

Universität der Bundeswehr München

Institut für **Werkstoffe**
des Bauwesens

Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens Glas

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel

Wintertrimester 2023

Inhaltsverzeichnis

	1	
1	Geschichte des Glases [1]	3
2	Definition	6
3	Herstellung	7
3.1	Grundlagen	7
3.2	Schmelze [5, Kapitel 9.3]	8
3.3	Formgebung	9
3.4	Entspannungskühlen [5]	9
3.5	Veredelung	10
3.6	Glasfehler	10
4	Einteilung der Gläser	11
4.1	Einteilung aufgrund chemischer Eigenschaften	11
4.1.1	Kalknatronglas (Normalglas)	11
4.1.2	Borsilikatglas	11
4.1.3	Bleiglas	12
4.2	Einteilung nach der Produktionsform	12
5	Kennwerte	15
5.1	Chemische Beständigkeit	15
5.2	Viskosität	16
5.3	Mechanische Eigenschaften	17
5.3.1	Festigkeit	17
5.3.2	Weitere mechanische Kennwerte	18
5.4	Thermische Eigenschaften	18
5.5	Optische Eigenschaften	19
6	Flachglas	22
6.1	Gussglas [9]	22
6.2	Ziehglas [6]	22
6.3	Floatglas [9]	23
6.4	Flachglasanwendungen	24
6.4.1	Wärmedämmglas („Isolierglas“)	24
6.4.2	Brandschutzglas	28
6.4.3	Sicherheitsglas	29
7	Pressglas [2]	32
7.1	Glasbausteine (DIN 18 175)	32
7.2	Betongläser (DIN 4243)	32
7.3	Glasfliesen	32
8	Bläh- und Schaumglas [2]	33
9	Glasfasern	34
9.1	Herstellung	34
9.1.1	Stabziehverfahren	34
9.1.2	Düsenziehverfahren	34
9.1.3	Schleuderverfahren (TEL-Verfahren)	34
9.1.4	Düsenblasverfahren/Sillanverfahren (TOR-Verfahren)	35
9.1.5	Festigkeit [2, 9]	35
9.1.6	Steifigkeit [2, 9]	35
9.1.7	Faserarten [2, 3]	36
9.1.8	Anwendung von Verstärkungsfasern	36
10	Normen	38
11	Literatur	39

1 Geschichte des Glases [1]

Glas ist keine Erfindung des Menschen, sondern vielmehr von der Natur kopiert. Naturglas entsteht beispielsweise bei Vulkanausbrüchen (Obsidian (Bild 1)), Meteoriteneinschlag (Tektite und diaplektisches Glas) und Blitzeinschlag (Fulgurite). Astronauten fanden natürliches Glas auf dem Mond. Fachleute nehmen an, dass bei Meteoriteneinschlägen Mineralien zu Mondglasperlen schmelzen.



Bild 1: Obsidian (Foto: Arno Winter [1])

Über den Ursprung der Glasherstellung gibt es keine genauen Angaben. Aus kalkhaltigem Sand in Verbindung mit Natron entstand Glas wohl als Zufallsprodukt beim Brennen von Gefäßen. Es wurde auch als Glasur auf Keramiken verwendet. Wie Funde belegen, konnten bereits Ägypter, Babylonier und Assyrer Glas schmelzen. Älteste Funde reichen bis 7000 Jahre vor Christus zurück.

"Nimm 60 Teile Sand, 180 Teile Asche aus Meerespflanzen, 5 Teile Kreide - und du erhältst Glas." Dieses eigentlich noch heute gültige Glasrezept ist auf einer Tontafel aus dem Jahr 650 vor Christus in Keilschrift geritzt und stammt aus der Bibliothek des assyrischen Königs Assurbanipal in Ninive. Etwa 3000 v. Chr. fertigten die Ägypter Kunst- und Gebrauchsgegenstände mit Hilfe der Sandkerntechnik an. Sie tauchten einen tonhaltigen Sandkern in die auf etwa auf 900 °C erhitzte, zähe Schmelzmasse. Durch das ständige Drehen des Kerns in der Schmelze haftete das Glas an der Form. Der Kern wurde nach dem Abkühlen vorsichtig herausgekratzt - übrig blieb das gewünschte Glasgefäß.

Ein großer Schritt in der Entwicklung der Glasherstellung war die Erfindung der Glasmacherpfeife. Etwa 200 vor Christus gelang es in phönizischen Werkstätten die ersten dünnwandigen Hohlgefäße in unzähligen Größen und Formen, mit und ohne Ornamentierung, herzustellen. Mit einem etwa eineinhalb Meter langen Blasrohr nahmen die Glasbläser einen Klumpen flüssiges Glas aus der Schmelze und bliesen diesen zu einem dünnwandigen Gegenstand. Diese Technik bildete die Vorstufe der Flachglasherstellung.

Sicht und Licht vermittelnder Raumabschluss. Die Glasscheiben wurden meist in Holz- und Bronzerahmen gefasst. Da Flachglas sehr kostbar war, fand Glas zu Beginn nur für Thermen und luxuriöse Villen Verwendung. Das grünstichige römische Fensterglas war jedoch rau und nicht sehr transparent. Die Herstellung erfolgte nach der Guss- und Strecktechnik. Die Handwerker gossen eine zähflüssige Glasmasse auf eine sandbestreute, mit Rändern eingefasste Unterlage. Mit Eisenhaken zogen sie die dickflüssige Masse auseinander.

Bei ihren Eroberungszügen nördlich der Alpen wurde Flachglas für die Römer ein notwendiger Baustoff zum Schutz vor der mitteleuropäischen Kälte. So entstanden die ersten Glaswerkstätten nördlich der Alpen mit Zentrum in Köln.

Während des Hochmittelalters setzte man Glas zunehmend als Baustoff für Kirchen und Klöster ein. Glashütten lagen meist in waldreichen Gebieten und an Flussläufen; denn zur Energieerzeugung und der gewaltigen Produktion an Asche, benötigten die Glasmacher viel Holz. Das Wasser diente zur Kühlung des Glases und vereinfachte den Transport von Sand. War eine Gegend kahl geschlagen, wanderten die Glasmacher weiter. Wegen der massiven Waldrodungen verbot man in verschiedenen Regionen die Glasherstellung. Der Ersatz des Energieträgers Holz durch Kohle bedeutete im 18. Jahrhundert das Ende der Waldglashütten. Bis ins frühe 20. Jahrhundert hinein, bildeten das Zylinderstreck- und Mondglasverfahren in Mitteleuropa die Grundlage der Glasherstellung.

Beim **Zylinderstreckverfahren** wurde die Glaskugel durch Blasen, Schwenken und Wälzen auf einer Platte zu einem Zylinder geformt. Mit einem nassen Eisenstift kappte der Arbeiter die beiden Enden des gekühlten, spannungsfreien Zylinders und schnitt ihn anschließend der Länge nach auf. Im Streckofen wurde der Zylinder erneut erwärmt und mit geeigneten Werkzeugen zu einer flachen Tafel gebogen. Die Zylinderlänge hing von der Lungenkraft des Bläasers ab. Die größten Zylinder maßen in der Länge etwa 2 m und wiesen einen Durchmesser von 30 cm auf.

Beim **Mondglas- oder Schleuderverfahren** klebte der Glaser die geblasene Kugel auf die Kopfplatte eines Eisenstabes. Danach sprengte er die Glaspfeife ab und erweiterte mit einem heißen Eisen die entstandene Öffnung. Die nun weit offene Schale wurde erneut erwärmt und durch Schleudern zu einer runden Scheibe geformt. Zu Beginn konnten nur sehr kleine Scheiben geschleudert werden, später erreichten sie einen Durchmesser bis zu 90 cm. Die Glaser schnitten das Mondglas je nach Qualität in Rauten, Recht- oder Sechsecke. Am Ende blieb das dicke Mittelstück, die Butze übrig. Diese gelangte als **Butzenscheibe** in den Verkauf. Durch das Mondglasverfahren erhielt man reinere und glänzendere Scheiben als durch das Zylinderstreckverfahren, da sie nicht mit dem heißen, rauen Ofenboden in Berührung kamen. Das in den Glashütten hergestellte Flachglas galt jedoch qualitativ nicht als zufrieden stellend. Weil die Glasmasse nicht ausreichend erhitzt werden konnte, enthielt das Glas viele Bläschen und Schlieren.

