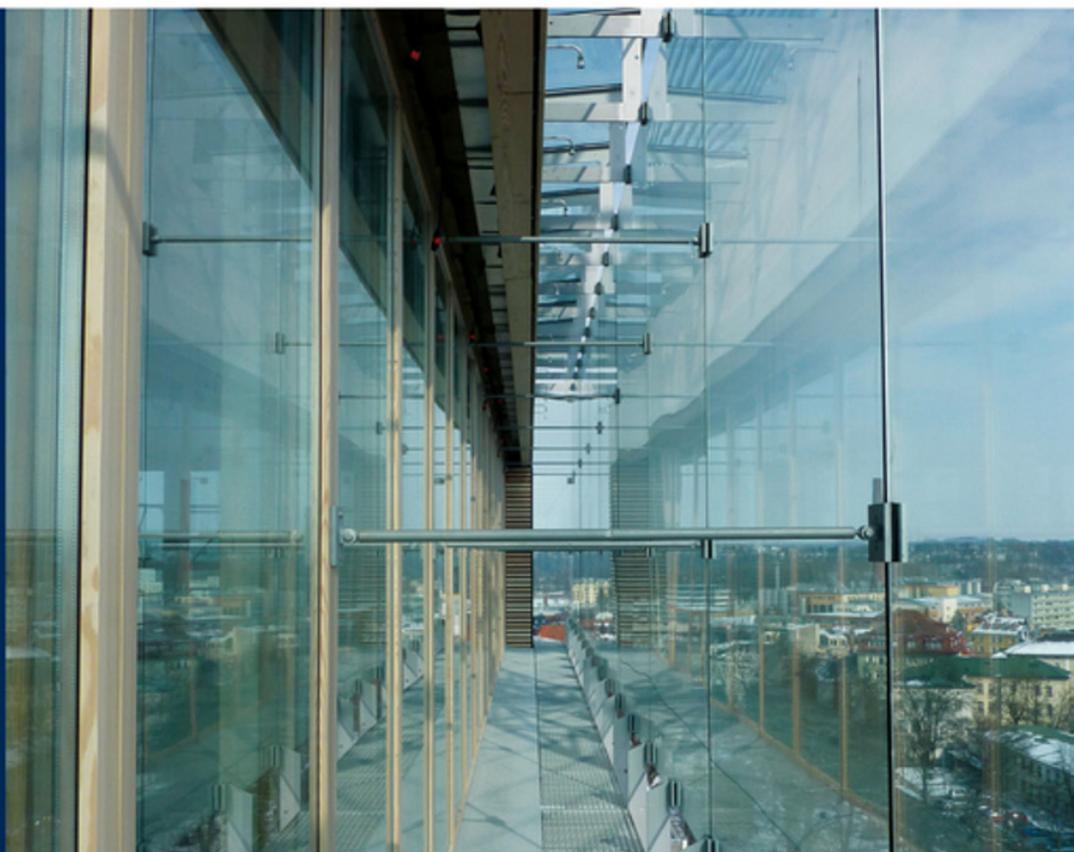


Tragende Bauteile aus Glas

Grundlagen, Konstruktion, Bemessung,
Beispiele

Geralt Siebert, Iris Maniatis

Bauingenieur-Praxis



Geralt Siebert, Iris Maniatis

Tragende Bauteile aus Glas
Grundlagen, Konstruktion, Bemessung, Beispiele

2. Auflage

Tragende Bauteile aus Glas

**Grundlagen, Konstruktion, Bemessung,
Beispiele**

Geralt Siebert, Iris Maniatis

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Geralt Siebert	Ingenieurbüro Dr. Siebert
Dr.-Ing. Iris Maniatis	Büro für Bauwesen
Universität der Bundeswehr München	Gotthelfstraße 24
Professur Baukonstruktion	D-81677 München
und Bauphysik	Telefon (089) 9240 1410
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau	www.ing-siebert.de
Werner-Heisenberg-Weg 39	
D-85577 Neubiberg	
Telefon (089) 6004-2521	
www.unibw.de/glasbau	

Titelbild: Sparkasse Rosenheim, energetische Sanierung.
Punktförmig gelagerte Doppelfassade mit absturzsichernder Funktion

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2012 Wilhelm Ernst & Sohn,
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,
Rotherstr. 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten.
Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in
irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren –
reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen,
verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of
this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other
means – nor transmitted or translated into a machine language without written
permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen
Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von
jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um
eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen
handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung: stilvoll° | Werbe- und Projektagentur, Waldulm
Herstellung: pp030 - Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin
Druck und Verarbeitung: betz-Druck GmbH, Darmstadt

Printed in the Federal Republic of Germany.
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

2. vollständig überarbeitete Auflage
Print ISBN: 978-3-433-02914-5
ePDF ISBN: 978-3-433-60279-9
ePub ISBN: 978-3-433-60280-5
mobi ISBN: 978-3-433-60281-2
oBook ISBN: 978-3-433-60278-2

Vorwort zur 2. Auflage

Seit der ersten Auflage dieses Buches sind nun mehr als zehn Jahre vergangen. Der Baustoff Glas hat sich inzwischen zu einem festen Bestandteil in der Architektur etabliert. Mittlerweile übernehmen Verglasungen als Bestandteil in der Gebäudehülle multifunktionelle Eigenschaften, neben ästhetischen Aspekten (Einfärbung, Bedruckung), genügen diese auch höchsten Anforderungen an Wärme- und/oder Sonnenschutz (Beschichtung, Isolierverglasung, etc.). Darüber hinaus ist ein Trend zu immer größeren Scheibenformaten zu beobachten. Ebenso ist gebogenes Glas durch die ständig komplexer werdenden Gebäudegeometrien, insbesondere freigeformte Geometrien, ein fester Bestandteil geworden.

Dem wachsenden Anwendungsgebiet wurde zum einen durch neue, immer noch auf dem „zul- σ -Konzept“ basierende Technische Regeln des DIBt Rechnung getragen, zum anderen gibt es zwischenzeitlich mit DIN 18008 eine nationale Bemessungsnorm auf dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte. Die Aktualisierung von Regelungen – auch im europäischen Kontext – gestaltet die Situation nicht unbedingt übersichtlicher.

In der neuen Auflage dieses Buches wurden u. a. die oben genannten Aspekte eingearbeitet sowie eine Unterteilung in drei Hauptabschnitte vorgenommen: nach den eher theoretischen und von Bemessungsvorschriften unabhängigen Grundlagen in Teil I folgen in Teil II die baurechtlichen Randbedingungen und Umsetzungen in Regeln sowie Hinweise zu Entwurf und Konstruktion.

In Teil III sind Beispiele einschließlich Hilfsmittel zur Bemessung zu finden, die bedingt durch das vergrößerte Anwendungsgebiet sowie alternativer Nachweisführung nach „alten“ Technischen Regeln (TRLV, TRAV, TRPV) und zukünftig genormten Regeln (DIN 18008) erheblich größeren Umfang einnehmen. Die Bearbeitung dieser Normenreihe durch den Arbeitsausschuss begann 2002, seit 2010 darf sich der Autor als Obmann einbringen.

Des Weiteren wurden die Teile I und II teilweise neu strukturiert und erheblich erweitert. So wurden z. B. in Teil I die Themen *Gebogenes Glas*, *Beschichtung und Oberflächenbehandlung von Glas*, *Dünnglas* sowie *Brandschutzverglasungen*, *Sicherheitsverglasungen* und *Photovoltaikverglasungen* neu aufgenommen.

Zum Teil umfangreiche Ergänzungen waren erforderlich bei *Mehrscheiben-Isolierverglasung*, Darstellung der *Bemessungsregeln* (hier auch insbesondere der zugrunde liegenden Konzepte) einschließlich der Überarbeitung und Erweiterung der *Beispiele*. Komplett überarbeitet und ergänzt wurde auch das Kapitel *Baurechtliche Situation*, hier sei insbesondere auf die neue europäische Bauproduktenverordnung hingewiesen. Ebenso wurden die in der ersten Auflage noch ausgesparten Themen wie beispielsweise *Kleben*, *Tragende Bauteile* und *Bauteilversuche* aufgenommen.

