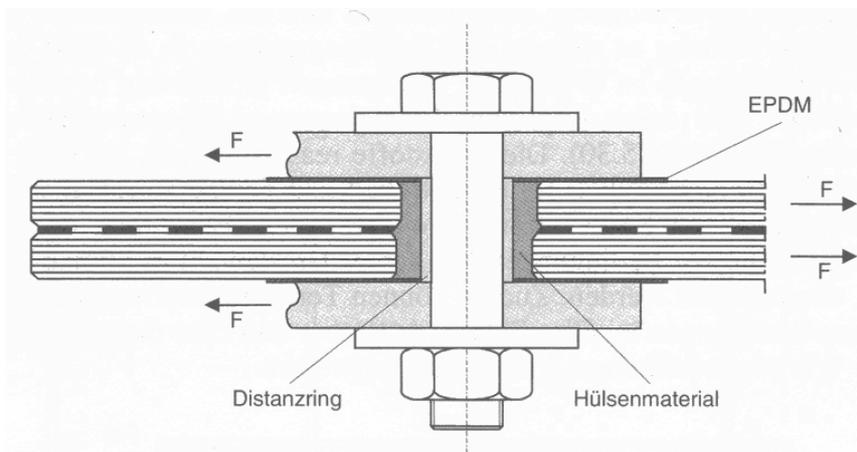


Abbildung 26: Beispiel für eine Lochleibungsverbindung (Wörner, S. 96, [31])

Eine häufig angewendete Haltekonstruktion für Lochleibungsverbindungen ist der sogenannte „Spider“, der als Auflager für vier in den Eckpunkten aufeinander treffende Scheiben dient (Abbildung 27).

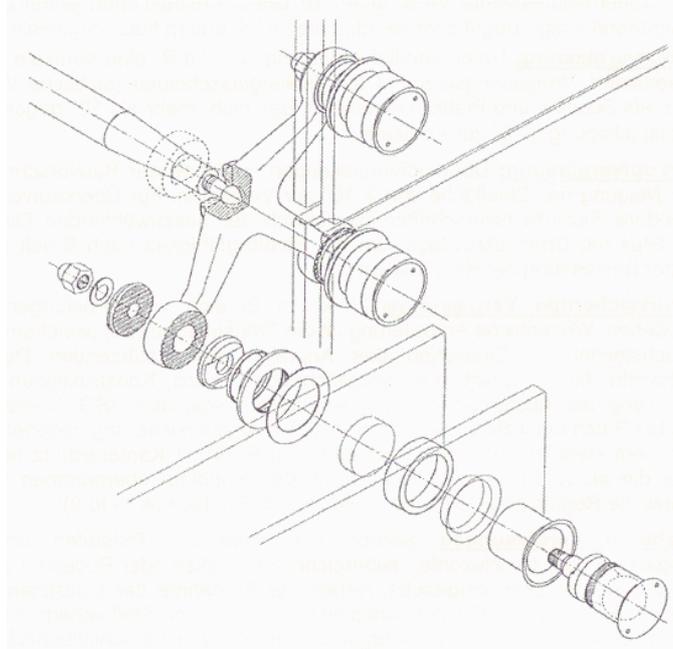


Abbildung 27:Haltekonstruktion „Spider“ für eine Isolierverglasung (Kolbitsch, S. 16, [12])

Unter gleichmäßig statischer Belastung werden die maximalen Hauptzugspannungen stets im Bereich der Bohrungen auftreten. Darum haben Oberflächen- und Kantenbeschaffenheit in diesen Zonen hohen Einfluss auf die Gesamttragfähigkeit der Glasscheiben. Um die sich infolge Temperaturbeanspruchung ergebenden Zwängungen auszuschalten, benötigt man bei Punkthalterungen eine statisch bestimmte Lagerung der Glastafeln, die die Anordnung von Gelenken erforderlich macht (Abbildung 28).

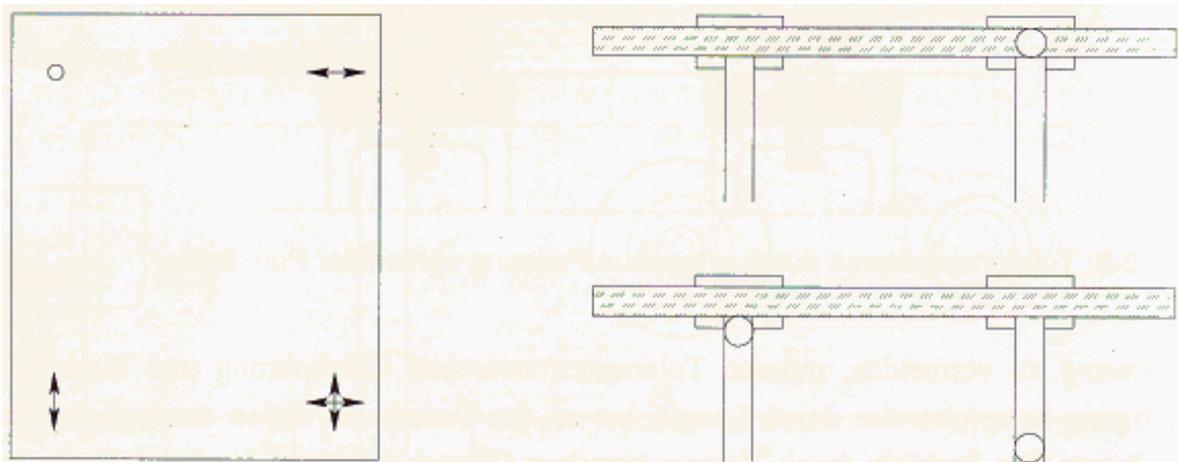


Abbildung 28:Bewegungsmöglichkeiten bei statisch bestimmter Lagerung (links) und mögliche Lage der Gelenke bei Punkthaltern (rechts) (Siebert, S. 160, [29])

4.1.3 Linienförmige Lagerung als Klebeverbindung

Durch Silikon, Epoxid oder Polyurethan verklebte Verbindungen zeichnen sich vor allem durch eine gleichmäßige Lasteintragung aus, wobei die Klebstoffeigenschaften und die Dicke der Klebstoffschichten bedeutende Faktoren bei der Vermeidung von Spannungsspitzen im Glas zufolge Unebenheiten der Unterkonstruktion darstellen.

Die Klebeverbindung kommt nicht nur zwischen Metall- und Glasbauteilen zum Einsatz, sondern kann auch zur Verbindung von Glas mit Glas herangezogen werden (Abbildung 29).

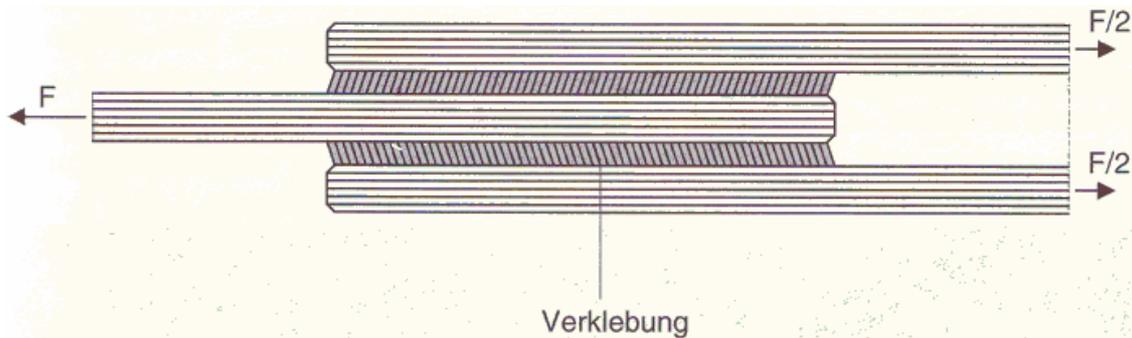


Abbildung 29: Beispiel für eine Klebeverbindung (Wörner, S. 95, [31])

Wegen der meist differierenden Wärmeausdehnungskoeffizienten von Glas und Klebstoff, können Schwankungen der Temperatur erhebliche Spannungen in die Glaselemente induzieren. Diese könnten durch einen an das Glas angenäherten Wärmeausdehnungskoeffizienten der Klebemittel verringert werden.

Weiters ist zu berücksichtigen, dass die verwendeten Klebstoffe wiederum schwach kriechwirksam gegen Dauerbelastungen sein und eine gute Beständigkeit gegen chemische und physikalische Umwelteinflüsse aufweisen sollten.

4.1.4 Linienförmige Lagerung mittels Pressleisten

Den größten Anwendungsbereich in baupraktischen Belangen findet die Linienlagerung von Glasscheiben, die einseitig eingespannt, zwei-, drei- und vierseitig gelenkig gelagert erfolgen kann (Abbildung 30).

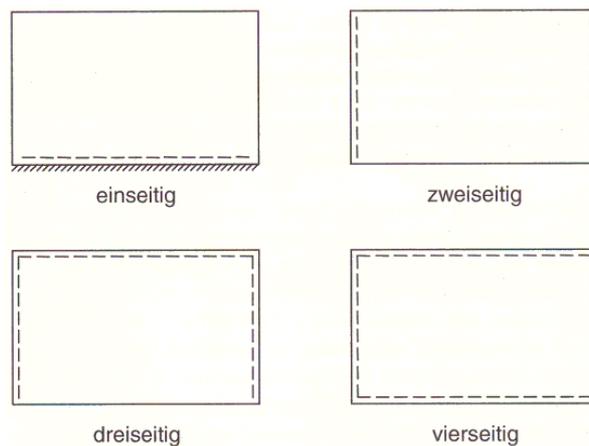


Abbildung 30: Typen linienförmiger Lagerung (Wörner, S. 80, [31])

Die Lagerung der einseitigen Einspannung findet primär bei Brüstungselementen (Abbildung 31) Anwendung, zeigt jedoch „in der Regel im Belastungsversuch kein gutmütiges Tragverhalten“ (Wörner, S. 80, [31]).

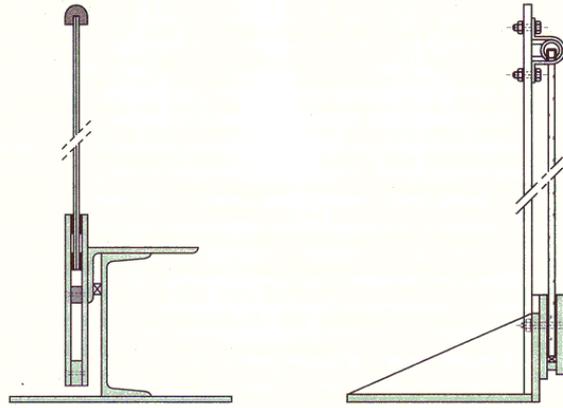


Abbildung 31: Brüstungselemente mit eingespannten Glasscheiben (Wörner, S. 80, [31])

Bei der gelenkigen Lagerung mittels Pressleisten wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die elastischen Zwischenschichten aus EPDM oder Silikon geringe Unebenheiten der Unterkonstruktion kompensieren und aus statischer Sicht ausreichende Verdrehbarkeit der Lager ermöglichen (Abbildung 32). „Eine kontinuierliche Lagerung auf Vorlegeband oder Elastomerstreifen mit einer Breite von 10 mm bis 15 mm kann bei kleinen Verformungen die Verdrehbarkeit in der Regel mit hinreichender Genauigkeit gewährleisten.“ (Wörner, S. 79, [31]).

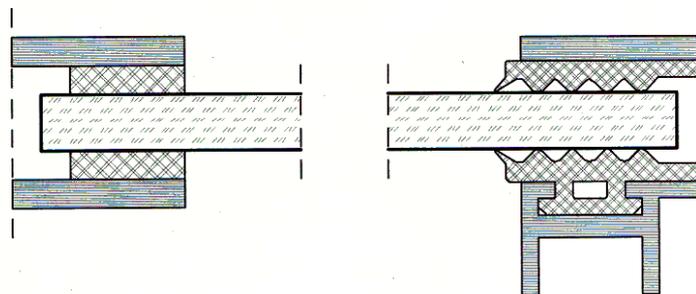


Abbildung 32: Formen der elastischen Zwischenlagen von Linienlagerungen (Siebert, S. 157, [29])

Für die Aufnahme von Sogbeanspruchungen sind Halterungen gegen Abheben von Konstruktionsteilen anzuordnen. Dies kann durch zusätzlich angeordnete Punkthalterungen oder kontinuierlich über Soghalteleisten erfolgen (Abbildung 33).

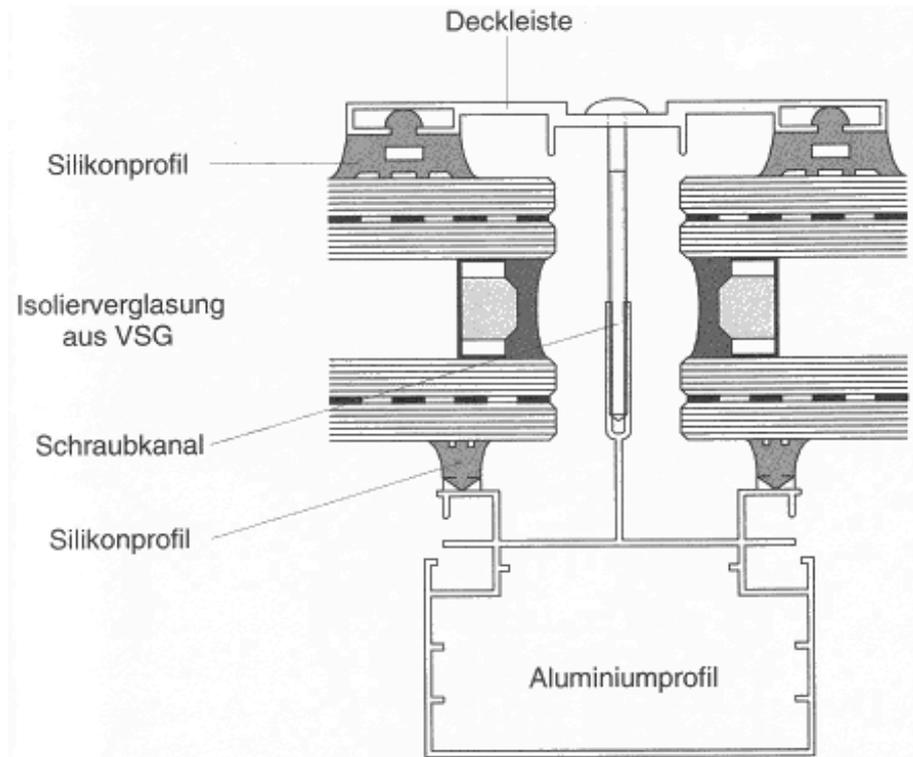


Abbildung 33: Lagerung einer Isolierglasscheibe und Soghalterung (Wörner, S. 81, [31])

Für Punkthalter ist an dieser Stelle wiederum ein Nachweis mittels Finiter Elemente Methoden zu führen. „Werden kontinuierlich umlaufende Soghalteleisten angeordnet, so sollte der Abstand von Befestigungspunkten der Unterkonstruktion kleiner als 35 cm gewählt werden, wobei der Abstand von den Ecken etwa 5 bis 10 cm betragen sollte. Die übliche Auszugskraft der bei diesen Konstruktionen verwendeten Schrauben beträgt etwa 2 bis 4 kN.“ (Wörner, S. 83f, [31]).

Bezüglich der Kombinationen von Verbindungselementen sei resümierend jedoch zu erwähnen, dass sie zwar grundsätzlich die Sicherheit gegen Absturz einer Scheibe erhöhen, jedoch eine derartige Verbindungsmethode aus nachfolgend angegebenen Gründen nur in speziellen Fällen angeordnet werden sollte: Aus Sicht der Bemessung ist prinzipiell die schwächere Verbindung maßgebend und somit entsprechend den zu erwartenden Einwirkungen zu dimensionieren. Die Tragwirkung der stärkeren Verbindung darf theoretisch erst nach Versagen der schwächeren angesetzt werden, und hat dann alle Einwirkungen zu übernehmen. Dies bedeutet auch, sie muss für alle zu erwartenden Einwirkungen dimensioniert werden. Da also eine lastaufteilende Wirkung bei Kombination von verschiedenen Verbindungselementen nicht in Rechnung gestellt werden darf, erscheinen kombinierte Verbindungsmethoden unter diesem Aspekt irrational. Deshalb sollte besser nur ein Verbindungstyp mit größeren Teilsicherheitsbeiwerten angeordnet werden, als zwei Verbindungen anzuordnen, die dann bei einer Überschreitung der Bemessungslast beide zeitgleich versagen.

4.2 Fugenausbildung, Dichtung und Klotzung

Der Fugenausbildung und Dichtung von Verglasungen kommt im Rahmen der praktischen Baudurchführung als auch bei der Planung große Bedeutung zu. Gemäß dem Sprichwort „Eine Kette ist nur so stark, wie ihr schwächstes Glied“ seien alle Baubeteiligten dazu angehalten der Fugenabdichtung und deren Aufgaben, die vom dauerhaften Luft- und Feuchtigkeitsschutz über die Schall- und Wärmedämmung bis hin zur Kompensation der Bewegungen von Glas und der Unterkonstruktion reichen, die nötige Aufmerksamkeit zu

schenken. Verschiebungen und Verdrehungen des Tragwerks als auch Verformungen der Glasbauteile, die aus Erschütterungen, Schwingungen, Windbeanspruchung oder niederfrequentem Schall resultieren können, müssen durch eine adäquate Fugenausbildung und Dichtung ermöglicht werden. Weiters wird den Dichtungen die Aufgabe zuteil den Dehnungen aus Temperaturbeanspruchungen, die bei hoch wärmeabsorbierenden Verglasungen Werte von bis zu $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ erreichen können, den nötigen Raum zur Verfügung zu stellen, ohne selbst an geforderten Eigenschaften zu verlieren.

Die Breite der Stoßfugen hängt in erster Linie von den Abmessungen und dem Aufbau der Glastafeln sowie den zu erwartenden Einwirkungen ab. Ihre Mindestbreite ergibt sich jedoch zu vier Millimetern. Eine Auswahl an Abdichtungsmethoden findet sich in untenstehender Darstellung (Abbildung 34).

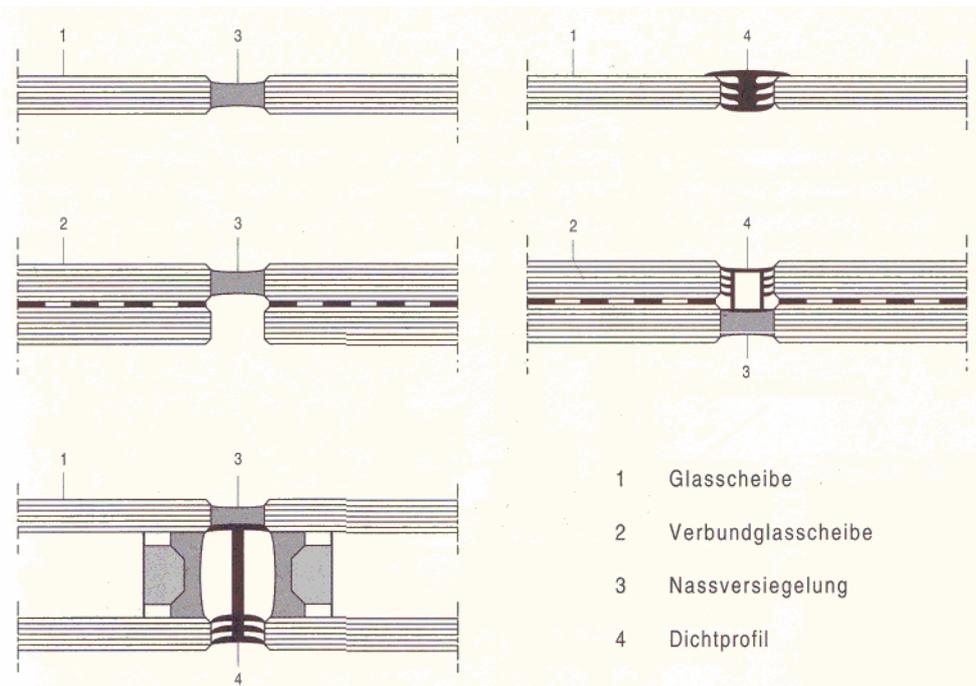


Abbildung 34: Verschiedene Arten der Stoßfugenabdichtung (Wörner, S. 91, [31])

Alle dargestellten Varianten haben dabei gemein, dass sie einen einwandfreien Wasserablauf gewährleisten müssen. Als Dichtstoffe kommen Acryl-Dispersionen, Polysulfide und Polyurethane sowie Silikon zum Einsatz. „Eine Fugenversiegelung mit Materialien, deren UV-Beständigkeit nicht sicher gestellt ist, wie beispielsweise bei Produkten auf Basis von Polysulfiden, ist jedoch nur in Bereichen möglich, die keiner direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind.“ (Wörner, S. 91, [31]).

Besondere Bedeutung kommt auch der Versiegelung von Isolierglasscheiben zu, da sich bei unzureichenden Dampfdruckausgleichsöffnungen nach außen Tauwasser im Falzraum niederschlagen kann. Muss in Räumen mit erhöhter Luftfeuchtigkeit gerechnet werden, „ist wegen der Gefahr des Tauwasserausfalls im Glasfalz der Dampfdruckausgleich“ (Wörner, S. 93, [31]) durch zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen zu unterbinden.

Für die unterste Reihe von Vertikalverglasungen kann die Lagerung der Glastafeln über eine sogenannte Verklotung erfolgen. Die Klotzung (Abbildung 35) sorgt dabei für eine unmittelbare Lastabtragung und eine zwängungsarme Lagerung der Glasscheiben. Klotzbrücken finden Verwendung, wenn unebene Falzauflagen vorliegen.