Glas fast ohne Farbstich und nahezu blasenfrei wurde bereits im 15. Jahrhundert von Venezianern hergestellt. Diese reine Qualität erzielten sie durch Beigabe von Asche einer bestimmten Strandpflanze sowie von Mangan und Arsenik als Entfärbungsmittel. Ein Monopol der Norditaliener blieb lange Zeit die Spiegelherstellung. Dazu wurden die Glasplatten mit Zinn und Quecksilber beschichtet.

Im 17. Jahrhundert stieg die Nachfrage nach Glas beträchtlich an. Inzwischen verwendeten Bauherren Glas nicht nur in Kirchen und Klöstern, sondern auch in Schlössern und Stadthäusern. Die Monopolstellung Venedigs trieb die Glashütten im Norden an, neue Produktionsverfahren zu entwickeln.

Ein entscheidender Schritt gelang dem Franzosen Bernard Perrot im Jahre 1687 mit der Erfindung des **Gussglasverfahrens**. Dabei wurde der Inhalt der Schmelzwanne auf eine glatte, vorgewärmte Kupferplatte ausgegossen und mit einer wassergekühlten Metallwalze zu einer Tafel ausgewalzt. Die Dicke der Glastafel ergab sich durch die Höhe der seitlichen Einfassschienen. Die deutlich ebenere Glastafel wurde mit Sand und Wasser abgeschliffen und anschließend mit einer Paste aus Eisenoxid poliert. Trotz schnellerer Produktion mit weniger Personalaufwand blieb Glas für Fenster dennoch teuer.

Im Zuge der industriellen Revolution ermöglichte der Siemens-Schmelzofen ab 1856 einen rationelleren Arbeitsablauf, weil er nur noch halb so viel Energie benötigte. Dadurch konnte die Produktion gesteigert und Glas günstiger verkauft werden.

Um 1900 entwickelte der Amerikaner John H. Lubbers ein mechanisches Verfahren, mit dem Zylinder bis zu einer Länge von 12 m und einem Durchmesser von 80 cm erreicht werden konnten. Bis zur fertigen Glasplatte war der Arbeitsprozess immer noch sehr langwierig und umständlich. Nicht nur das Umlegen des Zylinders von der Senkrechten in die Horizontale bereitete Schwierigkeiten, sondern auch das Aufschneiden und Umformen, bis die gewünschte Glasplatte entstand.

1913 gelang es dem Belgier **Emile Fourcault** erstmals Glastafeln maschinell zu produzieren, indem sie direkt aus der Glaswanne gezogen wurden. Dabei tauchte man eine Düse aus gebranntem Ton in die warme Glasschmelze. Diese Masse quoll durch eine Öffnung, wurde durch Fangeisen aufgenommen und wie Honig vertikal nach oben gezogen und gekühlt.

Ein ähnliches Verfahren ließ der Amerikaner **Irving Colburn** 1905 patentieren; das Libbey-Owens-Verfahren. Das Glas wurde nicht wie bei Fourcault senkrecht in die Höhe, sondern ohne Düse über eine Biegewalze in die Waagrechte gebracht und in einem 60 m langen Kühlkanal

bis auf Handwärme abgekühlt und anschließend zugeschnitten. Dadurch erreichte die Produktion Gussstärken von 0,6 bis 20 mm. Die Ziehgeschwindigkeit bestimmte die Dicke. Je schneller man die Glasplatten zog, desto dünner wurden die Scheiben.

Der entscheidende Schritt bei der Gussglasherstellung gelang 1919 Max Bicheraux. Die flüssige Glasmasse wurde dabei zwischen gekühlten Walzen zu einem Glasband geformt, im noch erwärmten Zustand zu Tafeln geschnitten und in Öfen abgekühlt. Mit diesem Verfahren erreichte man die heute noch üblichen Scheibengrößen von 3 x 6 m.

1928 kombinierte die Plate Glass Company in Pittsburgh die Vorteile der Verfahren von Fourcault und Colburn; sie erzielte dadurch eine deutliche Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit.

Inzwischen sind nahezu alle Verfahren der Flachglas-Produktion durch die **Floatglas-Herstellung** ersetzt worden. Am 20. Januar 1959 präsentierte der britische Glashersteller Pilkington dieses bahnbrechende, bis heute noch aktuelle Verfahren der Weltöffentlichkeit. Floatglas ist heute die am meisten verwendete Glasart. Floaten bedeutet fließen oder schwimmen, was sich direkt auf die Verfahrensweise des Produktionsvorgangs bezieht.

2 Definition

Unter Glas (so viel wie "glasa", germanisch für Bernstein; das Glänzende oder Schimmernde) versteht man einen amorphen Feststoff. Glas ist eine ohne wesentliche Kristallbildung erstarrte Schmelze und damit eine röntgenamorphe Substanz. Thermodynamisch wird Glas als eingefrorene unterkühlte Flüssigkeit bezeichnet. Diese Definition gilt für alle Substanzen, die geschmolzen und mit einer entsprechend hohen Geschwindigkeit abgekühlt werden [2].

Glas besteht aus verschiedenen zusammengesetzten Verbindungen und kann daher nicht durch eine einzige chemische Formel beschrieben werden. Im engeren Sinne versteht man unter Glas vor allem erstarrte anorganische Schmelzen auf der Basis von Siliziumdioxid (SiO_2) das heißt vor allem aus Quarzsand und Zusatzstoffen wie Soda (Natriumcarbonat, Na_2CO_3) und früher auch Pottasche (Kaliumcarbonat, K_2CO_3), Manganoxid und Metalloxiden. Durch die Beimengung dieser Zusätze lassen sich die Eigenschaften des Glases beeinflussen.

Daraus ergibt sich eine Abgrenzung zum Kunststoff, der zwar die oben genannte Definition erfüllen kann, aber im Grunde aus Kohlenwasserstoffverbindungen besteht und organischen Ursprungs ist [2].

3 Herstellung

3.1 Grundlagen

Glas wird aus Quarzsand (SiO_2) erschmolzen. Beim Abkühlen der meisten Schmelzen tritt bei der Liquidustemperatur die Kristallisation ein, und erst nach vollständiger Kristallisation verringert sich die Temperatur weiter. Die Glasschmelze hingegen wird bei der Abkühlung unter die Liquidustemperatur zu einer unterkühlten Flüssigkeit (Bild 2), bei der es zu einer Strukturierung der Atome kommt, jedoch nicht zu einer Kristallisation. Dies macht sich durch einen Anstieg der Viskosität mit sinkender Temperatur bemerkbar. Erst bei Unterschreitung der Glasübergangstemperatur (TG) erstarrt die Schmelze und wird zu einer eingefrorenen, unterkühlten Flüssigkeit, dem Glas.

In einem Glas gibt es unterschiedlich starke Wechselwirkungen, die denen im Kristall (Nahordnung) gleichen und eine Reihe schwächerer Wechselwirkungen (die "fehlerhafte" Fernordnung). Daher tritt keine scharfe Schmelztemperatur auf, sondern es gibt einen Erweichungsbereich und eine Glasübergangstemperatur.