Das Buch soll den in der Praxis tätigen Planer und Anwender bei Entwurf, Konstruktion und Bemessung mit dem Baustoff Glas unterstützen, ist aber auch in Forschung und Lehre an Hochschulen und Universitäten sowohl für Studierende wie auch Wissenschaftler geeignet, die in das Themengebiet einsteigen möchten.

Herzlich gedankt wird an dieser Stelle Frau Dipl.-Ing. M. Herr vom DIBt für die zahlreichen Anregungen in Kapitel 12 und interessanten Gespräche zum Baurecht.

Auch dem Verlag sei an dieser Stelle herzlich für sein Verständnis und seine Geduld gedankt – dadurch konnte die vorliegende Auflage noch die letzte Fassung der DIN 18008 berücksichtigen.

München, im August 2012

Iris Maniatis und Geralt Siebert

Vorwort

In einer Vielzahl von Veröffentlichungen – z. T. ohne textliche Erläuterung der baurechtlichen und konstruktiven Probleme – wird der Eindruck erweckt, beim Bauen mit Glas handelt es sich (inzwischen) um eine Bauweise mit anerkannten Regeln der Technik und bauaufsichtlich eingeführten Regelungen. Tatsächlich gibt es hier aber nur sehr wenige anerkannte Regeln im Sinne von DIN-Normen oder vergleichbarem. Die Praxis zeigt, dass das Wissen darüber – über die Tatsache fehlender Regelungen und gleichermaßen über richtiges Entwerfen, Konstruieren und Bemessen von Glas – nur sehr begrenzt verbreitet ist. Zum Teil wird offenbar davon ausgegangen, die anderen am Bau Beteiligten (Architekt, Tragwerksplaner, Statiker, Prüffingenieur, Baubehörde, ausführende Firma) seien fachkundig und würden die eigenen Defizite kompensieren.

Dass ein als Gestaltungsmittel eingesetzter Baustoff Glas auch ein tragendes Konstruktionselement ist und als solches schon in der Planungsphase die ihm zukommende Beachtung erfahren muss, wird des Öfteren übersehen. So werden ohne Rücksicht auf statisch-konstruktive Randbedingungen Gebäuderaster konsequent „durchgezogen“ und unnötig aufwendige Konstruktionselemente projektiert.

Im Zusammenhang mit der Erteilung eines Lehrauftrages für „Konstruktiven Glasbau“ an der TU München entstand die Idee eines Buches für die in der Praxis tätigen Ingenieure und Planer. Es soll zum Basiswissen für einen Einstieg in den „Konstruktiven Glasbau“ die wichtigsten Grundkenntnisse für richtiges – d. h. dem Werkstoff Glas gerecht werdendes – Entwerfen und Konstruieren vermitteln. Außerdem wird versucht, zum Verständnis der auf der Bruchmechanik basierenden Bemessung nationaler und zukünftiger europäischer Regelungen beizutragen.

Die üblicherweise im Berufsleben der meisten Bauingenieure bei der Verwendung der Werkstoffe Holz, Beton oder Stahl – wegen ausreichend eingeführter Technischer Regeln – nur selten anzuwendende „Zustimmung im Einzelfall“ ist fast die Regel bei der Ausführung von Konstruktionen mit Glas. Dies gilt insbesondere für anspruchsvolle Konstruktionen wie beispielsweise bei der Verwendung von Punkthaltern in Bohrungen oder bei Absturzsicherungen. Deshalb werden neben den wenigen eingeführten Technischen Baubestimmungen auch die baurechtliche Situation bzw. die baurechtlichen Prinzipien im europäischen Kontext näher betrachtet.

Dieses Buch soll kein Ersatz für elektronische Berechnungsprogramme oder Tabellenwerke mit Tafeln für Beanspruchung oder Durchbiegung sein. Ebenfalls soll es nicht als „Rezeptbuch“ verstanden werden, denn solche sind nur sinnvoll bei standardisierten Lösungen und solche gibt es im konstruktiven Glasbau äußerst selten. Es werden die Grundlagen der Bruchmechanik und statistischen Auswertung nach Weibull zum Verständnis des Materials und der Bemessung dargestellt und an Hand kleiner Beispiele erläutert. Eine Bemessung üblicher Glasbauteile ist mit den darauf basierenden Regelungen oder Hinweisen zur Anwendung möglich, die für Sonderaufgaben zusätzlich erforderliche Kenntnisse sind aus der weiterführenden Literatur – in der Regel Dissertationen – zu entnehmen. Für Entwurf und Konstruktion sind die fertigungstechnischen Grenzen von veredeltem Glas genannt.

Im letzten Kapitel finden sich zur Verdeutlichung Beispiele ausgeführter Bauten mit Anwendungen aus den wichtigsten Bereichen (von liniengelagerter Überkopfverglasung nach eingeführten Technischen Regeln bis zu punktgehaltener Isolierverglasung).

Um den Rahmen des Buches nicht zu sprengen, konnten einige Problembereiche nicht mit aufgenommen werden wie beispielsweise versuchstechnische Nachweise der Resttragfähigkeit, gebogenes Glas, Absturzsicherungen, Lochleibungsverbindungen, Probleme der Stabilität und Theorie II. Ordnung, Klebung von Glas – insbesondere zur kontinuierlichen Krafteinleitung bei aussteifender Verglasung. Gegebenenfalls werden diese Themen bei einer Neuauflage oder Erweiterung zu berücksichtigen sein.

Gedankt wird den Kollegen der TU München, den Vertretern der Bauaufsicht (Bundes- und Länderebene, besonders Frau Dipl.-Ing. I. Maniatis vom DIBt für Anregungen zu Kapitel 9) und dem Verlag für Unterstützung und Geduld.

Für Anregungen oder Wünsche zu einer eventuellen Erweiterung ist der Autor dankbar.

München, im November 2000

Geralt Siebert

Inhalt

Vorwort	V
Teil I Grundlagen	
1 Einleitung	1
1.1 Einführendes Beispiel	1
1.2 Begriffsbestimmung	2
2 Der Werkstoff Glas	5
2.1 Einleitung	5
2.2 Definitionen von Glas	7
2.3 Struktur und Zusammensetzung von Glas	9
2.4 Herstellung von Glas	11
2.4.1 Rohstoffe	11
2.4.2 Produktion von Flachglas	12
2.5 Veredelung von Flachglas	15
2.5.1 Mechanische Bearbeitung	16
2.5.2 Elemente aus mehreren Scheiben (Isolierverglasung, Verbundgläser)	17
2.5.3 Gläser mit Vorspannung	17
2.5.4 Beschichtung und Oberflächenbehandlung von Flachglas	18
2.5.5 Gestaltetes Verbundglas	20
2.6 Gebogenes Glas	20
2.6.1 Thermisch gebogenes Glas	20
2.6.2 Kaltverformtes Glas	22
2.7 Sonderprodukte	23
2.7.1 Glasrohre	23
2.7.2 Profilbauglas	23
2.8 Elastische Kenngrößen	24
2.8.1 Elastizitätsmodul E	24
2.8.2 Theoretische und praktische Festigkeit	24
2.8.3 Allgemeine weitere Zahlenwerte	25
3 Bruchmechanik und Auswertung nach Weibull	27
3.1 Allgemeines	27
3.2 Grundgleichungen der Bruchmechanik	27
3.3 Statistische Auswertung nach Weibull	29
3.3.1 Allgemeines	29
3.3.2 Verteilungsfunktion	30
3.3.3 Punktschätzungen für θ und β	30
3.3.4 Grafische Darstellung im Weibull-Netz	31
3.3.5 Vertrauensbereiche	31
3.3.6 Beispiel 1 aus DIN 55303-7	31