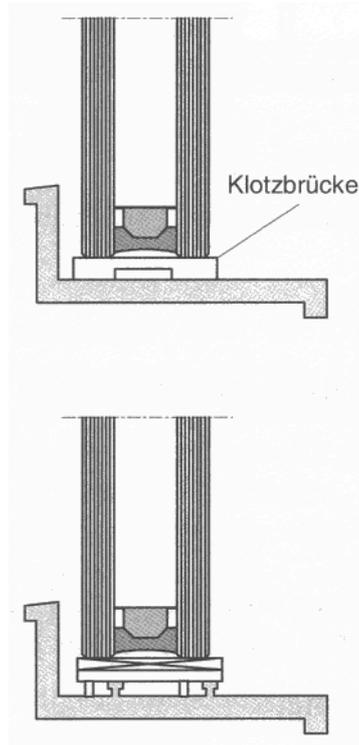


Abbildung 35: Klotzung von Isoliergläsern (Wörner, S. 93, [31])

4.3 Bemessungsmethode am Beispiel „System FW 50⁺“ Schüco

An dieser Stelle sei nochmals Herrn Harald Wanke von der Alukönigstahl GmbH gedankt, von dem die im Anhang angegebenen statischen Werte zum „System FW 50⁺“ der Firma Schüco und vieles mehr zur Verfügung gestellt wurden.

Die statischen Werte beziehen sich allerdings immer auf eine Pfosten-Riegelkonstruktion, die in der Baupraxis selbst als tragende Konstruktion ausgeführt werden kann. Im Verlauf des Bemessungsprogramms wird jedoch stets davon ausgegangen, dass die bemessene Stahlkonstruktion die Aufgaben eines Primärtragwerks übernimmt. Dies impliziert, dass sich die Pfosten-Riegelkonstruktion des „Systems FW 50⁺“ als Sekundärtragwerk versteht und im MS Excel-Programm als auf Stahlträgern gelagert berechnet wird. Begründet wird diese Bemessungsmethode dadurch, dass so auch Konstruktionen berechnet werden können, die die Möglichkeiten der Pfosten-Riegelkonstruktion des „Systems FW 50⁺“ übersteigen.

Die Berechnung der Linienlager erfolgt dabei wiederum auf Basis der Ermittlung des Flächenträgheitsmoments zweiten Grades zur Einhaltung der erlaubten Verformungen.

Betreffend der zulässigen Deformationen wird gemäß Punkt 4 der ÖNORM B 3716-2 für die Lagerung von Horizontalverglasungen die Bedingung gestellt, dass „die Durchbiegung der Konstruktionsteile [...] höchstens 1/200stel der aufliegenden Scheibenlänge, maximal jedoch 15 mm betragen“ (ÖNORM B 3716-2, S. 4, [39]) darf. Aus Gründen der Vereinfachung wird diese Forderung auch für Vertikalverglasungen übernommen.

Die daran anschließende Bedingung: „Die linienförmige Lagerung muss auch hinsichtlich Soglasten wirksam sein.“ (ÖNORM B 3716-2, S. 4, [39]), wird im Bemessungsprogramm nur insofern berücksichtigt, als im „Arbeitsblatt Output“ die zu erwartende Sogbeanspruchung angegeben wird, gegen welche die linienförmige Lagerung wirksam sein muss.

Sinngemäß nach „Bautabellen“ (Krapfenbauer, S. 95, [13]) ergibt sich die Formel für das erforderliche Flächenträgheitsmoment zweiten Grades unter gleichförmiger Streckenlast, bei beidseitig gelenkiger Lagerung wiederum zu:

$$J = (5 * q * l^4) / (384 * E * w) \quad (30)$$

Gemäß dem resultierenden Flächenträgheitsmoment zweiten Grades können dann die statisch erforderlichen Querschnittsprofile aus den im Anhang angegebenen Tabellen entnommen werden.

5 Das Bemessungsprogramm

5.1 Normative Grundlagen

Das MS Excel-Programm zur Bemessung von Stahl-Glas-Konstruktionen basiert auf den nachfolgend angegebenen normativen Grundlagen. Ist im weiteren Verlauf ein Eurocode mit dem Buchstaben B gekennzeichnet, so versteht sich dieser als nationaler Anhang zur entsprechenden europäischen Norm (EN) und muss unter Berücksichtigung dieser angewendet werden.

Ø Die Bemessung der Glasbauteile erfolgt mittels:

- ÖNORM B 3716-1 (Ausgabe: 2006-03-01):
Glas im Bauwesen – Konstruktiver Glasbau:
Teil 1: Grundlagen
- ÖNORM B 3716-2 (Ausgabe: 2006-03-01):
Glas im Bauwesen – Konstruktiver Glasbau:
Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen
- ÖNORM EN 572-1 (Ausgabe: 2004-09-01):
Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas:
Teil 1: Definition und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften
- ÖNORM EN 572-2 (Ausgabe: 2004-09-01):
Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas:
Teil 2: Floatglas
- ÖNORM EN 572-8 (Ausgabe: 2004-08-01):
Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas:
Teil 8: Liefermaße und Festmaße
- ÖNORM EN 572-9 (Ausgabe: 2005-01-01):
Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas:
Teil 9: Konformitätsbewertung/Produktnorm

Ø Die Bemessung der Stahlbauteile erfolgt mittels:

- ÖNORM B 1993-1-1 (Ausgabe: 2006-10-01):
EUROCODE 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten:
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln

Ø Die Bemessung der Pressleisten erfolgt mittels:

- ÖNORM B 3716-2 (Ausgabe: 2006-03-01):
Glas im Bauwesen – Konstruktiver Glasbau:
Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen

Ø Die Ermittlung der Nutzlast erfolgt mittels:

- ÖNORM B 1991-1-1 (Ausgabe: 2006-01-01):
EUROCODE 1 – Einwirkung auf Tragwerke:
Teil 1 - 1: Allgemeine Einwirkungen – Wichten, Eigengewichte, Nutzlasten im Hochbau

- Ø Die Ermittlung der Windlast erfolgt mittels:
 - ÖNORM B 4014-1 (Ausgabe: 1993-05-01):
Belastungsannahmen im Bauwesen: Statische Windwirkungen:
(nicht schwingungsanfällige Bauwerke)

- Ø Die Ermittlung der Schneelast erfolgt mittels:
 - ÖNORM B 1991-1-3 (Ausgabe: 2005-11-01):
EUROCODE 1 – Einwirkung auf Tragwerke:
Teil 1 - 3: Allgemeine Einwirkungen –Schneelasten

- Ø Die Ermittlung der Klimalast erfolgt mittels:
 - ÖNORM B 3716-1 (Ausgabe: 2006-03-01):
Glas im Bauwesen – Konstruktiver Glasbau:
Teil 1: Grundlagen

Über die ÖNORM B 4000 „wird dem Grundsatz Rechnung getragen, dass Normenpakete als geschlossene Einheiten anzuwenden sind“ (ÖNORM B 4000, S. 3, [41]). Sie versteht sich als Verbindungselement zwischen den ÖNORM-Reihen EN 199x respektive B 199x und B 4xxx.

5.2 Anwendungsgrenzen

Im Rahmen des MS Excel-Programms können plane, rechteckige, betretbare und orthogonal, linienförmig durch Stahlelemente unterstützte Glaskonstruktionen für Horizontal- oder Vertikalverglasungen aus Verbundsicherheitsglas oder Isolierglas unter Plattenbeanspruchung berechnet werden. Die Lagerung des Tragwerks der dritten Ebene (Abbildung 36 und 37) aus parallel verlaufenden stählernen Trägern kann beidseitig gelenkig oder, wenn es sich um eine vertikale Konstruktion handelt, als auskragendes System berechnet werden. Im Fall einer gelenkigen Lagerung kann bei Bedarf ein unterstützendes Tragwerk der vierten Ebene (Abbildung 36 und 37) angeordnet werden, welches stets orthogonal zu dem der dritten Ebene verlaufen wird.

Genauer wird im Punkt 5.4 „User-Manual und Formelapparat“ blätterspezifisch erläutert.

5.3 Bedienungsanleitung

Das MS Excel-Programm gliedert sich in vier verschiedene Bereiche, die durch Farbgebung visuell voneinander getrennt dargestellt werden:

- Violett hinterlegte Zonen kennzeichnen Input-Bereiche. Sie beinhalten die Aufgabenstellungen, ein oder zwei fett umrandete Eingabefelder und gegebenenfalls Fehlerausgabefelder, wenn erforderliche Bedingungen nicht erfüllt wurden.
- Rosa hinterlegte Zonen kennzeichnen Ergebnis- oder Zwischenergebnis-Bereiche.
- Gelb hinterlegte Zonen kennzeichnen Informations- respektive Bedingungs-Bereiche, die auch als solche zur ordnungsgemäßen Eingabe der Input-Bereiche zu verstehen sind.
- Grau hinterlegt Zonen kennzeichnen Berechnungs-Bereiche und dienen der Anwendung des Formelapparats. Durch den Verzicht auf Makros sind alle Berechnungsschritte einfach überprüfbar.

Da im Rahmen des Bemessungsprogramms zur Unterstützung des Stahltragwerks optional ein weiteres, orthogonal verlaufendes Stahltragwerk angeordnet werden kann, wurde entgegen der Konvention eine Tragwerksnummerierung aus Sicht der Last vorgenommen. Dies bedeutet, dass Glasbauteile im weiteren

Verlauf als „Tragwerk der ersten Ebene“, Anpressprofile als „Tragwerk der zweiten Ebene“, stets anzuordnende Stahlträger als „Tragwerk der dritten Ebene“ und die zur Unterstützung optional anzuordnenden stählernen Träger als „Tragwerk der vierten Ebene“ bezeichnet werden (Tabelle 15, Abbildung 36).

Bauteile	Konventionelle Bezeichnungen	Verwendete Bezeichnungen
Glasbauteile	Quartärtragwerk	Tragwerk der ersten Ebene
Pressleisten	Tertiärtragwerk	Tragwerk der zweiten Ebene
unterstützte Stahlträger	Sekundärtragwerk	Tragwerk der dritten Ebene
unterstützende Stahlträger	Primärtragwerk	Tragwerk der vierten Ebene

Tabelle 15: Konventionelle und verwendete Bezeichnungen der Tragwerkselemente

Bezeichnung der Tragwerkselemente

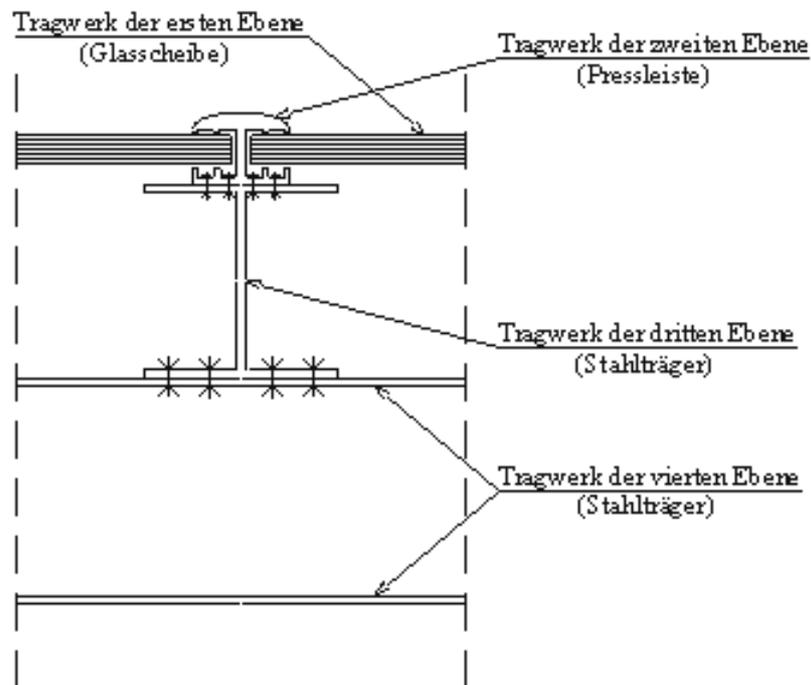


Abbildung 36: Bezeichnung der Tragwerkselemente aus Sicht der Last

5.4 User-Manual und Formelapparat

Als Softwarevoraussetzung ist eine Microsoft Excel-Version XP oder jünger anzuführen. Die Hardwarevoraussetzungen werden über die Softwarevoraussetzungen impliziert.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit erscheint eine blätterspezifische Erläuterung hilfreich.

Ø Das Arbeitsblatt „Klassifizierung“:

Als ersten Eingabewert benötigt das Programm die Neigung der Tragkonstruktion gegen die Horizontale. Abhängig davon werden die nachfolgenden Input-Bereiche variiert.

Gesetzt den Fall, es handelt sich um eine horizontale Konstruktion, wird der User im nächsten Schritt um die Eingabe von Länge und Breite der Tragkonstruktion gebeten. Bereits zu diesem Zeitpunkt wird festgelegt, dass das Tragwerk der dritten Ebene, welches aus parallel verlaufenden Stahlträgern beliebiger Querschnittsform besteht, normal zur längeren Kante verlaufen wird. So kann eine Tragwirkung über die kurze Seite erzielt werden (Abbildung 37).

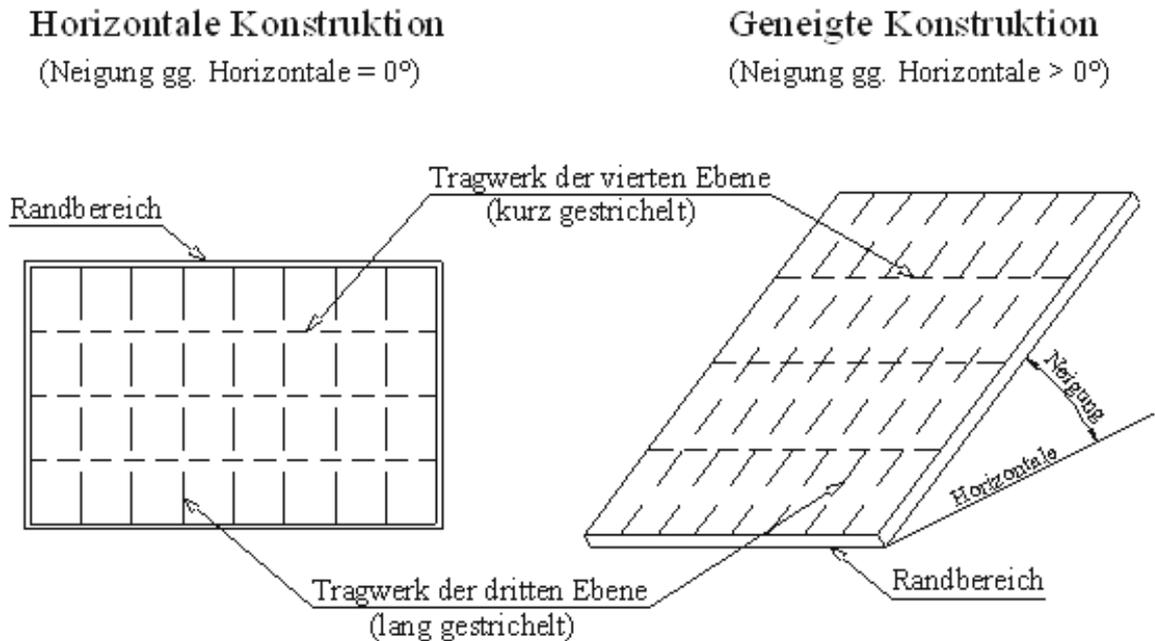


Abbildung 37: Lage der Tragwerksteile für den horizontalen (links) und den geneigten Fall (rechts)

Anders ist dies bei geneigten Konstruktionen. In diesem Fall wird der Anwender aufgefordert die Höhe der Konstruktionsober- als auch der Konstruktionsunterkante über der Geländeoberkante in Metern einzugeben. Das hat den Sinn Missverständnissen bei Eingabe von Länge beziehungsweise projizierter Länge bei geneigten Konstruktionen vorzubeugen. Das Programm berechnet dann selbstständig über Winkelfunktionen die Länge der geneigten Kante und ordnet zeitgleich ein Tragwerk der dritten Ebene aus nebeneinander laufenden, stählernen Trägern parallel zur geneigten Kante an (Abbildung 37).

Der Grund dafür liegt im Faktum, dass geneigte Ebenen mit horizontal verlaufenden Trägern zwangsläufig zu geneigten Querschnittsachsen führen, damit Torsionsbeanspruchungen und, wegen der oberhalb des Trägers angreifenden Kräfte, zusätzlich abtreibende Torsionsmomente initiiert werden (Abbildung 38).

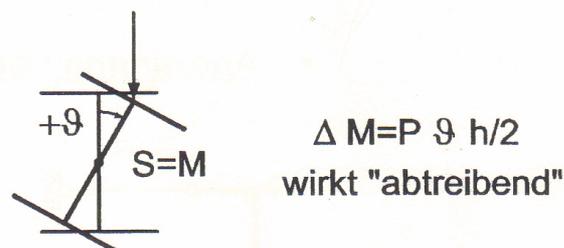


Abbildung 38: Abtreibendes Moment bei Angriffspunkt der Querlast an der oberen Querschnittskante (Fink, Bl. 5.4/73, [7])

Da es im Programm nicht möglich war alle Beanspruchungen zu berücksichtigen und abgesehen davon ein Nachweis für Torsion die Annahme eines bestimmten Querschnitts erfordert hätte, wurde auf diesem Wege versucht die Beanspruchung aus exzentrischem Lastangriff im Vorhinein auszuschalten. Zwar werden Lasten im Lauf der Bemessung stets normal auf die Tragkonstruktion umgerechnet, gelingt es aber dadurch dennoch einen großen Unsicherheitsfaktor zu eliminieren.

Im nächsten Punkt wird der Anwender zur Angabe eines gewünschten Achsabstandes der Tragwerkselemente der dritten Ebene aufgefordert. Die Bedingung, dass die Tragwerkslänge respektive bei geneigten Konstruktionen die Länge der horizontalen Kante ein Vielfaches des Achsabstandes sein muss, um regelmäßige Abstände zu gewährleisten, ist im Programm eingearbeitet. Der User wird bei Nichterfüllung dieser Bedingung durch einen Fehler-Output aufmerksam gemacht und zur Variation des Achsabstandes aufgefordert.

„Das aus dem Floatglas weiterverarbeitete Einscheibensicherheitsglas ESG und das teilvorgespannte Glas TVG ist im Allgemeinen mit maximalen Bandmaßen von 2.44 / 4.5 m und 1.67 / 6.4 m verfügbar.“ (Ofner, S. 2, /17/) Weiters schreibt Ofner: „TVG wird wegen der schwierigeren Herstellungsbedingungen nur von zertifizierten Herstellern angeboten und ist im Allgemeinen nur bis zu einer Dicke von 12 mm lieferbar.“ (Ofner, S. 5, /17/).

Aufgrund der Tatsache, dass im beschriebenen Bemessungsprogramm nur Verbundsicherheitsglas aus Einscheibensicherheitsglas oder teilvorgespanntem Glas respektive für Isolierverglasungen Kombinationen aus den beiden Verbundsicherheitsgläsern angewendet werden können, resultieren die größtmöglichen Scheibenabmessungen als Minimalwerte aller verfügbaren Abmessungen zu 1,67 Metern mal 4,5 Metern mit einer maximalen Einzelscheibendicke von 12 Millimetern.

Mit der Annahme eines Glasplattenabstandes von 25 Millimetern (Abbildung 39) ergibt sich unter einem Achsabstand der Elemente des Tragwerks der dritten Ebene von kleiner, gleich 1695 Millimetern (= 1670mm + 25mm) im Programm eine maximale Glastafelhöhe von 4500 Millimetern. Umgekehrt resultiert ein größerer Achsabstand als 1695 Millimetern in einer größtmöglichen Glastafelhöhe von 1670 Millimetern. Der maximale Achsabstand des Tragwerks der dritten Ebene ist aber in jedem Fall mit 4525 Millimetern begrenzt. Gemäß ÖNORM EN 572-8 gilt außerdem für das Ausgangsprodukt Floatglas: „Die kleinste Abmessung H und B von Festmaßen darf nicht kleiner als 100 mm und die Oberfläche nicht kleiner als $0,05 \text{ m}^2$ sein.“ (ÖNORM EN 572-8, S. 8, [45]). All das wird vom Programm berücksichtigt und dem Anwender bei der Eingabe der gewünschten Glasplattenhöhe als Bedingung auferlegt.