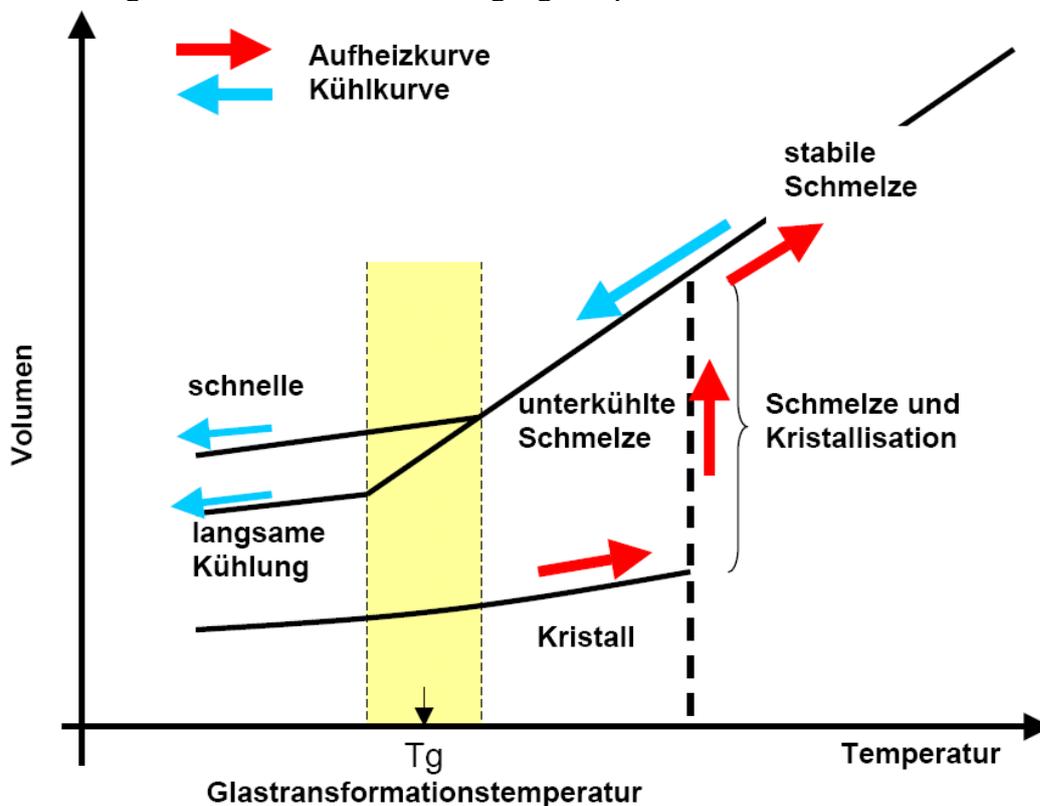


Bild 2: Vergleich von Glasübergangstemperatur und Schmelztemperatur von Glas und Kristall [3]

Um Glas zu erschmelzen, wird ein **Netzwerkbildner** (Quarzsand), **Netzwerk wandler** oder -störer wie Na_2O , K_2O etc., und Zwischenoxide, auch **Stabilisatoren** genannt, wie beispielsweise MgO , zusammen mit Schmelzbeschleunigern, so genannten **Flussmitteln** (Pottasche, Soda) geschmolzen. Wegen der Bildung des Netzwerkes spricht man bei Gläsern auch von einer Matrix. Sie setzt sich aus den diese Struktur bildenden Elementen Sauerstoff und aus Si^{4+} , B^{3+} oder P^{5+} zusammen.

Das Netzwerk wird durch Kationen wie Na^+ oder Ca^+ aufgespalten; daneben existieren so genannte intermediäre Kationen wie Al^{3+} , Zn^{2+} oder Pb^{2+} , die sowohl bildende als auch Netzwerk wandelnde Eigenschaften haben.

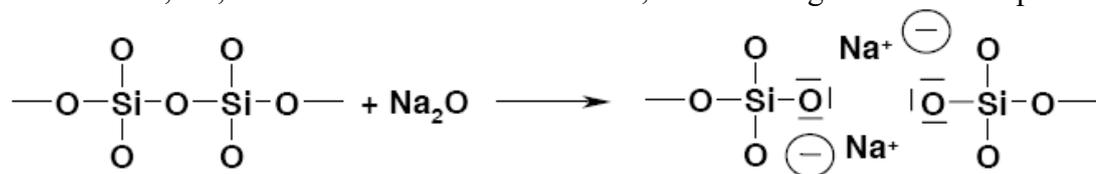
Die Zwischenoxide erniedrigen die Viskosität und bewirken so, dass das Glas auch bei niedrigen Temperaturen noch bearbeitet werden kann. Ein gängiger Stabilisator ist MgO , da es

schon in den Rohstoffen (beispielsweise als Begleiter des Kalks) vorkommen kann. Die Menge des Natriums und/oder Calciums ist entscheidend für die Länge der Netzwerkstruktur.

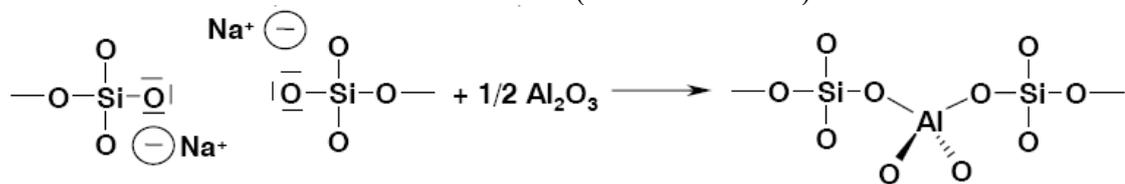
Die Zumischung eines Flussmittels ist erforderlich, da reiner Quarz (SiO₂) erst bei einer Temperatur von etwa 1700 °C schmilzt. Durch die Flussmittel wird die Erweichungstemperatur auf 600 °C und die Schmelztemperatur auf 1400 °C bis 1500 °C abgesenkt.

Die Eigenschaften eines Glastyps variieren stark mit der chemischen Zusammensetzung. Man kann Glas durch Variation der Stoffe und deren relativer Mengen für fast jeden gewünschten Zweck (wie mechanische oder thermische Stabilität oder optische Eigenschaften) konstruieren [4]:

- **Netzwerkbildner (saure Bestandteile)**
Das Netzwerk besteht überwiegend aus Quarz (SiO₂), aber auch Phosphor- oder Arsenpentoxid (As₂O₅), Boroxid B₂O₃ und Aluminiumoxid können enthalten sein.
- **Netzwerkstörer (basische Bestandteile)**
Oxide von Ca, Na, K und Pb. Je mehr Trennstellen, desto niedriger der Schmelzpunkt.



- **Trennstellenschließer**
Zuschläge wie Boroxid (B₂O₃) oder das amphotere Aluminiumoxid (Al₂O₃) sowie Alumosilicate (Kaolin, Feldspäte) sind zugleich Netzwerkbildner wie -störer. Sie schließen aufgrund der mittleren Wertigkeit (Wertigkeit III) Trennstellen und sorgen für höhere Schmelzbereiche des Na/Ca-Glases (→ Duran-Gläser).



3.2 Schmelze [5, Kapitel 9.3]

Die Glasschmelze besteht aus verschiedenen Phasen: Den Beginn macht die Rauschmelze mit dem Erschmelzen des Gemenges der Homogenisierung. Nach dem Erschmelzen der festen Bestandteile kommt die **Läuterung**, in der die Gase in der Schmelze ausgetrieben werden. Daran schließt sich das Abstehen des Glases an, in der das Material zur weiteren Formgebung abgekühlt wird.

Bei chargenweise arbeitenden **Tageswannen** und **Hafenöfen** geschehen alle diese Schritte nacheinander in demselben Becken. Dieses historische Produktionsverfahren findet heute nur noch bei kunsthandwerklicher Produktion und speziellen, optischen Gläsern in geringen Mengen statt. Im industriellen Maßstab finden ausschließlich **kontinuierlich arbeitende Öfen** Verwendung. Hier ist die Abfolge obiger Schritte nicht zeitlich, sondern räumlich getrennt. Die Menge der Glasentnahme entspricht der des zugeführten Gemenges.

Das Gemenge wird mit einer Einlegemaschine der Schmelzwanne aufgegeben. Bei Temperaturen von ca. 1480 °C schmelzen die verschiedenen Bestandteile langsam. Die Bewegung der Konvektion im Glasbad erzeugt Homogenität. Diese kann durch ein Bubbling, das Eindüsen von Luft oder Gasen in die Schmelze, unterstützt werden.

