

Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen

Jens Schneider · Johannes Kuntsche
Sebastian Schula · Frank Schneider
Johann-Dietrich Wörner

Glasbau

Grundlagen · Berechnung · Konstruktion

2. Auflage



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Springer Vieweg

VDI-Buch

Weitere Informationen zu dieser Reihe finden Sie unter
<http://www.springer.com/series/3482>

Jens Schneider · Johannes Kuntsche
Sebastian Schula · Frank Schneider
Johann-Dietrich Wörner

Glasbau

Grundlagen, Berechnung, Konstruktion

2. Auflage



Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider studierte und promovierte an der Technischen Universität Darmstadt. Nach einigen Jahren in der Ingenieurpraxis, u. a. bei Schlaich, Bergermann und Partner in Stuttgart, wurde er 2009 zum Professor an das Institut für Statik und Konstruktion der Technischen Universität Darmstadt berufen. Er ist Sachverständiger für Glasbau, leitet seit 2016 die Arbeitsgruppe zur Erstellung des Eurocode *Structural Glass* und ist Mitherausgeber des internationalen Journals *Glass Structures & Engineering*.



Dr.-Ing. Johannes Kuntsche studierte und promovierte an der Technischen Universität Darmstadt über das mechanische Verhalten von Verbundglas. Er arbeitet seit 2016 bei Professor Pfeifer und Partner, Ingenieurbüro für Tragwerksplanung in Darmstadt.



Dr.-Ing. Sebastian Schula promovierte an der Technischen Universität Darmstadt über das Kratzverhalten von Gläsern im Bauwesen. Er arbeitet seit 2014 bei SGS Ingenieurdienstleistungen im Bauwesen GmbH in Heusenstamm bei Frankfurt.



Dr.-Ing. Frank Schneider promovierte an der Technischen Universität Darmstadt über das inelastische Materialverhalten von Glas. Seit 2006 ist er Leiter für Forschung und Entwicklung bei der OKALUX GmbH und seit 2016 Vorstandsvorsitzender des Fachverbands Konstruktiver Glasbau.



Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner studierte an den Technischen Universitäten in Berlin und Darmstadt. Er promovierte an der Technischen Universität Darmstadt, leitete nach einigen Jahren in der Ingenieurpraxis und nachfolgendem Ruf als Professor die Universität von 1995 bis 2007, an der er noch heute als Hochschullehrer aktiv ist. Danach war er Vorstandsvorsitzender des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und ist seit 2015 Generaldirektor der European Space Agency (ESA). Seit 2002 ist er Mitherausgeber des *Beton-Kalenders*.

Jens Schneider
Darmstadt, Deutschland

Frank Schneider
Marktheidenfeld, Deutschland

Johannes Kuntsche
Darmstadt, Deutschland

Johann-Dietrich Wörner
Darmstadt, Deutschland

Sebastian Schula
Darmstadt, Deutschland

VDI-Buch

ISBN 978-3-540-28476-5

ISBN 978-3-540-68927-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-540-68927-0

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001, 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

Vorwort zur 2. Auflage

Seit dem Erscheinen der 1. Auflage dieses Buches sind bereits über 15 Jahre vergangen, was eine grundlegende Neubearbeitung erforderlich machte. Die Anwendungsmöglichkeiten von Glas im konstruktiven Bereich haben sich seit damals erheblich erweitert. Gläser sind jetzt standardmäßig in größeren Abmessungen verfügbar und die Vielfalt der Funktionen, die Glas erfüllt, hat weiter zugenommen. Wesentliche Fortschritte bei der Verwendung von Glas als Konstruktionswerkstoff im Ingenieurwesen sind auch durch wichtige Forschungsarbeiten gemacht worden. Hier sind zum Beispiel die Untersuchungen zu Eigenspannungen und zur Festigkeit von thermisch vorgespannten Gläsern zu nennen, die grundlegenden Arbeiten zu stabilitätsgefährdeten Bauteilen und stoßbeanspruchten Bauteilen sowie die Erforschung des Tragverhaltens der Verbundgläser mit den heute verfügbaren polymeren Zwischenschichten. Hierdurch und durch die Weiterentwicklung der Klebtechnik hat auch die Schnittstelle zur Polymermechanik an Bedeutung gewonnen.