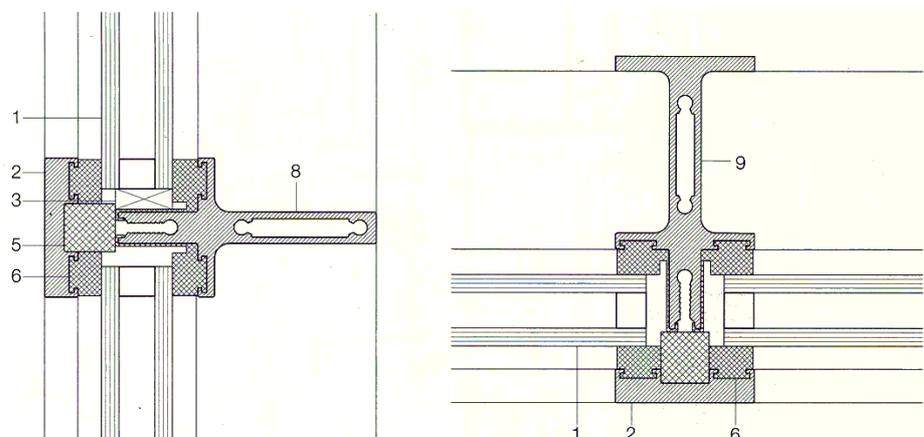


Abbildung 39: Aluminiumdruckleiste mit Wärmedämmung, mit Riegel (links) und Pfosten (rechts) im Maßstab 1: 2,5 [1 Isolierglas, 2 Druckprofil, 3 Verklötzung, 5 Dämmprofil, 6 Dichtung, 8 Riegelprofil, 9 Pfostenprofil] (Schittich, S. 155, [23])

Abhängig von der Neigung der Konstruktion wird nun gemäß ÖNORM B 3716-2 eine Einteilung in Horizontal- und Vertikalverglasung getroffen. Horizontalverglasungen sind Verglasungen, die durch einen Neigungswinkel größer 15° gegen die Vertikale gekennzeichnet sind. Ist der Winkel kleiner, gleich 15° so handelt es sich um eine Vertikalverglasung, sofern nicht „[...] geneigte Fassaden ein zusätzliches Risiko für darunter liegende Verkehrsbereiche darstellen und eine Belastung durch Schneeanhäufung möglich ist (zB Shed-Verglasungen)“ (ÖNORM B 3716-2, S. 4, [39]). Auch diese Bedingung wird über einen zusätzlichen Input-Bereich berücksichtigt und in die laufende Berechnung eingearbeitet.

Nun wird vom MS Excel-Programm die anzuwendende Verglasungsart für Horizontalverglasungen zu Verbund-Sicherheitsglas - welches „aus mindestens zwei, in bestimmten Anwendungsfällen aus bis zu zehn miteinander verklebten Einzelscheiben“ (Bucak, S. 531, [4]) bestehen kann - aus teilvorgespanntem Glas und für Vertikalverglasungen zu Verbund-Sicherheitsglas aus Einscheibensicherheitsglas festgelegt (Tabelle 16).

Verglasungsart	vom Programm zugewiesener Aufbau
Horizontalverglasung	Verbundsicherheitsglas VSG aus teilvorgespanntem Glas TVG
Vertikalverglasung	Verbundsicherheitsglas VSG aus Einscheibensicherheitsglas ESG

Tabelle 16: Verglasungsarten und ihr zugewiesener Aufbau

Begründet wird dies dadurch, dass bei Horizontal- oder Überkopfverglasungen (definieren sich entsprechend /4/ als Verglasungen, die größer 10° gegen die Vertikale geneigt sind) „[...] neben der Aufnahme der statischen Belastung eine ausreichende Resttragfähigkeit nach einem Glasbruch und gegebenenfalls eine Stoßsicherheit gegenüber harten Stößen (z.B. Hagelschlag oder herabfallende Gegenstände z.B. bei einer Innenhofüberdachung)“ (Ofner, S. 17, /17/) gewährleistet sein muss. „Für den Überkopfbereich wird daher eine passive Absturzsicherung gefordert. Dafür kann VSG aus Floatglas oder VSG aus TVG verwendet werden.“ (Ofner, S. 17, /17/).

Vertikalverglasungen werden als Pendant zu Horizontalverglasungen gemäß /4/, den „Technischen Regeln für Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen“, als Verglasungen mit Neigungen kleiner, gleich 10° gegen die Vertikale definiert.

Um eine einheitliche Berechnung zu ermöglichen, wurde Vertikalverglasungen der bereits angegebene Aufbau aus Verbund-Sicherheitsglas aus Einscheibensicherheitsglas zugewiesen. Dies gewährleistet sowohl die Vorteile eines Einscheibensicherheitsglases, also „sicheres Bruchverhalten und eine wesentlich erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen mechanische und thermische Spannungen“ (Siebert, S. 57, [29]) als auch jene eines Verbund-Sicherheitsglases, „bei dem im Falle eines Bruches die Zwischenschicht dazu dient, Glasbruchstücke zurückzuhalten, die Öffnungsgröße zu begrenzen, eine Restfestigkeit zu bieten und das Risiko von Schnitt- und Stichverletzungen zu verringern“ (Siebert, S. 66, [29]).

Ausgegeben werden schlussendlich die Abmessungen der Glastafeln, die Art der Verglasung und, ob die Bemessung als Horizontal- oder Vertikalverglasung erfolgt.

Ø Das Arbeitsblatt „LA Wind“:

Im Rahmen der Lastaufstellung Wind können nur statische Beanspruchungen gemäß ÖNORM B 4014-1 berücksichtigt werden. Eine Nachweisführung für dynamische Windeinwirkungen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Abgesehen davon sind Windbeanspruchungen, mit Ausnahme von Klimalasten für Isolierverglasungen, die einzigen Einwirkungen, die stets als normal – im Sinne einer Normalbelastung gemäß ÖNORM B 4014-1 - auf die Tragkonstruktion wirkend angenommen werden, und so keine neigungswinkelabhängige Abminderung erfahren.

Als Voraussetzung der ordnungsgemäßen Anwendung des MS Excel-Programms ist unbedingt folgendes zu berücksichtigen: Die Ermittlung der statischen Windlast erfolgt gemäß ÖNORM B 4014-1 Punkt 4.3, der vereinfachten Ermittlung der Beiwerte für Baukörper mit ebenen Oberflächen. Als Grundvoraussetzung gilt demnach, dass die Stahl-Glas-Konstruktion Teil eines geschlossenen Gebäudes mit ebenen Oberflächen ist. Da aber die allgemein gültige Windlastermittlung für frei stehende Wände den Umfang dieser Arbeit überstiegen hätte, musste das vereinfachte Verfahren auch hierfür angewendet werden.

Weiters werden bei der Ermittlung der Differenzdruckbeiwerte für Wände nur allgemeine Wandflächen berücksichtigt und örtliche Effekte gemäß ÖNORM B 4014-1 Tabelle 16 vernachlässigt. Handelt es sich bei den erforderlichen Werten um Differenzdruckbeiwerte für Dächer, so können wiederum nur allgemeine Dachflächen berechnet werden. Örtliche Effekte sowie Dachkantenbereiche finden hierbei keinen Eingang.

Als ersten Eingabewert bei der Lastaufstellung für Wind wird der Anwender gebeten anzugeben, ob die Konstruktion überhaupt durch Windlasten beansprucht werden kann. Ist dem nicht so, so resultieren die Zwischenergebnisse charakteristischer Winddruck D_k und charakteristischer Windsog S_k zu Null und es kann mit der Lastaufstellung für Schnee begonnen werden.

Im Fall einer möglichen Windbeanspruchung wird der User aufgefordert den Typ (Wand oder Dach) der Stahl-Glas-Konstruktion anzugeben.

Handelt es sich um eine Wand oder den Teil einer Wandkonstruktion, ergeben sich die Differenzdruckbeiwerte gemäß Tabelle 16 der ÖNORM B 4014-1 für Druck- zu 1,1 und für Sogbeanspruchung zu -0,9.

Gesetzt den Fall, es soll eine Dachkonstruktion oder ein Teil einer Dachkonstruktion bemessen werden, so müssen die hierfür erforderlichen Differenzdruckbeiwerte abhängig vom Neigungswinkel der Konstruktion gemäß Tabelle 17 der ÖNORM B 4014-1 ermittelt werden.

Für die Berechnung des Staudrucks dienen die Input-Bereiche 3) bis 5).

„Übersteigt die Seehöhe des Standortes die in der Tabelle 1 beim geographisch nächstgelegenen Ort angegebene Seehöhe um nicht mehr als 250m, ist der Tabelle 2 der Staudruck q in Abhängigkeit vom Grundwert v_{10} aus dem Ortsverzeichnis, von der Höhe h über dem Boden und von der Geländeform des unmittelbar umgebenden Geländes (Tabelle 3) zu entnehmen. [...] Liegt die Seehöhe des Standortes mehr als 250m über jener des in der Tabelle 1 angegebenen nächstliegenden Ortes, so sind die Staudrücke nach Tabelle 5 anzunehmen, falls nicht ein diesbezügliches Windgutachten (z.B. von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien) vorliegt.“ (ÖNORM B 4014-1, S. 3, [42]).

Ist also die Differenz zwischen eingegebener Seehöhe des Bauwerkstandorts und der eingegebenen Seehöhe des Bemessungsstandorts (nächstgelegener, angegebener Ort) gemäß ÖNORM B 4014-1 Tabelle 1 kleiner, gleich 250 Meter, so fordert der variable Input-Bereich 5) zur Ermittlung des Staudruckwerts q in $[\text{kN}/\text{m}^2]$ gemäß Tabelle 2 der ÖNORM B 4014-1 auf. Übersteigt jedoch die Differenz die angeführten 250 Meter, so variiert Input-Bereich 5) und es wird um die Eingabe des Staudruckwerts gemäß Tabelle 5 der ÖNORM B 4014-1 gebeten, sofern nicht ein Windgutachten für den Bauwerksstandort vorliegt.

Gemäß Formel (7) der ÖNORM B4014-1

$$w_n = c_{pn} * q \quad (34)$$

wird anschließend der charakteristische Winddruck sowie der charakteristische Windsog ermittelt und mit den Bezeichnungen D_k für Druck und S_k für Sog als Zwischenergebnis ausgeworfen.

Bei der Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsfaktoren zur Ermittlung der Bemessungsflächenlast werden Winddruck und Windsog stets addiert und als eine stets gemeinsam wirkende, veränderliche Einwirkung betrachtet.

Ø Das Arbeitsblatt „LA Schnee“:

Im Abschnitt Lastaufstellung Schnee ist zu beachten, dass örtliche Effekte, wie Verwehungen an Wänden und Aufbauten oder Schneeüberhang an Dachtraufen gemäß ÖNORM B 1991-1-3 Punkt 4.6 nicht berücksichtigt werden können. Handelt es sich also gemäß Input-Bereich 2) der Lastaufstellung Wind um eine Wand oder einen Teil einer Wandkonstruktion, so resultiert die charakteristische Schneelast zu Null.

Der primäre Input-Bereich in diesem Arbeitsblatt dient der Erörterung, ob die zu berechnende Tragkonstruktion durch Schneeeinwirkungen belastet oder dies im Vorhinein ausgeschlossen werden kann. In letzterem Fall ergibt sich die mit E_k bezeichnete charakteristische Schneelast zu Null und es kann mit der Lastaufstellung für klimatische Beanspruchung fort gefahren werden.

Im Fall einer möglichen Schneebelastung wird der Anwender um die Eingabe der Zonen-Nummer des Bauwerkstandorts gemäß ÖNORM B 1991-1-3 Anhang B gebeten. Hierbei ist folgendes zu beachten: „In unmittelbarer Nähe von Zonengrenzen (d.h. bis zu 5km im Allgemeinen, für Wien: 250m beiderseits der Zonengrenzen) ergibt sich der charakteristische Wert s_k der Schneelast als arithmetisches Mittel der Werte der beiden benachbarten Zonen. Im Zweifelsfall ist der höhere Wert maßgebend.“ (ÖNORM B 1991-1-3, S. 11, [34]). Außerdem muss berücksichtigt werden, dass in aufsteigender Reihenfolge die Zonen 2*, 2, 3 und 4 Zonen höherer Schneebelastung beschreiben. Abhängig von der eingegebenen Zonen-Nummer wird dann der zugehörige Rechenwert Z für Gleichung (B.1) der ÖNORM B 1991-1-3 gemäß Tabelle B.1 der ÖNORM B 1991-1-3 festgelegt. Entsprechend Tabelle B.1 der ÖNORM B 1991-1-3 resultiert so der Rechenwert Z für Zone 2* zu 1,6, für Zone 2 zu 2, für Zone 3 zu 3 und für Zone 4 zu 4,5.

Mit Formel (B.1) der ÖNORM B 1991-1-3

$$s_k = (0,642 * Z + 0,009) * [1 + (A / 728)^2] \quad (35)$$

ergibt sich dann die im grau hinterlegten Berechnungs-Bereich mit der Variablen s_k gekennzeichnete charakteristische Schneelast auf dem Boden in [kN/m²]. Der Eingangswert A beschreibt die Geländehöhe des Bauwerkstandorts in Metern über Adria und wird Input-Bereich 3) der Lastaufstellung für Windbeanspruchung entnommen.

Im nächsten Schritt wird der Anwender um die Eingabe der Formbeiwerte für die zu berechnende Dachkonstruktion gemäß ÖNORM B 1991-1-3 Punkt 4.5.2 beziehungsweise gemäß ÖNORM B 1991-1-3 Anhang C gebeten. Die Formkoeffizienten hängen „von der Dachform, Schneeverfrachtung durch Wind, Dachneigung u. dgl. ab.“ (Fornather, S. 5, /8/). Der größere Wert μ_i der eingegebenen Formbeiwerte dient dann als Eingangswert für die nachstehende Formel zur Berechnung der Schneelast der Dachkonstruktion, die im Berechnungs-Bereich mit s bezeichnet wird:

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k \quad (36)$$

(Fornather, S. 6, /8/). „Die Koeffizienten C_e und C_t wurden in der ÖNORM B 1991-1-3 auf Grund der Unsicherheiten bei der Beurteilung der angrenzenden Geländebebauung bzw. der Änderung der Vegetation sowie der Gebäudeklimatisierung auf 1,0 festgelegt.“ (Fornather, S. 6, /8/).

Da im Bemessungsprogramm nur Plattenbeanspruchungen berücksichtigt werden können, wird nun noch die vertikal wirkende, schräg verlaufende Flächenlast folgendermaßen in eine normal auf die Tragkonstruktion wirkende Last umgerechnet:

$$g_{\perp} = g * \cos \alpha \quad (37)$$

(Schneider, S. 4.14, [25]). Als Zwischenergebnis wird dann die mit E_k bezeichnete charakteristische Schneelast normal auf die Tragkonstruktion wirkend ausgegeben.

Ø Das Arbeitsblatt „LA Klima“:

Bei der Lastaufstellung Klima ist von wesentlicher Bedeutung, dass die Verwendung von Isolierglasscheiben stets folgenden Aufbau inkludiert: Analog zum Arbeitsblatt „Klassifizierung“ wird für die äußere Scheibe Verbund-Sicherheitsglas angeordnet, welches aus zwei bis zehn Einscheibensicherheitsgläsern mit den Dicken gemäß Tabelle A.3 der ÖNORM B 3716-1 4, 6, 8 oder 10 Millimeter bestehen kann. Für n Einscheibensicherheitsgläser werden $(n-1)$ dazwischenliegende Polyvinylbutyral-Folien der Ausgangsdicke von 0,38 Millimeter angeordnet, „die mehrlagig bis zu einer Dicke von 2,28 mm laminiert werden können.“ (Wörner, S. 16, [31]). „Die Gesamtdicke der PVB-Folien (Polyvinylbutyral-Folie) für VSG muss mindestens 0,76 mm betragen.“ (ÖNORM B 3716-2, S. 5, [39]). Die Dicke des Scheibenzwischenraums kann gemäß Tabelle A.3 der ÖNORM B 3716-1 10, 12, 14 oder 16 Millimeter betragen. Für die innere Scheibe der Isolierverglasung wird stets Verbundsicherheitsglas aus teilvorgespanntem Glas angeordnet. Aus Gründen der Vereinfachung wird die Dicke der PVB-Folien sowie die Dicke und Anzahl der Einzelscheiben gleich jener der äußeren Scheibe vorgeschrieben. PVB-Folien werden im Laufe der Bemessungslastermittlung als gewichts- und dickenlos angenommen.

Im ersten Input-Bereich kann der Anwender optional zwischen isolierender und nicht isolierender Glastafel auswählen. Wird nicht isolierendes Glas angeordnet, so kann mit dem Arbeitsblatt „Bemessungslast“ fortgefahren werden. Sollte sich der User für eine Mehrscheiben-Isolierverglasung entscheiden, so wird in diesem Arbeitsblatt nicht nur die Lastaufstellung für Isolierverglasungen vorgenommen, sondern auch umgehend eine Bemessungslastermittlung für die innere als auch äußere Scheibe der Isolierverglasung durchgeführt.

„Da der Scheibenzwischenraum (SZR) von Mehrscheiben-Isolierglas ein gegenüber der umgebenden Atmosphäre abgeschlossenes gasgefülltes Volumen darstellt, müssen zusätzlich zu den üblichen Einwirkungen aus Eigengewicht, Wind und Schnee auch die sogenannten „Inneren Lasten“ oder „Klimabelastungen“ berücksichtigt werden.“ (Sedlacek, S. 161, [27]). Dieser Tatsache wird nach der Auswahl der Anzahl und Dicke der Einzelscheiben der Verbundsicherheitsgläser, der Dicke des Scheibenzwischenraums sowie der Dicke der PVB-Folien im Input-Bereich 5) Rechnung getragen.

Der Anwender wird abhängig davon, ob die klimatischen Einwirkungen oder Teile davon zur Berechnung des resultierenden isochoren Drucks bekannt sind, zur Eingabe dieser Werte aufgefordert respektive darüber informiert, dass bei Nicht-Eintrag der geforderten Werte die Rechenwerte für klimatische Einwirkungen gemäß Tabelle 2 der ÖNORM B 3716-1 herangezogen werden.

Im obigen Zitat unter üblichen Einwirkungen nicht angeführt ist die Nutzlast, die im „Falle einer geforderten Betretbarkeit (zB für Reinigung und Wartung) [...] gemäß ÖNORMEN B 1991-1-1 und EN 1991-1-1 für die Nutzlastkategorie H“ (ÖNORM B 3716-1, S. 5, [38]) zu ermitteln ist. Ihre Berechnung erfolgt im Arbeitsblatt „Bemessungslast“ und wird rückwirkend in die Lastaufstellung für Isolierverglasungen einbezogen.

Die Ermittlung des Eigengewichts erfolgt hierbei unter Zugrundelegung einer Dichte von 2500 [kg/m³] gemäß Tabelle 1 der ÖNORM EN 572-1 und wird analog zum Arbeitsblatt „La Schnee“ auf Basis einfacher Winkelfunktionen in eine parallel und eine normal zur Tragwerksebene wirkende Komponente zerlegt, wobei wiederum nur die normal wirkende Komponente berücksichtigt wird.

„Der isochore Druck p_0 im Scheibenzwischenraum (Druck bei gleich bleibendem Volumen) ergibt sich wie folgt aus den klimatischen Veränderungen:

$$p_0 = c_1 * \Delta T - \Delta p_{\text{met}} + c_2 * \Delta H \quad (26)$$

$$\text{mit } c_1 = 0,34 \text{ kPa/K} \quad (27)$$

$$\text{und } c_2 = 0,012 \text{ kPa/m} \quad (28)$$

(ÖNORM B 3716-1, S. 10, [38]).

Als weiterer Eingabewert wird vom User die zulässige Durchbiegung vom Isolierglashersteller gefordert. Stehen keine Angaben Verfügung, wird die Durchbiegungsbegrenzung gemäß Tabelle 3 der ÖNORM B 3716-1 vorgenommen und die maximal zulässige Durchbiegung ergibt sich dann als Minimalwert der gemäß ÖNORM B3716-1 größtmöglichen Durchbiegung und der Scheibendicke.

Die Scheibendicke als Grenzwert für die maximal zulässige Durchbiegung heranzuziehen resultiert daraus, dass für „dünne Platten mit kleinen Durchbiegungen [...] die Modellgleichungen stark vereinfacht werden“ (Altenbach, S. 13f, [1]) können. „Wegen der Kleinheit der Durchbiegungen sind die Gleichungen geometrisch linear, Scheiben- und Plattenaufgabe können getrennt gelöst werden. Für dieses Plattenmodell wird näherungsweise angenommen, daß die Dehnungen und die Gleitungen in Dickenrichtung so klein sind, daß sie vernachlässigt werden können. Das Plattenmodell ist somit in Dickenrichtung dehn- und schubstarr. Diese Annahmen haben zur Folge, daß eine Normale zur unverformten Plattenmittelfläche auch nach der Verformung Normale der Mittelfläche ist. Dieses Plattenmodell wird häufig als Kirchhoff-Modell bezeichnet.“ (Altenbach, S. 14, [1]).

„Erreichen die maximalen Durchbiegungen/Formänderungen (f_{max}) die Größenordnung der Plattenstärke (Dicke) oder übersteigen diese sogar (z.B. bei großen Plattenformaten), so werden die Spannungsverteilungen auf der Glasplattenoberfläche und damit die maximalen Hauptzugspannungen nach der nichtlinearen Plattentheorie (Berücksichtigung der Membrankräfte) mit Hilfe von Finite-Element-Rechnungen ermittelt“ (Schneider, S. 111f, [26]), und dies würde wiederum den Umfang dieser Arbeit übersteigen. Aus Gründen der Vereinfachung werden im Programm Durchbiegungen, sofern sie kleiner als alle anderen maximal zulässigen Durchbiegungen sind, in der Größenordnung der Plattenstärke zugelassen. Die schlussendlich maximal zulässige Durchbiegung findet allerdings erst im Arbeitsblatt „Nachweisführung“ wieder Eingang.

„Das tatsächliche Tragverhalten einer Verbundscheibe wird durch die Verbundwirkung der Folie entscheidend mitbestimmt. [...] Das Tragverhalten von Verbundglas liegt zwischen dem bei „starrem“ Verbund und dem ohne Verbund.“ (Bucak, S. 533, [4]) (Abbildung 40).