Im Läuterbereich, der dem Schmelzbereich unmittelbar folgt und häufiger auch durch einen Wall in der Schmelze von diesem getrennt ist, werden in der Schmelze verbliebende Blasen ausgetrieben. Durch die hohe Zähigkeit der Schmelze geschieht dies nur sehr allmählich und es sind ebenso hohe Temperaturen erforderlich wie im Schmelzbereich. Da die **Läuterung** bestimmend für die Glasqualität ist, gibt es vielfältige Maßnahmen um diese zu unterstützen.

Dem Läuterbereich schließt sich die baulich klar getrennte Arbeitswanne an. Da für die Formgebung niedrigere Temperaturen als zur Schmelze und Läuterung nötig sind, muss das Glas vorher abstehen. Daher spricht man auch von Abstehwanne. Der Kanal, der Schmelzwanne und Arbeitswanne verbindet, heißt Durchfluss und arbeitet nach dem Siphonprinzip. Bei Flachglaswannen sind Schmelz- und Arbeitswanne nur durch eine Einschnürung getrennt, da ein Durchfluss eine optische Unruhe im Fertigprodukt entstehen ließe.

Von der Arbeitswanne fließt das Glas weiter zum Punkt der Entnahme. Bei der Produktion von Hohlglas sind dies die Speiser oder Feeder. Hier werden Tropfen in darunter stehende Glasmaschinen geleitet. Bei Flachglas fließt das Glas über die Lippe in das Floatbad.

3.3 Formgebung

Glas kann u. a. durch

- Pressen,
- Blasen,
- Spinnen oder
- Walzen

in seine Form gebracht werden. Tabelle 1 stellt einen Zusammenhang zwischen der Formgebung von Glas und den dazu eingesetzten Verfahren her.

Tabelle 1: Formgebung von Glas [3]

Verfahren	Flachglas	Hohlglas	Röhren	Fasern	Vollformen
Pressen					
Blasen					
Gießen					
Schleudern					
Walzen					
Ziehen					
Biegen					
Extrudieren					

3.4 Entspannungskühlen [5]

Bei der Formgebung entstehen im Glas mechanische Spannungen als Folge von Dehnungsunterschieden. Die auftretende thermische Eigenspannung hängt vom Ausdehnungskoeffizienten des jeweiligen Glases ab und muss thermisch ausgeglichen werden. Für jedes Glas lässt sich zwischen der oberen Kühltemperatur (Viskosität von 10^{13} mPa·s) und einer unteren Kühltemperatur (Viskosität von 10^{18} mPa·s), in der Regel zwischen 550 °C und 350 °C, ein Kühlbereich festlegen. Die thermischen Eigenspannungen verringert man durch definiertes langsames Abkühlen im Kühlbereich, dem Tempern.

Die Zeit zum Durchlaufen des Kühlbereichs, hängt maßgeblich von der je nach Glasart zu überbrückenden Temperatur und der Stärke (Dicke) des Gegenstands ab. Im Hohlglasbereich sind dies zwischen 30 min und 100 min, bei großen optischen Linsen mit 1 m Durchmesser und mehr, kann eine langsame Abkühlung von einem Jahr notwendig sein, um sichtbare Spannungen und somit Bildverzeichnungen der Linse zu vermeiden.

Die kontrollierte Temperatursenkung kann mit unterschiedlichen Öfen vorgenommen werden. Man unterscheidet periodische Kühlöfen und kontinuierliche Kühlbahnen. Kühlöfen eignen

sich nur für Sonderfertigungen und Kleinstchargen, da nach jeder Entnahme der Werkstücke der Ofen wieder auf Temperatur gebracht werden muss. Industriell werden Kühlbahnen genutzt. Hier wird die Produktion auf Stahlmatten (Hohlglas) bzw. Rollen (Flachglas) langsam durch abgestuft geheizte Ofensegmente transportiert.

3.5 Veredelung

Auf die Glasoberfläche können durch chemische und physikalische Gasphasenabscheidung feinste Metallbeschichtungen aufgebracht werden, um zum Beispiel die Durchlässigkeit für Infrarotlicht zu reduzieren, ohne zugleich die Durchsichtigkeit wesentlich zu beeinträchtigen. Eine andere Beschichtungstechnik verhindert die Verschmutzung und unterstützt die Selbstreinigung von Fensterglas.

3.6 Glasfehler

Im Zuge der Herstellung und des Gebrauchs können verschiedene Glasfehler auftreten.

- Bei ungleichmäßiger Glaszusammensetzung werden Inhomogenitäten als **Schlieren** durch unterschiedliche Brechzahlen sichtbar.
- Als **Entglasung** wird eine Kristallstruktur im Glas bezeichnet, die als unerwünschte Trübung zu erkennen ist.
- **Stein** ist ein undurchsichtiger Einschluss.
- **Blasen** sind Gaseinschlüsse im Glasinneren.
- Als **Knoten** werden zum Teil undurchsichtige Oberflächenfehler bezeichnet, die durch Glas anderer Zusammensetzung entstehen.
- **Ziehstreifen** sind lang gezogene Oberflächenfehler wie Knoten.
- **Bläue** des Glases ist eine durch Alkaliablagerungen verursachte Verfärbung der Glasoberfläche.
- **Erblicken** entsteht durch Feuchtigkeit, die längere Zeit auf der Oberfläche des Glases verbleibt.

4 Einteilung der Gläser

4.1 Einteilung aufgrund chemischer Eigenschaften

Ein wesentliches Merkmal ist die chemische Zusammensetzung. Hier ergeben sich drei Hauptgruppen:

- Kalknatronglas,
- Borsilikatglas und
- Bleiglas.

Mindestens 95 % der gesamten Glasherstellung entfallen auf diese 3 Gruppen, die restlichen 5 % sind Spezialgläser.

4.1.1 Kalknatronglas (Normalglas)

Die größte Menge der Gläser wird in der Zusammensetzung als Kalknatronglas hergestellt. Sie gehören zur Gruppe der Alkali-Kalk-Gläser. Kalknatronglas besteht zu rund 71 - 75 % aus Sand (Siliziumdioxid, SiO_2), 12 – 16 % aus Natriumoxid, 10 - 15 % aus Kalk (Calciumoxid, Rohstoff Kalk) und zu wenigen Prozenten aus anderen Zuschlagstoffen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Ungefähre chemische Zusammensetzung einiger technischer Gläser [Masse-%]

	Kieselglas	Kalknatronglas	Borosilikatglas	Alumosilikatglas	Bleiboratglas
SiO₂	100	71 - 75	81	62	56
Al₂O₃		~ 1	2	17	2
CaO		10 - 15		8	
MgO		~ 4		7	
Na₂O		12 - 16	4	1	4
K₂O					9
B₂O₃			13	5	
PbO					29

Das in der Tabelle zuerst genannte Kieselglas ist besser bekannt unter der Bezeichnung „Quarzglas“.

Flaschen, Trinkgläser und Flachglas werden aus Kalknatronglas hergestellt, das sich durch gute Lichtdurchlässigkeit und glatte, porenfreie Oberflächen auszeichnet. Im Bauwesen werden fast ausschließlich Silikatgläser verwendet.

4.1.2 Borsilikatglas

Wesentliche Eigenschaften der Borsilikatgläser sind ihre geringe Empfindlichkeit gegen Temperaturwechsel (wegen der geringen Temperaturdehnung) und die hohe Beständigkeit gegenüber chemischen Einwirkungen. Sie haben einen höheren Anteil an Siliziumdioxid als Kalknatron und Bleiglas. Ihre Bezeichnung verdanken sie dem Anteil an Boroxid. Im Haushalt wird Borsilikatglas als "feuerfestes Glas" (Jenaer Glas) verwendet. Vor allem aber wird es in der chemischen Industrie und in Laboratorien benutzt. Wegen der hohen Temperaturwechselbeständigkeit wird Borosilikatglas u.a. als Brandschutzglas eingesetzt wird. Bor-Tonerdegläser sind auch weniger spröd.