3.4	Lösung der Grundaufgaben für Lebensdauerberechnungen.....	34
3.4.1	Allgemeines	34
3.4.2	Umrechnung der Belastungsgeschichte.....	34
3.4.3	Umrechnung der Lastfläche und Spannungsverteilung.....	37
3.4.4	Umrechnung der Wahrscheinlichkeit.....	39
3.5	Beispiele zu Lebensdauerberechnungen	39
3.5.1	Berücksichtigung unterschiedlicher Belastungsgeschichten	39
3.5.2	Berücksichtigung unterschiedlicher Lastflächen und Lastformen	40
3.5.3	Berücksichtigung unterschiedlicher Bruchwahrscheinlichkeiten.....	42
4	Festigkeit und Bruchhypothese.....	43
4.1	Allgemeines	43
4.2	Einflussfaktoren auf die Festigkeit.....	43
4.2.1	Mechanischer Bearbeitungszustand von Oberfläche und Kanten	43
4.2.2	Spannungsverteilung und Flächengröße	44
4.2.3	Umgebungsbedingungen und Alter.....	44
4.2.4	Belastungsgeschwindigkeit und -dauer	45
4.2.5	Vorspannung der Oberfläche	45
4.3	Unterscheidung von Festigkeit und Prüffestigkeit	45
4.3.1	Allgemeines und Definitionen	45
4.3.2	Beispiel zur Erläuterung.....	46
4.3.3	Schlussfolgerungen aus dem Beispiel.....	49
4.3.4	Auswirkung einer Vorspannung auf Gleichungen der Bruchmechanik	50
4.4	Versuche nach DIN.....	51
4.5	Bruchhypothese.....	52
4.5.1	Allgemeines	52
4.5.2	Versuche zur Bruchhypothese.....	52
4.5.3	Schlussfolgerungen und Bruchhypothese für Glas.....	54
5	Vorgespanntes Glas.....	56
5.1	Allgemeines	56
5.2	Herstellung.....	57
5.3	Bruchverhalten	58
5.4	ESG	59
5.4.1	Spontanversagen	60
5.4.2	Heißlagerungsprüfung (Heat-Soak-Test)	60
5.5	TVG	61
5.6	Verteilung der Vorspannung über Querschnitt und Bauteil	62
5.6.1	Ermittlung der Vorspannung durch Versuch und Rechnung.....	62
5.6.2	Spannungsverlauf in verschiedenen Zonen	63
5.6.3	Festigkeitskennwerte.....	64
5.7	Dünnglas	65
6	Verbundglas und Verbundsicherheitsglas	66
6.1	Allgemeines	66
6.2	Rohstoffe und Methoden zur Herstellung von Verbundglas	67
6.2.1	Polyvinylbutyral (PVB)	68
6.2.2	Ethylen-Vinylacetat (EVA).....	70

6.2.3	SentryGlas® (SG)	71
6.2.4	Gießharze	72
6.3	Tragverhalten von Verbundglas	73
6.3.1	Schubbeanspruchung.....	74
6.3.2	Biegebeanspruchung	74
6.4	Resttragverhalten von gebrochenem Verbundglas	76
6.4.1	Allgemeines	76
6.4.2	Resttragfähigkeit verschiedener Zwischenschichten.....	77
6.4.3	Spannungsverteilung und -umlagerung im Bereich eines Risses	77
6.4.4	Resttragfähigkeit punktgehaltener abgespannter Vordächer mit unterschiedlichen Gläsern und Zwischenlagenmaterial	79
7	Berechnung von Verbundglas	82
7.1	Allgemeines	82
7.2	Einachsig abtragende Bauteile (Balken)	82
7.2.1	Allgemeines	82
7.2.2	Analytische Lösungen	83
7.2.3	Finite-Elemente-Methode (FEM).....	86
7.2.4	Beispiel	88
7.3	Zweiachsig abtragende Bauteile (Platten).....	93
7.3.1	Analytische Lösungen	93
7.3.2	Finite-Elemente-Methode (FEM).....	93
7.3.3	Beispiel	95
7.4	Schlussfolgerungen	97
8	Brandschutzverglasungen	99
8.1	Allgemeines	99
8.2	Gegenwärtige und künftige Regelungen	101
8.3	Zusätzliche Anforderungen	102
9	Sicherheitsverglasungen	103
9.1	Angriffhemmende Verglasungen	103
9.2	Durchschusshemmende Verglasungen	103
9.3	Sprengwirkungshemmende Verglasungen	103
10	Photovoltaikverglasungen	105
10.1	Allgemeines	105
10.2	Elementtypen	105
10.3	Integration in die Gebäudehülle	106
10.4	Anforderungen an Entwurf und Bemessung	108
10.5	Befestigungssysteme	108
11	Isolierverglasungen	110
11.1	Allgemeines	110
11.2	Beanspruchung und rechnerische Erfassung von 2-Scheiben-Isolierglas	112
11.2.1	Allgemeines und Definitionen	112
11.2.2	Der Druck im SZR	114
11.2.3	Einführung dimensionsloser Variablen und vereinfachte Lösung.....	116

11.2.4	Übersicht der Berechnung nach TRLV bzw. DIN 18008	118
11.2.5	Beispiel und Diskussion	122
11.3	Beanspruchung und rechnerische Erfassung von Mehrscheiben-Isolierglas.....	124
11.3.1	Allgemeines	124
11.3.2	Die Drücke in den SZR	125
11.3.3	Einführung dimensionsloser Variablen und vereinfachte Lösung.....	126
Teil II	Anwendungen	
12	Baurechtliche Situation	131
12.1	Allgemeines	131
12.2	Harmonisierung technischer Regelungen.....	132
12.2.1	Bauproduktenrichtlinie (BPR) und Bauproduktengesetz (BauPG)	132
12.2.2	Bauproduktenverordnung (BauPVO).....	133
12.3	Musterbauordnung (MBO).....	134
12.4	Bauregelliste.....	136
12.4.1	Allgemeines	136
12.4.2	Bauprodukte und Bauarten aus Glas	138
12.5	Musterliste der Technischen Baubestimmungen	139
12.5.1	Allgemeines	139
12.5.2	Technische Regeln für Glas	141
12.6	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis.....	143
12.7	Zustimmung im Einzelfall.....	145
12.8	Europäische technische Zulassung (ETA)	146
12.9	Ausblick	146
13	Entwurf und konstruktive Details	147
13.1	Allgemeines	147
13.2	Anwendungsbereich und Glasauswahl.....	147
13.3	Fertigungstechnische Grenzen	148
13.4	Lagerung von Glasbauteilen.....	149
13.4.1	Allgemeines	149
13.4.2	Mechanische Verbindungen.....	150
13.4.3	Klebeverbindungen	160
14	Berechnung und Bemessung	166
14.1	Allgemeines	166
14.2	Linienförmig gelagerte Verglasungen.....	167
14.3	Punktförmig gelagerte Verglasungen.....	167
14.3.1	Allgemeines	167
14.3.2	Nachweis der Verwendbarkeit	167
14.3.3	Ausblick	172
14.4	Klebeverbindungen	172
14.4.1	Allgemeines	172
14.4.2	Bemessung nach ETAG 002	173
14.5	Versuchsgestützte Bemessung	174
14.5.1	Allgemeines	174

14.5.2	Resttragfähigkeit	175
14.5.3	Weitere Bereiche	175
15	Überblick zu Bemessungskonzepten und Nachweisen unterschiedlicher Regelungen	176
15.1	Allgemeines	176
15.1.1	Einleitung	176
15.1.2	Nachweiskonzepte	176
15.1.3	Zeitliche Entwicklung der Regelungen im Konstruktiven Glasbau	179
15.2	Nachweis auf Basis des zul- σ -Konzepts	182
15.2.1	Allgemeines	182
15.2.2	DIN 18516-4:1990: Außenwandbekleidungen aus ESG, hinterlüftet	183
15.2.3	Technische Regeln des DIBt: TRLV	184
15.2.4	Technische Regeln des DIBt: TRAV	185
15.2.5	Technische Regeln des DIBt: TRPV	186
15.3	Verfahren der Teilsicherheitsbeiwerte und (sichtbare) Anwendung der Bruchmechanik	186
15.3.1	Allgemeines	186
15.3.2	Wissenschaftliche Arbeiten	187
15.3.3	DIN 18008	193
15.3.4	ÖNORM B 3716	196
15.3.5	EN 13474	198
15.3.6	NEN 2608	199
15.4	Vergleich der Regelungen für ausgewählte Anwendungen	201
16	Konstruktion und Bemessung nach TRLV, TRAV und TRPV	204
16.1	TRLV	204
16.1.1	Geltungsbereich, Bauprodukte und Anwendungsbedingungen	204
16.1.2	Nachweisformat, Ermittlung der vorhandenen und zulässigen Werte	207
16.1.3	Anhänge	210
16.2	TRAV	210
16.2.1	Geltungsbereich, Bauprodukte und Anwendungsbedingungen	210
16.2.2	Einwirkungen und Nachweisführung	211
16.2.3	Anhänge	212
16.3	TRPV	213
16.3.1	Geltungsbereich, Bauprodukte und Anwendungsbedingungen	213
16.3.2	Nachweisführung und Ermittlung der vorhandenen Werte	213
16.3.3	Hilfsmittel auf Basis der TRLV	214
17	Konstruktion und Bemessung nach DIN 18008	215
17.1	DIN 18008 Teil 1 – Begriffe und allgemeine Grundlagen	217
17.1.1	Allgemeines, Einwirkungen	217
17.1.2	Sicherheitskonzept und Konstruktionswerkstoffe	217
17.1.3	Einwirkungen	218
17.1.4	Ermittlung von Spannungen und Verformungen	218
17.1.5	Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit	219
17.1.6	Nachweise der Resttragfähigkeit	221
17.1.7	Generelle Konstruktionsvorgaben	221