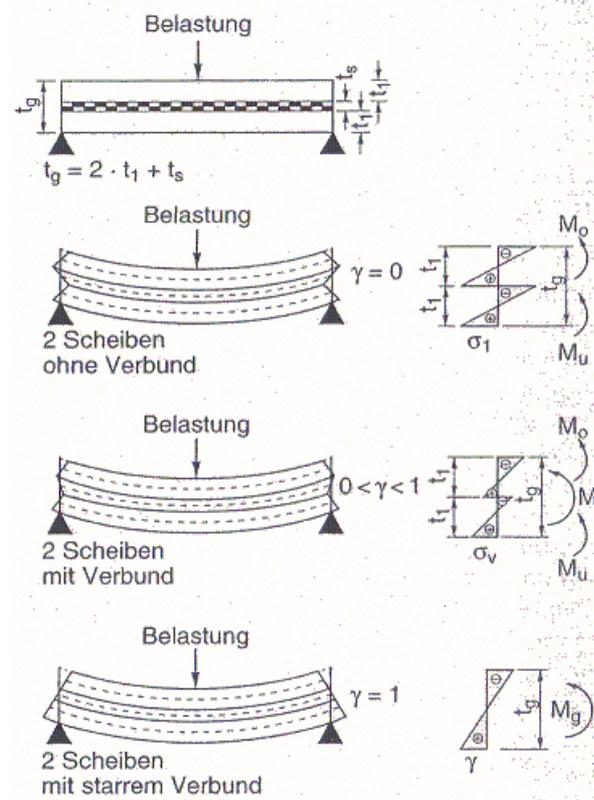


Abbildung 40: Verbundverhalten von zwei Scheiben bei unterschiedlicher Verbundsteifigkeit (Bucak, S. 533, [4])

„Je nach Temperaturbereich und Belastungsdauer herrscht bei VSG oder VG ein mehr oder weniger guter Schubverbund zwischen den Scheiben, da PVB-Folien (thermoplastische Stoffe) und reaktionsfähige Harze ein ausgeprägtes Kriechverhalten aufweisen. [...] Bei Kurzzeitbelastungen (z.B. Windlasten) und Temperaturen unter 50°C besteht eine nahezu vollständige Verbundwirkung. [...] Für Langzeitlasten (z.B. Schneelasten) herrscht bei niedrigen Temperaturen (um den Gefrierpunkt) ein sehr hoher Schubverbund, bei Raumtemperaturen teilweise Schubverbund, aber bei hohen Temperaturen ab etwa 50°C nahezu kein Schubverbund mehr. [...] Nach den zur Zeit üblichen Bemessungsvorgaben (z.B. TRLV) darf bei der Bemessung für Lasteinwirkung kein Schubverbund angesetzt werden. Jedoch ist bei Isoliergläsern zusätzlich der Grenzzustand des vollen Schubverbunds zu berücksichtigen. [...] Bei vollem Schubverbund verhalten sich die beiden Scheiben des VSG wie ein monolithischer Aufbau. Die Biegespannungen und Verformungen der Scheibe können unter Ansatz der gesamten Querschnittshöhe ermittelt werden [...]. Ohne Schubverbund verteilt sich die Belastung auf die beiden Einzelscheiben entsprechend dem Verhältnis der einzelnen Biegesteifigkeiten zur gesamten Biegesteifigkeit [...]. Beide Scheiben verformen sich hierbei gleich. Die Verformungen der VSG-Scheibe ohne Verbund können mit einer ideellen Ersatzdicke d^* wie folgt ermittelt werden.“ (Wörner, S. 153ff, [31]).

$$d^* = (d_1^3 + d_2^3 + \dots)^{1/3} \quad (1)$$

(ÖNORM B 3716-1, S. 10, [38]). „Die Biegespannungen der Scheibe sind mit dem jeweiligen Belastungsanteil unter Ansatz des Widerstandsmoments der Einzelscheibe zu ermitteln.“ (Wörner, S. 156, [31]). Dies findet im Bemessungsprogramm im Arbeitsblatt „Nachweisführung“ Eingang, zunächst aber erfolgt die Verteilung der Einwirkungen gemäß Tabelle A.2 der ÖNORM B 3716-1. Die dafür benötigten Eingangswerte werden im Berechnungs-Bereich für die Fälle „voller Verbund“ (mit der gesamten Querschnittshöhe) und „ohne Verbund“ (unter Verwendung der ideellen Ersatzdicke d^*) berechnet.

Das MS Excel-Programm vollzieht hierfür folgende Operationsschritte:

Zuerst werden entsprechend der Formeln (A.1) und (A.2) des Anhangs A der ÖNORM B3716-1 die Anteile δ_a und δ_i an der Gesamtbiegesteifigkeit ermittelt:

$$\delta_a = d_a^3 / (d_a^3 + d_i^3) \quad (22)$$

$$\delta_i = d_i^3 / (d_a^3 + d_i^3) = 1 - \delta_a \quad (23)$$

Unter Berücksichtigung der bereits genannten Voraussetzungen ergibt sich im Bemessungsprogramm stets eine prozentuelle Aufteilung von 50 zu 50 Prozent, da der Aufbau der inneren Scheibe (Anzahl und Dicke der einzelnen VSG-Elemente) stets dem Aufbau der äußeren Scheibe entspricht.

Im zweiten Schritt erfolgt die Berechnung des Beiwerts B_V , welcher zur Ermittlung der charakteristischen Kantenlänge a^* erforderlich ist, gemäß Tabelle A.1 der ÖNORM B 3716-1. Das Auslesen der Tabellenwerte in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis a (kleinere Kantenlänge) zu b (größere Kantenlänge) beziehungsweise lineare Interpolation für Zwischenwerte erfolgt automatisch und kann im grau hinterlegten Berechnungs-Bereich nachvollzogen werden.

Die charakteristische Kantenlänge a^* ergibt sich gemäß Formel (A.3) der ÖNORM B 3716-1 zu:

$$a^* = 28,9 * [(d_{SZR} * d_a^3 * d_i^3) / ((d_a^3 + d_i^3) * B_V)]^{(1/4)} \quad (24)$$

und der Faktor φ resultiert aus Formel (A.4) der ÖNORM B 3716-1 zu:

$$\varphi = 1 / [1 + (a / a^*)^4] \quad (25)$$

Wie bereits angeführt, wird nun nach Berechnung aller erforderlichen Parameter die Verteilung der Einwirkungen auf die äußere und innere VSG-Scheibe vollzogen und im Ergebnis-Bereich verbundwirkungsabhängig dargestellt. Ein weiteres Ergebnis stellt die Dicke des geplanten Scheibenaufbaus dar.

Die verwendeten Sicherheitsfaktoren werden im Arbeitsblatt „Bemessungslast“ erläutert. Aus Gründen der Vereinfachung wird für die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit dieselbe Bemessungsflächenlast verwendet.

Ø Das Arbeitsblatt „Bemessungslast“:

Dieses Arbeitsblatt fungiert primär als Zusammenstellung der bisher ermittelten Zwischenergebnisse, allerdings erfolgt an dieser Stelle auch die Auswahl des Aufbaus für nicht isolierende Gläser sowie die Behandlung der Nutzlast.

Input-Bereich 1) dient der Ermittlung, ob die Konstruktion für Instandhaltungsarbeiten betretbar sein soll oder nicht. Wird keine Betretbarkeit für Reinigungs- und Wartungsarbeiten gefordert, ergibt sich die Nutzlast zu Null und es kann mit Input-Bereich 2) bis 4) fort gefahren werden.

Gesetzt den Fall einer geforderten Betretbarkeit ergibt sich gemäß Tabelle 5 der ÖNORM B 1991-1-1 für die Nutzungskategorie H eine anzusetzende Flächenlast $q_k = 1,0$ [kN/m²] sowie eine anzusetzende Einzellast $Q_k = 1,5$ [kN], die „[...] auf einer Fläche von 100 mm x 100 mm an ungünstigster Stelle anzusetzen“ (ÖNORM B 3716-1, S. 5, [38]) ist. Da aber das Bemessungsprogramm auf der Basis von gleichmäßigen Flächenlasten arbeitet und in den verwendeten Lehrbüchern die Spannungen und Durchbiegungen aus der sogenannten Mannlast stets über FE-Programme ermittelt werden (siehe dazu: Sedlacek, S. 156, [27]), wurde dieser

Unstimmigkeit mit einer zusätzlichen Bemessungsflächenlast von $0,5 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ begegnet. Im Falle einer geforderten Betretbarkeit resultiert die anzusetzende Flächenlast also zu $1,0 \text{ [kN/m}^2\text{]} + 0,5 \text{ [kN/m}^2\text{]} = 1,5 \text{ [kN/m}^2\text{]}$, woraus wiederum analog zu Arbeitsblatt „LA Schnee“ über einfache Winkelfunktionen die normal auf die Glastafeln wirkende Komponente herausgerechnet werden kann.

Die Input-Bereiche 2) bis 4) dienen der Eingabe des gewünschten Glasaufbaus.

Im Input-Bereich 2) kann der User zwischen zwei bis zehn Scheiben Einscheibensicherheitsglas beziehungsweise teilvorgespanntem Glas, aus welchen sich die VSG-Scheibe zusammensetzen wird, wählen.

Input-Bereich 3) dient der Eingabe der Dicke dieser Elemente, die abhängig vom Ausgangsprodukt Floatglas entsprechend Tabelle 1 der ÖNORM EN 572-2 in folgenden Dicken lieferbar sind: 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19 oder 25 mm. Gemäß ÖNORM B 3716-1 Punkt 10.1 gilt aber: „Die Mindest-Nennstärke bei Anwendung dieser ÖNORM beträgt 4 mm und bei VSG 6 mm (2 x 3 mm).“ (ÖNORM B 3716-1, S. 8, [38]), woraus folgt, dass die Dicke von 2 Millimetern im Bemessungsprogramm keine wählbare Option darstellt. Im Arbeitsblatt „Klassifizierung“ wurde außerdem bereits erklärt, dass die maximal auswählbare Dicke mit 12 Millimetern begrenzt wird. Somit können die wählbaren Dicken mit 3, 4, 5, 6, 8, 10 oder 12 mm angegeben werden.

Im Input-Bereich 4) wird vom User die anzusetzende PVB-Foliendicke ausgewählt. Die Bedingungen hierbei gelten analog zum Arbeitsblatt „LA Klima“.

Betreffend der Aufstellung der Eigenlasten wird abermals entsprechend Arbeitsblatt „LA Klima“ vorgegangen: PVB-Folien gelten als gewichtslos, den Glaskonstruktionen wird eine Dichte von $2500 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ zugewiesen und es werden wiederum nur Plattenbeanspruchungen berücksichtigt, die über Winkelfunktionen errechnet werden.

In den beiden Ergebnis-Bereichen werden zum einen die Dicke des geplanten Scheibenaufbaus und zum anderen die resultierende Bemessungsflächenlast ermittelt, die sich gemäß ÖNORM ENV 1991-1 für eine veränderliche Einwirkung sinngemäß zu

$$S_d = \Sigma (1,35 * G_{Gj}) + 1,5 * Q_{ki}, \text{ mit } j \geq 1 \text{ und } i = 1 \quad (9)$$

und für mehrere veränderliche Einwirkungen zu

$$S_d = \Sigma (1,35 * G_{Gj}) + 1,35 * \Sigma (Q_{ki}), \text{ mit } j \geq 1 \text{ und } i \geq 1 \quad (10)$$

ergibt. Die Variable G steht hier für ständige und Q für veränderliche Einwirkungen.

Weiters ist noch anzuführen, dass bei Mehrscheiben-Isoliergläsern stets von mehr als einer veränderlichen Einwirkung ausgegangen wird. Die Berücksichtigung des resultierenden isochoren Drucks und der Ansatz zumindest einer weiteren veränderlichen Einwirkung (Wind-, Schnee- oder Nutzlast) werden hierfür als Begründung angegeben.

Ø Das Arbeitsblatt „Nachweisführung“:

Das beschriebene Arbeitsblatt versteht sich als Berechnungs- und Ergebnis-Bereich. Eingangs werden die Grundlagen der Nachweisführung erläutert. Sie beinhalten die grundsätzlichen Vorgaben zur Berechnung der Grenzfälle „voller Verbund“ und „ohne Verbund“ für den Nachweis der Tragfähigkeit sowie der Gebrauchstauglichkeit, die zulässigen charakteristischen Festigkeitswerte gemäß Tabelle 4 abgemindert durch die Teilsicherheitsbeiwerte gemäß Tabelle 7 der ÖNORM B 3716-1 sowie die zulässigen Durchbiegungen gemäß Tabelle 3 der selben Norm. Des Weiteren wird

die zulässige Durchbiegung, wie im Arbeitsblatt „LA Klima“ näher erklärt wurde, mit der Plattendicke beschränkt. Die Überprüfung dieser Bedingung erfolgt aus Gründen der Vereinfachung allerdings erst nach der Berechnung der tatsächlich zu erwartenden maximalen Deformation. Der Elastizitätsmodul für die zu berechnenden Glasbauteile wird dabei gemäß ÖNORM B 3716-1 Tabelle 1 für Kalk-Natron-Silicatglas mit $70.000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ festgelegt.

Auch wenn im Abschnitt „LA Klima“ bereits erläutert wurde, dass für nicht isolierende Scheiben der Grenzfall „ohne Verbund“ maßgebend ist, wird dennoch die Berechnung unter „vollem Verbund“ in das MS Excel-Programm aufgenommen, da „bei speziellen Kombinationen von Geometrie und Beanspruchung der Grenzfall „zwei lose Platten“ eine höhere Tragfähigkeit aufweist als die „monolithische Platte“ mit einer Dicke entsprechend der Summe der Einzeldicken“ (Siebert, S. 80, [29]).

Wie bereits angeführt, erfolgen unter Annahme des vollen Schubverbunds die Nachweise der Tragfähigkeit respektive Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung der gesamten Querschnittshöhe und unter Ansatz der vollen Bemessungsflächenlast. Im Grenzfall ohne Berücksichtigung der Verbundwirkung basiert die Nachweisführung der Tragfähigkeit auf der Verteilung der Lasten auf die Einzelscheiben entsprechend der Verteilung der Biegesteifigkeiten. Da sich aber der Glasaufbau stets aus n gleich dicken Scheibenelementen zusammensetzt, wird im ULS (Ultimate Limit State) der Nachweis an einer Einzelscheibe unter Ansatz eines n -tel der im Grenzfall „ohne Verbund“ wirkenden Bemessungsflächenlast vollzogen. Im SLS (Serviceability Limit State) erfolgt der Nachweis an der Ersatzdicke d^* unter Ansatz der entsprechenden Bemessungsflächenlast. Bezüglich der PVB-Folien wird abermals weder Gewicht noch Dicke berücksichtigt.

Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn vorhandene Spannungen und vorhandene Verschiebungsgrößen ihre festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten.

Die Berechnung der Ist-Werte erfolgt auf Basis der „Bach’schen Plattenformel“. In „Glas im konstruktiven Ingenieurbau“ (Bucak, S. 545ff, [4]) wird sie zur Berechnung einer allseitig linienförmig gelagerten Platte verwendet, jedoch nicht näher erklärt. „Aquaserg“ zieht in „Сделайте аквариум своими руками“ (/1/) die Bach’sche Plattenformel zur „Calculation of glass thickness for panes subject to surface loading“ (Aquaserg, /1/) heran und verweist auf „([...] Dubbel, „Taschenbuch für den Maschinenbau, 13th edition, Part 1, Chapter IX/4, ebene Platten“)“ (Aquaserg, /1/), wo sich diese auch findet, aber nicht als „Bach’sche Plattenformel“ ausgewiesen wird. Abgesehen davon basiert der angeführte Formelapparat auf einer Querszahl von $\mu = 0,3$, scheint aber durch die Verwendung in „Glas im konstruktiven Ingenieurbau“ ([4]) verifiziert.

Die verwendete Formel lautet somit für die resultierende Durchbiegung in Plattenmitte

$$f = \psi p b^4 / E h^3 \quad (15)$$

(Meyer zur Capellen, S. 435, [19]) und zur Ermittlung der maximalen Spannung in Plattenmitte

$$\sigma_y = \varphi_y p b^2 / h^2 \quad (14)$$

(Meyer zur Capellen, S. 435, [19]), wobei die vom Plattenseitenverhältnis abhängigen Variablen ψ und φ_y Tafelwerte gemäß der angegebenen Zusammenstellung (Tabelle 9) sind.

Die Variable h beschreibt nachfolgend die Plattendicke und b repräsentiert die halbe Breite (Abbildung 18).

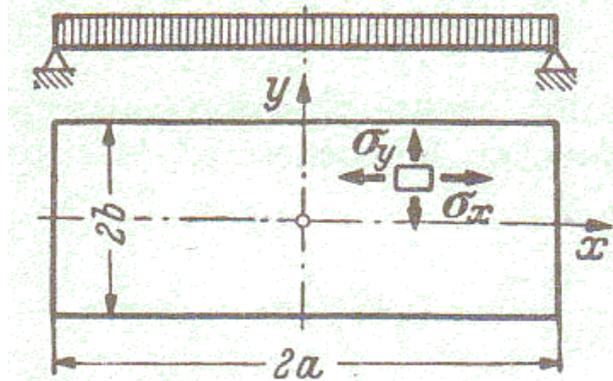


Abbildung 18: Frei aufliegende Platte (Meyer zur Capellen, S. 436, [19])

a/b	ψ	φ_x	φ_y	ξ
1,0	0,71	1,15	1,15	0,26
1,5	1,35	1,20	1,95	0,34
2,0	1,77	1,11	2,44	0,37
3,0	2,14	0,97	2,85	0,37
4,0	2,24	0,92	2,96	0,38
∞	2,28	0,90	3,00	0,38

 Tabelle 9: Tabellenwerte zur Anwendung der Bach'schen Plattenformel
(Meyer zur Capellen, S. 435, [19])

Aus Gründen der Sicherheit wurde auf eine lineare Interpolation verzichtet und das Auslesen der Werte aus Tabelle 5 erfolgt nun über den jeweils nächstgrößeren angegebenen Wert.

Ø Das Arbeitsblatt „Tragkonstruktion“:

Nun erfolgt die Berechnung des Tragwerks der dritten beziehungsweise vierten Ebene. Die Tragwerke setzen sich jeweils aus parallel verlaufenden Stahlträgern zusammen, für die als Berechnungsergebnis schlussendlich das erforderliche Flächenträgheitsmoment zweiten Grades angegeben wird, um dem Anwender bei der Querschnittsauswahl größtmögliche Freiheiten zu gewähren. Dieser große Spielraum geht allerdings auf Kosten von Querschnittsnachweisen und impliziert die Vernachlässigung des Eigengewichts der Stahlkonstruktion.

Zugrunde liegt der Bemessung ein Elastizitätsmodul für Stahl von $210.000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ beziehungsweise für nichtrostende Stähle (NiRo) ein Elastizitätsmodul von $200.000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$.

En gros stehen zwei differierende Konstruktionsmethoden zur Auswahl. Das Tragwerk der dritten Ebene kann als beidseitig gelenkig gelagert oder aber als auskragendes System bemessen werden, wenn die Konstruktion 90° gegen die Horizontale geneigt ist. Mit der Option der gelenkigen Lagerung wird versucht die Bemessung einfacher Elemente von Hochbauten zu ermöglichen. Die Variante der auskragenden Lagerung dient zur Berechnung frei stehender Wände, die nicht als Absturzicherung dienen sollen. Bei der Bemessung solcher Konstruktionen wird zur Lagerung der Glastafeln stets ein orthogonales Raster benötigt.

Im Input-Bereich 1) kann der Anwender zwischen herkömmlichen Stahllegierungen und nichtrostenden Stählen auswählen. Wird keine Angabe getroffen, wird der Bemessung ein Elastizitätsmodul von 210.000 [N/mm²] zugrunde gelegt.

Der Input-Bereich 2) dient dann der Feststellung, um welche Lagerungsart es sich bei dem vorzubemessenden Stahltragwerk handelt, falls dieses 90° gegen die Horizontale geneigt ist. Legt sich der User auf ein einseitig eingespanntes Tragwerk mit freiem Ende fest, so überspringt er die Input-Bereiche 3) bis 7) und fährt im Input-Bereich 8) mit der Angabe der zulässigen Durchbiegung fort. Wird dort kein Wert eingegeben, so wird das erforderliche Flächenträgheitsmoment zweiten Grades über eine zulässige Durchbiegung von $L/250$ stel sinngemäß nach ÖNORM B 4000 Punkt 4.2 ermittelt. Die erforderliche Formel ergibt sich unter Anwendung von „Bautabellen“ (Krapfenbauer, S. 93, [13]) zu

$$J = (q * l^4) / (8 * E * w), \quad (29)$$

wobei für die Variable q die Bemessungsflächenlast multipliziert mit der Einflussbreite, gemäß der Wahl des Achsabstandes, verwendet wird. Eine Anordnung eines Tragwerks der vierten Ebene ist in diesem Fall nicht möglich.

Gesetzt den Fall, dass bei einer Neigung von 90° gegen die Horizontale eine beidseitig gelenkige Lagerung angestrebt wird respektive eine Neigung kleiner 90° gegen die Horizontale vorliegt, ist im Input-Bereich 3) die zulässige Durchbiegung festzulegen. Bei Nicht-Eintrag bedient sich das Programm wiederum der Vorgaben des Unterpunkts 4.2 der ÖNORM B 4000. Dort heißt es: „Die rechnermäßige Durchbiegung [...] darf unter der Gesamtlast [...] bei Unterzügen höchstens 1/500 der Stützweite betragen und braucht nur für die Mitte der Stützweite berechnet werden.“ (ÖNORM B 4000, S. 4, [41]). Die stählernen Träger werden aus Gründen der Sicherheit im Rahmen des Bemessungsprogramms also als Unterzüge behandelt.