In der praktischen Anwendung kommen so immer größere Gläser zum Einsatz, Glasbalken werden in Fassaden und bei Dachverglasungen häufig verwendet und auch die Verwendung von Glas zur Aussteifung von Gebäudeteilen ist nicht mehr allzu ungewöhnlich. Die Bemessungsnormen für Glas sind mit der DIN-18008-Reihe in Deutschland jetzt auch bauaufsichtlich eingeführt, der *Eurocode Glas* ist in Vorbereitung und auch am US-amerikanischen Markt etablieren sich erste Vorschriften zum Konstruktiven Glasbau.

Im Bereich der Füge-techniken gibt es kleinere Fortschritte: Neben der Klebtechnik für Glas-Glas-, Glas-Aluminium- und Glas-Holz-Verbindungen entwickeln sich Laminationstechniken, die auch für Metall-Glas-Verbindungen angewendet werden; für Bolzenverbindungen existieren Bemessungskonzepte, Hinterschnittanker sind inzwischen auch für Glas verfügbar. Schließlich etablieren sich gerade besonders die gebogenen Gläser und Dünngläser am Markt und eröffnen neue Potenziale für Glaskonstruktionen. Wie bereits in unserem ersten Vorwort beschrieben gilt aber nach wie vor: »Die zielsichere Ausnutzung der Glaseigenschaften für Bauteile und Baustrukturen verlangt mehr als bei allen anderen Baustoffen eine bis ins Detail reichende Betrachtung, um das Versagen durch lokal auftretende Überbeanspruchung sicher zu vermeiden.« Dieses Buch soll daher die Lücke schließen zwischen den Werken aus den Materialwissenschaften, bei denen die Beschreibung des Werkstoffs im Vordergrund steht und den Büchern aus der Ingenieurpraxis, die vor allem die Bemessung anhand der eingeführten Normen und Regelwerke behandeln. Denn der Entwurf, die Konstruktion, die Berechnung und Bemessung sowie die Ausführung von Glaskonstruktionen verlangen ein vertieftes Verständnis des Werkstoffverhaltens und der Einwirkungen. Zudem stellen die Quantifizierung lokaler Effekte mit mechanischen Modellen, die Entwicklung und mechanische Analyse der Details und die sorgfältige Qualitätssicherung und Ausführungsüberwachung hohe Anforderungen an alle Beteiligten.

Das Institut für Statik und Konstruktion der Technischen Universität Darmstadt ist seit über 25 Jahren aktiv im Bereich Glasbau bei Forschung, Beratung und Normung. Die aktuellen Forschungsergebnisse werden ebenfalls beim Springer-Verlag in der Schriftenreihe *Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen* veröffentlicht. Teile des Buchs sind zusammen mit diesen Veröffentlichungen entstanden. In einigen Abschnitten sind daher Formulierungen den entsprechenden Dissertationen entnommen (SCHULA, 2015; KUNTSCHKE, 2015).

Vorwort zur 1. Auflage

Glas hat eine Reihe von hervorragenden Eigenschaften, die seine Verwendung seit langer Zeit dominieren. Zunächst stand die Durchsichtigkeit bei gleichzeitigem Schutz vor »Wind und Wetter« für den Fensterbau im Vordergrund. Inzwischen hat Glas eine Reihe weiterer Gebiete erobert. Der Behälterbau, bei dem es auf Dichtheit, möglichst geringen Einfluss auf den jeweiligen Inhalt und gute Reinigungsmöglichkeit (z. B. Flaschen) ankommt, sei hier beispielhaft genannt. Als konstruktiver Werkstoff wurde Glas nur sehr zögerlich angenommen, da seine Sprödigkeit hinlänglich bekannt und als gewichtiges Argument gegen die Verwendung bei tragenden Bauteilen angeführt wurde. Durch umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind Glas und seine spezifische Eigenschaften so weit erschlossen, dass eine breitere Anwendung auch in sicherheitsrelevanten Bauteilen akzeptabel ist. Die zielsichere Ausnutzung der Glaseigenschaften für Bauteile und Baustrukturen verlangt mehr als bei allen anderen Baustoffen eine bis ins Detail reichende Betrachtung, um das Versagen durch lokal auftretende Überbeanspruchung sicher zu vermeiden. Der Ingenieur ist aufgefordert, alle möglichen Situationen und deren Konsequenzen zu berücksichtigen, um die Gefährdung durch versagende Bauteile unterhalb einer akzeptablen Schwelle zu halten. Diese Aufgabe umfasst gleichermaßen die möglichst genaue Berechnung der Beanspruchungen, die Kenntnis des Widerstandes und die konstruktive Durchbildung der Strukturen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen

XIII

1	Werkstoff Glas	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Glaszustand	2
1.2.1	Klassisches Modell der Glasstruktur	2
1.2.2	Glas – Festkörper oder Flüssigkeit?	3
1.2.3	Thermodynamik der Gläser	4
1.3	Glasstruktur von Gläsern im Bauwesen	9
1.3.1	Chemische Zusammensetzung	9
1.3.2	Atomare Struktur, Symmetrie und Ordnung der Gläser	11
1.3.3	Chemische Beständigkeit – Glaskorrosion	16
1.4	Eigenschaften von Gläsern im Bauwesen	19
1.4.1	Optische Eigenschaften	19
1.4.2	Allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften	23
2	Festigkeit von Glas	27
2.1	Allgemeines	27
2.2	Versagensmechanismen und Bruchverhalten von Glas	29
2.3	Grundlagen der linear-elastischen Bruchmechanik	31
2.4	Defekte auf der Glasoberfläche und an der Glaskante	36
2.5	Risswachstum und Ermüdungsverhalten	40
2.5.1	Subkritisches Risswachstum	40
2.5.2	Ermüdung von Glas	46
2.5.3	Rissheilungseffekte	53
2.6	Biegefestigkeit von Glas	57
2.6.1	Biegefestigkeit von Glas in Normen und Regelwerken	57
2.6.2	Prüfmethoden	60
2.6.3	Statistische Auswertung und charakteristische Biegefestigkeit	64
2.6.4	Einfluss der belasteten Fläche auf die Biegefestigkeit	73
2.7	Druckfestigkeit von Glas	76

3	Kunststoffe im Glasbau	79
3.1	Allgemeines	79
3.2	Mechanische Materialmodelle für Kunststoffe	84
3.2.1	Allgemeines	84
3.2.2	Lineare Elastizität	86
3.2.3	Nichtlineare Elastizität	86
3.2.4	Viskoelastizität	88
3.2.5	Plastizität	91
3.2.6	Versagenstheorien	91
3.3	Kleb- und Dichtstoffe	92
3.3.1	Allgemeines	92
3.3.2	Epoxidharz	93
3.3.3	Acrylat	94
3.3.4	Polyurethan	94
3.3.5	MS-Polymere	94
3.3.6	Silikon	94
3.3.7	Polysulfid	96
3.3.8	Polyisobutylen	96
3.4	Zwischenschichten von Verbundglas	96
3.4.1	Allgemeines	96
3.4.2	Polyvinylbutyral (PVB)	97
3.4.3	Ionoplast	98
3.4.4	Ethylenvinylacetat (EVA)	99
3.4.5	Thermoplastisches Polyurethan (TPU)	100
3.4.6	Gießharz	100
3.5	Kontaktmaterialien zur Krafteinleitung	101
3.5.1	Allgemeines	101
3.5.2	Thermoplaste	101
3.5.3	Elastomere	102
3.5.4	Vergussmörtel	102
3.6	Bauprodukte aus transparenten Kunststoffen	103
3.6.1	Allgemeines	103
3.6.2	Acrylglas (PMMA)	105
3.6.3	Polycarbonat (PC)	106
3.6.4	Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE)	106
3.7	Prüfmethoden	108
3.7.1	Allgemeines	108
3.7.2	Zugversuch	108
3.7.3	Dynamisch-mechanische Thermoanalyse	109
3.7.4	Weitere Prüfmethoden	111