17.2	DIN 18008 Teil 2	222
17.2.1	Allgemeines, Anwendungsbedingungen	222
17.2.2	Zusätzliche Regelungen für Horizontal- und Vertikalverglasungen	222
17.2.3	Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit	223
17.3	DIN 18008 Teil 3	224
17.3.1	Allgemeines	224
17.3.2	Anwendungsbedingungen und Konstruktion	224
17.3.3	Zusätzliche Regelungen für Vertikal- und Horizontalverglasungen	224
17.3.4	Einwirkungen und Nachweise	225
17.3.5	Anhänge	225
17.4	DIN 18008 Teil 4	225
17.5	DIN 18008 Teil 5	227
17.6	DIN 18008 Teil 6	227
17.7	DIN 18008 Teil 7	227
18	Tragelemente	228
18.1	Allgemeines	228
18.2	Stabilität und Lasteinleitung	228
18.3	Ausblick	229
Teil III	Beispiele	
19	Beispiele	230
19.1	Beispiel 1: Vordach mit 2-seitig linienförmig gelagerten Glasscheiben	230
19.1.1	Allgemeines, System und charakteristische Einwirkungen	230
19.1.2	Nachweis nach „zul- σ -Konzept“ – TRLV	232
19.1.3	Nachweis nach Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte – DIN 18008	233
19.2	Beispiel 2: Linienförmig gelagerte Isolierverglasung	235
19.2.1	Allgemeines	235
19.2.2	Charakteristische Einwirkungen	236
19.2.3	Verteilung der charakteristischen Einwirkungen auf die einzelnen Scheiben des Isolierglaselementes	237
19.2.4	Nachweis nach TRLV	242
19.2.5	Nachweis nach DIN 18008	245
19.3	Beispiel 3: Punktgehaltene, vertikale Windfangverglasung	250
19.3.1	Allgemeines	250
19.3.2	Einwirkungen	251
19.3.3	Berechnung von Spannungen und Durchbiegungen	251
19.3.4	Beanspruchbarkeiten (zulässige Werte) und Nachweise nach TRPV	253
19.3.5	Beanspruchbarkeiten und Nachweis nach DIN 18008	253
19.4	Beispiel 4: Punktgehaltene Überkopfverglasung	255
19.4.1	Allgemeines und Systemdaten	255
19.4.2	Berechnung und Nachweis mittels aufwendigem FE-Modell	256
19.4.3	Vereinfachtes Verfahren nach DIN 18008-3	257
19.4.4	Nachweis mittels abZ	261
19.5	Beispiel 5: Absturzsichernde Einfachverglasung der Kategorie A	263
19.5.1	Allgemeines	263
19.5.2	Grenzzustände für statische Einwirkungen	264

19.5.3	Grenzzustand für stoßartige Einwirkungen	265
19.6	Beispiel 6: Absturzsichernde Isolierverglasung der Kategorie A.....	267
19.6.1	Allgemeines	267
19.6.2	Nachweis unter stoßartigen Einwirkungen nach TRAV	268
19.6.3	Nachweis unter stoßartigen Einwirkungen nach DIN 18008-4.....	269
19.7	Beispiel 7: Absturzsichernde Brüstungsverglasung der Kategorie B	272
19.7.1	Allgemeines	272
19.7.2	Grenzzustände für statische Einwirkungen	273
19.7.3	Grenzzustand für stoßartige Einwirkungen	276
19.8	Beispiel 8: Vierseitig linienförmig gelagerte begehbare Verglasung.....	277
19.8.1	Allgemeines	277
19.8.2	Grenzzustände für statische Einwirkungen	277
19.8.3	Grenzzustände für stoßartige Einwirkungen und Resttragfähigkeit	281
19.9	Hilfsmittel für linienförmig gelagerte Verglasungen	281
19.9.1	Allgemeines	281
19.9.2	Rechteckige zweiseitig linienförmig gelagerte Verglasungen	282
19.9.3	Rechteckige vierseitig linienförmig gelagerte Verglasungen.....	284
Literaturverzeichnis.....		290
Stichwortverzeichnis.....		306

Teil I Grundlagen

1 Einleitung

1.1 Einführendes Beispiel

Im Rahmen von augenscheinlich aufwendigen Glaskonstruktionen wird in der Regel für Entwurf, Konstruktion und Bemessung der Glasbauteile entsprechend frühzeitig eine sachkundige Unterstützung der am Bau Beteiligten angefordert. Anders verhält es sich (leider) meist, wenn es sich „nur“ um ein Vordach oder eine Fassade mit Glas im Rahmen eines größeren Bauvorhabens handelt. Oft wird zwar vom „normalen“ Tragwerksplaner eine statische Berechnung der Unterkonstruktion erstellt, spezifische Probleme des konstruktiven Glasbaus und das Glas selbst werden aber außer Acht gelassen oder der ausführenden Firma im Rahmen der Ausschreibung „überlassen“. Es kommt dann oftmals nicht die hinsichtlich Tragsicherheit, Gestaltung und Kosten optimale Lösung zur Ausführung. An einem typischen, im Folgenden kurz dargestellten Beispiel wird dies verdeutlicht.

Ein im Grundriss kissegmentförmiges Vordach für ein Bürogebäude soll entsprechend den Vorstellungen des Bauherrn aus einer abgehängten Stahlkonstruktion mit Verglasung bestehen. Die Glasscheiben sind auf zwei gegenüberliegenden Stahlprofilen linienförmig gelagert. Dementsprechend wurde zunächst von einer problemlosen Genehmigung und Ausführung ausgegangen und das Vordach entsprechend ausgeschrieben. Nach Vergabe und Produktionsbeginn des Stahlbaus stellten sich bei der statischen Berechnung der Verglasung und damit verbunden bei der Beurteilung der Konstruktion die folgenden Probleme dar:

- Die Spannweite der Überkopfverglasung beträgt mehr als 1,2 m, somit ist nach [1, 4] eine nur zweiseitige Auflagerung nicht zulässig. Nachdem eine vierseitige Lagerung der Überkopfverglasung aus optischen Gründen und wegen der bereits erfolgten Produktion der Stahlkonstruktion nicht ausführbar war, ist die Konstruktion derart zu ändern, dass eine ausreichende Resttragsicherheit gegeben ist.
- Eine Unterspannung mit ausreichend tragfähigen Seilen oder Netzen wurde aus optischen Gründen nicht gewünscht, es kam zur Anordnung zusätzlicher Punkthalter in Bohrungen. Für die einzelnen Gläser der VSG-Elemente ist teilvorgespanntes Glas TVG erforderlich. Die Randbedingungen der Technischen Regeln für die Bemessung und die Ausführung punktförmig gelagerter Verglasungen [2] bezüglich des maximalen Stützrasters zur Sicherstellung ausreichender Resttragfähigkeit sind nicht eingehalten, die zur Verwendung geplanten gelenkigen Tellerhalter können nicht nach bauaufsichtlich bekanntgemachten Technischen Baubestimmungen nachgewiesen werden (Kugel- oder Elastomergelenke) und sind auch nicht allgemein bauaufsichtlich oder europäisch technisch zugelassen. Es ist deshalb eine „Zustimmung im Einzelfall“ bei der obersten Bauaufsichtsbehörde des Bundeslandes zu stellen.
- Für die Erlangung der „Zustimmung im Einzelfall“ ist neben der statischen Tragfähigkeit der Nachweis ausreichender Tragfähigkeit auch im gebrochenen Zustand zu erbringen.

gen. Die gegenüber linienförmig gelagerter Verglasung aufwendigere statische Berechnung zusätzlich noch punktförmig gehaltener Gläser sowie Zeit und Kosten für die „Zustimmung im Einzelfall“ mit dazu eventuell erforderlichen versuchstechnischen Nachweisen oder gutachterlichen Stellungnahmen waren im Rahmen der Ausschreibung nicht berücksichtigt und beim Angebot nicht kalkuliert.