4.1.3 Bleiglas

Zur Gruppe der Bleigläser gehören das Kristall- und Bleikristallglas (Kali-Blei-Gläser). In der Zusammensetzung wird anstelle von Calciumoxid ein höherer Anteil an Bleioxid eingesetzt. Bleigläser sind leichter schmelzend und haben eine höhere Dichte. Da bleihaltige Gläser eine besonders hohe Lichtbrechung erreichen, eignen sie sich gut für den Glasschliff. Innerhalb der EU sind die Kennzeichnungen von Kristall- und Bleikristallgläsern durch gesetzliche Bestimmung nach Zusammensetzung, Dichte und Lichtbrechung genau festgelegt. Kristall und Alu-kristall werden hauptsächlich für geschliffene Trinkgläser, Karaffen, Vasen, Ziergegenstände und Linsen verwendet.

4.2 Einteilung nach der Produktionsform

Glasprodukte können nach der Produktform, der Herstellungsart und der Anwendung unterschieden werden. Im Wesentlichen gibt es hier folgende Hauptgruppen:

- Flachglas,
- Hohlglas,
- Pressgläser,
- Dämmstoffe aus Glas,
- Glasfaser,
- spezielle Gläser und
- optische Gläser.

Die bautechnisch interessanten Produkte sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Bautechnisch interessante Glasprodukte

Oberbegriff	Basisprodukt (zum Teil auch farbig)	Produkte der Weiterentwicklung	Wertmäßiger Anteil an der Weltproduktion
Hohlglas	Flaschenglas		60 %
	Glasrohr		
Flachglas	Spiegelglas (Floatglas)	Glas mit besonderen lichttechnischen Eigenschaften	25 %
	Gussglas		
	Fensterglas	Mehrscheibenisoliervglas	
	Mundgeblasenes Glas		
	Sonstiges Glas		
Pressglas	Glassteine		8 %
	Betonglas		
	Glasdachsteine		
Dämmstoffe aus Glas	Glasfaserdämmstoffe		2 %
	Schaumglas		
	Blähglas		
Glasfaser		Glasfaserverstärkte Kunststoffe	5 %



Bild 3: Flachglas (links), Glasrohr (Mitte) Hohlglas (rechts) [6]



Bild 4: Pressglas (links) Glasfaser (rechts) [6]

Je nach Verwendungszweck kann Glas unterschiedlich verarbeitet werden, dabei unterscheidet man vor allem Gläser die gepresst, geblasen, gesaugt, gesponnen oder gewalzt werden.

Hohlgläser werden in mehreren Verfahren durch Pressen, Blasen, Saugen und Kombinationen dieser Techniken hergestellt.

Glasfasern werden durch Spinnen im so genannten TEL-Verfahren oder TOR-Verfahren produziert.

Flachglas wird zum Großteil im Floatprozess erzeugt (siehe Kapitel 6). Dabei wird das noch flüssige Glas auf ein Zinnbad geleitet und erstarrt auf dessen Oberfläche. Die Berührungsfläche zwischen Glas und Zinnbad weist sehr gute Eigenschaften auf und muss nicht nachbehandelt werden. Auf diese Weise lassen sich Flachgläser mit einer Breite von mehreren Metern herstellen, allerdings kann eine Dicke von etwa 2 mm nicht unterschritten werden. Bei den meisten Dämmglasherstellern und Flachglasveredelungsunternehmen hat sich eine "Standardgröße" von 321 x 600 cm durchgesetzt ("große Bandmaße"). Die Anlieferung dieser riesigen Scheiben erfolgt in Stößen von 2,5 und 5 Tonnen durch sogenannte Innenlader.

Einscheibensicherheitsglas (ESG) ist thermisch oder chemisch vorgespanntes Glas. Bei thermisch vorgespanntem Glas wird das Glas auf etwa 600 °C erhitzt und dann durch Anblasen mit kalter Luft rasch abgekühlt. Da sich der Kern langsamer abkühlt, entsteht eine Spannung im Glas. Einscheibensicherheitsglas kann nicht mehr bearbeitet werden. Wenn das Spannungsfeld unterbrochen wird, so zerfällt das Glas in kleine Krümel. Besonders empfindlich sind die Kanten der Gläser. Durch die Vorspannung ist das Glas wesentlich widerstandsfähiger gegen Biege- oder Bruchbelastungen.

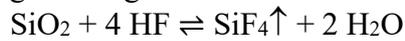
Teilvorgespanntes Glas (TVG) ist ebenfalls thermisch vorgespanntes Glas. Die Vorspannung ist jedoch nicht so hoch wie bei Einscheibensicherheitsglas und deshalb ist das Bruchverhalten anders. Die Scheibe ist ebenfalls härter als normales Floatglas und bricht mit langen Rissen, die von der Störstelle bis zum Rand des Glases verlaufen.

Verbundsicherheitsglas (VSG) besteht aus abwechselnden Schichten von Glas und Kunststoffolie (Polyvinylbutyral, PVB), bei einem Bruch sollen die Glassplitter oder -scherben an der Folie haften bleiben. Sicherheitsglas mit einer Dicke von etwa 25 mm wird als Panzerglas bezeichnet und beispielsweise für Schaufenster, Vitrinen und Autofenster verwendet. Wird die Schichtdicke entsprechend gesteigert, spricht man von schussfestem Glas. Verbundsicherheitsglas kann aus Kombinationen von verschiedenen Glastypen (Float, ESG, TVG) bestehen.

5 Kennwerte

5.1 Chemische Beständigkeit

Glas ist sehr beständig gegen die meisten Chemikalien. Diese Beständigkeit nimmt mit steigendem SiO₂-Gehalt zu und kann durch die Zusammensetzung des Glases beeinflusst werden. Unmittelbar sichtbare Zerstörungen ruft Flusssäure (HF) hervor, die mit dem SiO₂ zum gasförmigen Siliciumtetrafluorid reagiert und so die Netzstruktur des Glases zerstört.



Flusssäure wird zum gezielten Ätzen von Glas (Mattglas) genutzt. Beim Einsatz fluorhaltiger Holzschutzmitteln ist Glas vorbeugend zu schützen.

Bei dauerndem Kontakt können wässrige Lösungen zu Verwitterungserscheinungen führen. Saure Lösungen tauschen Alkaliionen an der Glasoberfläche aus, ohne dabei in die Tiefe einzuwirken. Basische Lösungen (Kalkwasser, Mörtelwasser) greifen das Si-O-Netzwerk an. Dies kann durch Regenwasser hervorgerufen werden, das von einer Betonfassade abfließt. Die veränderte Oberfläche reflektiert das Licht nicht mehr gleichmäßig und wird blind. Das Erblinden ist auch die Folge länger einwirkender feuchtwarmer Luft, stehenden Kondenswassers oder von Industrieabgasen.

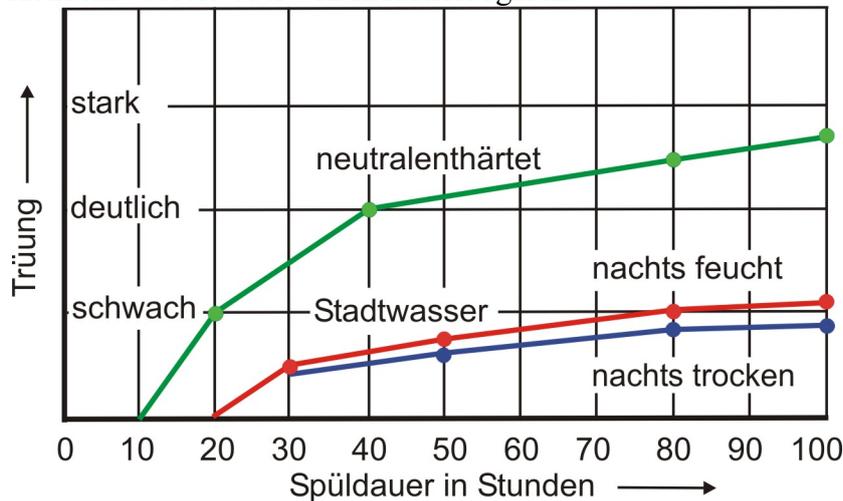


Bild 5: Trübung einer Glasoberfläche durch Wasser

Silikon kann sich mit den Silikaten der Glasoberfläche verbinden und lässt sich dann kaum noch ablösen. Glasflächen sind daher beim Arbeiten mit Silikon (Hydrophobierungsmittel) zu schützen.

