

# Grundlagen zu linienförmig gelagerten Verglasungen nach TRLV

Der Werkstoff Glas im konstruktiven Ingenieurbau unter Verwendung der Technischen Regeln für linienförmig gelagerte Verglasungen von Dr.-Ing. Joachim Kretz



*Linienförmig gelagerte Glaskonstruktionen haben Einzug in die übliche Baupraxis genommen. So kommen Überkopferverglasungen in vielfältiger Weise im Wohnungsbau wie z. B. bei Wintergärten, Balkonüberdachungen oder Vordächern zum Einsatz. Fassaden werden als Vertikalverglasungen häufig liniengelagert ausgeführt. In den verschiedensten Ausführungsformen werden Glaskonstruktionen immer mehr zur Aufgabe in den Ingenieurbüros.*

Glas als tragendes Bauelement nimmt einen immer größeren Anteil am aktuellen Baugeschehen ein. Infolge umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind Glas und seine spezifischen Eigenschaften inzwischen soweit erschlossen, dass eine breite Anwendung möglich ist. Durch die Einführung Technischer Regeln u.a. für linienförmig gelagerte Verglasungen stehen dem praktisch tätigen Ingenieur umfangreiche Anwendungs- und Berechnungsgrundlagen zur Verfügung. Um jedoch die besonderen Eigenschaften des Werkstoffs Glas zielsicher auszunutzen zu können, ist eine möglichst genaue Berechnung der Beanspruchungen, die Kenntnis des Widerstandes

sowie der konstruktiven Durchbildung der Konstruktionen erforderlich. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über den Werkstoff Glas und dessen häufigste Anwendungen im konstruktiven Ingenieurbau für linienförmig gelagerte Verglasungen. Weiterhin werden die Bemessungsgrundlagen bei linienförmiger Lagerung nach TRLV vorgestellt.

Weitergehende Anwendungsbereiche, punktförmige Lagerungen, begehbare, betretbare sowie absturzsichernde Verglasungen, weitere Veredlungsprodukte und neue Verbindungstechniken im Glasbau sind einem weiteren Beitrag vorbehalten.

## 1. Werkstoff Glas

Der Werkstoff Glas unterscheidet sich grundlegend von den übrigen bekannten Werkstoffen des Bauwesens. Er verfügt wie z.B. Stahl über eine vergleichsweise hohe Festigkeit, doch fehlt die Zähigkeit und damit die Eigenschaft, durch Plastizieren Spannungsspitzen abzubauen zu können. Als spröder Werkstoff tritt bei Glas ein schlagartiges Versagen ohne Vorankündigung auf. Weiterhin besteht eine hohe Empfindlichkeit gegen Schläge mit harten, spitzen Gegenständen.

### 1.1 Basisglas

Als Basis-Gläser oder Basis-Produkte werden die direkt aus der Glasschmelze hergestellten Gläser bezeichnet. Bautechnisch relevante Glasarten sind Kalk-Natron-Silikatglas und Borosilikatglas. Aufgrund seiner hohen Temperaturwechselbeanspruchbarkeit wird Borosilikatglas vorwiegend als Brandschutzglas verwendet.

#### 1.1.1 Floatglas / Spiegelglas

Floatglas ist das zurzeit am meisten verwendete Bauglas. Es besitzt aufgrund seiner Herstellungsweise eine völlig verzerrungsfreie Oberfläche. Aus Floatglas werden vor allem Drahtspiegelglas und Spiegelglas für Fensterverglasungen sowie Veredelungsprodukte hergestellt, die in tragenden Glaskonstruktionen zum Einsatz kommen. Von der Oberflächenbeschaffenheit ist die mechanische Festigkeit in hohem Maße abhängig. Die Oberflächen von Glas sind infolge Herstellung, Gebrauch und mechanischer Witterungs- und Alterungseinflüsse durch Mikro- und teilweise durch Makrorisse geschädigt. Das Glasinnere besteht weitgehend aus fehlerfreiem Material. Wird eine Glaskonstruktion durch Zugkräfte beansprucht, kommt es am Rissgrund durch Kerbwirkung zu Spannungsspitzen, die nicht umgelagert werden können. Bereits kleinste Mikrorisse an der Oberfläche können zum Versagen der Glasscheibe führen.

#### 1.1.2 Gussglas

Gussglas ist charakterisiert durch eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Ornamentierung der Oberfläche. Gussgläser sind zum Teil mit Drahteinlagen versehen, die die Sicherheit hinsichtlich brandschutztechnischer Aspekte erhöhen.

### 1.2 Materialeigenschaften / Materialverhalten

Das Materialverhalten von Glas lässt sich als nahezu linear-elastisch bis zum spröden Bruch charakterisieren. In Bild 1 sind vergleichend die Spannungs-Dehnungslinien von Glas, Stahl und Beton dargestellt.

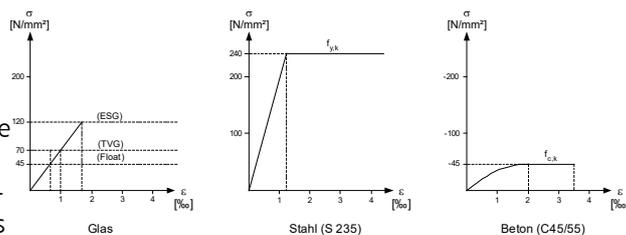


Bild 1. Idealisierte Spannungs-Dehnungslinien von Glas (Zugspannungen) im Vergleich zu Stahl (Zugspannungen) und Beton (Druckspannungen)

Die Bruchfestigkeit von Glas ist keine Materialkonstante, sondern hängt vom Oberflächenzustand ab. Glas „bricht“, sobald die von vielen Faktoren abhängige Rissausbreitungsgeschwindigkeit einen kritischen Wert überschritten hat. Wesentlich für die Rissausbreitung ist die Beanspruchung des Risses durch eine Zugspannung senkrecht zur Rissfläche.

Die prinzipielle Spannungsverteilung (Spannungsspitzen) in einem gekerbten Zugstab ist in Bild 2 zu erkennen. Durch die Reduzierung des Spannungsquerschnitts entstehen an der Rissspitze vielfach höhere Spannungen (im Vergleich zu ungestörten Bereichen), die nicht durch Plastizieren des Materials umgelagert werden können.