Bei Kenntnis der Problematik und deren rechtzeitiger Behandlung hätten die genannten (und nicht genannten vertragsrechtlichen und finanziellen) Folgen vermieden oder in zeitlich weniger engem Rahmen gelöst werden können.

Das vorliegende Buch soll einen Beitrag leisten, frühzeitig eventuell auftretende Probleme zu erkennen und erforderlichenfalls einer sachgerechten Lösung zuzuführen.

1.2 Begriffsbestimmung

Nachdem der konstruktive Glasbau ein relativ neues Tätigkeitsfeld mit z. T. neuen Konstruktionen, Konstruktionsformen und Anwendungen ist, werden in diesem Zusammenhang z. T. ungewohnte oder neue Bezeichnungen und Abkürzungen verwendet. Im Folgenden wird ein Überblick über einige wichtige, im Rahmen dieses Buches sowie der Fachliteratur verwendeten Bezeichnungen und Abkürzungen gegeben; dabei wird – soweit möglich – auf die Bezeichnungen aus Vorschriften, technischen Regeln oder Normen zurückgegriffen.

Der Begriff *Einfachverglasung* wird häufig eingesetzt im Sinne von *keine Isolierverglasung*, d. h. auch ein Verbundglaselement kann eine Einfachverglasung sein.

Unter *Reststragsicherheit (-fähigkeit)* ist die nach dem Bruch von einzelnen oder allen Gläsern eines Verbundglaselementes verbleibende Sicherheit gegen Versagen zu verstehen, i. d. R. gemessen in Zeitdauer bis zum Absturz gefährlicher Bruchstücke. Der Nachweis kann in der Regel nur durch Bauteilversuche erbracht werden. Bei Verwendung von Glasbauteilen aus entsprechend vielen einzelnen Schichten, kann für Teilerstörungszustände mit hinreichend vielen intakten Glasschichten und/oder -scheiben die Resttragfähigkeit auch rechnerisch nachgewiesen werden, wobei gebrochene Glasschichten nicht angesetzt werden dürfen [3].

Eine *Überkopfverglasung* (Horizontalverglasung) befindet sich über Kopf von Personen, d. h. es findet unter der Verglasung Personenverkehr statt; dabei sind entsprechend [1, 4] auch Schrägverglasungen mit einer Neigung größer 10° gegen die Vertikale hinzuzuzählen. Nach [10, 11] beträgt die Grenze 15° . Es kommt zur Sicherstellung ausreichender Resttragfähigkeit Verbundsicherheitsglas (VSG) aus Floatglas (FG), früher Spiegelglas (SPG), oder VSG aus teilvorgespanntem Glas (TVG), gegebenenfalls als unterste Scheibe eines Isolierglaselementes, zum Einsatz.

Die *Vertikalverglasung* definiert sich aus der vertikalen Einbausituation, in Abgrenzung zur Überkopfverglasung ist entsprechend [1, 4] auch eine Schrägverglasung mit einer maximalen Neigung von 10° gegen die Senkrechte noch als solche einzustufen. Als Verglasung ist jede Glasart denkbar, abhängig vom Verkehrsaufkommen neben bzw. unter der Verglasung und der Lagerung der Scheiben.

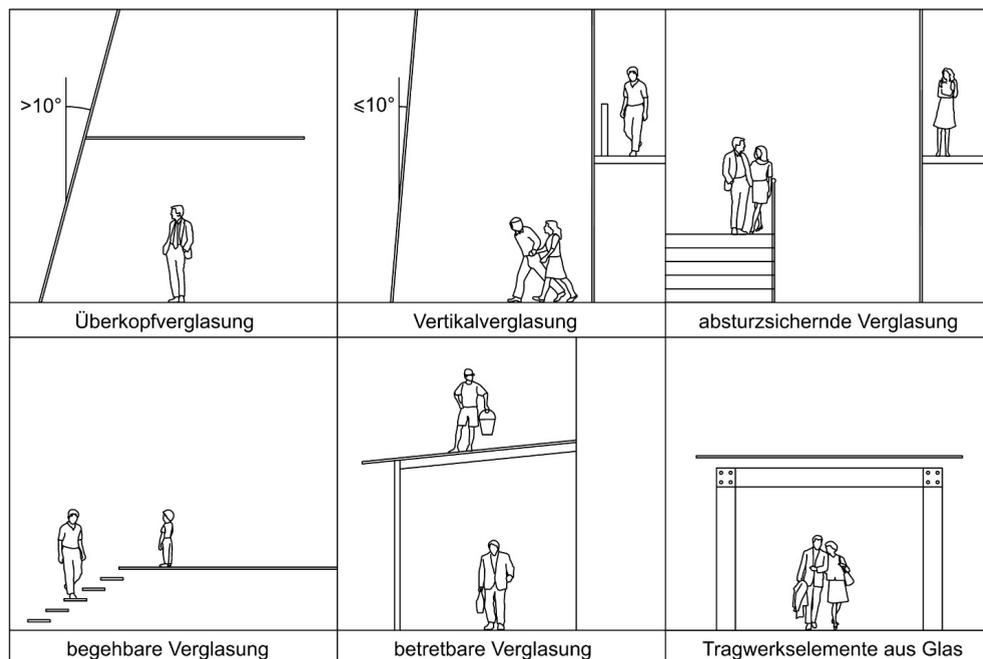


Bild 1.1 Bezeichnung von Verglasungen

Absturzsichernde Verglasung soll den Absturz von Personen bei vorhandenen Höhendifferenzen von Verkehrsflächen verhindern; es werden verschiedene Kategorien unterschieden, je nachdem ob die Verglasung der alleinige Schutz gegen Absturz ist, ein unabhängiger Handlauf vorhanden ist oder die Verglasung nur ausfachende Funktion eines ansonsten selbst ausreichend tragfähigen Geländers hat [7, 12]. Abhängig vom Verkehrsaufkommen finden auch hier die unterschiedlichen Glasarten Verwendung.

Hinsichtlich horizontaler Verglasung mit der Möglichkeit des Aufenthalts von Personen wird vielfach unterschieden in begehbare und betretbare Verglasung. Die *begehbare Verglasung* wird planmäßig begangen, d. h. Personenverkehr ist jederzeit möglich, z. B. bei einem Treppen- oder Brückenbelag. Im Unterschied hierzu soll eine *betretbare Verglasung* nur eingeschränkt zu Wartungs- oder Reinigungszwecken betreten werden, z. B. Überkopferverglasung. Verglasung mit Aufenthalt von Personen ist nur möglich als VSG, wobei für betretbare Verglasung bereits 2-lagiges VSG ausreichen kann, während begehbare Verglasung aus mindestens 3 Lagen Glas bestehen muss [8, 9].

Denkbar ist selbstverständlich auch eine Vielzahl von Kombinationen wie z. B. *begehbare Überkopferverglasung* (Gehbelag einer Brücke mit Personenverkehr auch unter der Verglasung).