Die chemische Beständigkeit von Glas ist in Normen geregelt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Klassen der chemischen Beständigkeit von Glas

DIN 12116			DIN 52322			DIN 12111		
Säureklasse	Bezeichnung	Halber Oberfläche ngewichtsv erlust nach 6 Stunden [mg/dm ²]	Laugenklasse	Merkmal	Oberfläche ngewichts verlust nach 3 Stunden [mg/dm ²]	Hydrolytische Klasse	Säureverbrauch an 0,01 NHCl [ml]	Basen- äquivalent als Na ₂ O [µg/g]
1	säurebeständig	0 bis ≤ 0,7	1	schwach laugenlöslich	0 bis ≤ 75	1	≤ 0,1	≤ 31
2	schwach säurelöslich	> 0,7 bis ≤ 1,5	2	mäßig laugenlöslich	> 75 bis ≤ 175	2	> 0,1 bis ≤ 0,2	> 31 bis ≤ 62
3	mäßig säurelöslich	> 1,5 bis ≤ 15	3	stark laugenlöslich	> 175	3	> 0,2 bis ≤ 0,85	> 62 bis ≤ 264
4	stark säurelöslich	> 15				4	> 0,85 bis ≤ 2,0	> 264 bis ≤ 620
						5	> 2,0 bis ≤ 3,5	> 620 bis ≤ 1085

5.2 Viskosität

Gläser haben im Gegensatz zu kristallinen Stoffen keinen definierten Schmelzpunkt als Übergang flüssig/fest. Daher verändert sich ihre Viskosität beim Abkühlen in einem weiten Temperaturbereich. Hierbei werden oft die folgenden Viskositäten zur Charakterisierung von Gläsern angegeben:

Tabelle 5: Charakteristische Viskositätsgrenzen von Gläsern [3, 5]

Viskosität η [dPa·s]	Bedeutung
10^2	Schmelztemperatur zum Erzielen einer homogenen Schmelze
10^4	Verarbeitungstemperatur (working point)
$10^{7,6}$	Erweichungstemperatur (softening point)
10^{13}	obere Kühltemperatur (annealing point)
$10^{14,5}$	untere Kühltemperatur (strain point)

Die Heißverarbeitung von Gläsern wird im Viskositätsbereich von $\eta = 10^3$ bis 10^8 dPa·s vorgenommen. Die Zusammensetzung (siehe Kapitel 4.1) hat einen wesentlichen Einfluss auf die Viskosität in der Schmelze und damit darauf, wie das Glas verarbeitet werden kann. Die Temperaturangaben zum Erzielen bestimmter Viskositäten dieser Gläser sind in Tabelle 6 und Bild 6 wiedergegeben.

Tabelle 6: Temperaturangaben [°C] einiger technischer Gläser zum Erzielen bestimmter Viskositäten

	Quarzglas	Kalknatronglas	Borosilikatglas	Alumosilikatglas	Bleiboratglas
Erweichungstemperatur	1580	695	820	915	630
obere Kühltemperatur	1050	510	565	715	435
untere Kühltemperatur	990	470	515	670	395

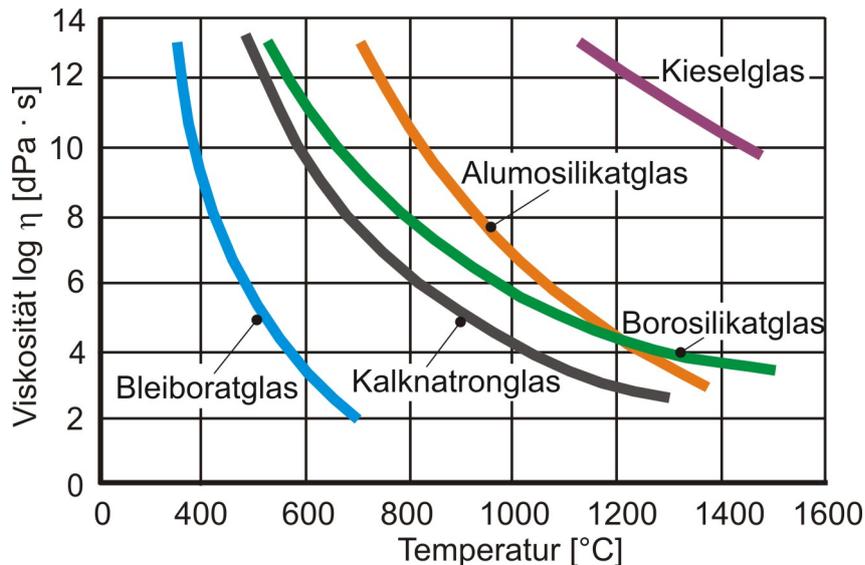


Bild 6: Temperaturabhängigkeit der Viskosität η einiger technischer Gläser [3]

5.3 Mechanische Eigenschaften

5.3.1 Festigkeit

Die theoretische Zugfestigkeit von Glas liegt um 100.000 N/mm^2 , an anderer Stelle wird diese theoretische Zugfestigkeit mit Werten von 15.000 bis zu 25.000 N/mm^2 angegeben. Praktisch erreicht die Zugfestigkeit $30 - 80 \text{ N/mm}^2$, also nur etwa 1% der theoretischen Festigkeitswerte. Bei Dauerbelastung sind nur 7 N/mm^2 zulässig.

Eine niedrige Zugfestigkeit kann durch eine Nachbehandlung, wie eine thermische oder chemische Vorspannung auf ca. 50 N/mm^2 erhöht werden.

Die Verminderung ist auf mikroskopische Risse und Kerben zurückzuführen, die sich in jedem Glas finden. Dieselbe Auswirkung wie diese Fehl- und Störstellen haben kaum sichtbare Oberflächenrisse, die sowohl im Fertigungsprozess als auch durch mechanische oder korrosive Beanspruchung während der Nutzung entstehen. Die Zugfestigkeitswerte von Glasfasern liegen mit $1000 - 5000 \text{ N/mm}^2$ wesentlich höher, weil sie weniger Risse und Kerben haben. Dieser Zusammenhang wird aus Bild 7 deutlich.

Die Biegezugfestigkeit liegt zwischen 40 N/mm^2 bei Floatglas und erreicht $120 - 200 \text{ N/mm}^2$ bei vorgespanntem Glas (ESG).

Die Druckfestigkeit erreicht nach DIN 1249-10 Werte von 700 bis 900 N/mm^2 .

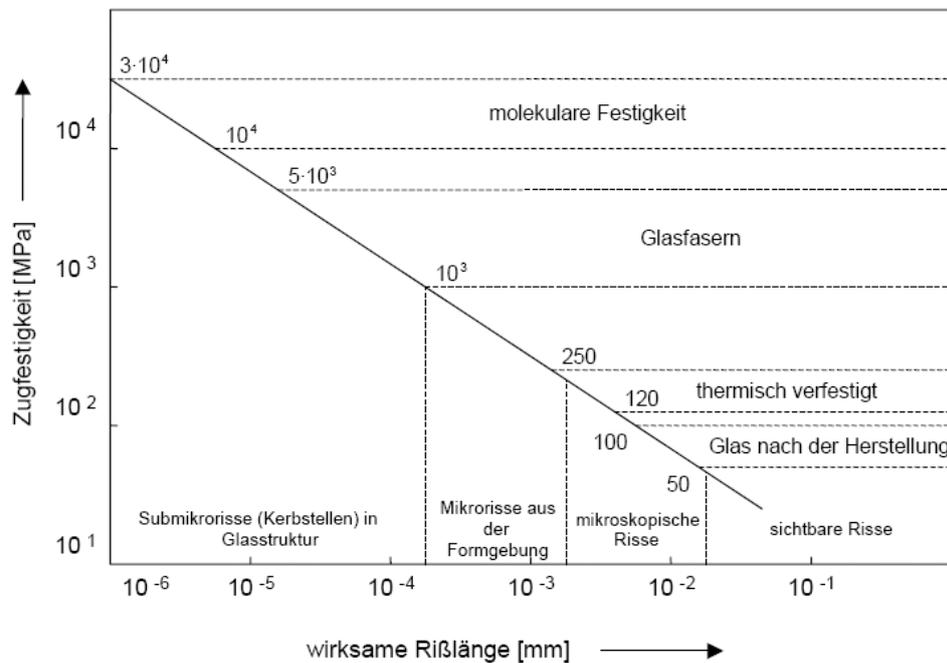


Bild 7: Kurzzeitzugfestigkeit von Glas in Abhängigkeit von der wirksamen Risslänge [7]

5.3.2 Weitere mechanische Kennwerte

Die Kennwerte unterscheiden sich von einer Glasart zur anderen geringfügig. Einige Angaben enthält Tabelle 7.