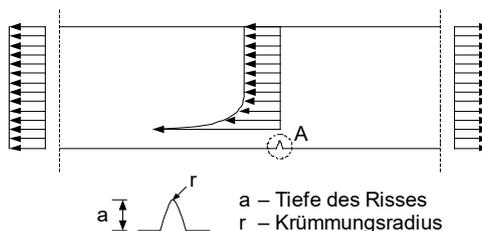


Bild 2. Spannungsverteilung in einem gekerbten Glas-Zugstab

In der Praxis ist die Entstehung von Mikrorissen als Oberflächendefekte nicht zu vermeiden. Um Glas als Werkstoff im konstruktiven Ingenieurbau als tragendes Bauteil einsetzen zu können, müssen die Basisgläser durch Zusatzmaßnahmen veredelt werden.

Die wesentlichen Einflussfaktoren, die die Beanspruchbarkeit von nicht vorgespanntem Floatglas bestimmen, sind:

- **Oberflächengröße:** Je größer die Oberfläche, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein für die Beanspruchung kritischer Riss in der Fläche vorhanden ist.
- **Belastungsdauer und Belastungsgeschwindigkeit:** Je schneller eine Last aufgebracht wird, umso weniger Zeit hat der Riss zum Nachwachsen. Aber auch wenn die Last nicht direkt zum Bruch führt, wachsen die Mikrorisse weiter. Somit hat auch die Höhe der Bruchlast und die Belastungsgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Tragfähigkeit.

- Spannungsverteilung: Eine Scheibe unter reiner Zugbeanspruchung  $\sigma$  (beide Oberflächen enthalten Mikrorisse) ist kritischer einzustufen als die gleiche Scheibe unter Biegebeanspruchung mit der maximalen Biegespannung  $\sigma$ .
- Oberflächenbeschaffenheit: Unterschiedliche Oberflächenbehandlungen führen zu unterschiedlichen Oberflächenqualitäten.
- Klimatische Bedingungen: Die Rissbildung wird durch Wasser als Korrosionsmittel beschleunigt.
- Kantenbearbeitung: Sie beeinflussen die Beanspruchbarkeit vor allem bei Beanspruchungen in Scheibenebene.
- Umgebungstemperatur: Die Biegefestigkeit sinkt mit steigender Temperatur; der Einfluss auf die Beanspruchbarkeit ist jedoch verhältnismäßig gering.

Die Auflistung der wesentlichen Einflussfaktoren zeigt, dass es sich bei der Bruchfestigkeit von Glas um keine Materialkonstante handelt, sondern um eine stark streuende Größe. Die in den Technischen Regeln angegebenen Beanspruchbarkeiten definieren ein Maß für die Wahrscheinlichkeit signifikanter Oberflächenschädigungen für eine bestimmte Nutzung.

Die wesentlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Kalk-Natron-Silikatglas und Borosilikatglas sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Eigenschaft	Einheit	Kalk-Natronglas DIN EN 572-1	Kalk-Natronglas DIN 1249-10 <sup>1)</sup>	Borosilikatglas DIN EN 1748-1-1
Dichte $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	2,5 · 10 <sup>3</sup>		2,2 bis 2,5 · 10 <sup>3</sup>
Elastizitätsmodul E	N/mm <sup>2</sup>	7,0 · 10 <sup>4</sup>	7,3 · 10 <sup>4</sup> <sup>2)</sup> 7,0 · 10 <sup>4</sup> <sup>3)</sup>	6,0 bis 7,0 · 10 <sup>4</sup>
Poissonzahl $\mu$	-	0,20	0,23	0,20
Spezifische Wärmekapazität c	J/(kg · K)	0,72 · 10 <sup>3</sup>	0,8 · 10 <sup>3</sup>	0,8 · 10 <sup>3</sup>
Mittlerer Thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha$ (20°C bis 300°C)	K <sup>-1</sup>	9,0 · 10 <sup>-6</sup>		3,1 bis 6,0 · 10 <sup>-6</sup>
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	W/(m · K)	1,0	0,8	1,0

<sup>1)</sup> Glas nach DIN 1249-10 ist geregelt nach Bauregelliste  
<sup>2)</sup> Technisch entspanntes Glas  
<sup>3)</sup> Thermisch vorgespanntes Glas

Tabelle 1. Mechanische und physikalische Eigenschaften von Kalk-Natron-Silikatglas und Borosilikatglas

### 1.3 Veredelungsprodukte des Glases

Erst durch die Veredelung der Basisgläser zu vorgespannten Gläsern, Verbundgläsern und Isoliergläsern wird die Verwendung von Glas im konstruktiven Bereich ermöglicht.

Zur Herstellung von vorgespannten Gläsern sind zwei Verfahren anwendbar, die:

- Thermische Vorspannung
- Chemische Vorspannung

#### 1.3.1 Thermisch vorgespannte Gläser

Bei thermisch vorgespanntem Glas wird die Druckfestigkeit des Glases durch das Einbringen von Eigenspannungen an der Oberfläche erhöht. Die Glasscheibe wird dabei auf eine festgelegte Temperatur (ca. 650°C) erhitzt und dann kontrolliert schnell abgekühlt. Im Inneren der Glasscheibe entstehen durch den Temperaturunterschied Zugspannungen, denen an den Oberflächen Druckspannungen gegenüberstehen. An der Glasoberfläche „überdrücken“ diese Spannungen die an den Mikrorissen zum Versagen führenden Spaltzugspannungen und erhöhen somit die Festigkeit des Produktes. Der prinzipielle Spannungsverlauf bei thermischer Vorspannung ist Bild 3 zu entnehmen.

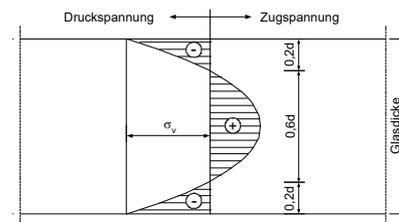


Bild 3. Spannungsverlauf bei thermisch vorgespanntem Glas

Wird eine Glasscheibe nach dem Vorspannen mit Biegebeanspruchungen belastet, so stellt sich der in Bild 4 angegebene prinzipielle Spannungsverlauf ein.