Tabelle 1.1 Übersicht häufig verwendeter Abkürzungen und Auswahl von Markennamen

Abk.	Bedeutung	Beispiele für geschützte Bezeichnungen
FG (SPG)	Floatglas (früher Spiegelglas)	Pilkington OPTIFLOAT® PLANILUX® (Saint-Gobain Glass) Ipafloat (INTERPANE) EUROFLOAT (Glas Trösch)
TVG	teilverspanntes Glas (auch: thermisch verfestigtes Glas)	BI-Hestral (BGT Bischoff Glastechnik) PLANIDUR® (Saint-Gobain Glass) ipasave TVG (INTERPANE) TG-TVG® (Thiele Glas) SANCO DUR TVG (Glas Trösch)
ESG	Einscheibensicherheitsglas (auch: voll vorgespanntes Glas)	BI-Tensit (BGT Bischoff Glastechnik) ipasave ESG (INTERPANE) SEKURIT® (Saint-Gobain Glass) DELODUR® (Pilkington) TG-ESG® (Thiele Glas) SANCO DUR ESG (Glas Trösch)
ESG-H	Heißgelagertes Einscheibensicherheitsglas	SEKURIT®-H (Saint-Gobain Glass) TG-ESG-H® (Thiele Glas)
VG	Verbundglas	
VSG	Verbundsicherheitsglas	BI-Combiset (BGT Bischoff Glastechnik) STADIP® (Saint-Gobain Glass) SIGLA® (Pilkington) ipasave VSG (INTERPANE) TG-PROTECT® (Thiele Glas) SANCO LAMEX (Glas Trösch)
PVB	Polyvinylbutyral, Kunststoff zur Herstellung von Verbundsicherheitsglas	TROSIFOL® MB (Kuraray Europe, Division Trosifol)) Butacite® (DuPont) Saflex® (Solutia)
SG	SentryGlas®	SentryGlas® (DuPont)
GH	Gießharz, Kunststoff zur Herstellung von Verbundglas und Verbundsicherheitsglas	

2 Der Werkstoff Glas

2.1 Einleitung

Glas findet im Bauwesen seit Jahrhunderten Verwendung für Fenster. Bedingt durch die aufwendigen Verfahren zur Gewinnung der Rohstoffe wie auch der Herstellung von Glas waren Fenster in der vorindustriellen Zeit noch Luxusgüter.

Erst mit der künstlichen Sodakalzinierung wurde eine billige Massenproduktion von Glas ermöglicht. So war eine Voraussetzung für den Einsatz von Glas – neben den ebenso „alten“ Baustoffen Holz und Stein – als konstruktiver Werkstoff geschaffen.

Der für die Weltausstellung in London im Jahr 1851 erbaute Kristallpalast ist mit seinen 270.000 mundgeblasenen Scheiben eines der ersten Gebäude mit Glas-Holz-Eisen-Verbund. Dabei kann jedoch die aussteifende Wirkung von gekitteten Glasscheiben nicht ohne Weiteres zuverlässig quantifiziert und auf Dauer sichergestellt werden.

Die Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren – nach Glasblasen zunächst Guss-, anschließend verschiedene Ziehverfahren bis zur aktuellen Floattechnik – verbilligten den Werkstoff Glas weiter.

Für die Weltausstellung expo2000 in Hannover findet neben dem effekthascherischen Einsatz als druckbeanspruchte Abstandhalter für die Abspannung der das Dachtragwerk des „Deutschen Pavillon“ tragenden Stahlstützen der Konstruktionswerkstoff Glas Verwendung als ansprechende Fassadenverkleidung z. B. von Tetraeder, Kubus und Halbkugel des „Dänischen Pavillon“ oder fast selbstverständlich auch als transparentes, begehbare Tragelement in einer Vielzahl von Pavillons.

Zur Weltausstellung 2010 in Shanghai hat Apple einen weiteren sog. Flagstore in Shanghai eröffnet, vgl. Bild 2.1, und dabei wiederum Maßstäbe hinsichtlich der verwendeten Glasbauteile gesetzt; es ist kaum nötig darauf hinzuweisen, dass solche Konstruktionen auch hinsichtlich der Kosten nicht im üblichen Rahmen liegen.

Ein zuverlässig sicherer und wirtschaftlicher Einsatz von Glas als Konstruktionswerkstoff, auch als Ersatz für bislang zum Einsatz gekommene Materialien, setzt jedoch anerkannte Regeln für die Produktion der Rohstoffe, wie für die Berechnung der Tragwerke und seiner Tragelemente voraus. Darüber hinaus ist für einen ausführbaren und bezahlbaren Entwurf wichtig die Kenntnis über die durch unterschiedliche technische Randbedingungen bedingten Grenzen der einzelnen in Bild 2.2 dargestellten Verarbeitungsschritte. So wird beispielsweise die Größe von thermisch vorgespannten Gläsern u. a. durch die Kapazität vorhandener Vorspannöfen begrenzt, und es lassen sich nicht alle vorgespannten Gläser – bedingt z. B. durch die Größe vorhandener Autoklaven – zu Verbundgläsern laminieren.



Bild 2.1 Apple-Store in Shanghai

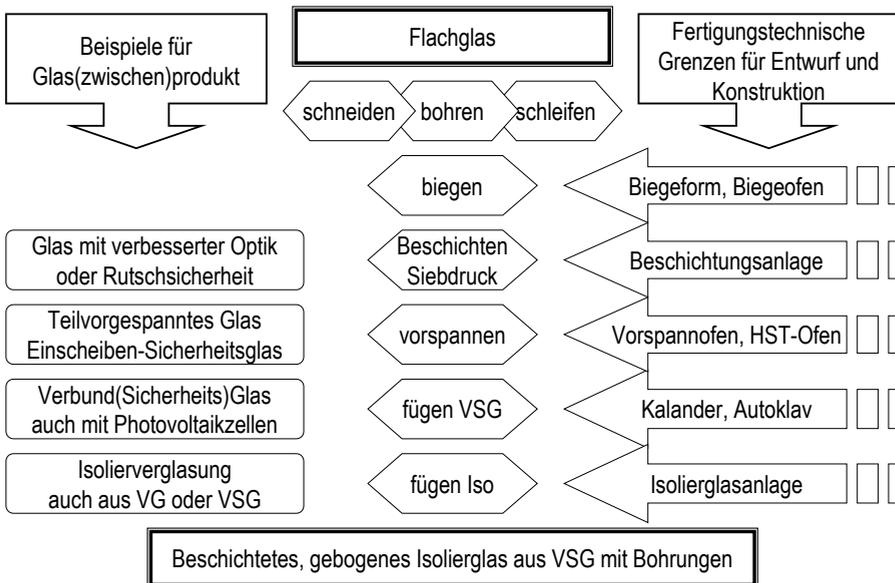


Bild 2.2 Verarbeitungsschritte

Die Kenntnis vorgenannter Grundlagen ist umso wichtiger, als die Ideen der Architekten und Ingenieure keine Grenzen zu haben scheinen und die bekannten und über viele Jahrzehnte erarbeiteten Hilfsmittel der Ingenieure zur Berechnung von Tragstrukturen sich nicht ohne Weiteres von anderen Baustoffen auf Glaskonstruktionen übertragen lassen.

Um entscheiden zu können, welche Berechnungs- und Bemessungsmethoden unverändert anwendbar sind, in welchen Bereichen Modifikationen oder aber gänzlich neue Verfahren erforderlich sind, müssen zunächst Daten über das Material vorliegen. Dies betrifft den Prozess der Herstellung und Veredelung (gemeint ist Vorspannen und Fügen zu Verbundglaselementen) sowie deren chemische Zusammensetzung und molekulare Struktur und, daraus abgeleitet, die für den Bauingenieur wichtigen Eigenschaften und Kenngrößen.

2.2 Definitionen von Glas

Durch die Glasstrukturforschung erarbeitete Ansätze zur Kristallchemie führen zur Netzwerkhypothese, deren Gedanken kurz wiedergegeben werden.

Der Grundbaustein aller Silicate ist der SiO_4 -Tetraeder, eine Struktureinheit, in dessen Zentrum ein Siliciumatom steht, umgeben von 4 Sauerstoffatomen. Alle vier Sauerstoffatome berühren gleichzeitig das Siliciumatom und die jeweiligen Koordinationspartner.

Die Polymerisationstendenz der SiO_4 -Baugruppe, d. h. die Bildung einer Vielzahl komplexer Silicate ist begründet durch das Bestreben nach völliger Absättigung der Sauerstoffatome mit Elektronen bei bevorzugter Oktetthüllenbildung. Dies kann entweder durch Anlagerung von Metallen, die Elektronen zur Neutralisation mitbringen, oder durch Verknüpfung von Tetraedern untereinander mit Brückensauerstoffatomen mit sich selbst erfolgen.

In kristallinen Verbindungen – z. B. dem Bergkristall – sind die SiO_4 -Tetraeder gleichmäßig miteinander zu Netzwerken verknüpft. Beim SiO_2 -Glas – z. B. Kieselglas – ist die Verbindung unregelmäßig.