3.8	Verträglichkeit und Dauerhaftigkeit	113
4	Bearbeitung von Glas	115
4.1	Allgemeines	115
4.2	Schneiden	115
4.3	Kantenbearbeitung	117
4.4	Bohrungen	119
4.5	Biegen	120
4.6	Beschichten	126
4.6.1	Eigenschaften	126
4.6.2	Wirkungsweise	126
4.6.3	Beschichtungsverfahren	130
4.6.4	Aufbau von Beschichtungen	132
4.7	Bedrucken und Emaillieren	133
4.8	Sandstrahlen	135
4.9	Ätzen	136
5	Vorspannen von Glas	139
5.1	Allgemeines	139
5.2	Thermisches Vorspannen	140
5.2.1	Vorspannprozess und Eigenspannungszustand	140
5.2.2	Biegefestigkeit	143
5.2.3	Prozesstechnologie und Vorspannöfen	144
5.2.4	Optische Anisotropien und Irisationen	147
5.2.5	Berechnungsmodelle für den Vorspannprozess und numerische Simulation	149
5.2.6	Spontanbruch durch Nickel-Sulfid und Heißlagerungstest	156
5.3	Chemisches Vorspannen	162
5.3.1	Allgemeines	162
5.3.2	Vorspannprozesse	162
5.3.3	Eigenschaften chemisch vorgespannter Gläser	164
5.4	Bruchstruktur	165
5.5	Spannungsoptische Messmethoden	168
6	Glasprodukte im Bauwesen	173
6.1	Allgemeines	173
6.2	Basisprodukte	178
6.2.1	Floatglas	178
6.2.2	Gussglas	179
6.2.3	Profilbauglas	180
6.2.4	Drahtglas und Drahtornamentglas	180

6.2.5	Gefärbtes Glas.....	182
6.2.6	Dünnglas.....	182
6.3	Vorgespanntes Glas	184
6.3.1	Einscheiben-Sicherheitsglas	184
6.3.2	Teilvorgespanntes Glas	186
6.3.3	Chemisch vorgespanntes Glas	188
6.4	Verbund- und Verbundsicherheitsglas.....	189
6.4.1	Definition	189
6.4.2	Herstellung	190
6.4.3	Prüfmethoden zur Haftung	192
6.4.4	Laminationsgebogenes Glas	195
6.5	Isolierverglasung	196
6.5.1	Allgemeines	196
6.5.2	Definition	198
6.5.3	Bauphysikalische Aspekte	198
6.5.4	Scheibenzwischenraum	202
6.5.5	Randverbund	204
6.5.6	Herstellung	206
6.5.7	Vakuumisolierglas.....	209
6.6	Brandschutzverglasung	210
6.6.1	Brandverhalten	210
6.6.2	Feuerwiderstand.....	210
6.7	Schutzverglasung	212
6.7.1	Allgemeines	212
6.7.2	Einbruchhemmung.....	212
6.7.3	Beschusshemmung.....	214
6.7.4	Sprengwirkungshemmung	216
6.8	Photovoltaikverglasung	218
6.8.1	Allgemeines	218
6.8.2	Modultypen.....	218
6.8.3	Lagerungsarten	219
6.8.4	Besondere Einwirkungen	219
6.8.5	Baurechtliche Situation und Empfehlung zur Bemessung	220
6.9	Verglasungen für solarthermische Anwendungen	221
6.10	Weitere Glasprodukte	223
6.10.1	Glassteine.....	223
6.10.2	Glasrohre	225
6.10.3	Schaltbare Verglasungen.....	226
6.10.4	Heizscheiben	228
6.10.5	Glaskeramik	228