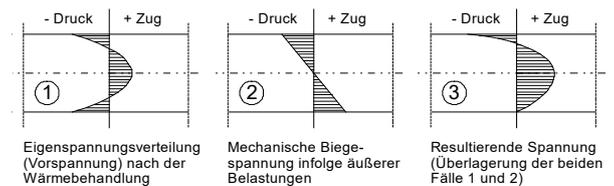


Bild 4. Resultierender Spannungsverlauf bei einer Biegebeanspruchung

#### 1.3.1.1 Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG)

ESG ist definiert als thermisch vorgespanntes Glas, das durch Erhitzen auf ca. 650°C und anschließendem schnellen Abkühlen vorgespannt wird. Durch die Abkühlung wird, wie zuvor bereits beschrieben, infolge der unterschiedlichen thermischen Kontraktion im Inneren eine Zugspannung und an der Oberfläche eine Druckspannung „eingefroren“. ESG ist ein baurechtlich eingeführtes Bauprodukt der Bauregelliste Teil A.

ESG zerspringt beim Bruch in kleine würfelförmige Teile, wodurch das Verletzungsrisiko reduziert wird.

Die Mindestbiegefestigkeit von ESG beträgt:  
 $f_{ct} = 120 \text{ N/mm}^2$

Die Oberflächendruckfestigkeit von ESG beträgt:  
 $100 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_0 \leq 150 \text{ N/mm}^2$

### 1.3.1.2 Heißgelagertes Einscheibensicherheitsglas (ESG-H)

Thermisch vorgespanntes heißgelagertes Einscheibensicherheitsglas ist ein baurechtlich eingeführtes Bauprodukt der Bauregelliste A. Einscheibensicherheitsglas kann aufgrund seines Herstellungsprozesses spontan ohne Vorankündigung und ohne offensichtliche äußere Einwirkung brechen. Ursache dafür ist u.a. eine in der Glasmasse enthaltene Nickelsulfid-Einlagerung. Um das spontane Versagen zu vermeiden, wird ESG nach der Herstellung einem Heißlagerungstest unterzogen. In diesem Prozess wird das Glas über mehrere Stunden bei 290°C im Ofen gelagert. Scheiben mit Nickel-Sulfid-Einschlüssen überstehen den Test nicht und zerbrechen im Ofen. Bei Gläsern, die den Heißlagerungstest bestanden haben (ESG-H-Gläser), kann davon ausgegangen werden, dass sie nach dem Einbau nicht aufgrund der Umwandlung der Nickel-Sulfid-Einschlüsse brechen werden.

### 1.3.1.3 Teilvorgespanntes Glas (TVG)

Der Herstellungsprozess von TVG entspricht dem von ESG. Durch ein langsames Abkühlen wird jedoch eine geringere Vorspannung erzeugt. Aus diesem Grund hat TVG eine geringere Biegefestigkeit als ESG.

Das Bruchbild ähnelt dem von Floatglas, wodurch bei Folienverbund eine bessere Verzahnung der größeren Bruchstücke zu einer Verbesserung der Resttragfähigkeit führt. TVG ist kein Produkt der Bauregelliste und wird national im Rahmen einer herstellereinspezifischen bauaufsichtlichen Zulassung geregelt.

Die Mindestbiegefestigkeit von TVG beträgt:  
 $f_{ct} = 70 \text{ N/mm}^2$

Die Oberflächendruckfestigkeit von TVG beträgt:  
 $30 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_0 \leq 50 \text{ N/mm}^2$

### 1.3.2 Chemisch vorgespannte Gläser

Als Alternative zur thermischen Vorspannung steht die chemische Vorspannung zur Verfügung. Der Einsatz der chemischen Vorspannung erfolgt vor allem bei dünnen Scheiben (Scheibendicke 2 – 3 mm). Bei chemischem Vorspannen, oder besser bei der chemischen Verfestigung, werden

die Glasscheiben in eine Kaliumnitratschmelze eingetaucht. Dabei erfolgt im Laufe der Zeit ein Ionenaustausch der Na-Ionen durch die Ca-Ionen. Hierdurch werden die Oberflächen-druckspannungen erhöht, die wie bei den thermisch vorgespannten Glasscheiben zu einer größeren Festigkeit führen. Die so entstehenden Oberflächen-druckspannungen sind höher als die aus der thermischen Vorspannung erzielten. Die Vorspannung kann sehr hohe Werte erreichen, die chemisch vorgespannte Gläser für Spezialanwendungen interessant machen.

### 1.3.3 Verbund-Sicherheitsglas (VSG)

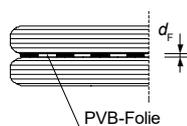


Bild 5. Prinzipieller Aufbau eines Verbund-Sicherheitsglases (VSG)

$0,38 \text{ mm} \leq d_F \leq 2,28 \text{ mm}$

Verbund-Sicherheitsglas ist eine mit einer elastischen, reißfesten Folie, meist Poly-Vinyl-Butyral (PVB) aus mindestens zwei Flachgläsern verbundene Glaseinheit. VSG hat die Funktion, im Falle eines Bruches Glasbruchstücke zurückzuhalten, die mögliche Öffnungsgröße zu begrenzen und eine Reststandfestigkeit zu gewährleisten, um das Risiko von Schnitt- und Stichverletzungen zu minimieren. Die PVB-Folien der Dicke 0,38 mm werden unter Druck und Erwärmung ein- oder mehrlagig bis zu einer Dicke von 2,28 mm eingebaut.

Verbundsicherheitsglas ist in Deutschland nur mit einer PVB-Folie bauaufsichtlich geregelt. VSG mit PVB-Folie ist ein bauaufsichtlich eingeführtes Bauprodukt der Bauregelliste Teil A.

Der Vorteil der Verbindung mittels PVB-Folie zeigt sich darin, dass das gebrochene Glaselement ein „duktileres“ Versagensverhalten zeigt. Dieses Verhalten wird allgemein als Resttragfähigkeit definiert. Es hat sich gezeigt, dass nicht- oder teilvorgespannte Gläser eine höhere Resttragfähigkeit besitzen als Verbundsicherheitsgläser aus ESG. Deshalb darf Verbundsicherheitsglas in Überkopfsituationen (Neigungswinkel größer als 10° gegenüber der Vertikalen) als untere Scheibe nach den momentan geltenden Technischen Regeln (TRLV) nicht aus ESG bestehen.