Sinngemäß nach „Bautabellen“ (Krapfenbauer, S. 95, [13]) ergibt sich die Formel für das erforderliche Trägheitsmoment zweiten Grades zu:

$$J = (5 * q * l^4) / (384 * E * w) \quad (30)$$

Entspricht das ermittelte Flächenträgheitsmoment zweiten Grades nicht den Vorstellungen des Anwenders, so wird ein Tragwerk der vierten Ebene vordimensioniert, welches mit dem Tragwerk der dritten Ebene drillsteif verbunden werden sollte, um mögliche Verwindungen der Unterkonstruktion klein zu halten. Abhängig von der Wahl des Achsabstandes des Tragwerks der vierten Ebene werden dann die einwirkenden Einzellasten berechnet. Gemäß „Bautabellen für Ingenieure“ (Schneider, S. 4.2, [25]) wird in Abhängigkeit von der Anzahl ($n-1$) der angreifenden Einzellasten und davon, ob n gerade oder ungerade ist, das erforderliche Trägheitsmoment der Elemente des Tragwerks bestimmt. Ist die Anzahl n der Felder, die sich durch Division von Länge des Tragwerks der dritten Ebene und Achsabstand des Tragwerks der vierten Ebene ergibt, eine gerade Zahl, so ergibt sich das erforderliche Trägheitsmoment indirekt (Schneider, S. 4.2, [25]) zu:

$$J = (5 * n * P * l^3) / (384 * E * w) * (1 - 0,8 / n^2) \quad (31)$$

Ist n eine ungerade Zahl, so ergibt es sich gemäß „Bautabellen für Ingenieure“ (Schneider, S. 4.2, [25]) zu:

$$J = (5 * n * P * l^3) / (384 * E * w) * (1 - 0,8 / n^2 - 0,2 / n^4) \quad (32)$$

Da sich dadurch auch das erforderliche Trägheitsmoment zweiten Grades des Tragwerks der dritten Ebene wiederum ändert, wird dies folgendermaßen neu berechnet: Aus statischer Sicht ergibt sich das nun mehrfach gelagerte Tragwerk der dritten Ebene zu einem Durchlaufträger, der an seinen Enden gelenkig gelagert ist. Da eine genaue Berechnung dieses statisch unbestimmten Systems den

Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, musste eine Vereinfachung im Sinne einer feldweisen Betrachtung getroffen werden. Unter Ausschaltung von Querschnittsnachweisen wird sich unter konstanter Streckenlast die größte Durchbiegung in den Randfeldern einstellen. Ergo resultiert das erforderliche Trägheitsmoment zweiten Grades für die nunmehr unterstützten Elemente des Tragwerks der dritten Ebene sinngemäß nach „Bautabellen für Ingenieure“ (Schneider, S. 4.6f, [25]) zu:

$$J = (q * l^4) / (184,6 * E * w) \quad (33)$$

Ein weiteres Feature, das dem User zur Verfügung steht, ist die Berechnung der maximalen Trägerlängen unter Berücksichtigung von Ladeflächenabmessungen von universell einsetzbaren Lastkraftwagen. Gemäß der Firma LKW Walter wird ab einer Ladeflächenlänge von 13,6 Metern eine Genehmigung als Sondertransport erforderlich (Fa. LKW Walter, /7/). Dies bedeutet, dass, sofern kein Sondertransport in Anspruch genommen werden soll, die maximale Trägerlänge mit 13,6 Metern begrenzt ist. Übersteigt eine erforderliche Trägerlänge diesen Wert, so gibt das Programm im Ergebnis-Bereich einen Vorschlag der Stückelung des Trägers zu n gleich langen, biegesteif (z.B. mittels Laschenstoß) zu verbindenden Elementen an.

Ø Das Arbeitsblatt „Verbindung“:

Im Abschnitt „Verbindung“ werden die linienförmigen, gelenkigen Lagerungen der Glastafel analog zur Bemessung der Stahlkonstruktion über die zulässige Durchbiegung und das dafür benötigte Flächenträgheitsmoment zweiten Grades vordimensioniert. Weitere Bedingungen, die zwar keinen Eingang in die Bemessung der Pressleisten finden, sind die Forderungen nach Wirksamkeit gegen Sogbeanspruchung sowie die Bedingung der thermischen Trennung von Pressleiste und Tragprofil, wenn es sich bei der gewählten Verglasung um einen isolierenden Aufbau handelt.

Grundlage der Bemessung bildet wiederum die Angabe der zulässigen Durchbiegung der Pressleisten. Wird im Input-Bereich 1) kein Wert für die zulässigen Deformationen angegeben, so wird der Maximalwert der Verschiebungsgröße als kleinerer Wert der gemäß ÖNORM B 3716-2 Punkt 4.2 für Horizontalverglasungen angegebenen Werte festgelegt. Dort heißt es: „Die Unterkonstruktion der Scheibe muss eine kontinuierliche Lagerung der Scheibenränder sicherstellen. Die Durchbiegung der Konstruktionsteile darf höchstens 1/200stel der aufliegenden Scheibenlänge, maximal jedoch 15 mm betragen.“ (ÖNORM B 3716-2, S. 4, [39]).

Im Vergleich zur Bemessung der Stahlkonstruktionen differiert die Bemessung der Pressleisten dahingehend, als dass vor Dimensionierung der Anpressprofile beliebige Materialien verwendet werden können. Diese Option kann im Input-Bereich 2) wahrgenommen werden. Die Frage nach dem Elastizitätsmodul lässt grundsätzlich alle Möglichkeiten offen, sofern die oben angeführten Bedingungen erfüllt bleiben. Wird kein Elastizitätsmodul angegeben, so erfolgt die Berechnung auf Basis des Elastizitätsmoduls für Stahl mit $210.000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$.

Bei der Ermittlung der einwirkenden Streckenlast wurde auf eine Lastverteilung im Sinne der Lasteinflussflächen verzichtet. Maßgebender Wert ist die Bemessungsflächenlast multipliziert mit der Einflussbreite (Breite des Anpressprofils addiert mit zwei Mal der Hälfte der maßgebenden Glastafelseite). Aus Gründen der Vereinfachung ist die maßgebende Pressleiste immer jene, die die längere Glastafelkante lagert, auch wenn diese in bestimmten Fällen direkt durch einen Stahlträger unterstützt sein kann.

Sinngemäß nach „Bautabellen“ (Krapfenbauer, S. 95, [13]) ergibt sich die Formel für das erforderliche Flächenträgheitsmoment zweiten Grades wiederum zu:

$$J = (5 * q * l^4) / (384 * E * w) \quad (30)$$

Das erforderliche Trägheitsmoment der anzuordnenden Pressleisten wird im Ergebnis-Bereich ausgeworfen.

Wird bei Verwendung von Mehrscheiben-Isoliergläsern ein vom Tragwerk thermisch getrenntes Pressleistensystem erforderlich, so findet sich dieses und zahlreiche weitere Ausführungsformen und Architekturdetails in [23].

Ø Das Arbeitsblatt „Output“:

Im Arbeitsblatt „Output“ werden alle bedeutenden Ergebnisse und Zwischenergebnisse sowie getroffene Annahmen übersichtlich zusammengestellt. Abhängig von der Neigung der Konstruktion, der Isoliereigenschaften des Glasaufbaus sowie der Lagerung des Tragwerks der dritten beziehungsweise vierten Ebene variiert das Arbeitsblatt „Output“ die einzelnen Resultate. Zusammenfassend wird ebenfalls angeführt, gegen welche Sogbeanspruchung die Pressleisten wirksam sein müssen und ob die entworfenen Glastafeln den erforderlichen Nachweisen genügen. Für Mehrscheiben-Isolierverglasungen sind dabei die Grenzzustände „voller Verbund“ und „ohne Verbund“ maßgebend, bei nicht isolierenden Glasbauten hingegen nur der Grenzzustand „ohne Verbund“.

5.5 Anwendungsbeispiele

An dieser Stelle soll die Verwendung des MS Excel-Programms anhand zweier Anwendungsbeispiele erläutert werden.

5.5.1 Geneigte Mehrscheiben-Isolierverglasung

Angabe:

Für das erste Anwendungsbeispiel wird eine 45° gegen die Horizontale geneigte Mehrscheiben-Isolierverglasung berechnet. Sie sei 20m breit, ihre Konstruktionsoberkante soll sich in einer Höhe von 12,5m und ihre Konstruktionsunterkante in einer Höhe von 8m befinden. Es sei Wind (Teil einer Satteldachkonstruktion, Ort: Grünau im Almtal, Seehöhe: 800m ü.A.) als auch Schnee zu berücksichtigen. Die Konstruktion soll für Instandhaltungsarbeiten betretbar sein.

Berechnung:

1) Klassifizierung:

Neigung gegen die Horizontale:	$\alpha = 45^\circ$
Gewählter Achsabstand des Stahltragwerks:	$a_{III} = 400\text{cm}$
Glasplattenbreite:	$b = a - 2,5\text{cm} = 397,5\text{cm}$
Länge der geneigten Kante:	$l = (12,5\text{m} - 8\text{m}) / \sin(45^\circ) \approx 6,36\text{m} = 636\text{cm}$
Gewählte Glasplattenhöhe:	$h = (636\text{cm} / 6) - 2,5\text{cm} = 103,5\text{cm}$
Verglasungsart (ÖNORM B 3716-2):	Horizontalverglasung
Gewählter Glasaufbau: äußere Scheibe:	VSG aus ESG
Gewählter Glasaufbau: innere Scheibe:	VSG aus TVG

2) Windlast:

Seehöhe Grünau im Almtal:	$S = 527\text{m ü.A.}$
Seehöhe Bauwerksstandort:	$A = 800\text{m ü.A.}$
Höhendifferenz:	$\Delta H = 273\text{m} > 250\text{m} \rightarrow \text{Tab. 5 (ÖNORM B 4014-1)}$
Grundwert der Windgeschwindigkeit:	$v_{10} = 115 \text{ km/h}$
Höhe über dem Boden:	$H_0 = 12,5\text{m} \rightarrow \text{Tab. 5: } H_0 = 15\text{m}$
Staudruckwert:	$q = 0,94 \text{ kN/m}^2$
Konstruktionstyp:	Dachkonstruktion $\rightarrow \text{Tab. 17 (ÖNORM B 4014-1)}$
Konstruktionsneigung:	$\alpha = 45^\circ \geq 35^\circ$
Differenzdruckbeiwert allgemein für Druck:	$c_d = 1,1$
Differenzdruckbeiwert allgemein für Sog:	$c_s = -1,1$
Charakteristischer Winddruck:	$D_k = q * c_d = 1,03 \text{ kN/m}^2$
Charakteristischer Windsog:	$S_k = q * c_s = 1,03 \text{ kN/m}^2$

3) Schneelast:

Zonennummer:	$Z = 4$ (Anhang B ÖNORM B 1991-1-3)
Rechenwert für Z:	$Z_R = 4,5$ (Tab. B.1 ÖNORM B 1991-1-3)
Formbeiwert:	$\mu_2 = 1,2 * (60 - \alpha) / 30 = 0,6$ (Anhang C)
Charakteristische Schneelast auf dem Boden:	$s_k = (0,642 * Z_R + 0,009) * [1 + (A / 728)^2] = 6,397 \text{ kN/m}^2$
Maximaler Formbeiwert:	$\mu_{\max} = 0,6$
Charakt. Schneelast der Dachkonstruktion:	$s = s_k * \mu_{\max} = 3,838 \text{ kN/m}^2$
Charakt. Schneelast normal:	$E_k = s * \cos(45^\circ) = 2,71 \text{ kN/m}^2$

4) Klimalast:

Gewählter Scheibenaufbau (innen u. außen): VSG aus 2 ESG- bzw. 2 TVG-Scheiben

Gewählte Dicke der Einzelscheiben: $d_{ES} = 10 \text{ mm}$
 Gewählte Dicke des Scheibenzwischenraums: $d_{SZR} = 10 \text{ mm}$
 Gewählte Dicke der PVB-Folien: $d_{PVB} = 0,76 \text{ mm}$
 Klimatische Einwirkungen: nicht bekannt

Resultierender isochorer Druck im Sommer: $p_0 = 16 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 2 ÖNORM B 3716-1)

Resultierender isochorer Druck im Winter: $p_0 = -16 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 2 ÖNORM B 3716-1)

Durchbiegungsbegrenzung Isolierglasherst.: nicht bekannt

Nutzlast: Verglasung soll für Instandhaltung betretbar sein

Charakt. Nutzlast vertikal: $q_{k,v} = 1,5 \text{ kN/m}^2$

Charakt. Nutzlast normal: $q_{k,n} = 1,5 * \cos(45^\circ) \approx 1,06 \text{ kN/m}^2$

Eigengewicht: berücksichtigt

Dichte von Glas: 25 kN/m^3

Eigengewicht vertikal: $g_{k,v} = 25 \text{ kN/m}^3 * (2 * 2 \text{ Scheiben} * 0,01 \text{ m}) = 1,0 \text{ kN/m}^2$

Eigengewicht normal: $g_{k,n} = 1,0 * \cos(45^\circ) \approx 0,71 \text{ kN/m}^2$

Ersatzdicke voller Verbund (vV): $d_{vV}^* = \Sigma(d_{ES}) = 20 \text{ mm}$ (Formel (A.6) ÖNORM B 3716-1)

Ersatzdicke ohne Verbund (oV): $d_{oV}^* = [d_{ES,1}^3 + d_{ES,2}^3 + \dots]^{1/3} \approx 12,6 \text{ mm}$ (Formel (A.7))

Lastaufteilende Wirkung (Koppeffekt): berücksichtigt

Seitenverhältnis: $a / b = 1035 \text{ mm} / 3975 \text{ mm} \approx 0,26$

Beiwert B_V (Tab. A.1, ÖNORM B 3716-1): $B_V = 0,0676 + (0,3 - 0,26) * (0,0676 - 0,0676) / 0,1 \approx 0,0712$

Charakt. Kantenlänge voller Verbund: $a^* = 28,9 * [\{d_{SZR} * d_a^3 * d_i^3\} / \{(d_a^3 + d_i^3) * B_V\}]^{1/4} \approx 791,2 \text{ mm}$

Charakt. Kantenlänge ohne Verbund: $a^* = 28,9 * [\{d_{SZR} * d_a^3 * d_i^3\} / \{(d_a^3 + d_i^3) * B_V\}]^{1/4} \approx 559,5 \text{ mm}$

Faktor ϕ voller Verbund: $\phi_{vV} = 1 / [1 + (a / a^*)^4] \approx 0,2546$

Faktor ϕ ohne Verbund: $\phi_{oV} = 1 / [1 + (a / a^*)^4] \approx 0,0787$

Anteil an Gesamtbiegesteifigkeit: $\delta_a = 0,5 = 50 \%$ (gleicher Scheibenaufbau außen und innen)

Anteil an Gesamtbiegesteifigkeit: $\delta_i = 0,5 = 50 \%$ (gleicher Scheibenaufbau außen und innen)

Sicherheits- und Kombinationsfaktoren: gemäß Formel (9.14) der ÖNORM ENV 1991-1

Mehrere veränderliche Einwirkungen: $S_d = \Sigma(1,35 * G_{k,i}) + 1,35 * \Sigma(Q_{k,i})$

Lastaufteilung: gemäß Tabelle A.2 ÖNORM B 3716-1

Lastaufstellung für die äußere Scheibe bei vollem Verbund:

vV: Wind w_a für äußere Scheibe: $w_{d,a} = 1,35 * (\delta_a + \phi_{vV} * \delta_i) * D_k \approx 0,88 \text{ kN/m}^2$

vV: Wind w_i für äußere Scheibe: $w_{d,i} = 1,35 * (1 - \phi_{vV}) * \delta_a * S_k \approx 0,52 \text{ kN/m}^2$

vV: Schnee s für äußere Scheibe: $s_d = 1,35 * (\delta_a + \phi_{vV} * \delta_i) * E_k \approx 2,30 \text{ kN/m}^2$

vV: Nutzlast q_n für äußere Scheibe: $q_{d,n} = 1,35 * (\delta_a + \phi_{vV} * \delta_i) * q_{k,n} \approx 0,90 \text{ kN/m}^2$

vV: Eigengewicht g_n für äußere Scheibe: $g_{d,n} = 1,35 * (\delta_a + \phi_{vV} * \delta_i) * g_{k,n} \approx 0,60 \text{ kN/m}^2$

vV: isochorer Druck p_0 für äußere Scheibe: $p_{d,0} = 1,35 * (-\phi_{vV}) * (\pm 16 \text{ kN/m}^2) \approx \pm 5,50 \text{ kN/m}^2$

Maximale Summe der Design-Lasten: $L_{d,a,vV} \approx 10,69 \text{ kN/m}^2 = 0,01069 \text{ N/mm}^2$

Lastaufstellung für die innere Scheibe bei vollem Verbund:

vV: Wind w_a für innere Scheibe: $w_{d,a} = 1,35 * (1 - \phi_{vV}) * \delta_i * D_k \approx 0,52 \text{ kN/m}^2$

vV: Wind w_i für innere Scheibe: $w_{d,i} = 1,35 * (\phi_{vV} * \delta_a + \delta_i) * S_k \approx 0,88 \text{ kN/m}^2$

vV: Schnee s für innere Scheibe: $s_d = 1,35 * (1 - \phi_{vV}) * \delta_i * E_k \approx 1,37 \text{ kN/m}^2$

vV: Nutzlast q_n für innere Scheibe: $q_{d,n} = 1,35 * (1 - \phi_{vV}) * \delta_i * q_{k,n} \approx 0,53 \text{ kN/m}^2$

vV: Eigengewicht g_n für innere Scheibe: $g_{d,n} = 1,35 * (1 - \phi_{vV}) * \delta_i * g_{k,n} \approx 0,36 \text{ kN/m}^2$

vV: isochorer Druck p_0 für innere Scheibe: $p_{d,0} = 1,35 * \phi_{vV} * (\pm 16 \text{ kN/m}^2) \approx \pm 5,50 \text{ kN/m}^2$

Maximale Summe der Design-Lasten: $L_{d,i,vV} \approx 9,15 \text{ kN/m}^2 = 0,00915 \text{ N/mm}^2$

Lastaufstellung für die äußere Scheibe ohne Verbund:

oV: Wind w_a für äußere Scheibe:	$w_{d,a} = 1,35 * (\delta_a + \varphi_{oV} * \delta_i) * D_k \approx 0,75 \text{ kN/m}^2$
oV: Wind w_i für äußere Scheibe:	$w_{d,i} = 1,35 * (1 - \varphi_{oV}) * \delta_a * S_k \approx 0,64 \text{ kN/m}^2$
oV: Schnee s für äußere Scheibe:	$s_d = 1,35 * (\delta_a + \varphi_{oV} * \delta_i) * E_k \approx 1,98 \text{ kN/m}^2$
oV: Nutzlast q_n für äußere Scheibe:	$q_{d,n} = 1,35 * (\delta_a + \varphi_{oV} * \delta_i) * q_{k,n} \approx 0,77 \text{ kN/m}^2$
oV: Eigengewicht g_n für äußere Scheibe:	$g_{d,n} = 1,35 * (\delta_a + \varphi_{oV} * \delta_i) * g_{k,n} \approx 0,51 \text{ kN/m}^2$
oV: isochorer Druck p_0 für äußere Scheibe:	$p_{d,0} = 1,35 * (-\varphi_{oV}) * (\pm 16 \text{ kN/m}^2) \approx \pm 1,70 \text{ kN/m}^2$
Maximale Summe der Design-Lasten:	$L_{d,a,oV} \approx 6,36 \text{ kN/m}^2 = 0,00636 \text{ N/mm}^2$

Lastaufstellung für die innere Scheibe ohne Verbund:

oV: Wind w_a für innere Scheibe:	$w_{d,a} = 1,35 * (1 - \varphi_{oV}) * \delta_i * D_k \approx 0,64 \text{ kN/m}^2$
oV: Wind w_i für innere Scheibe:	$w_{d,i} = 1,35 * (\varphi_{oV} * \delta_a + \delta_i) * S_k \approx 0,75 \text{ kN/m}^2$
oV: Schnee s für innere Scheibe:	$s_d = 1,35 * (1 - \varphi_{oV}) * \delta_i * E_k \approx 1,69 \text{ kN/m}^2$
oV: Nutzlast q_n für innere Scheibe:	$q_{d,n} = 1,35 * (1 - \varphi_{oV}) * \delta_i * q_{k,n} \approx 0,66 \text{ kN/m}^2$
oV: Eigengewicht g_n für innere Scheibe:	$g_{d,n} = 1,35 * (1 - \varphi_{oV}) * \delta_i * g_{k,n} \approx 0,44 \text{ kN/m}^2$
oV: isochorer Druck p_0 für innere Scheibe:	$p_{d,0} = 1,35 * \varphi_{oV} * (\pm 16 \text{ kN/m}^2) \approx \pm 1,70 \text{ kN/m}^2$
Maximale Summe der Design-Lasten:	$L_{d,i,oV} \approx 5,88 \text{ kN/m}^2 = 0,00588 \text{ N/mm}^2$

5) Nachweisführung:

Nachweisformat für ULS:	$S_d \leq R_d$ (Formel (1) der ÖNORM B 3716-1)
Nachweisformat für SLS:	$E_d \leq C_d$ (Formel (6.13) der ÖNORM EN 1990)