Zur Verdeutlichung der Unterschiede bezüglich der räumlichen Anordnung der einzelnen Atome wählte [24] ein zweidimensionales Analogon, das in Bild 2.3 wiedergegeben ist. Es handelt sich hierbei also **nicht** – wie in einer Vielzahl von Literaturquellen angegeben – um eine Darstellung von SiO_2 im kristallinen und glasigen Zustand mit jeweils einem O_2 ober- oder unterhalb der Zeichenebene, sondern um ein **hypothetisches** A_2O_3 -Molekül.

Glasbildung ist auch an Systemen mit mehreren Komponenten möglich. Es lassen sich z. B. in einfaches SiO_2 -Glas große Kationen einbauen, indem man SiO_2 zusammen mit Na_2O schmilzt. Die dabei erfolgte Netzwerksprengung mit Änderung der Glasstruktur und Einlagerung der großen Kationen in die Hohlräume soll statistisch erfolgen. Eine wiederum ebene Darstellung ist in Bild 2.4 gegeben.

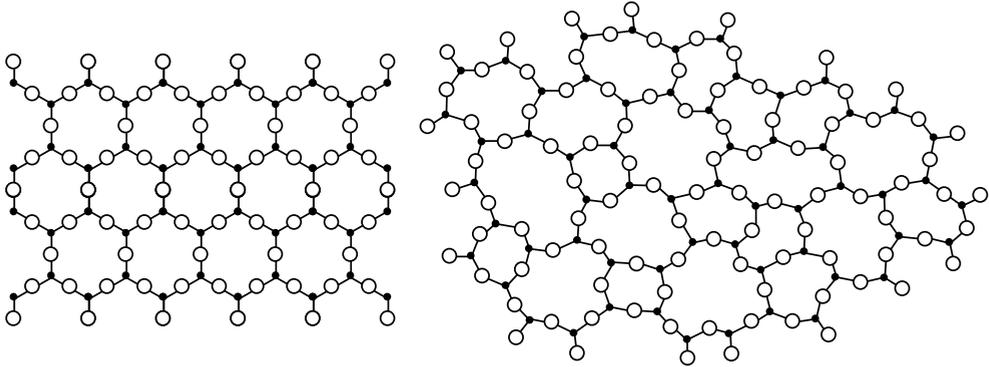


Bild 2.3 Struktur des hypothetischen Al_2O_3 im kristallinen (links) und glasigen (rechts) Zustand, O = O, • = Al, nach [24]

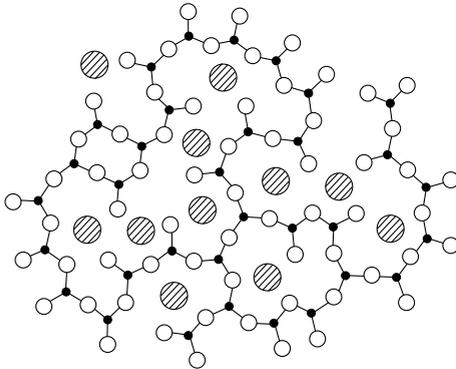


Bild 2.4 Struktur des Al_2O_3 -Moleküls im Glaszustand mit eingelagerten Fremdatomen

Die binären Erdalkalisilicatgläser haben in der praktischen Anwendung jedoch kaum Bedeutung erlangt, weil sie zur ausgesprochenen Entmischung neigen bzw. ihre Schmelzsysteme Mischungslücken aufweisen, so dass ein starker Trübungseffekt auftritt und Klargläser, bei denen eine bestimmte Tröpfchengröße unterschritten wird, nicht herstellbar sind.

Durch Kombination von zwei oder mehreren Systemen entstehen wegen des Konkurrenzprinzips nur noch relativ kleine tröpfchenförmige Entmischungsbereiche mit für das menschliche Auge jedoch nicht mehr wahrnehmbarer Trübung. Als einfaches und praktisch weit verbreitetes Beispiel sei die Kombination der zwei binären Schmelzsysteme Na_2SiO_2 und CaOSiO_2 genannt: das Fenster- oder Kronglas.

Die als weitere Folge einer Entmischung (d. h. also Trennung in alkalireiche und SiO_2 reiche Phase) erleichterte Auslaugbarkeit der alkalireichen Phase z. B. bei Wasserangriff kann durch die Zugabe von 2–3 M.-% Al_2O_3 weiter reduziert und so eine bessere hydrolytische Beständigkeit erreicht werden.

Tabelle 2.1 Zusammensetzung von Flachglas aus Kalk-Natron-Silicatglas nach DIN 1249-10 [42] und EN 572-1 [43] und Borosilicatglas nach EN 1748-1 [45] Angaben in M.-%

Vorschrift	SiO ₂	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Andere Oxide bzw. Stoffe
DIN 1249-10	70–74	0	12–16	0	5–12	0–5	0,2–2	geringe Anteile
EN 572-1	69–74	0	12–16	0	5–12	0–6	0–3	kleine Anteile
EN 1748-1	70–87	7–15	0–8	0–8	0–8	0–8	0–8	0–8

Wie bereits oben angedeutet, hat die jeweilige Zusammensetzung selbstverständlich Einfluss auf die Eigenschaften der Produktion und das fertige Erzeugnis Glas. Eine kurze Übersicht gibt Tabelle 2.2; weitergehende Information hierzu findet sich in dem nächsten Abschnitt oder ist der Literatur zu entnehmen.

Tabelle 2.2 Beeinflussung der Eigenschaften der Gläser durch verschiedene Oxide [25]

Eigenschaft	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	BaO	PbO	ZnO	Na ₂ O	K ₂ O
Dichte	-		+			+	++	+		
Zugfestigkeit		++	+	++		++	+			
Druckfestigkeit	+		+	-		-	-		--	--
Brechungsindex	-	-		++		+	++	+	+	+
spez. elektr. Widerstand	+	+	-	++	+	+	+		--	--
Chemische Beständigkeit	+	+	++	++	+			++	--	-

Erläuterung:
Zugabe eines Oxids zu einer bestimmten Zusammensetzung verändert die Eigenschaft wie folgt:
+ erhöht ++ stark erhöht - erniedrigt -- stark erniedrigt

Aufgrund der Vielzahl von unterschiedlichen Bestandteilen und damit verbunden mit der noch größeren Anzahl von möglichen „Mischungen“ ist es selbstverständlich, dass die Materialeigenschaften sich ebenfalls unterscheiden müssen.

2.3 Struktur und Zusammensetzung von Glas

Glas ist ein amorpher Festkörper. In dieser sehr allgemein gehaltenen Definition von [13] beschreibt das Adjektiv „amorph“ den Strukturzustand des Materials als einen Zustand mittlerer Ordnung, bei dem es zwar eine Nah- jedoch keine Fernordnung gibt. Mit anderen Worten, die Regelmäßigkeit der molekularen Bestandteile ist nur in der Größenordnung von einigen Vielfachen der einzelnen Bausteine selbst gegeben. So beträgt z. B. der mittlere Abstand zweier Siliciumatome in Kieselsäureglas (SiO₂) 3,6 Å; in einer Größenordnung ab ca. 10 Å ist keine Ordnung der Atome mehr festzustellen.

Das Substantiv „Festkörper“ steht für Materialien, die nicht fließen, solange sie nur durch geringe Kräfte beansprucht werden. Etwas genauer und quantifiziert kann „Festkörper“ als Material mit einer Viskosität größer 10^{14} Pa s ($1 \text{ Pa s} = 10 \text{ Poise}$) beschrieben werden.

Im Unterschied zu vielen anderen Definitionen von Glas findet bei [13] keine Einschränkung der chemischen Bestandteile wie auch des Herstellungsprozesses statt. Es wird also berücksichtigt, dass auch Metalle und organische Polymere bei ausreichend rascher Abkühlung (bei Metallen von über 1000 K/s) in den amorphen Zustand übergeführt werden können (metallene Gläser finden aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften bereits seit mehreren Dekaden Anwendung in der Elektronik und Elektrotechnik) und neben der Schmelzmethode eine Vielzahl von Verfahren zur Herstellung nichtkristalliner Festkörper existieren und angewandt werden.