### 1.3.4 Verbundglas (VG)

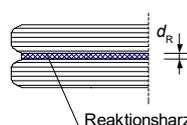


Bild 6. Prinzipieller Aufbau eines Verbundglases (VG)

$1,0 \text{ mm} \leq d_R \leq 4,0 \text{ mm}$

Verbundglas ist eine aus mindestens zwei Flachgläsern mittels Reaktionsharzen verbundene Glaseinheit. Die Dicke der Zwischenschicht beträgt zwischen 1 mm und 4 mm. Die Verbundgläser eignen sich für Spezialanwendungen (Schallschutzgläser, ...), da die Verbindungsschichten (Gießharze) in ihrer Zusammensetzung auf die spezielle Anwendung angepasst werden können.

Verbundgläser sind kein Produkt der Bauregelliste und zurzeit in Deutschland nur in Form von Zulassungen oder Zustimmung im Einzelfall geregelt.

### 1.3.5 Isoliergläser

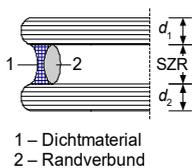


Bild 7. Prinzipieller Aufbau von Isoliergläsern (VSG)

Als Isolierglas bezeichnet man eine Verglasungseinheit aus mindestens zwei Gläsern, die durch einen Scheibenzwischenraum (SZR; mindestens 8 mm bis 16 mm) mit eingeschlossenem Luft-/ Gasvolumen voneinander getrennt und nur durch einen Randverbund miteinander verbunden sind. Ausgangsprodukte für Mehrscheiben-Isolierglas sind die zuvor beschriebenen Basisprodukte.



Bild 8. Beispiel einer Vertikalverglasung

Isoliergläser werden zur Wärme- und Schalldämmung oder zum Sonnenschutz eingesetzt. Zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften und zur Erhöhung des Schallschutzes erfolgt eine Füllung des SZR mit Spezialgasen.

Die Glasscheiben werden infolge der Klimabelastungen (siehe hierzu Abschnitt 3.2.2.2) als allseitig linienförmig gelagerte Platte beansprucht. Durch das eingeschlossene Luft- und Gasvolumen ist eine mechanische Kopplung der Einzelscheiben gegeben. Die der Last zugewandte Seite verformt sich entsprechend ihrer Steifigkeit. Damit verbunden ist eine Änderung des Drucks im SZR, der eine Verformung

der lastabgewandten Scheibe bewirkt. Bei der Bemessung bzw. dem Nachweis von Isoliergläsern ist eine Klimabelastung zu berücksichtigen. Innere und äußere Scheibenaufbauten können aus unterschiedlichen Gläsern bestehen. Je nach Einsatzbedingungen werden VSG und/oder VG erforderlich.

## 2. Konstruieren mit Glas

Konstruktionen und deren Details sind vom Tragwerksplaner **materialgerecht** zu entwickeln und zu planen. Bei Glaskonstruktionen müssen diese Planungen den Besonderheiten des spröden Materials Glas gerecht werden. Es ist deshalb erforderlich, alle Einwirkungen möglichst realistisch zu erfassen und die daraus resultierenden Beanspruchungen gegenüber dem Materialwiderstand gering zu halten. Unplanmäßige Zwängungen sind grundsätzlich durch konstruktive Maßnahmen zu vermeiden oder zu begrenzen.

### 2.1 Konstruktive Details - Linienlagerung

Um Oberflächenschäden und Spannungskonzentrationen zu vermeiden, darf kein Kontakt zwischen Glas und harten Werkstoffen erfolgen. Grundsätzlich gilt bei allen Lagerungsarten, dass der direkte Kontakt zwischen Glas und Glas bzw. Glas und Stahl durch weiche Zwischenschichten dauerhaft verhindert werden muss.

Die Linienlagerung stellt den häufigsten Lagerungsfall dar. Linienlager klemmen die Scheibe an der Glaskante ein. Je nach Breite der Klemmfläche lässt sich eine quasi gelenkige bis drehsteife Lagerung einrichten.

Von verschiedenen Herstellern werden eine Vielzahl von Aluminium-Strangpressprofilen im Fenster- und Fassadenbau angeboten, die den statischen, konstruktiven und bauphysikalischen Anforderungen gerecht werden. Beispielhaft ist in Bild 9 eine Linienlagerung einer Isolierglasscheibe mit Soghalterung abgebildet.

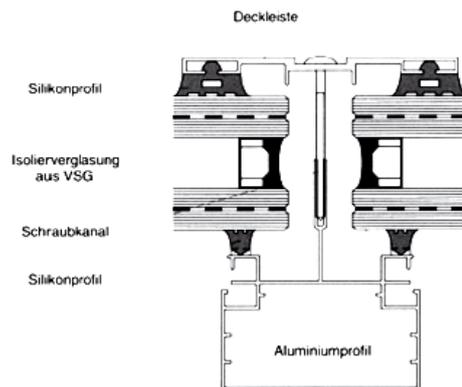


Bild 9. Lagerung einer Isolierglasscheibe und Soghalterung nach [ 3 ]

## 2.2 Typisierte Glaskonstruktionen

### 2.2.1 Vertikalverglasungen

Unter Vertikalverglasungen versteht man Glasscheiben mit einer Neigung von bis zu 10° gegenüber der Vertikalen. Die Vertikalverglasungen stellen den häufigsten Anwendungsfall im Glasbau

dar. Beansprucht werden Vertikalverglasungen durch das Eigengewicht und durch kurzfristige Einwirkungen aus Wind. Ist jedoch bei Vertikalverglasungen mit Anhäufung von Schnee zu rechnen (z.B. Sheddächer), gelten die Anforderungen für Überkopfverglasungen.