Zulässige Spannungen: gemäß Kap. 9.2 der ÖNORM B 3716-1

Charakt. Festigkeit für ESG:	$f_k = 120 \text{ N/mm}^2$ (Tab. 4)
Abminderungsfaktor für Einwirkungsdauer:	$k_{mod} = 1,0$ (Tab. 5)
Abminderungsfaktor für Beanspruchungsart:	$k_b = 1,0$ (Plattenbeanspruchung gem. Tab. 6)
Teilsicherheitsbeiwert:	$\gamma_M = 1,5$ (Tab. 7)
Bemessungswert des Widerstandes für ESG:	$R_{d,ESG} = f_k * k_{mod} * k_b / \gamma_M \approx 80 \text{ N/mm}^2$ (Formel (3))
Charakt. Festigkeit für TVG:	$f_k = 70 \text{ N/mm}^2$ (Tab. 4)
Abminderungsfaktor für Einwirkungsdauer:	$k_{mod} = 1,0$ (Tab. 5)
Abminderungsfaktor für Beanspruchungsart:	$k_b = 1,0$ (Plattenbeanspruchung gem. Tab. 6)
Teilsicherheitsbeiwert:	$\gamma_M = 1,5$ (Tab. 7)
Bemessungswert des Widerstandes für TVG:	$R_{d,TVG} = f_k * k_{mod} * k_b / \gamma_M \approx 46,66 \text{ N/mm}^2$ (Formel (3))
Zulässige Verformungen:	gemäß Tab. 3 ÖNORM B 3716-1
Durchbiegungsbegrenzung:	$w_{zul} = h / 100$
Bemessungswert des Widerstandes:	$C_d = 10,35 \text{ mm}$ (\leq Scheibendicke)

Auswirkungen der Einwirkungen: gemäß Kapitel 2.2: Variante „Bach´sche Plattenformel“

Elastizitätsmodul:	$E_G = 70000 \text{ N/mm}^2$
Halbe Plattenbreite:	$b = 1035 / 2 = 517,5 \text{ mm}$
Halbe Plattenlänge:	$a = 3975 / 2 = 1987,5 \text{ mm}$
vV: Plattendicke:	$h_{vV} = d_{vV}^* = 20 \text{ mm}$
oV: Plattendicke:	$h_{oV} = d_{oV}^* = 12,6 \text{ mm}$
Seitenverhältnis:	$a / b = 1987,5 \text{ mm} / 517,5 \text{ mm} \approx 3,84$
Gewähltes Seitenverhältnis:	$a / b = 4,0$
Faktor ψ für $a / b = 4,0$:	$\psi = 2,24$
Faktor φ_y für $a / b = 4,0$:	$\varphi_y = 2,96$
Resultierende Spannung in Plattenmitte:	$\sigma_y = \varphi_y p b^2 / h^2$ (gemäß Formel (14))
Resultierende Verformung in Plattenmitte:	$f = \psi p b^4 / E h^3$ (gemäß Formel (15))

vV: result. Spannung der äußeren Scheibe: Nachweis:	$\sigma_y = \varphi_y * L_{d,a,vV} * b^2 / d_{vV}^{*2} \approx 21,18 \text{ N/mm}^2$ $S_d = 21,18 \text{ N/mm}^2 \leq R_{d,ESG} = 80 \text{ N/mm}^2 \rightarrow$ erbracht!
vV: result. Verformung der äußeren Scheibe: Nachweis:	$f = \psi * L_{d,a,vV} * b^4 / E_G * d_{vV}^{*3} \approx 3,07 \text{ mm}$ $E_d = 3,07 \text{ mm} \leq C_d = 10,35 \text{ mm} \rightarrow$ erbracht!
vV: result. Spannung der inneren Scheibe: Nachweis:	$\sigma_y = \varphi_y * L_{d,i,vV} * b^2 / d_{vV}^{*2} \approx 18,13 \text{ N/mm}^2$ $S_d = 18,13 \text{ N/mm}^2 \leq R_{d,TVG} = 46,66 \text{ N/mm}^2 \rightarrow$ erbracht!
vV: result. Verformung der inneren Scheibe: Nachweis:	$f = \psi * L_{d,i,vV} * b^4 / E_G * d_{vV}^{*3} \approx 2,62 \text{ mm}$ $E_d = 2,62 \text{ mm} \leq C_d = 10,35 \text{ mm} \rightarrow$ erbracht!
oV: result. Spannung der äußeren Scheibe: Nachweis:	$\sigma_y = \varphi_y * (L_{d,a,oV} / 2 \text{ Scheiben}) * b^2 / d_{ES}^2 \approx 25,20 \text{ N/mm}^2$ $S_d = 25,20 \text{ N/mm}^2 \leq R_{d,ESG} = 80 \text{ N/mm}^2 \rightarrow$ erbracht!
oV: result. Verformung der äußeren Scheibe: Nachweis:	$f = \psi * L_{d,a,oV} * b^4 / E_G * d_{oV}^{*3} \approx 7,30 \text{ mm}$ $E_d = 7,30 \text{ mm} \leq C_d = 10,35 \text{ mm} \rightarrow$ erbracht!
oV: result. Spannung der inneren Scheibe: Nachweis:	$\sigma_y = \varphi_y * (L_{d,i,oV} / 2 \text{ Scheiben}) * b^2 / d_{ES}^2 \approx 23,31 \text{ N/mm}^2$ $S_d = 23,31 \text{ N/mm}^2 \leq R_{d,TVG} = 46,66 \text{ N/mm}^2 \rightarrow$ erbracht!
oV: result. Verformung der inneren Scheibe: Nachweis:	$f = \psi * L_{d,i,oV} * b^4 / E_G * d_{oV}^{*3} \approx 6,75 \text{ mm}$ $E_d = 6,75 \text{ mm} \leq C_d = 10,35 \text{ mm} \rightarrow$ erbracht!

6) Tragkonstruktion:

Eigengewicht Stahlkonstruktion:	vernachlässigt
Sicherheits- und Kombinationsfaktoren:	gemäß Formel (9.14) der ÖNORM ENV 1991-1
Mehrere veränderliche Einwirkungen:	$S_d = \Sigma (1,35 * G_{k,i}) + 1,35 * \Sigma (Q_{k,j})$
Resultierende Bemessungsflächenlast:	$q_{n,max} = 1,35 * (D_k + S_k + E_k + q_{k,n} + g_{k,n}) \approx 8,84 \text{ kN/m}^2$
Einflussbreite:	$a = 400 \text{ cm} = 4 \text{ m}$
Resultierende Streckenlast:	$p = q_{n,max} * a \approx 35,37 \text{ kN/m} = 0,3537 \text{ kN/cm}$
Konstruktion aus NiRo:	nein
Elastizitätsmodul:	$E_S = 21000 \text{ kN/cm}^2$
Stützweite = Trägerlänge:	$l_S = 636 \text{ cm} \leq 13,6 \text{ m}$ (LKW ohne Sondertransport)
Durchbiegungsbegrenzung:	$l_S / 500 = 1,272 \text{ cm}$ (gemäß Pkt. 4.2 der ÖNORM B 4000)
Statisches System:	beidseitig gelenkig gelagert
Trägheitsmomentermittlung:	gemäß Kapitel III.2 (Krapfenbauer, S. 95, [13])
Erforderl. Flächenträgheitsmom. 2. Grades:	$J_{s,erf.} = 5 * q * l^4 / (384 * E_S * w) \approx 28209,7 \text{ cm}^4$
Entspricht dies den Vorstellungen?	Ja
Gewählter Querschnitt:	HE-B 320 ($J_y = 30820 \text{ cm}^4$)

7) Verbindung:

Eigengewicht Pressleisten:	vernachlässigt
Sicherheits- und Kombinationsfaktoren:	gemäß Formel (9.14) der ÖNORM ENV 1991-1
Mehrere veränderliche Einwirkungen:	$S_d = \Sigma (1,35 * G_{k,i}) + 1,35 * \Sigma (Q_{k,j})$
Resultierende Bemessungsflächenlast:	$q_{n,max} = 1,35 * (D_k + S_k + E_k + q_{k,n} + g_{k,n}) \approx 8,84 \text{ kN/m}^2$
Einflussbreite:	$b = 106 \text{ cm} = 1,06 \text{ m}$ (Glasplattenhöhe + 2,5 cm)
Resultierende Streckenlast:	$p = q_{n,max} * b \approx 9,37 \text{ kN/m} = 0,0937 \text{ kN/cm}$
Gewähltes Material der Pressleisten:	Stahl
Elastizitätsmodul:	$E_p = 21000 \text{ kN/cm}^2$
Maßgebende Länge:	$l_p = 400 \text{ cm} = 4000 \text{ mm}$

Durchbiegungsbegrenzung:	$l_p / 200$ oder 15 mm (gem. Pkt. 4.2 ÖNORM B 3716-2)
Zulässige Durchbiegung:	$w_{zul} = l_p / 200 = 20 \text{ mm} \geq 15 \text{ mm} \rightarrow w_{zul} = 15 \text{ mm} = 1,5 \text{ cm}$
Erforderl. Flächenträgheitsmom. 2. Grades:	$J_{p,erf.} = 5 * q * l^4 / (384 * E * w) \approx \mathbf{991,9 \text{ cm}^4}$
Gewählter Querschnitt (maßgebend):	FW 50⁺ Pfosten Art.-Nr.: 326030/326040 ($J_x = 1010,1 \text{ cm}^4$)

5.5.2 Frei stehende Wand

Angabe:

Das zweite Anwendungsbeispiel dient zur Berechnung einer frei stehenden Wand. Ihre Höhe soll 3,0m betragen und sie soll sich über eine Länge von 80m erstrecken. Es sei nur Wind (Ort: 19. Wiener Gemeindebezirk, Seehöhe: 180m ü.A.) zu berücksichtigen. Das Tragwerk soll sich aus Stützen aus nicht rostendem Stahl (NiRo) und aus Pressleisten aus Aluminium zusammensetzen.

Berechnung:

1) Klassifizierung:

Neigung gegen die Horizontale:	$\alpha = 90^\circ$
Gewählter Achsabstand des Stahltragwerks:	$a = 160\text{cm}$
Glasplattenbreite:	$b = a - 2,5\text{cm} = 157,5\text{cm}$
Länge der geneigten Kante:	$l = 3,0\text{m} = 300\text{cm}$
Gewählte Glasplattenhöhe:	$h = 300\text{cm} - 2,5\text{cm} = 297,5\text{cm}$
Verglasungsart (ÖNORM B 3716-2):	Vertikalverglasung
Gewählter Glasaufbau:	VSG aus ESG

2) Windlast:

Seehöhe 19. Bezirk:	$S = 171\text{m ü.A.}$
Seehöhe Bauwerksstandort:	$A = 180\text{m ü.A.}$
Höhendifferenz:	$\Delta H = 9\text{m} \leq 250\text{m} \rightarrow \text{Tab. 2 (ÖNORM B 4014-1)}$
Grundwert der Windgeschwindigkeit:	$v_{10} = 125 \text{ km/h}$
Geländeform:	III (dichte Bebauung)
Höhe über dem Boden:	$H_o = 3,0\text{m} \rightarrow \text{Tab. 2: } H_o = 6\text{m}$
Staudruckwert:	$q = 0,49 \text{ kN/m}^2$
Konstruktionstyp:	Wandkonstruktion $\rightarrow \text{Tab. 16 (ÖNORM B 4014-1)}$
Differenzdruckbeiwert für Wandfläche:	$c_d = 1,1$
Differenzdruckbeiwert allgemein für Sog:	$c_s = -0,9$
Charakteristischer Winddruck:	$D_k = q * c_d \approx \mathbf{0,54 \text{ kN/m}^2}$
Charakteristischer Windsog:	$S_k = q * c_s \approx \mathbf{0,44 \text{ kN/m}^2}$
Charakteristische Windlast:	$W_k = D_k + S_k = \mathbf{0,98 \text{ kN/m}^2}$

3) Bemessungslast:

Gewählter Scheibenaufbau:	VSG aus 2 ESG-Scheiben
Gewählte Dicke der Einzelscheiben:	$d_{ES} = 10 \text{ mm}$
Gewählte Dicke der PVB-Folien:	$d_{PVB} = 0,76 \text{ mm}$
Eigengewicht:	berücksichtigt
Dichte von Glas:	25 kN/m^3
Eigengewicht vertikal:	$g_{k,v} = 25 \text{ kN/m}^3 * (2 \text{ Scheiben} * 0,01 \text{ m}) = 0,5 \text{ kN/m}^2$
Eigengewicht normal:	$g_{k,n} = 0,5 * \cos(90^\circ) = \mathbf{0,0 \text{ kN/m}^2}$

Sicherheits- und Kombinationsfaktoren: Eine veränderliche Einwirkung: Resultierende Bemessungsflächenlast:	gemäß Formel (9.13) der ÖNORM ENV 1991-1 $S_d = \Sigma (1,35 * G_{k,i}) + 1,5 * Q_{k,1}$ $L_d = 1,5 * W_k = 1,47 \text{ kN/m}^2 = 0,00147 \text{ N/mm}^2$
<i>4) Nachweisführung:</i>	
Nachweisformat für ULS: Nachweisformat für SLS:	$S_d \leq R_d$ (Formel (1) der ÖNORM B 3716-1) $E_d \leq C_d$ (Formel (6.13) der ÖNORM EN 1990)
Ersatzdicke voller Verbund (vV): Ersatzdicke ohne Verbund (oV):	$d^*_{vV} = \Sigma (d_{ES}) = 20 \text{ mm}$ (Formel (A.6) ÖNORM B 3716-1) $d^*_{oV} = [d_{ES,1}^3 + d_{ES,2}^3 + \dots]^{1/3} \approx 12,6 \text{ mm}$ (Formel (A.7))
Zulässige Spannungen:	gemäß Kap. 9.2 der ÖNORM B 3716-1
Charakt. Festigkeit für ESG: Abminderungsfaktor für Einwirkungsdauer: Abminderungsfaktor für Beanspruchungsart: Teilsicherheitsbeiwert: Bemessungswert des Widerstandes für ESG:	$f_k = 120 \text{ N/mm}^2$ (Tab. 4) $k_{mod} = 1,0$ (Tab. 5) $k_b = 1,0$ (Plattenbeanspruchung gem. Tab. 6) $\gamma_M = 1,5$ (Tab. 7) $R_{d,ESG} = f_k * k_{mod} * k_b / \gamma_M \approx 80 \text{ N/mm}^2$ (Formel (3))
Zulässige Verformungen:	gemäß Tab. 3 ÖNORM B 3716-1
Durchbiegungsbegrenzung: vV: Bemessungswert des Widerstandes: vV: Bemessungswert des Widerstandes:	keine Angaben → Durchbiegung m. Plattendicke beschränkt $C_{d,vV} = d^*_{vV} = 20,0 \text{ mm}$ $C_{d,oV} = d^*_{oV} = 12,6 \text{ mm}$
Auswirkungen der Einwirkungen:	gemäß Kapitel 2.2: Variante „Bach’sche Plattenformel“
Elastizitätsmodul: Halbe Plattenbreite: Halbe Plattenlänge: vV: Plattendicke: oV: Plattendicke: Seitenverhältnis: Gewähltes Seitenverhältnis: Faktor ψ für $a / b = 4,0$: Faktor ϕ_y für $a / b = 4,0$: Resultierende Spannung in Plattenmitte: Resultierende Verformung in Plattenmitte:	$E_G = 70000 \text{ N/mm}^2$ $b = 1575 / 2 = 787,5 \text{ mm}$ $a = 2975 / 2 = 1487,5 \text{ mm}$ $h_{vV} = d^*_{vV} = 20,0 \text{ mm}$ $h_{oV} = d^*_{oV} = 12,6 \text{ mm}$ $a / b = 148,75 \text{ mm} / 78,75 \text{ mm} \approx 1,89$ $a / b = 2,0$ $\psi = 1,77$ $\phi_y = 2,44$ $\sigma_y = \phi_y * p * b^2 / h^2$ (gemäß Formel (14)) $f = \psi * p * b^4 / E * h^3$ (gemäß Formel (15))
vV: result. Spannung: Nachweis:	$\sigma_y = \phi_y * L_d * b^2 / d^*_{vV}^2 \approx 5,56 \text{ N/mm}^2$ $S_d = 5,56 \text{ N/mm}^2 \leq R_{d,ESG} = 80 \text{ N/mm}^2 \rightarrow$ erbracht!
vV: result. Verformung: Nachweis:	$f = \psi * L_d * b^4 / E_G * d^*_{vV}^3 \approx 1,79 \text{ mm}$ $E_d = 1,79 \text{ mm} \leq C_{d,vV} = 20,0 \text{ mm} \rightarrow$ erbracht!
oV: result. Spannung: Nachweis:	$\sigma_y = \phi_y * (L_d / 2 \text{ Scheiben}) * b^2 / d_{ES}^2 \approx 11,12 \text{ N/mm}^2$ $S_d = 11,12 \text{ N/mm}^2 \leq R_{d,ESG} = 80 \text{ N/mm}^2 \rightarrow$ erbracht!
oV: result. Verformung: Nachweis:	$f = \psi * L_d * b^4 / E_G * d^*_{oV}^3 \approx 7,15 \text{ mm}$ $E_d = 7,15 \text{ mm} \leq C_{d,oV} = 12,6 \text{ mm} \rightarrow$ erbracht!

5) Tragkonstruktion:

Eigengewicht Stahlkonstruktion:	vernachlässigt
Sicherheits- und Kombinationsfaktoren:	gemäß Formel (9.13) der ÖNORM ENV 1991-1
Eine veränderliche Einwirkung:	$S_d = \Sigma (1,35 * G_{k,i}) + 1,5 * Q_{k,1}$
Resultierende Bemessungsflächenlast:	$L_d = 1,5 * W_k = 1,47 \text{ kN/m}^2$
Einflussbreite:	$a = 160 \text{ cm} = 1,6 \text{ m}$
Resultierende Streckenlast:	$p = L_d * a \approx 2,35 \text{ kN/m} = 0,0235 \text{ kN/cm}$
Konstruktion aus NiRo:	ja
Elastizitätsmodul:	$E_S = 20000 \text{ kN/cm}^2$
Stützweite = Trägerlänge:	$l_s = 300 \text{ cm} \leq 13,6 \text{ m}$ (LKW ohne Sondertransport)
Durchbiegungsbegrenzung:	$l_s / 250 = 1,2 \text{ cm}$ (gemäß Pkt. 4.2 der ÖNORM B 4000)
Statisches System:	einseitig eingespannt
Trägheitsmomentermittlung:	gemäß Kapitel III.2 (Krapfenbauer, S. 93, [13])
Erforderl. Flächenträgheitsmom. 2. Grades:	$J_{s,erf.} = p * l_s^4 / (8 * E_S * w) \approx 992,3 \text{ cm}^4$
Gewählter Querschnitt:	HE-A 140 ($J_y = 1030 \text{ cm}^4$)

6) Verbindung:

Eigengewicht Pressleisten:	vernachlässigt
Sicherheits- und Kombinationsfaktoren:	gemäß Formel (9.13) der ÖNORM ENV 1991-1
Eine veränderliche Einwirkung:	$S_d = \Sigma (1,35 * G_{k,i}) + 1,5 * Q_{k,1}$
Resultierende Bemessungsflächenlast:	$L_d = 1,5 * W_k = 1,47 \text{ kN/m}^2$
Einflussbreite:	$b = 160 \text{ cm} = 1,6 \text{ m}$ (Glasplattenhöhe + 2,5 cm)
Resultierende Streckenlast:	$p = L_d * b \approx 2,35 \text{ kN/m} = 0,0235 \text{ kN/cm}$
Gewähltes Material der Pressleisten:	Aluminium
Elastizitätsmodul:	$E_p = 7200 \text{ kN/cm}^2$
Maßgebende Länge:	$l_p = 300 \text{ cm} = 3000 \text{ mm}$
Durchbiegungsbegrenzung:	$l_p / 200$ oder 15 mm (gem. Pkt. 4.2 ÖNORM B 3716-2)
Zulässige Durchbiegung:	$w_{zul} = l_p / 200 = 15 \text{ mm} \geq 15 \text{ mm} \rightarrow w_{zul} = 15 \text{ mm} = 1,5 \text{ cm}$
Erforderl. Flächenträgheitsmom. 2. Grades:	$J_{p,erf.} = 5 * q * l^4 / (384 * E * w) \approx 229,7 \text{ cm}^4$
Gewählter Querschnitt (maßgebend):	FW 50⁺ Riegel Art.-Nr.: 322440 ($J_x = 354,7 \text{ cm}^4$)

6 Zusammenfassung

Transparenz bei zur selben Zeit gebotenen Schutz vor klimatischen Einwirkungen, gute Reinigungsfähigkeit und Dichtheit sowie eine relativ hohe Druckfestigkeit zählen wohl zu den bedeutendsten positiven Eigenschaften des amorphen Materials Glas. Doch das Sprichwort „*Glück und Glas, wie leicht bricht das...*“ erinnert nur zu gern an die alles andere als gutmütigen Materialeigenschaften von Gläsern, zu denen vor allem Sprödigkeit und eine geringe Biegezugfestigkeit zu zählen sind. Hat doch auch das Attribut „Glasartiges Verhalten“ einen eher bitteren Beigeschmack bei der Umschreibung von Materialien.

Die „Sorge, die Diskrepanz zwischen dem wirklichen Verhalten unvollkommener Konstruktionen und den vereinfachenden, idealisierenden Berechnungsannahmen durch die „Schlauheit des Werkstoffs“, das heißt den plastischen Verformungsausgleich in den Bauteilen, bei Glas nicht ausgleichen zu können“ (Sedlacek, im Vorwort, [27]), hat sein Übriges dazu getan, dass seitens des planenden Ingenieurs dem Baustoff Glas nicht das benötigte Vertrauen entgegen gebracht werden konnte, welches es für den Einsatz als tragendes Element benötigt hätte.