6.10.6	Schaumglas	229
6.10.7	Glasfasern	230
7	Konstruktive Durchbildung von Details	231
7.1	Allgemeines	231
7.2	Lagerung von Glas	232
7.2.1	Linienlagerung	232
7.2.2	Punktlagerung	234
7.2.3	Geklebte und einlamierte Punkthalter	244
7.3	Fugenausbildung und Dichtungen	245
7.4	Kantenschutz	249
7.5	Klotzung	251
7.6	Ganzglasecken	254
7.7	Verbindungstechniken	257
8	Konstruktion und Bemessung	263
8.1	Allgemeines	263
8.2	Baurechtliche Gesichtspunkte	264
8.2.1	Allgemeines	264
8.2.2	Bauprodukte aus Glas	266
8.2.3	Bauarten aus Glas	268
8.2.4	Anwendungsorientierte Verwendung von Sicherheitsgläsern	270
8.3	Bemessungskonzepte	276
8.3.1	Grundlagen der Sicherheitskonzepte im Bauwesen	276
8.3.2	Bemessungskonzept nach DIN 18008	283
8.3.3	Sonstige Bemessungskonzepte	287
8.4	Besonderheiten bei der Glasbemessung	288
8.4.1	Einwirkungsdauer	288
8.4.2	Zwangs- und Temperatureinwirkungen	291
8.4.3	Lineare und nichtlineare Plattentheorie	293
8.4.4	Schubverbund bei Verbundgläsern	297
8.4.5	Resttragfähigkeit von Verglasungen	303
8.4.6	Klimabelastungen bei Isolierverglasungen	305
8.4.7	Koppeffekt bei Isolierverglasungen	310
8.4.8	Dynamische Einwirkungen	312
8.4.9	Empfehlungen zu Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM)	318
8.5	Nachweise durch Versuche	320
8.5.1	Allgemeines	320
8.5.2	Durchführung von Versuchen	321
8.5.3	Auswertung von Versuchsdaten	323

8.6	Glaskonstruktionen	326
8.6.1	Vertikalverglasungen	326
8.6.2	Horizontalverglasungen	327
8.6.3	Absturzsichernde Verglasungen	329
8.6.4	Begehbare Verglasungen	340
8.6.5	Betretbare und durchsturzsichernde Verglasungen	342
8.6.6	Geklebte Glasfassaden	344
8.6.7	Glasbalken und Glasschwerter	348
8.6.8	Glasstützen	352
8.6.9	Schubfelder	353
8.7	Transparente Kunststoffplatten	355
9	Instandhaltung und Schadensanalyse	357
9.1	Allgemeines	357
9.2	Reinigung und Wartung	358
9.2.1	Wartung und Instandhaltung von Glaskonstruktionen	358
9.2.2	Reinigung von Glaskonstruktionen	362
9.2.3	Sanierung von Glasoberflächen	365
9.3	Fraktografische Grundlagen	366
9.3.1	Allgemeines	366
9.3.2	Bruchspiegel	368
9.3.3	Wallner-Linien	370
9.3.4	Bruchbild und Verzweigungslänge von Einscheiben-Sicherheitsglas	371
9.4	Beurteilung von Schadensbildern	374
10	Bemessungsbeispiele nach DIN 18008	381
10.1	Linienförmig gelagerte Vertikalverglasung	381
10.2	Linienförmig gelagerte Horizontalverglasung	385
10.3	Absturzsichernde Verglasung	389
10.3.1	Vereinfachtes Verfahren mit statischen Ersatzlasten	389
10.3.2	Transientes Verfahren	394
10.4	Punktförmig gelagerte Vertikalverglasung	396
11	Ausblick	399
	Literatur- und Normenverzeichnis	401
	Fachbegriffe	427
	Sachverzeichnis	461

Abkürzungen und Formelzeichen

Wichtige Abkürzungen

abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
AFM	Atomkraftmikroskop
CG	Schaumglas (<i>cellular glass</i>)
CVG	chemisch vorgespanntes Glas
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMA, DMTA	Dynamisch-mechanische (Thermo-)Analyse
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
ESG	Einscheiben-Sicherheitsglas
ESG-H	heißgelagertes Einscheiben-Sicherheitsglas
ETA	Europäische Technische Bewertung (<i>European Technical Assessment</i>)
ETAG	ETA Leitlinie (<i>ETA Guideline</i>)
ETB	Eingeführte Technische Baubestimmungen
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen
EVA	Ethylen-Vinylacetat
FEM	Finite-Elemente-Methode
FG	Floatglas
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
KG	geschnittene Kante
KGN	geschliffene (feinjustierte) Kante
KGS	gesäumte Kante
KMG	maßgeschliffene (justierte) Kante
KPO	polierte Kante
LBO	Landesbauordnung
MBO	Musterbauordnung