### 2.2.2 Überkopfverglasungen



Bild 10. Beispiel einer Überkopfverglasung

Verglasungen mit einer Neigung von mehr als 10° gegenüber der Vertikalen werden als Überkopfverglasung bezeichnet. Bei Überkopfverglasungen sind die planmäßigen Bemessungslasten infolge von Eigengewicht, Wind und Schnee anzusetzen. Durch die im Vergleich zur Vertikalverglasung höhere Biegebeanspruchung infolge der Einwirkungen aus Eigengewicht und Schnee muss bei der Ausführung Verbundsicherheitsglas eingesetzt werden.

## 3. Bemessung von Glasbauteilen

### 3.1 Baurechtliche Situation – Technische Baubestimmungen

Aktuell gibt es nur die „Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen“ (TRLV) [1], die DIN 18 516-4 [2] und die „Technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen“ (TRAV) als bauaufsichtlich eingeführte Regelwerke für die Berechnung und Bemessung von Glasbauteilen.

Bauteile aus Glas, die nicht durch eine der eingeführten Regelwerke zu erfassen sind und für die keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) oder ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (abP) vorliegt, unterliegen immer einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE).

### 3.2 Allgemeine Grundlagen der Berechnung und Bemessung

#### 3.2.1.1 Tragfähigkeit

Die Sicherstellung einer ausreichenden Tragfähigkeit ist die vorrangigste Aufgabe einer jeden Bemessung. Da die Zugfestigkeit von Glas wesent-

lich geringer ist als seine Druckfestigkeit, wird der Nachweis der Tragfähigkeit für Verglasungen auf dem Niveau der Hauptzugspannungen geführt. In den vorhandenen, Technischen Regeln (TRLV) wird der Tragfähigkeitsnachweis durch Vergleich der vorhandenen Zugspannung mit der zulässigen Spannung geführt.

$$\text{vorh. } \sigma \leq \text{zul. } \sigma = \sigma_R / \gamma$$

#### 3.2.1.2 Gebrauchstauglichkeit

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist ein reiner Durchbiegungsnachweis. Hierbei erfolgt die Nachweisführung durch Vergleich der charakteristischen Durchbiegungswerte mit definierten Grenzwerten.

#### 3.2.1.3 Resttragfähigkeit

Bei Glas gibt es infolge des linearelastisch-spröden Verhaltens keinen kontinuierlichen Übergang vom intakten zum zerstörten Zustand. Durch die Sicherstellung der sogenannten Resttragfähigkeit soll dieser Besonderheit von Glas Rechnung getragen werden. Die Ermittlung der Resttragfähigkeit wird aktuell nur durch Versuche erbracht. Durch Einhaltung von entsprechenden Randbedingungen und konstruktiver Vorgaben wird eine ausreichende Resttragfähigkeit sichergestellt.

### 3.2.2 Besonderheiten bei der Bemessung von Glaskonstruktionen

Um wirklichkeitsnahe Beanspruchungen einer Glaskonstruktion zu erhalten, muss das Tragverhalten für eine statische Berechnung möglichst genau idealisiert werden.

#### 3.2.2.1 Schubverbund bei Verbundgläsern (VG / VSG)

Das tatsächliche Tragverhalten einer Verbundscheibe wird durch den Schubverbund entscheidend mitbestimmt. Je nach Temperaturbereich und Belastungsdauer herrscht ein mehr oder weniger guter Schubverbund zwischen den Scheiben. Ursache dafür ist, dass die PVB-Folie und die Reaktionsharze ein ausgeprägtes Kriechverhalten aufweisen.

Bei Kurzzeitlasten und Temperaturen unter 50°C besteht eine nahezu vollständige Verbundwirkung. Bei Beanspruchungen, die über einen längeren Zeitraum bei niedrigen Temperaturen wirken (z.B. Schneelasten) ist ein hoher Schubverbund festzustellen. Bei Raumtemperatur sinkt die Tragfähigkeit infolge teilweisem Schubverbundes ab. Nahezu kein Verbund herrscht dagegen bei höheren Temperaturen. In Bild 11 ist das prinzipielle Verbundverhalten von Verbundgläsern (ohne Verbund, teilweiser Verbund und vollem Verbund) dargestellt.

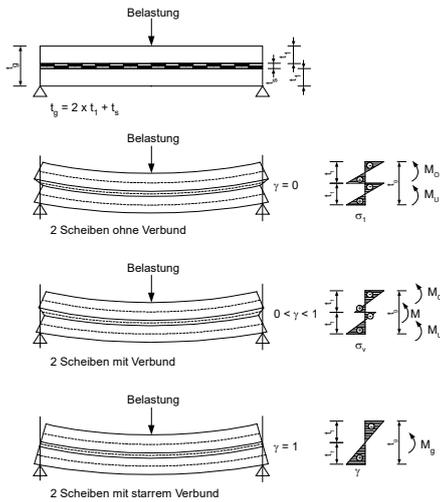


Bild 11. Verbundverhalten von Verbundgläsern

Aufgrund der zuvor beschriebenen starken Abhängigkeiten von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit darf nach den derzeit eingeführten Technischen Regeln **kein Verbund** zwischen den einzelnen Glasscheiben einer VSG-Scheibe angesetzt werden.

Ohne Verbund verteilt sich die Belastung auf die Einzelscheiben im Verhältnis der einzelnen Biegesteifigkeiten zur gesamten Biegesteifigkeit. Für Verformungsberechnungen für eine Scheibe ergibt sich für eine Scheibe mit n Glasschichten der Dicken  $d_1$  bis  $d_n$ :

$$d = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n d_i^3}$$

Bei Scheibenaufbauten aus Einzelscheiben gleicher Dicke, kann die Last durch die Anzahl der Einzelscheiben dividiert und anschließend der Nachweis mit der Einzelscheibe geführt werden.