Eine andere, auch häufig verwendete Definition von Glas beschreibt den thermodynamischen Zustand: *Glas ist eine eingefrorene unterkühlte Schmelze*. z. B. [14–17].

Auch diese Definition schränkt die chemische Zusammensetzung nicht ein, beschreibt jedoch indirekt einen möglichen Herstellungsprozess. Das Phänomen der eingefrorenen, unterkühlten Schmelze wird im Folgenden anhand der Änderung der spezifischen Wärme, d. h. also der Enthalpieänderung mit der Temperatur $c_p = dH/dT$ kurz erläutert und dem Verhalten eines kristallinen Festkörpers gleicher Zusammensetzung gegenübergestellt, vgl. Bild 2.5.

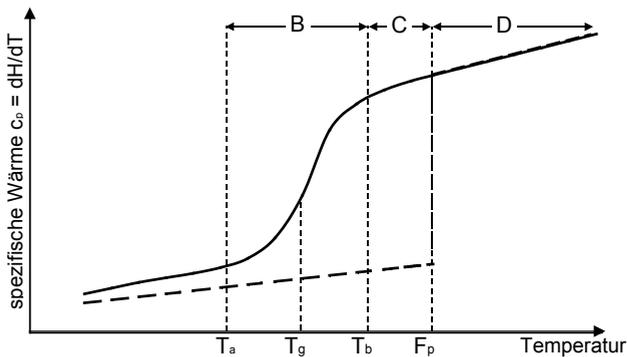


Bild 2.5 Änderung der spezifischen Wärme für glasige (durchgezogene Kurve) und kristalline (gestrichelte Kurve) Festkörper in Abhängigkeit von der Temperatur

Bei entsprechend hoher Temperatur bildet sich aus einem glasigen wie aus einem kristallinen Festkörper eine identische Schmelze (Bereich D in Bild 2.5); diese Schmelze ist im thermodynamischen Gleichgewicht, die Kurven fallen im Bereich D zusammen.

Ab einem bestimmten Temperaturniveau ist die Abnahme der spezifischen Wärme nicht mehr stetig linear. Beim kristallinen Festkörper erfolgt am Schmelzpunkt T_p eine sprunghafte Reduktion der spezifischen Wärme, die in der Schmelze noch ungeordneten Atome

oder Moleküle werden nun in einem Kristallverband regelmäßig angeordnet; das Kristall befindet sich ebenfalls im thermodynamischen Gleichgewicht. Eine weitere Abkühlung des kristallinen Festkörpers geht bis nahe an den absoluten Nullpunkt mit einer wiederum stetig linearen Abnahme der spezifischen Wärme c_p einher.

Bei einer Glasschmelze erfolgt der Übergang vom flüssigen in den festen Zustand über ein größeres Temperaturintervall zunächst mit gleicher Steigung weiter stetig linear und im sog. Erweichungsintervall von T_a bis T_b (Bereich B) stark abnehmend. Dabei ist im Gegensatz zum kristallinen Körper die Abnahme nicht sprunghaft, sondern wird durch eine Kurve mit Wendepunkt bei der sog. Transformationstemperatur T_g beschrieben. Thermodynamisch gesehen befindet sich der Festkörper Glas in einem Ungleichgewichtszustand.

Wird die erstarrte Glasschmelze weiter abgekühlt, so ist wiederum eine stetig lineare Abnahme der spezifischen Wärme zu beobachten. Allerdings liegt die c_p -Kurve des glasigen Festkörpers deutlich über der des kristallinen; entsprechend ist der glasige Festkörper energiereicher als der kristalline Festkörper.

Von dem Deutschen Institut für Normung e. V. [18] wird folgende Definition gegeben: *Glas ist ein anorganisches Schmelzprodukt, das im Wesentlichen ohne Kristallisation erstarrt.* Dies entspricht der Definition der American Society for Testing Material (ASTM): *Glass is an inorganic product of fusion which has been cooled to a rigid condition without crystallisation.*

Bei vorstehender Definition wird sowohl die Zusammensetzung auf anorganische Produkte beschränkt und auch das Herstellungsverfahren angegeben.

Im Folgenden soll unter dem Begriff „Glas“ der Werkstoff vorwiegend silicatischer Natur verstanden werden. Eine weitergehende Erläuterung und Beschreibung, was im Rahmen dieser Arbeit unter „Glas“ zu verstehen ist, geben die folgenden Abschnitte über die Herstellung der Gläser, die Struktur und Zusammensetzung sowie Materialkennwerte.

Für die Bezeichnungsweise und Einteilung von Glas bzw. Glaserzeugnissen gibt es kein einheitliches Prinzip. Im Bauwesen kommt in der Regel Silicatglas als Baustoff zum Einsatz. Die Bezeichnung erfolgt z. T. nach der Geometrie (z. B. Flachglas), nach dem Herstellungsprozess (z. B. Floatglas, Pressglas), nach der Verwendung (z. B. Fensterglas, Glasdachstein) oder auf Grund spezieller Eigenschaften (z. B. Sicherheitsglas).

2.4 Herstellung von Glas

2.4.1 Rohstoffe

Der wichtigste Rohstoff für die Herstellung von Glas ist Sand; er besteht hauptsächlich aus Siliciumdioxid SiO_2 , das beinahe die Hälfte der festen Erdoberfläche bildet. Dabei ist wegen der „Verunreinigungen“ mit färbenden Oxiden nicht jeder Sand geeignet, ab etwa 0,1 % Fe_2O_3 ist Sand für anspruchsvolle Zwecke ungeeignet, es ist eine deutliche Grünfärbung zu sehen. Für optische Gläser sind die Anforderungen entsprechend höher. Der Gehalt der anderen färbenden Oxide muss in der Regel noch geringer sein.

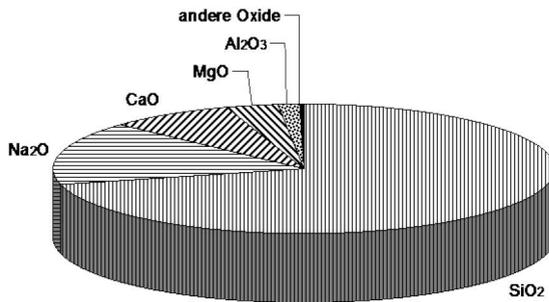


Bild 2.6. Zusammensetzung von Floatglas

Die Schmelztemperatur von Sand (1700 °C) kann durch Zugabe von Flussmitteln gesenkt werden. Früher war dies Pottasche (Kaliumcarbonat K_2CO_3), heute kommt meist – aus Kochsalz und Kalk preisgünstig hergestelltes – Soda (Natriumcarbonat Na_2CO_3) zum Einsatz, 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 ($CaCO_3 + MgCO_3$) mit Kalk verbunden ist und die Schmelztemperatur herabsetzt.

Zur Beseitigung von Trennstellen und damit zu verbesserter chemischer Resistenz und erhöhter Zähigkeit bei tiefen Temperaturen wird Tonerde (Al_2O_3) beigegeben, meist in Form von Feldspat (z. B. $NaAlSi_3O_8$).

Wird Calciumoxid z. T. durch Bleioxid oder Bortrioxid ersetzt, ergibt sich Blei(kristall)glas oder Borosilicatglas. Eine Vielzahl weiterer Mischungen ist denkbar und in der industriellen Anwendung, jedoch nicht als im Bauwesen eingesetztes „Massenglas“.

2.4.2 Produktion von Flachglas

Flachglas sind alle in flacher Form hergestellten Glasprodukte, die auch in einem späteren Verarbeitungsschritt oder Veredelungsprozess gebogen werden können (z. B. gebogene Aufzugsverglasung).

Die Geschichte der Herstellung von Flachglas begann um Christi Geburt. Die römischen Glasmacher stellten flache Scheiben mittels einer Gusstechnik her: zähflüssiges Glas wurde auf nasses Holz gegossen und mit Werkzeug zu einer Scheibe auseinandergezogen. Nach Erfindung der Glasmacherpfeife hat sich das Blasen von Hohlkörpern und Umformen zu Flächen entwickelt. Beim sogenannten Zylinderblasverfahren bläst der Glasmacher aus heißem, zähflüssigem Glas einen Zylinder, der im erkalteten Zustand längs aufgeschlitzt und im Streckofen glattgebügelt wird. Durch den Glashobel wurde im 18. Jahrhundert das