Steigende Anforderungen der Architektur an den im Vergleich zu Beton, Stahl oder Holz bedeutend jüngeren konstruktiven Baustoff Glas und das Erfordernis der Wettbewerbsfähigkeit drängen den Kalkulator zu mehr Risikobereitschaft, welche durch ganzheitliche Betrachtung der Tragwirkung von Glasbauten, der Kenntnis über die bereits erwähnten Vor- und Nachteile und einen adäquaten Einsatz der beschriebenen Materialien minimiert werden könnte.

Eine große Auswahlmöglichkeit an sicheren Produkten, variantenreiche Kombinationen bestehender Ausgangselemente seitens der Glashersteller sowie eine nahezu perfekte mathematische, werkstoffgerechte Formulierung und Modellierung der Auswirkungen von statischen und dynamischen Beanspruchungen unter der essentiellen Berücksichtigung der Randbedingungen durch den Planer können dazu führen, dass das große Entwicklungspotential des Baustoffs Glas zu Tage treten, herausragende Visionen im Glasbau verwirklicht werden und so Vertrauen im kollektiven Gedächtnis der Menschheit gegenüber Glas aufgebaut werden könnte. Gläserne Treppen (Abbildung 41) sollen nicht länger als Besonderheit oder Rarität erachtet werden.



Abbildung 41: Glastreppe im Verwaltungsgebäude Fischer GmbH
(Knaack, S. 375, [11])

Bei den zu erfüllenden Anforderungen an Tragwerke und deren Tragelemente spielen Ästhetik, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit, Wirtschaftlichkeit und die Sicherheit bedeutende Rollen. Da aber in der Praxis eine gleichwertige Kombination aller fünf Aspekte meist einem Wunschdenken entspricht, müssen Kompromisse gefunden werden. Im Glasbau setzt man dabei Prioritäten zugunsten der Sicherheit, die sich nicht selten auf Kosten der Wirtschaftlichkeit auswirken. Wie in allen Bereichen der Sicherheitsbetrachtung, die stets auf der Wahrscheinlichkeitsrechnung basiert, hängt die Wahl der Sicherheitsfaktoren deutlich von der Besorgnis des Einzelnen ab. Vergleichbar große Risiken werden zum Beispiel im Sport, insbesondere dann, wenn die Auffassung vertreten wird, Risiken durch selbständiges Handeln minimieren zu können, akzeptiert. Eine gewisse Nulltoleranz hingegen empfindet der Einzelne aber beispielsweise im Gegenstand des Flugverkehrs, die zur Wahl relativ großer Sicherheitsfaktoren führt. Nicht anders ist dies bei konstruktiven Glasbauten, die zu allem Übel noch begangen werden sollen (Abbildung 42).



Abbildung 42: Glasbrücke in Rotterdam (Knaack, S. 358, [4])

Ziel muss es daher sein dem großen Interesse und Bedarf an Glasbauwerken mit ausgeklügelten, sicheren und erschwinglichen Konstruktionen in Verbindungs- und Tragwerkstechnik Rechnung zu tragen, um der breiten Masse Zugang zu solch konstruktiven Schmuckstücken zu gewähren und so die emotionale Hemmschwelle des Einzelnen herabzusetzen. Denn „Glas – insbesondere als thermisch vorgespanntes Glas und als Verbundglas – muss den Vergleich mit im Bauwesen seit Jahrhunderten üblichen spröden Baustoffen, wie z.B. Natursteinen oder Keramiken nicht scheuen“ (Wörner, S. 232, [31]).

Ich hoffe, dass ich mit dieser Arbeit zeigen konnte, wie einfache Glaskonstruktionen mit dem altbewährten Baustoff Stahl adäquat kombiniert und bemessen werden können, welche Verbindungsmöglichkeiten existieren und welche Randbedingungen bei Stahl-Glas-Konstruktionen unbedingt beachtet werden müssen.

In dieser Diplomarbeit wurde versucht die neue Normenreihe der Eurocodes auf linienförmig gelagerte Verglasungen anzuwenden. Wünschenswert wäre es, das Bemessungsprogramm im Rahmen einer weiteren Diplomarbeit oder Dissertation auf punktförmig gelagerte Verglasungen auszuweiten.

„Es mag viele bedeutende Erfindungen geben. Ich persönlich halte die Erfindung des Glases für die wichtigste. Ich kann nur in großen, lichtdurchfluteten Zimmern arbeiten. Die Gedanken fliegen mir so zu, aber wie unwohl fühle ich mich überall dort, wo durch menschliche Unvernunft kein Lichtstrahl ins Zimmer dringen kann.“

(Joseph Freiherr von Eichendorff)

7 Anhang

7.1 Statische Werte für Riegel- und Pfostenprofile „System FW 50⁺“ Schüco

Die statischen Werte wurden zur Verfügung gestellt von Herrn Harald Wanke von der Alukönigstahl GmbH (Riegelprofile: Seite 76, Pfostenprofile: Seite 77), der auch das Plazet zur Veröffentlichung gab.

Abbildung	Art.-Nr.	a (mm)	c (mm)	Absteckung (mm)		I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	W _x (cm ³)	W _y (cm ³)	i _x (cm)	i _y (cm)	A (cm ²)	e _{s1} (cm)	e _{s2} (cm)	Kammermaß		
				mech.	uml.										Breite (mm)	Hohe (mm)	
	322 232	64	18	218	380	84,87	23,09	16,47	9,59	3,36	1,79	7,48	4,86	5,14	45,4	—	
	322 240	104	18	208	430	136,54	39,81	22,76	11,32	4,06	1,86	6,33	5,91	6,09	2,50	45,4	—
	322 250	124	18	208	460	215,35	33,80	30,15	13,51	4,80	1,82	9,33	6,80	7,14	2,50	45,4	—
	322 260	149	18	248	510	247,82	40,38	40,65	16,15	5,72	1,85	10,44	7,65	8,55	2,50	45,4	—
	322 270	8	10	160	608	115,81	39,36	21,95	8,36	3,31	1,83	10,46	4,72	5,28	2,29	4,71	—
	322 280	21	10	180	692	182,14	43,56	40,60	8,66	4,66	1,86	12,20	8,82	7,18	2,09	4,82	—
	322 290	27	10	200	792	254,31	47,18	60,00	8,28	6,70	1,83	14,11	9,00	9,42	1,82	2,08	—
	322 300	45	10	230	920	354,31	47,18	60,00	8,28	6,70	1,83	14,11	9,00	9,42	1,82	2,08	—
	322 310	28	10	160	608	115,81	39,36	21,95	8,36	3,31	1,83	10,46	4,72	5,28	2,29	4,71	—
	322 320	50	10	180	692	182,14	43,56	40,60	8,66	4,66	1,86	12,20	8,82	7,18	2,09	4,82	—
	322 330	6	10	160	608	115,81	39,36	21,95	8,36	3,31	1,83	10,46	4,72	5,28	2,29	4,71	—
	322 340	21	10	180	692	182,14	43,56	40,60	8,66	4,66	1,86	12,20	8,82	7,18	2,09	4,82	—
	322 350	27	10	200	792	254,31	47,18	60,00	8,28	6,70	1,83	14,11	9,00	9,42	1,82	2,08	—
	322 360	45	10	230	920	354,31	47,18	60,00	8,28	6,70	1,83	14,11	9,00	9,42	1,82	2,08	—
	322 370	28	10	160	608	115,81	39,36	21,95	8,36	3,31	1,83	10,46	4,72	5,28	2,29	4,71	—
	322 380	50	10	180	692	182,14	43,56	40,60	8,66	4,66	1,86	12,20	8,82	7,18	2,09	4,82	—
	322 390	70	10	200	792	254,31	47,18	60,00	8,28	6,70	1,83	14,11	9,00	9,42	1,82	2,08	—
	322 400	90	10	230	920	354,31	47,18	60,00	8,28	6,70	1,83	14,11	9,00	9,42	1,82	2,08	—
	322 410	110	10	270	1008	444,16	30,41	23,06	13,17	4,19	1,82	6,22	5,86	6,04	2,50	45,4	—
	322 420	130	10	310	1108	541,21	20,27	31,08	14,15	4,90	1,86	9,21	6,80	7,12	2,50	45,4	—
	322 430	150	10	360	1208	354,71	41,28	41,20	16,79	6,81	2,00	15,52	7,85	8,55	2,50	45,4	—
	322 440	180	10	410	1348	500,85	48,01	50,04	19,20	8,64	2,04	11,57	9,21	9,79	2,50	45,4	—
	322 450	200	10	440	1448	568,01	50,04	50,04	19,20	8,64	2,04	11,57	9,21	9,79	2,50	45,4	—
	322 460	220	10	460	1488	598,01	50,04	50,04	19,20	8,64	2,04	11,57	9,21	9,79	2,50	45,4	—
	322 470	240	10	480	1528	628,01	50,04	50,04	19,20	8,64	2,04	11,57	9,21	9,79	2,50	45,4	—
	322 480	260	10	500	1568	658,01	50,04	50,04	19,20	8,64	2,04	11,57	9,21	9,79	2,50	45,4	—
	322 490	280	10	520	1608	688,01	50,04	50,04	19,20	8,64	2,04	11,57	9,21	9,79	2,50	45,4	—
	322 500	300	10	540	1648	718,01	50,04	50,04	19,20	8,64	2,04	11,57	9,21	9,79	2,50	45,4	—
	322 510	320	10	560	1688	748,01	50,04	50,04	19,20	8,64	2,04	11,57	9,21	9,79	2,50	45,4	—
	322 520	340	10	580	1728	778,01	50,04	50,04	19,20	8,64	2,04	11,57	9,21	9,79	2,50	45,4	—
	322 530	50	10	85	320	19,07	5,03	5,54	1,89	2,35	1,16	3,76	3,44	3,06	1,67	2,53	—
	322 540	50	10	85	320	19,07	5,03	5,54	1,89	2,35	1,16	3,76	3,44	3,06	1,67	2,53	—
	322 550	50	10	85	320	19,07	5,03	5,54	1,89	2,35	1,16	3,76	3,44	3,06	1,67	2,53	—
	322 560	50	10	85	320	19,07	5,03	5,54	1,89	2,35	1,16	3,76	3,44	3,06	1,67	2,53	—
	322 570	50	10	85	320	19,07	5,03	5,54	1,89	2,35	1,16	3,76	3,44	3,06	1,67	2,53	—
	322 580	50	10	85	320	19,07	5,03	5,54	1,89	2,35	1,16	3,76	3,44	3,06	1,67	2,53	—
	322 590	50	10	85	320	19,07	5,03	5,54	1,89	2,35	1,16	3,76	3,44	3,06	1,67	2,53	—
	322 600	50	10	85	320	19,07	5,03	5,54	1,89	2,35	1,16	3,76	3,44	3,06	1,67	2,53	—
	322 610	50	10	85	320	19,07	5,03	5,54	1,89	2,35	1,16	3,76	3,44	3,06	1,67	2,53	—
	322 620	50	10	85	320	19,07	5,03	5,54	1,89	2,35	1,16	3,76	3,44	3,06	1,67	2,53	—
	322 630	50	10	180	417	43,30	50	12,71	13,80	2,31	2,60	6,14	3,34	3,41	4,00	70,4	—
	322 640	50	10	180	417	43,30	50	12,71	13,80	2,31	2,60	6,14	3,34	3,41	4,00	70,4	—
	322 650	50	10	180	417	43,30	50	12,71	13,80	2,31	2,60	6,14	3,34	3,41	4,00	70,4	—
	322 660	50	10	180	417	43,30	50	12,71	13,80	2,31	2,60	6,14	3,34	3,41	4,00	70,4	—
	322 670	50	10	180	417	43,30	50	12,71	13,80	2,31	2,60	6,14	3,34	3,41	4,00	70,4	—
	322 680	50	10	180	417	43,30	50	12,71	13,80	2,31	2,60	6,14	3,34	3,41	4,00	70,4	—
	322 690	50	10	180	417	43,30	50	12,71	13,80	2,31	2,60	6,14	3,34	3,41	4,00	70,4	—
	322 700	50	10	180	417	43,30	50	12,71	13,80	2,31	2,60	6,14	3,34	3,41	4,00	70,4	—
	322 710	50	10	180	417	43,30	50	12,71	13,80	2,31	2,60	6,14	3,34	3,41	4,00	70,4	—
	322 720	50	10	180	417	43,30	50	12,71	13,80	2,31	2,60	6,14	3,34	3,41	4,00	70,4	—

Statische Werte
für System:
FW 50°- Riegel

K 8604
Dal 19.03.01
FW 50°

Art-Nr.	h (mm)	c (mm)	Abwicklung (mm)		I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	W _x (cm ³)	W _y (cm ³)	I _x (cm)	I _y (cm)	A (cm ²)	e _{s1} (cm)	e _{s2} (cm)	e _{s3} (cm)	e _{s4} (cm)	Kammermaß Breite (mm)	Kammermaß Höhe (mm)
			mech.	uml.													
1	322 253	50	150	348	31,30	19,30	8,27	7,72	2,03	1,80	7,57	2,81	2,50	3,78	45,4	30,2	
2	322 253	50	150	378	35,35	22,76	12,81	9,10	2,42	1,88	8,11	3,70	2,50	4,42	45,4	42,4	
3	322 270 / 322 480	50	150	418	40,42	26,14	15,88	11,26	3,42	1,74	9,27	5,02	2,50	5,43	45,4	64,7	
4	322 280 / 322 470	105	15	260	405	167,25	37,05	12,06	4,13	1,82	8,79	5,92	2,50	6,18	45,4	85,4	
5	322 280 / 322 450	125	15	300	405	174,59	38,42	12,37	4,05	1,84	11,32	6,01	2,50	7,49	45,4	103,9	
6	322 300 / 322 450	150	15	300	348	423,78	44,37	40,89	17,27	5,86	12,32	7,83	2,50	8,67	45,4	129,0	
7	322 310 / 322 400	175	15	300	348	463,80	52,81	44,81	19,11	6,81	14,51	9,91	2,50	9,91	45,4	154,2	
8	322 350 / 322 350	175	15	300	348	503,82	60,74	48,74	20,99	7,81	16,61	11,91	2,50	11,91	45,4	179,3	
9	322 350 / 322 340	200	15	450	648	1010,13	78,74	92,23	30,70	7,27	2,00	18,10	10,80	10,80	45,4	179,3	
10	322 340	50	15	194	449	107,07	20,01	10,23	10,72	3,43	1,71	4,82	2,50	4,82	45,4	64,7	
11	322 340	105	15	234	489	145,15	31,07	16,47	12,43	4,14	1,80	6,84	2,50	6,84	45,4	85,4	
12	322 340	125	15	254	529	174,76	37,08	18,25	14,84	4,95	1,82	11,17	2,50	7,56	45,4	103,9	
13	322 340	150	15	303	579	210,07	43,04	21,83	17,21	5,80	1,86	12,17	2,50	8,34	45,4	129,0	
14	322 340	175	15	373	629,17	287,36	64,4	26,76	20,76	6,41	1,86	16,76	2,50	9,83	45,4	154,2	
15	322 340	200	15	423	679,17	350,88	72,86	28,14	22,22	7,22	2,00	18,26	2,50	11,03	45,4	179,3	
16	322 340	250	15	524	772	504,4	99,6	38,18	30,98	8,98	1,98	24,98	2,50	13,03	45,4	204,4	
17	322 340	300	15	624	872	658,0	118,0	43,82	35,42	10,72	2,04	28,42	2,50	15,03	45,4	229,5	
18	322 340	350	15	724	972	811,6	136,6	49,46	40,66	12,46	2,10	31,96	2,50	17,03	45,4	254,6	
19	322 340	400	15	824	1072	965,2	155,2	55,10	45,90	14,20	2,16	35,46	2,50	19,03	45,4	279,7	
20	322 340	450	15	924	1172	1118,8	173,8	60,74	51,14	15,94	2,22	38,96	2,50	21,03	45,4	304,8	
21	322 340	500	15	1024	1272	1272,4	192,4	66,58	56,38	17,68	2,28	42,46	2,50	23,03	45,4	329,9	
22	322 340	550	15	1124	1372	1426,0	211,0	72,42	61,62	19,42	2,34	45,96	2,50	25,03	45,4	355,0	
23	322 340	600	15	1224	1472	1579,6	229,6	78,26	66,86	21,16	2,40	49,46	2,50	27,03	45,4	380,1	
24	322 340	650	15	1324	1572	1733,2	248,2	84,10	72,10	22,90	2,46	52,96	2,50	29,03	45,4	405,2	
25	322 340	700	15	1424	1672	1886,8	266,8	89,94	77,34	24,64	2,52	56,46	2,50	31,03	45,4	430,3	
26	322 340	750	15	1524	1772	2040,4	285,4	95,78	82,58	26,38	2,58	59,96	2,50	33,03	45,4	455,4	
27	322 340	800	15	1624	1872	2194,0	304,0	101,62	87,82	28,12	2,64	63,46	2,50	35,03	45,4	480,5	
28	322 340	850	15	1724	1972	2347,6	322,6	107,46	93,06	29,86	2,70	66,96	2,50	37,03	45,4	505,6	
29	322 340	900	15	1824	2072	2501,2	341,2	113,30	98,30	31,60	2,76	70,46	2,50	39,03	45,4	530,7	
30	322 340	950	15	1924	2172	2654,8	359,8	119,14	103,54	33,34	2,82	73,96	2,50	41,03	45,4	555,8	
31	322 340	1000	15	2024	2272	2808,4	378,4	124,98	108,78	35,08	2,88	77,46	2,50	43,03	45,4	580,9	
32	322 340	1050	15	2124	2372	2962,0	397,0	130,82	114,02	36,82	2,94	80,96	2,50	45,03	45,4	606,0	
33	322 340	1100	15	2224	2472	3115,6	415,6	136,66	119,26	38,56	3,00	84,46	2,50	47,03	45,4	631,1	
34	322 340	1150	15	2324	2572	3269,2	434,2	142,50	124,50	40,30	3,06	87,96	2,50	49,03	45,4	656,2	
35	322 340	1200	15	2424	2672	3422,8	452,8	148,34	129,74	42,04	3,12	91,46	2,50	51,03	45,4	681,3	
36	322 340	1250	15	2524	2772	3576,4	471,4	154,18	134,98	43,78	3,18	94,96	2,50	53,03	45,4	706,4	
37	322 340	1300	15	2624	2872	3730,0	490,0	160,02	140,22	45,52	3,24	98,46	2,50	55,03	45,4	731,5	
38	322 340	1350	15	2724	2972	3883,6	508,6	165,86	145,46	47,26	3,30	101,96	2,50	57,03	45,4	756,6	
39	322 340	1400	15	2824	3072	4037,2	527,2	171,70	150,70	49,00	3,36	105,46	2,50	59,03	45,4	781,7	
40	322 340	1450	15	2924	3172	4190,8	545,8	177,54	155,94	50,74	3,42	108,96	2,50	61,03	45,4	806,8	
41	322 340	1500	15	3024	3272	4344,4	564,4	183,38	161,18	52,48	3,48	112,46	2,50	63,03	45,4	831,9	
42	322 340	1550	15	3124	3372	4498,0	583,0	189,22	166,42	54,22	3,54	115,96	2,50	65,03	45,4	857,0	
43	322 340	1600	15	3224	3472	4651,6	601,6	195,06	171,66	55,96	3,60	119,46	2,50	67,03	45,4	882,1	
44	322 340	1650	15	3324	3572	4805,2	620,2	200,90	176,90	57,70	3,66	122,96	2,50	69,03	45,4	907,2	
45	322 340	1700	15	3424	3672	4958,8	638,8	206,74	182,14	59,44	3,72	126,46	2,50	71,03	45,4	932,3	
46	322 340	1750	15	3524	3772	5112,4	657,4	212,58	187,38	61,18	3,78	129,96	2,50	73,03	45,4	957,4	
47	322 340	1800	15	3624	3872	5266,0	676,0	218,42	192,62	62,92	3,84	133,46	2,50	75,03	45,4	982,5	
48	322 340	1850	15	3724	3972	5419,6	694,6	224,26	197,86	64,66	3,90	136,96	2,50	77,03	45,4	1007,6	
49	322 340	1900	15	3824	4072	5573,2	713,2	230,10	203,10	66,40	3,96	140,46	2,50	79,03	45,4	1032,7	
50	322 340	1950	15	3924	4172	5726,8	731,8	235,94	208,34	68,14	4,02	143,96	2,50	81,03	45,4	1057,8	
51	322 340	2000	15	4024	4272	5880,4	750,4	241,78	213,58	69,88	4,08	147,46	2,50	83,03	45,4	1082,9	
52	322 340	2050	15	4124	4372	6034,0	769,0	247,62	218,82	71,62	4,14	150,96	2,50	85,03	45,4	1108,0	
53	322 340	2100	15	4224	4472	6187,6	787,6	253,46	224,06	73,36	4,20	154,46	2,50	87,03	45,4	1133,1	
54	322 340	2150	15	4324	4572	6341,2	806,2	259,30	229,30	75,10	4,26	157,96	2,50	89,03	45,4	1158,2	
55	322 340	2200	15	4424	4672	6494,8	824,8	265,14	234,54	76,84	4,32	161,46	2,50	91,03	45,4	1183,3	
56	322 340	2250	15	4524	4772	6648,4	843,4	270,98	239,78	78,58	4,38	164,96	2,50	93,03	45,4	1208,4	
57	322 340	2300	15	4624	4872	6802,0	862,0	276,82	245,02	80,32	4,44	168,46	2,50	95,03	45,4	1233,5	
58	322 340	2350	15	4724	4972	6955,6	880,6	282,66	250,26	82,06	4,50	171,96	2,50	97,03	45,4	1258,6	
59	322 340	2400	15	4824	5072	7109,2	899,2	288,50	255,50	83,80	4,56	175,46	2,50	99,03	45,4	1283,7	
60	322 340	2450	15	4924	5172	7262,8	917,8	294,34	260,74	85,54	4,62	178,96	2,50	101,03	45,4	1308,8	
61	322 340	2500	15	5024	5272	7416,4	936,4	300,18	265,98	87,28	4,68	182,46	2,50	103,03	45,4	1333,9	
62	322 340	2550	15	5124	5372	7570,0	955,0	306,02	271,22	89,02	4,74	185,96	2,50	105,03	45,4	1359,0	
63	322 340	2600	15	5224	5472	7723,6	973,6	311,86	276,46	90,76	4,80	189,46	2,50	107,03	45,4	1384,1	
64	322 340	2650	15	5324	5572	7877,2	992,2	317,70	281,70	92,50	4,86	192,96	2,50	109,03	45,4	1409,2	
65	322 340	2700															