VSG-Scheiben als Teil einer Isolierverglasung bilden derzeit eine Ausnahme, da sich bei diesen Gläsern die Verbundwirkung lasterhöhend für die benachbarten Scheiben auswirken kann. Aus diesem Grund müssen bei **Isolierverglasungen immer beide Grenzzustände** „ohne Verbund“ und „voller Verbund“ untersucht werden. Für den vollen Verbund gilt für die Ersatzdicke d:

$$d = \sum_{i=1}^n d_i$$

### 3.2.2.2 Klimalasten bei Isolierglasscheiben

Durch das eingeschlossene Gasvolumen bei Isolierglasscheiben entstehen zusätzliche Beanspruchungen der einzelnen Glasscheiben durch Druckunterschiede zwischen Scheibenzwischenraum (SZR) und der Umgebung. Desweiteren werden äußere Einwirkungen auf eine Scheibe teilweise auf die andere bzw. die anderen durch **Kopplung** über den SZR übertragen; d.h. alle

Scheiben werden am Lastabtrag beteiligt. Bei der Verformung der direkt belasteten Scheibe ändert sich das Volumen des Füllgases und führt dadurch zu einer Belastung der nicht direkt beanspruchten Scheibe. Die Belastung verteilt sich somit auf alle Scheiben des Isolierglases. Die Größe des Lastabtrages der jeweiligen Scheibe ist von den Steifigkeiten der Einzelscheiben und von dem Isolierglasfaktor abhängig. Im Anhang A der TRLV ist dieses Berechnungsverfahren für Isolierglas beschrieben. An dieser Stelle wird deshalb auf den Anhang A [1] verwiesen.

### 3.2.2.3 Berechnungsverfahren

Glaskonstruktionen sind extrem schlanke Bauteile mit relativ großen Verformungen (im Vergleich zur Bauteil- bzw. Scheibendicke). In den Regelwerken und Richtlinien sind hinsichtlich der zu verwendenden Theorie zur Berechnung der Schnittgrößen und Verformungen für Glaskonstruktionen keine Angaben enthalten. Zur Ermittlung dieser Werte stehen grundsätzlich die lineare Plattentheorie oder eine nichtlineare Schalentheorie zur Verfügung.

Bei einer linearen Plattentheorie werden Plattenmomente und Querkräfte ermittelt, während bei einer nichtlinearen Schalentheorie eine Kombination von Platten- und Membrantragwirkung berücksichtigt werden kann.

Die Einbeziehung der Membrantragwirkung führt zu einer Versteifung des Systems mit der Folge, dass sich Verformungen und Spannungen bei gleicher Belastung reduzieren.

Für eine wirtschaftliche Bemessung sollte eine geometrisch nichtlineare Berechnung unter Berücksichtigung von Membranspannungszuständen durchgeführt werden.

## 4. Nachweise und Bemessung von Glasbauteilen nach TRLV (08/06)

### 4.1 Geltungsbereich - Anwendungsbereich

Die Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen gelten sowohl für Überkopf- als auch für Vertikalverglasungen. Dabei müssen mindestens zwei gegenüberliegende Seiten linienförmig gelagert sein. Je nach ihrer Neigung zur Vertikalen erfolgt die Einteilung in:

- Überkopfverglasungen: Neigung > 10°
- Vertikalverglasungen: Neigung ≤ 10°

Die Technischen Regeln gelten explizit **nicht** für:

- geklebte Fassadenelemente
- Verglasungen, die planmäßig zur Aussteifung herangezogen werden

- gekrümmte Überkopfverglasungen
- Kombinationen aus linien- und punktförmig gelagerten Verglasungen

Alle Vertikal- oder Überkopfverglasungen, die nicht der TRLV entsprechen, bedürfen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE).

Für Verglasungen, die gegen Absturz sichern, sowie für begehbare oder betretbare Verglasungen sind zusätzliche Anforderungen zu erfüllen (auf die aber im Rahmen dieses Beitrages nicht näher eingegangen wird).

### 4.2 Verwendbare Glaserzeugnisse

Nach der TRLV dürfen nachfolgende Glaserzeugnisse verwendet werden:

- Spiegelglas nach DIN 1249-3 (02/80)
- Gussglas (Drahtglas oder Ornamentglas) nach DIN 1249-4 (08/81)
- Einscheiben-Sicherheitsglas: ESG nach DIN 1249-12 (09/90)
- Heißgelagertes Einscheiben-Sicherheitsglas: ESG-H nach Bauregelliste A
- Teilvorgespanntes Glas: TVG nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung
- Verbund-Sicherheitsglas: VSG aus Gläsern nach a) bis d) mit Zwischenfolien aus Polyvinyl-Butyral (PVB-Folie) oder aus anderen Gläsern bzw. mit anderen Zwischenschichten, deren Verwendbarkeit z.B. durch eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung nachgewiesen ist.
- Verbundglas: VG aus Gläsern nach a) bis e) mit sonstigen Zwischenschichten

Als Materialkennwerte für Glas nach 4.2 a) bis 4.2 c) sind anzunehmen:

- Elastizitätsmodul  $E = 70.000 \text{ N/mm}^2$
- Querdehnzahl  $\mu = 0,23$
- Thermischer Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Physikalische Eigenschaften gemäß DIN 1249-10 (08/90) und DIN 1249-12 (09/90)

### 4.3 Einwirkungen

Hinsichtlich der Einwirkungen verweist die TRLV auf die DIN 1055 mit den bauaufsichtlich bekannt gemachten Technischen Baubestimmungen. Die zu berücksichtigenden Einwirkungen stellen immer eine flächige Beanspruchung senkrecht zur Glasscheibenebene dar. Als statische Einwirkungen sind bei Einzelverglasungen die Eigengewichtlasten, sowie Wind- und Schneelasten (bei Überkopfverglasungen) zu berücksichtigen.

Bei Isolierverglasungen ist zusätzlich zu den Einwirkungen nach DIN 1055 die Wirkung von Druckdifferenzen  $p_0$  zu berücksichtigen, die sich

aus der Veränderung der Temperatur  $\Delta T$  und des meteorologischen Luftdrucks  $\Delta p_{\text{met}}$  sowie aus der Differenz  $\Delta H$  der Ortshöhe zwischen Herstellungs- und Einbauort ergeben. Als Herstellungsort gilt der Ort, an dem die endgültige Scheibenabdichtung eingebaut wurde.

Es sind die beiden Einwirkungskombinationen nach Tabelle 2 zu berücksichtigen.