Tabelle 7: Mechanische und physikalische Eigenschaften von Kalk-Natron-Silikatglas und von Borosilikatglas nach EN 572-1 und EN 1748-1

Eigenschaft	Dimension	Kalk-Natron-Silikatglas	Borosilikatglas
Dichte ρ	[kg/m ³]	2500	2200 – 2500
Elastizitätsmodul E	[N/mm ²]	70000	63000
Querkontraktionszahl μ	[-]	0,22	0,2
Härte nach Mohs	[-]	5,3	

5.4 Thermische Eigenschaften

Plötzliche Temperaturwechsel stellen eine kritische Beanspruchung für Gläser dar, die nach DIN EN 1096-4 deklariert wird. Die Gläser sind gegen Temperaturunterschiede von 40 K bei einfachem Floatglas bis 200 K bei ESG ohne Bruchgefahr beständig.

Der Übergang des Glases von spröde nach plastisch-viskos (Transformationstemperatur) liegt bei 520 °C bis 550 °C (vgl. Kapitel 5.2).

Die Schmelztemperatur von reinem SiO₂ beträgt ca. 1700 °C. Sie wird durch die Zugabe der Alkalien gesenkt. Durch diese Beimengungen (vgl. Tabelle 2) steigt gleichzeitig der Wärmeausdehnungskoeffizient des festen Glases von $\alpha_T \sim 0,5 \cdot 10^{-6}/K$ auf $\alpha_T \sim 4,0 \cdot 10^{-6}/K$ bei Borosilikatglas und ca. $9,0 \cdot 10^{-6}/K$ bei Kalk-Natron-Silikatglas an. Man teilt Gläser daher in Abhängigkeit des Wärmeausdehnungskoeffizienten auch in **Weichgläser** ($\alpha_T > 6,0 \cdot 10^{-6}/K$) und **Hartgläser** ($\alpha_T < 6,0 \cdot 10^{-6}/K$) ein.

Tabelle 8: Thermische Eigenschaften von Kalk-Natron-Silikatglas und von Borosilikatglas nach EN 572-1 und EN 1748-1

Eigenschaft	Dimension	Kalk-Natron-Silikatglas	Borosilikatglas
Spezifische Wärmekapazität C_P	J/(kg·K)	720	800
Mittlerer thermischer Längenausdehnungskoeffizient $\alpha_{T, 20/300}$	1/K	ca. $9 \cdot 10^{-6}$	Klasse 1: $3,1 \div 4,0 \cdot 10^{-6}$ Klasse 2: $4,1 \div 5,0 \cdot 10^{-6}$ Klasse 3: $5,1 \div 6,0 \cdot 10^{-6}$
Wärmeleitfähigkeit λ	W/(m·K)	1,05	1,0

5.5 Optische Eigenschaften

Die wichtigste Eigenschaft des Glases ist seine Transparenz im optisch sichtbaren Spektralbereich (optisch sichtbares Spektrum: $\lambda = 380 - 780$ nm). Sie beruht auf der Wechselwirkung zwischen den Photonen des Lichts und den Elektronen des Glases.

Dringt Licht in ein Medium ein, so wird ein Teil des Lichtstromes von dem Medium absorbiert. Dieser Anteil wird bei der Wechselwirkung des Lichtes mit anregbaren Bestandteilen des Mediums in andere Energieformen, z. B. Wärme, elektrische oder chemische Energie umgewandelt. Die größte Wechselwirkung des Lichtes besteht, wenn in dem Medium freie Elektronen vorhanden sind. Daher sind Metalle für das Licht undurchlässig.

Glas besitzt ein amorphes Molekulargefüge ohne Grenzschichten und verhält sich, solange keine Eigenspannungszustände oder äußere Belastungen vorliegen, optisch isotrop. Die Photonen des sichtbaren Lichts treffen mit einer von ihrer Masse und Wellenlänge abhängigen Energie auf das Glas. Diese Energie ist viel zu gering, um die in die Molekülstruktur eingebundenen Elektronen des Glases zum Schwingen anzuregen. Da die Elektronen nicht zu Schwingungen angeregt werden, können sie von den Photonen passiert werden. Die Folge ist die Transparenz.

Glas ist aber nur für einen Teil des gesamten Lichtspektrums durchlässig. Ein Teil des Lichtes wird durch Absorption im Glas zurückgehalten, ein weiterer Anteil wird durch Reflexion an der Grenzfläche zurückgeworfen. Für den Transmissionsgrad t , den Absorptionsgrad a und den Reflexionsgrad r gilt:

$$t + a + r = 1$$

Die Durchlässigkeit des Glases für Licht- und Wärmestrahlung wird in Abhängigkeit von der Wellenlänge angegeben. Der Transmissionsgrad bezeichnet das Verhältnis der durchgehenden Strahlung zur gesamten Strahlung. Bei einfachem Floatglas (Bild 8) beträgt der Transmissionsgrad im sichtbaren Bereich in Abhängigkeit von der Glasdicke 83 % -90 %, bei senkrechtem Lichteinfall wird etwa 4 % bis 8 % des Lichtes an den Grenzflächen reflektiert.

Das handelsübliche Flachglas ist im ultravioletten Bereich (UV) nahezu lichtundurchlässig. Es zeigt sich eine ausgeprägte Absorptionskante im Bereich von Wellenlängen $\lambda = 150 - 250$ nm. Die Lage dieser Absorptionskante verschiebt sich in Abhängigkeit von der Zusammensetzung und Alkaligehalt in den langwelligeren Bereich. Im infraroten Bereich (IR) zeigen sich bei normalem Glas mehr oder minder ausgeprägte Absorptionsbänder, die durch eine Wechselwirkung des Lichtes und Bestandteilen des Glases hervorgerufen werden. Für

Infrarotstrahlen mit einer Wellenlänge oberhalb von $\lambda = 5000 \text{ nm}$ sind alle Silikatgläser undurchlässig.

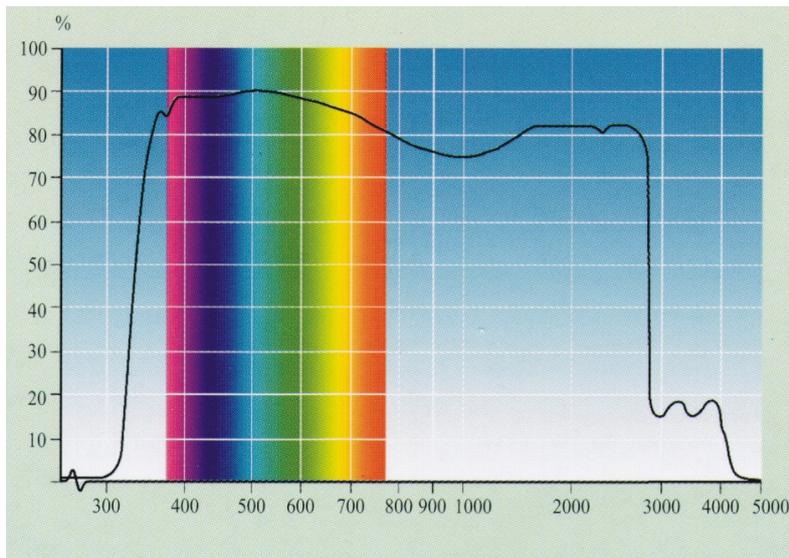


Bild 8: Transmissionsgrad einer 4 mm dicken Glastafel aus Kalknatronglas (Floatglas) in Abhängigkeit von der Wellenlänge [nm] [8]

Das Reflexionsvermögen kann gezielt durch entspiegelnde Beschichtungen mit definierter Brechzahl oder durch eine Feinätzung der Oberfläche beeinflusst werden. Durch die Streuungen des Lichtes geht die spiegelnde Reflexion dann in eine diffuse über. Das Absorptionsvermögen des Glases ist stark abhängig von seiner Zusammensetzung.