7.2 Quellenverzeichnis

7.2.1 Bücher und Schriften

[1]	Altenbach, H., et al.: Ebene Flächentragwerke: Grundlagen der Modellierung und Berechnung von Scheiben und Platten. Berlin: Springer, 1998.
[2]	Bach, C.: Elastizität und Festigkeit: Die für die Technik wichtigsten Sätze und deren erfahrungsmäßige Grundlage, 6. Auflage. Berlin: Springer, 1911.
[3]	Bucak, Ö. & Heger, F.: Fassaden. In Stahlbau-Kalender 2003. Berlin: Ernst, 2003.
[4]	Bucak, Ö.: Glas im konstruktiven Ingenieurbau. In Stahlbau-Kalender 1999. Berlin: Ernst, 1999.
[5]	Compagno, A.: Intelligente Glasfassaden: Material, Anwendung, Gestaltung, 5. Auflage. Basel: Birkhäuser, 2002.
[6]	Czerny, F.: Tafeln für Rechteckplatten. In Beton-Kalender 1987: Taschenbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie die verwandten Fächer, Teil I. Berlin: Ernst, 1987.
[7]	Fink, J.: Studienblätter zur Vorlesung Stahlbau 1: WS 2004/2005. Skriptum, Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, 2004.
[8]	Girkmann, K.: Flächentragwerke: Einführung in die Elastostatik der Scheiben, Platten Schalen und Faltwerke, 6. Auflage. Wien, New York: Springer, 1986.
[9]	Hess, R., et al.: Glasbau-Praxis in Beispielen: Konstruktion und Berechnung, 1. Auflage. Berlin: Bauwerk, 2005.
[10]	Knaack, U., et al.: Konstruktiver Glasbau 2: Neue Möglichkeiten und Techniken. Köln: Müller, 2000.
[11]	Knaack, U.: Konstruktiver Glasbau. Köln: Müller, 1998.
[12]	Kolbitsch, A.: Hochbau-Konstruktionen 2: Unterlagen 2005. Skriptum, Institut für Hochbau und Technologie, TU Wien, 2005.
[13]	Krapfenbauer, T.: Bautabellen: Auflage 2006/07. Wien: Jugend & Volk, 2006.
[14]	Loughran, P.: Falling Glass: Glasschäden und Lösungen in der neueren Architektur. Basel: Birkhäuser, 2003.
[15]	Magistrat der Stadt Wien, MA 64 (Hrsg.): Verordnung des Magistrats der Stadt Wien über die bis zum 31. Dezember 2008 befristete Zulassung von Glas im Bauwesen in festigkeitstechnischer Sicht.
[16]	Mang, H., Hofstetter, G.: Festigkeitslehre. Wien, New York: Springer, 2000.
[17]	Mang, H.: Flächentragwerke. In Mehlhorn, G. [Hrsg.]: Der Ingenieurbau: Rechenorientierte Baumechanik, Teil 6. Berlin: Ernst, 1995.
[18]	Marcus, H.: Die Theorie elastischer Gewebe und ihre Anwendung auf die Berechnung biegsamer Platten: unter besonderer Berücksichtigung der trägerlosen Pilzdecke. Berlin: Springer, 1924.
[19]	Meyer zur Capellen, W.: Festigkeitslehre. In Bouché, Ch., et al. [Hrsg.]: Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, Berichtigter Neudruck der 13. Auflage, Band I. Berlin: Springer, 1974.
[20]	Petzold, A., et al.: Der Baustoff Glas: Grundlagen, Eigenschaften, Erzeugnisse, Glasbauelemente, Anwendungen, 3. Auflage. Berlin: Verl. für Bauwesen, 1990.
[21]	Ramberger, G. & Schnaubelt, S.: Stahlbau: 5. Auflage. Wien: Manz, 1998.
[22]	Rubin, H. & Schneider, K.-J.: Baustatik: Theorie I. und II. Ordnung, 4. Auflage. Düsseldorf: Werner, 1996.

[23]	Schittich, C., et al.: Glasbau-Atlas. Basel: Birkhäuser, 1998.
[24]	Schnauffer, D.: Glas im konstruktiven Hochbau. Diplomarbeit: TU Wien, 2000.
[25]	Schneider, K.-J.: Bautabellen für Ingenieure: mit Berechnungshinweisen und Beispielen, 16. Auflage. München, Unterschleißheim: Werner, 2004.
[26]	Schneider, U., et al.: aluminium/glas: baustoffe und ihre anwendung, band 1. Wien, New York: Springer, 2002.
[27]	Sedlacek, G., et al.: Glas im Konstruktiven Ingenieurbau: 1. Auflage. Berlin: Ernst, 1999.
[28]	Shen, X. & Lanzrath, M.: Tragende Glaskonstruktionen. In VDI-Gesellschaft Bautechnik [Hrsg.]: Bauen mit Glas: Tagung Baden-Baden, 1./2. März 2000, VDI Berichte 1527. Düsseldorf: VDI, 2000.
[29]	Siebert, G.: Entwurf und Bemessung von tragenden Bauteilen aus Glas. Berlin: Ernst, 2001.
[30]	Wormuth, R., Schneider, K.-J. [Hrsg.]: Baulexikon: Erläuterung wichtiger Begriffe des Bauwesens mit vielen Abbildungen, 1. Auflage. Berlin: Bauwerk, 2000.
[31]	Wörner, J.-D., et al.: Glasbau: Grundlagen, Berechnung, Konstruktion. Berlin: Springer, 2001.
[32]	Ziegler, F.: Technische Mechanik der festen und flüssigen Körper: 101 Aufgabe mit Lösungen, 3. Auflage. Wien, New York: Springer, 1998.

7.2.2 Normen

[33]	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewichte, Nutzlasten im Hochbau (ÖNORM B 1991-1-1). Ausgabe 2006-01-01
[34]	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten (ÖNORM B 1991-1-3). Ausgabe 2005-11-01
[35]	Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1: Grundlagen der Tragwerksplanung (ÖNORM ENV 1991-1). Ausgabe 1996-01-01
[36]	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln (ÖNORM B 1993-1-1). Ausgabe 2006-10-01
[37]	Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung - Teil 1: Hochbau (ÖNORM B 1990-1). Ausgabe 2004-05-01
[38]	ÖNORM B 3716-1: Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau - Teil 1: Grundlagen. Ausgabe 2006-03-01
[39]	ÖNORM B 3716-2: Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau - Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen. Ausgabe 2006-03-01
[40]	ÖNORM B 3716-3: Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau - Teil 3: Absturzsichernde Verglasungen. Ausgabe 2006-09-01
[41]	ÖNORM B 4000: Einwirkungen auf Tragwerke - Allgemeine Berechnungsgrundlagen für den Hochbau und Anwendungsregeln für Eigengewichte, Lagergüter, Nutzlasten im Hochbau, Schnee- und Eislasten. Ausgabe 2006-01-01
[42]	ÖNORM B 4014-1: Belastungsannahmen im Bauwesen - Statische Windwirkungen (nicht schwingungsanfällige Bauwerke). Ausgabe 1993-05-01
[43]	ÖNORM EN 572-1: Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas - Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften. Ausgabe 2004-09-01

[44]	ÖNORM EN 572-2: Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas - Teil 2: Floatglas. Ausgabe 2004-09-01
[45]	ÖNORM EN 572-8: Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas - Teil 8: Liefermaße und Festmaße. Ausgabe 2004-08-01
[46]	ÖNORM EN 572-9: Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas - Teil 9: Konformitätsbewertung/Produktnorm. Ausgabe 2005-01-01

7.2.3 Quellen aus dem Internet

/1/	Aquaserg: Сделайте аквариум своими руками. http://www.aqa.ru/doc.php?docid=39&id=21 (Abrufdatum: 2006-10-04)
/2/	Deutsches Institut für Bautechnik: Technische Regeln für die Bemessung und Ausführung punktförmig gelagerter Verglasungen (TRPV): Entwurfsfassung August 2005. http://www.dibt.de/de/data/eTRPV.pdf (Abrufdatum: 2006-10-13)
/3/	Deutsches Institut für Bautechnik: Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen (TRAV): Fassung Jänner 2003. http://www.dibt.de/de/data/eTRAV.pdf (Abrufdatum: 2006-10-13)
/4/	Deutsches Institut für Bautechnik: Technische Regeln für Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV): Entwurfsfassung September 2005. http://www.dibt.de/de/data/eTRLV.pdf (Abrufdatum: 2006-10-13)
/5/	Fa. Alutek-Profilsysteme: Verarbeitungsrichtlinie für Dach und Fassaden: Version 6/2004. http://www.alutek.de/verarbeitungshinweise/1.pdf (Abrufdatum: 2006-10-05)
/6/	Fa. Ertl Glas: Einscheibensicherheitsglas. http://www.ertl-glas.at/d/index.html (Abrufdatum: 2006-10-17)
/7/	Fa. LKW Walter: Der LKW: Abmessungen/Verladekapazitäten - Planensattel. http://www.lkw-walter.com/de/lkw.aspx (Abrufdatum: 2006-10-18)
/8/	Fornather, J.: Schneelasten auf Tragwerke neu geregelt: Hintergrund und Auswirkung auf die Baupraxis. http://www.on-norm.at/publish/fileadmin/user_upload/bilder/Produkte_Services/Dokumente/ON_Fachinformation_Schneelasten_auf_Tragwerke_2006.pdf (Abrufdatum: 2006-10-14)
/9/	Kubowitz, P.: Lastannahmen, Einwirkungen, Sicherheitskonzepte: Version 29.04.2004. http://bauko.bv.tu-berlin.de/baukonew/lehre_dateien/downloads/files/VL_Einwirkungen.pdf (Abrufdatum: 2006-10-10)
/10/	Mandler, C., et al.: Konstruktive Durchbildung: Wahlseminar WS 2001-02. http://www.iti.tuwien.ac.at/publik/lehre/nachlese/ws_glas/ws0102/pdf/thema_10.pdf (Abrufdatum: 2006-10-13)
/11/	Merk: Holz + Glas Fassadenbau: Handbuch für Architekten und Planer. www.finnforest.com/de/default.asp?path=10232;10436;10437;10470;10473;10749;10750 (Abrufdatum: 2006-10-11)
/12/	Meyer, D.: Häute aus Glas und Stahl: Version 12/2002. http://www.tec21.ch/pdf/tec21_122002686.pdf#search=%22pre%C3%9Fleisten%20glas%22 (Abrufdatum: 2006-10-10)
/13/	Nigischer, W.: Eigenschaften des Glases: Version 2.0, Juli 2003. http://www.fn-glas.at/Glasdaten.htm (Abrufdatum: 2006-04-13)

/14/	Nigischer, W.: Geschichte des Glases: Version 2.0, Mai 2004. http://www.fn-glas.at/geschichte.htm (Abrufdatum: 2006-04-13)
/15/	Nigischer, W.: Glas und seine Rohstoffe: Version 1.8, November 2001. http://www.fn-glas.at/glas_def.htm (Abrufdatum: 2006-04-13)
/16/	Nigischer, W.: Warum ist Glas durchsichtig? http://www.fn-glas.at/Warum%20ist%20Glas%20durchsichtig.htm (Abrufdatum: 2006-04-13)
/17/	Ofner, R.: Leichtbau und Glasbau: Version Jänner 2006. http://www.shf.tugraz.at/pdf/education/glas/GlasbauSkript06.pdf (Abrufdatum: 2006-04-13)
/18/	Sanco: Dachverglasungen: Version Oktober 2006. http://www.heizglas.de/uploads/media/Glasbuch_04_Kapitel9.pdf#search=%22pre%20C3%9Fleisten%20abmessungen%20glas%22 (Abrufdatum: 2006-10-10)
/19/	Wikipedia, Die freie Enzyklopädie: Glas: Version Oktober 2006. http://de.wikipedia.org/wiki/Glas (Abrufdatum: 2006-10-22)

7.2.4 Abbildungen

Abbildung 1	Thermisches Ausdehnungsverhalten von Glas (Sedlacek, S. 11, [27])
Abbildung 2	Zusammensetzung von Floatglas (Siebert, S. 9, [29])
Abbildung 3	Floatverfahren (Ofner, S. 2, Nr. /17/)
Abbildung 4	Zugstab aus Stahl mit Kerbe (Ofner, S. 3, Nr. /17/)
Abbildung 5	Zugstab aus Glas mit Kerbe (Ofner, S. 3, Nr. /17/)
Abbildung 6	Thermische Vorspannung von Glas (Ofner, S. 5, Nr. /17/)
Abbildung 7	Eigenspannung in thermisch vorgespanntem Glas (Ofner, S. 5, /17/)
Abbildung 8	Spannungen über die Glasdicke in ESG oder TVG bei Biegebeanspruchung (Ofner, S. 5, /17/)
Abbildung 9	Bruchbild von Floatglas, TVG und ESG (Ofner, S. 8, /17/)
Abbildung 10	Herstellung von Verbundsicherheitsglas mit PVB-Folie (Ofner, S. 7, /17/)
Abbildung 11	Verformung einer Verbundglasscheibe bei vollem Schubverbund (Wörner, S. 153, [31])
Abbildung 12	Verformung einer Verbundglasscheibe bei fehlendem Schubverbund (Wörner, S. 154, [31])
Abbildung 13	Spannungsverteilung bei vollständigem Schubverbund (Wörner, S. 154, [31])
Abbildung 14	Spannungsverteilung bei teilweisem Schubverbund (Wörner, S. 155, [31])
Abbildung 15	Spannungsverteilung ohne Schubverbund (Wörner, S. 155, [31])
Abbildung 16	Aktivierung von Membrantragwirkung bei großen Verformungen von vierseitig linienförmig gelagerten Scheiben (Wörner, S. 167, [31])
Abbildung 17	Bezeichnung von Verglasungen gemäß /4/ (Siebert, S. 3, [29])
Abbildung 18	Frei aufliegende Platte (Meyer zur Capellen, S. 436, [19])
Abbildung 19	Aufbau von Isoliergläsern (Wörner, S. 18, [31])
Abbildung 20	Belastungs- und Verformungsverhalten von Mehrscheiben-Isolierglas (Bucak, S. 556, [4])
Abbildung 21	Mitwirkung der zweiten Scheibe (ÖNORM B 3716-1, S. 14, [38])
Abbildung 22	Ablaufschema der Stahlherstellung (Fink, Bl. 2.1/2, [7])

Abbildung 23	Mineralbad in Bad Cannstatt (Knaack, S. 93, [11])
Abbildung 24	Linear elastisch-ideal plastisches Spannungs-Dehnungsverhalten und Materialkennwerte des Baustoffs Stahl (Fink, Bl. 2.3/4, [7])
Abbildung 25	Beispiel für eine Reibverbindung (Wörner, S. 97, [31])
Abbildung 26	Beispiel für eine Lochleibungsverbindung (Wörner, S. 96, [31])
Abbildung 27	Haltekonstruktion „Spider“ für eine Isolierverglasung (Kolbitsch, S. 16, [12])
Abbildung 28	Bewegungsmöglichkeiten bei statisch bestimmter Lagerung (links) und mögliche Lage der Gelenke bei Punkthaltern (rechts) (Siebert, S. 160, [29])
Abbildung 29	Beispiel für eine Klebeverbindung (Wörner, S. 95, [31])
Abbildung 30	Typen linienförmiger Lagerung (Wörner, S. 80, [31])
Abbildung 31	Brüstungselemente mit eingespannten Glasscheiben (Wörner, S. 80, [31])
Abbildung 32	Formen der elastischen Zwischenlagen von Linienlagerungen (Siebert, S. 157, [29])
Abbildung 33	Lagerung einer Isolierglasscheibe und Soghalterung (Wörner, S. 81, [31])
Abbildung 34	Verschiedene Arten der Stoßfugenabdichtung (Wörner, S. 91, [31])
Abbildung 35	Klotzung von Isoliergläsern (Wörner, S. 93, [31])
Abbildung 36	Bezeichnung der Tragwerkselemente aus Sicht der Last
Abbildung 37	Lage der Tragwerksteile für den horizontalen (links) und den geneigten Fall (rechts)
Abbildung 38	Abtreibendes Moment bei Angriffspunkt der Querlast an der oberen Querschnittskante (Fink, Bl. 5.4/73, [7])
Abbildung 39	Abbildung 39: Aluminiumpressleiste mit Wärmedämmung, mit Riegel (links) und Pfosten (rechts) im Maßstab 1: 2,5 [1 Isolierglas, 2 Druckprofil, 3 Verklotzung, 5 Dämmprofil, 6 Dichtung, 8 Riegelprofil, 9 Pfostenprofil] (Schittich, S. 155, [23])
Abbildung 40	Verbundverhalten von zwei Scheiben bei unterschiedlicher Verbundsteifigkeit (Bucak, S. 533, Nr. [4])
Abbildung 41	Glastreppe im Verwaltungsgebäude Fischer GmbH (Knaack, S. 375, Nr. [11])
Abbildung 42	Glasbrücke in Rotterdam (Knaack, S. 358, [11])

7.2.5 Tabellen

Tabelle 1	Materialkennwerte von Floatglas und Stahl gemäß /17/
Tabelle 2	Charakteristische Festigkeit und Teilsicherheitsbeiwerte von Floatglas, TVG und ESG gemäß [38]
Tabelle 3	Zulässige Spannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Floatglas, TVG und ESG gemäß [38]
Tabelle 4	Zulässige Durchbiegungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für Horizontal- und Vertikalverglasungen in Abhängigkeit der Isoliereigenschaften gemäß [38]
Tabelle 5	Lastaufstellung für nicht isolierende Verglasungen
Tabelle 6	Ermittlung von Spannungen und Deformation einer gleichmäßig belasteten, gelenkig gelagerten Rechteckplatte (Czerny, S. 315, [6])
Tabelle 7	Tafel zur Ermittlung der Beiwerte A_t und C_t (Bucak, S. 542, [4])
Tabelle 8	Tafel zur Ermittlung der Beiwerte κ_w und κ_σ (Bucak, S. 542, [4])
Tabelle 9	Tabellenwerte zur Anwendung der Bach'schen Plattenformel (Meyer zur Capellen, S. 435, [19])
Tabelle 10	Lastaufstellung für Mehrscheiben-Isolierverglasungen

Tabelle 11	Verteilung der Einwirkungen gemäß [38]
Tabelle 12	Beiwert B_V gemäß [38]
Tabelle 13	Rechenwerte für klimatische Einwirkungen und den resultierenden isochoren Druck p_0 gemäß [38]
Tabelle 14	Zulässige Durchbiegungen gemäß [41]
Tabelle 15	Konventionelle und verwendete Bezeichnungen der Tragwerkselemente
Tabelle 16	Verglasungsarten und ihr zugewiesener Aufbau

...und nun noch ein Dank an jene, die mich im Laufe meines Lebens positiv beeinflusst oder mir weitergeholfen haben:

Meinen Eltern Waltraud und Kurt Hochhauser, denen ich diesen Erfolg zu verdanken habe.

Meiner lieben Freundin Sabine Seidner, die mich immer wieder motivieren konnte.

Meiner Schwester Sonja Hochhauser und ihrer Familie Thomas, Lukas und Tabea.

Meinen Großeltern Elfriede Leidolt, Helmut Reiter sowie Josefine und Anton Hochhauser.

Renate Kronsteiner, Maximilian Ebenführer, Johannes Karl, Matthias Aschaber, Helmut Reiter sowie Irmgard Leidolt dafür, dass sie mir den steinigen Weg der Ausbildung ebnen halfen.

Meinen Mitbewohnern Jochen Wakolbinger, Michael Gröbl, Stefan Rohrauer, Walter Gröbl, Alexander Kotschal, Manuel Hofer und Christian Krickl für viele Jahre Rock ´n´ Roll.

Meinen Studienkollegen Alexander Litschauer, Andreas Rappersdorfer, Bernhard Höfer, Christian Pummer, Georg Trauner, Hannes Edinger, Jakob Lederer, Johannes Ornetsmüller, Klaus Oberhauser, Michael Kern, Michael Paschinger, Paul Cis, Philipp Egger, Sebastian Marberger, Sonja Wolfger, Stefan Marinitsch, Stefan Resch und Werner Vogl für viel Freude im und am Studium.

All meinen Verwandten und meinen engsten Freunden Andreas Reiter, Antje Eisterhuber, Bettina Schmeißl, Björn Leidolt, Christian Vrecko, Christina Troppmann, Erich Pöttinger, Erkin Bayirli, Erwin Reisner, Florian Schlager, Gerd Leidolt, Hermann Lacheiner, Irene Leidolt, Judith Winter, Jürgen Waser, Lukas Oberdammer, Matthias Gruber, Michael Schmid, Niko Maierhofer, Philipp Fischer, Raoul Zeitlinger, Richard Hebesberger, Richard Metz, Simon Kronsteiner, Stefan Ehrenbrandner, Tobias Bachner, Wolfgang Angerbauer und Wolfgang Berger.