Einwirkungskombination	$\Delta T$ in K	$\Delta p_{\text{met}}$ in $\text{kN/m}^2$	$\Delta H$ in m	$p_0$ in $\text{kN/m}^2$
Sommer	+20	-2	+600	+16
Winter	-25	+4	-300	-16

Tabelle 2. Rechenwerte für klimatische Einwirkungen und den resultierenden isochoren Druck  $p_0$

In Tabelle 2 ist:

- $\Delta T$  Temperaturdifferenz zwischen Herstellung und Gebrauch
  - $\Delta p_{\text{met}}$  Differenz des meteorologischen Luftdrucks am Einbauort und bei der Herstellung
  - $\Delta H$  Differenz der Ortshöhe zwischen Einbauort und Herstellungsort
  - $p_0$  aus  $\Delta T$ ,  $\Delta p_{\text{met}}$  und  $\Delta H$  resultierender isochorer Druck
- $$p_0 = c_1 \cdot \Delta T - \Delta p_{\text{met}} + c_2 \cdot \Delta H$$
- mit  $c_1 = 0,34 \text{ kPa/K}$   
und  $c_2 = 0,012 \text{ kPa/m}$

Falls die Differenz der Ortshöhen  $\Delta H$  bekannt ist, so ist statt der Rechenwerte nach Tabelle 2 der tatsächliche Wert zu berücksichtigen.

Voraussetzung für den Ansatz der Rechenwerte für die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  nach Tabelle 2 ist die Verwendung von Isolierglas, das einen Gesamtabsorptionsgrad von weniger als 30% aufweist und nicht durch andere Bauteile oder Sonnenschutzvorrichtungen aufgeheizt wird.

Ist – aufgrund außergewöhnlicher Einbaubedingungen – mit ungünstigeren Temperaturbedingungen zu rechnen, so sind zusätzlich die Werte  $\Delta T$  oder  $p_0$  nach Tabelle 3 zu verwenden.

Einwirkungskombination	Ursache für erhöhte Temperaturdifferenz	$\Delta T$ in K	$\Delta p_0$ in $\text{kN/m}^2$
Sommer	Absorption zwischen 30% und 50%	+9	+3
	innenliegender Sonnenschutz (ventiliert)	+9	+3
	Absorption größer 50%	+18	+6
	innenliegender Sonnenschutz (nichtventiliert)	+18	+6
	dahinterliegende Wärmedämmung (Paneel)	+35	+12
Winter	unbeheiztes Gebäude	-12	-4

Tabelle 3. Zusätzliche Werte  $\Delta T$  und  $p_0$  zur Berücksichtigung besonderer Temperaturbedingungen am Einbauort

In Kapitel 3.2.2.3 ist ein Verfahren beschrieben, mit dem die Einwirkungen für allseitig gelagerte, ebene Isolierverglasungen mit rechteckigen Scheiben berechnet werden können. Dieses Verfahren ist ebenfalls im Anhang A der TRLV [1] angegeben. Die Anwendung vergleichbarer Verfahren zur Bestimmung der Einwirkungen für Isolierverglasungen ist zulässig.

**4.3.1 Einwirkungskombinationen nach TRLV**

Die Einwirkungen nach DIN 1055 sind für linienförmig gelagerte Verglasungen zu berücksichtigen. Die gleichzeitige Einwirkung von Eigengewichtslasten, Wind  $w$  und Schnee  $s$  ist nach dem globalen Sicherheitskonzept über die Kombinationen:

- $g + s + w/2$  bzw.
- $g + w + s/2$

zu berücksichtigen. Der ungünstigere Wert ist dabei maßgebend.

**4.4 Standsicherheits- und Durchbiegungsnachweise**

Für die Nachweisführung sind zu beachten:

- Die Glasscheiben sind für die Einwirkungen nach dem Kapitel 4.3 unter Beachtung aller beanspruchungserhöhenden Einflüsse zu bemessen.
- Bei Isolierverglasungen ist die Kopplung der Einzelscheiben über das eingeschlossene Gasvolumen zu berücksichtigen.
- Bei Standsicherheitsnachweisen von VSG- oder VG-Einfachverglasungen darf ein günstig wirkender Schubverbund der Scheiben nicht berücksichtigt werden. Gleiches gilt für die Schubkopplung von Isolierverglasungen über den Randverbund.
- Bei Vertikalverglasungen aus Isolierglas mit VSG oder VG ist bei den Nachweisen für veränderliche Einwirkungen zusätzlich der Grenzzustand des vollen Schubverbundes zu berücksichtigen.
- Die untere Scheibe einer Überkopfverglasung aus Isolierglas ist außer für den Fall der planmäßigen Einwirkungen (Wind, Schnee, Klimalasten) auch für den Fall des Versagens der oberen Scheibe mit deren Belastung zu bemessen.

**4.4.1 Standsicherheit**

Die Nachweisführung und die Bemessung von Glas erfolgen auf der Grundlage der TRLV nach dem globalen Sicherheitskonzept mit charakteristischen Spannungen.

**4.4.2 Spannungsnachweise**

Für linienförmig gelagerte Verglasungen ist nachzuweisen, dass die zulässigen Biegespannungen

nach Tabelle 4 nicht überschritten werden. Das Nachweisformat lautet:

$$\text{vorh. } \sigma \leq \text{zul. } \sigma$$

Glassorte	Überkopfverglasung	Vertikalverglasung
ESG aus SPG	50	50
ESG aus Gussglas	37	37
Emailliertes ESG aus SPG*	30	30
SPG	12	18
Gussglas	8	10
VSG aus SPG	15 (25**)	22,5
* Emaille auf der Zugseite ** Nur für die untere Scheibe einer Überkopfverglasung aus Isolierglas beim Lastfall „Versagen der oberen Scheibe“ zulässig		

Tabelle 4. Zulässige Biegespannungen in N/mm<sup>2</sup>

Bei der Bemessung dürfen die zulässigen Biegespannungen der Tabelle 4 im Allgemeinen um 15 % und bei Vertikalverglasungen mit Scheiben aus SG und Glasflächen bis zu 1,6 m<sup>2</sup> im Besonderen um 25 % erhöht werden.

**4.4.3 Gebrauchstauglichkeit**

Die Durchbiegungsnachweise von Glas erfolgen auf der Grundlage der TRLV nach dem globalen Sicherheitskonzept mit charakteristischen Verformungen.

**4.4.4 Durchbiegungsnachweise**

Die Durchbiegungen der Glasscheiben dürfen an ungünstigster Stelle nicht größer als die Werte der Tabelle 5 sein.

Lagerung	Überkopfverglasung	Vertikalverglasung
vierseitig	1/100 der Scheibenstützweite in Haupttragrichtung	keine Anforderung**
zwei- und dreiseitig	Einfachverglasung: 1/100 der Scheibenstützweite in Haupttragrichtung	1/100 der freien Kante*
	Scheiben der Isolierverglasung: 1/200 der freien Kante	1/100 der freien Kante**
* Auf die Einhaltung dieser Begrenzung kann verzichtet werden, sofern nachgewiesen wird, dass unter Last ein Glaseinstand von 5 mm nicht unterschritten wird. ** Durchbiegungsbegrenzungen des Isolierglasherstellers sind zu beachten.		

Tabelle 5. Durchbiegungsbegrenzungen

**4.4.5 Nachweiserleichterungen für Vertikalverglasungen**

Ohne weiteren Nachweis können für Einbauhöhen bis 20 m über Gelände bei normalen Produktions- und Einbaubedingungen allseitig gelagerte Isolierverglasungen verwendet werden, wenn folgende Bedingungen eingehalten sind:

- Glaserzeugnis: SPG, TVG oder ESG
- Fläche:  $\leq 1,6 \text{ m}^2$
- Scheibendicke:  $\geq 4 \text{ mm}$
- Differenz der Scheibendicken:  $\leq 4 \text{ mm}$
- Scheibenzwischenraum:  $\leq 16 \text{ mm}$
- Windlast w:  $\leq 0,8 \text{ kN/m}^2$

#### 4.5 Anwendungsbedingungen nach TRLV

##### 4.5.1 Vertikalverglasungen

Alle geregelten Glasarten dürfen verwendet werden, wenn die nachfolgenden Anwendungsbedingungen Berücksichtigung finden.

- Vertikalverglasungen müssen mechanisch befestigt sein und dürfen nur ausfachende Funktion haben.
- Bohrungen und Ausschnitte sind nur in Scheiben aus ESG oder VSG zulässig.
- Einfach-Verglasungen als Spiegelglas, Ornametglas oder VG müssen allseitig gelagert sein
- Für Scheiben
  - o bei denen Gefahr besteht, dass sie einer besonderen Temperaturbeanspruchung unterliegen oder
  - o die eine Energieabsorption von mehr als 65 % ausweisen oder
  - o die nicht allseitig durchlaufend eingefasst sind,

ist heißgelagertes Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG-H) nach Bauregelliste A Teil 1 zu verwenden.

##### 4.5.2 Überkopfverglasungen

- Für Überkopfverglasungen von Wohnungen (Balkonüberdachungen, Wintergärten,...) mit einer Scheibenspannweite  $\leq 80 \text{ cm}$  und einer Einbauhöhe  $\leq 3,50 \text{ m}$  dürfen alle Gläser nach Kapitel 4.2 verwendet werden.
- Für Einfach-Verglasungen und für die untere Scheibe von Isolier-Verglasungen darf nur Drahtglas oder VSG aus Spiegelglas verwendet werden.
- Bohrungen und Ausschnitte in Überkopfverglasungen sind unzulässig.
- Bei Stützweiten größer 1,20 m sind VSG-Scheiben aus Spiegelglas allseitig zu lagern, dabei darf das Seitenverhältnis nicht größer als 3:1 sein.
- Drahtglas ist nur bei einer Stützweite in Haupttragrichtung von  $\leq 0,70 \text{ m}$  zulässig. Der Glaseinstand von Drahtglas muss mindestens 15 mm betragen.
- Bei VSG als Einfach-Verglasung oder als untere Scheibe einer Isolier-Verglasung muss die Gesamtdicke der PVB-Folie im Allgemeinen mindestens 0,76 mm betragen. Eine Dicke von 0,38 mm ist zulässig bei allseitiger Lagerung mit einem Seitenverhältnis nicht größer als 3:1

und einer Stützweite in Hauptrichtung bis zu 0,80 m.

- Die Auflagerung von zweiseitig gelagerten Verglasungen ist mit Dichtstoffen nach DIN 18 545-2 Gruppe E auszuführen. Bei geschraubten Andruckprofilen/Abdeckleisten sind vorgefertigte Dichtprofile nach DIN 7863 Gruppe A bis D zulässig.
- Wird durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. durch dauerhafte, ausreichend tragfähige Netze mit einer Maschenweite  $\leq 40 \text{ mm}$ , verhindert, dass größere Glasteile auf Verkehrsflächen herabfallen, dann kann von den o. a. Regeln abgewichen werden.

Dr.-Ing. J. Kretz  
mb AEC Software GmbH  
mb-news@mbaec.de

#### 5. Literatur

- [1] Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV), Schlussfassung August 2006.
- [2] DIN 18 516-4: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet: Einscheiben-Sicherheitsglas, Anforderungen, Bemessung, Prüfung. Februar 1990
- [3] Wörner, J.; Schneider, J.; Fink, A.: Glasbau – Grundlagen, Berechnung, Konstruktion. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg 2001
- [4] Siebert, G.; Herrmann, T.; Haese, A.: Konstruktiver Glasbau – Grundlagen und Bemessung. In: Stahlbau-Kalender 2007, Ernst & Sohn Verlag, Berlin. 2007
- [5] Bucak, Ö.; Schuler, C.: Glas im Konstruktiven Ingenieurbau. In: Stahlbau-Kalender 2008, Ernst & Sohn Verlag, Berlin. 2008
- [6] Hess, R; Weller, B.: Glasbau-Praxis in Beispielen, Konstruktion und Berechnung. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2005
- [7] Mengenhagen, J.: Glas im Konstruktiven Ingenieurbau. In: Schneider Bautabellen für Ingenieure, 18. Auflage, Werner Verlag, Köln 2008
- [8] Weller, B.; Reich, S.; Wünsch, J.: Glasbau. In: Wendehorst – Beispiele aus der Praxis, 2. Auflage. Teubner Verlag, Wiesbaden 2007
- [9] Bucak, Ö.: Glas im Konstruktiven Ingenieurbau. In: Stahlbau-Kalender 1999, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1999.