Handelsübliche Gläser besitzen eine Brechzahl von 1,5 bis 1,6. Ursache für die Brechung ist die Geschwindigkeitsänderung des Lichtes in der Grenzfläche (Bild 9). Die Frequenz des Lichtes bleibt konstant, es ändert sich lediglich die Wellenlänge.

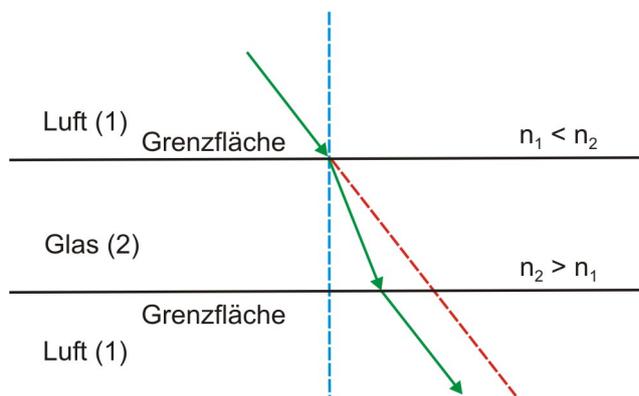


Bild 9: Lichtbrechung an der Grenzschicht Luft – Glas (Bild: Jens Schneider, TU Darmstadt, Institut für Werkstoffe und Mechanik im Bauwesen) [9]

Durch spezielle Zusammensetzungen des Glases oder Beschichtungen kann das Absorptionsvermögen in bestimmten Spektralbereichen gezielt beeinflusst werden. Beispiel hierfür sind Sonnenschutzgläser mit möglichst geringen Transmissionswerten im schädlichen infraroten und ultravioletten Spektralbereich.

Normalerweise ist Glas im sichtbaren Spektralbereich völlig farblos. Enthält das Glas geringe Mengen von Bestandteilen aus Nebengruppenelementen (Cu, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co oder Ni),

so treten schon bei Licht mit einer relativ geringen Energie Elektronensprünge auf, bei denen Energie absorbiert wird. Das Glas zeigt damit im sichtbaren Bereich Verfärbungen, die von der Art des Elementes abhängen. Durch spezielle Beimengungen kann durch Ausnutzen dieses Effektes eine gezielte Einfärbung des Glases erreicht werden.

Der **Gesamtenergiedurchlassgrad g** von Verglasungen für Sonnenstrahlung im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 2500 nm wird durch den g -Wert beschrieben. Diese Größe ist für klimatechnische Berechnungen von Bedeutung und wird normalerweise in Prozent ausgedrückt. Der g -Wert setzt sich zusammen aus direkter Sonnenenergie-Transmission und sekundärer Wärmeabgabe nach innen infolge langwelliger Strahlung und Konvektion (Bild 10).

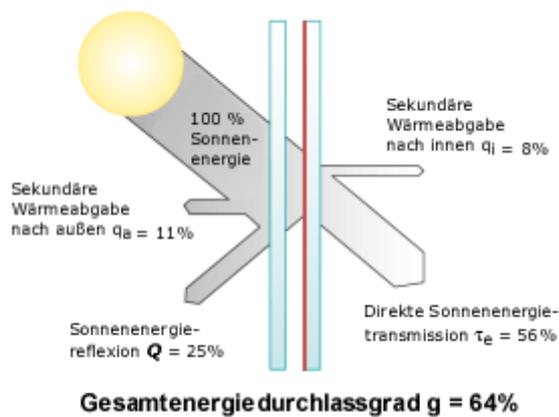


Bild 10: Gesamtenergiedurchlässigkeit g als Summe der direkten plus sekundären Wärme in einen Raum [8]

6 Flachglas

Planes Glas wird heute im Wesentlichen mit zwei Verfahren hergestellt: das klar durchsichtige **Spiegelglas** im Floatglasverfahren und das undurchsichtige **Gussglas** im Walzverfahren. Beide Hauptarten des Flachglases werden in verschiedenen Verfahren zu Funktionsgläsern weiterverarbeitet und miteinander kombiniert.

Als drittes Verfahren mit geringerer Bedeutung kommt das Ziehverfahren (Fourcault-Verfahren) zum Einsatz, das genutzt wird, um **Tafelglas** (Fensterglas) zu erzeugen.

6.1 Gussglas [9]

Bei der Herstellung von Gussglas wird die Glasschmelze entweder diskontinuierlich auf eine Platte gegossen und ausgewalzt oder nach kontinuierlichem Auslaufen aus einer Schmelzwanne zwischen Walzen geformt, z. B. Profilglas (Bild 11). Der Walzprozess führt zu einer rauen Oberfläche des Glases, die eine geringere Festigkeit im Vergleich zum Floatglas zur Folge hat. Gussglas ist lichtdurchlässig, jedoch undurchsichtig. Das charakteristische Merkmal aller Gussgläser ist die mehr oder weniger ausgeprägte Ornamentierung der Oberfläche. Diese Ornamentierung kann ein - aber auch beidseitig sein und wird durch Walzen mit ornamentierten Oberflächen auf das Glas übertragen.

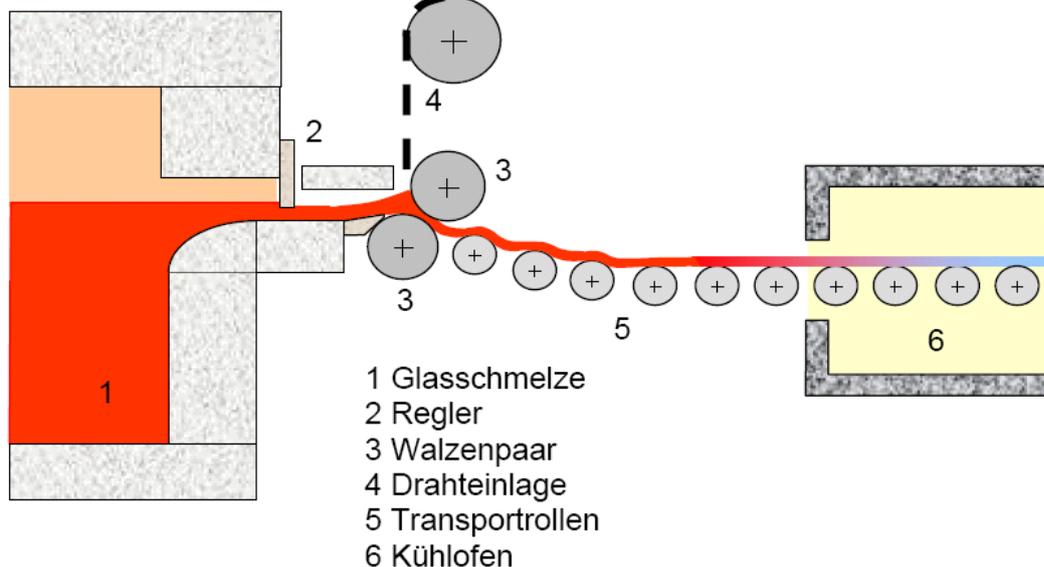


Bild 11: Herstellungsprozess von Gussglas [3]

Bei der Herstellung von Drahtglas wird eine Drahteinlage in die Schmelze eingewalzt. Das Drahtnetz dient nicht als Bewehrung des Glases um die Tragfähigkeit zu erhöhen, im Gegenteil die Zugfestigkeit wird noch verringert. Das Drahtnetz hat nur die Aufgabe, die Glassplitter bei einer mechanischen Zerstörung der Scheibe zusammenzuhalten. Da der Temperaturausdehnungskoeffizient von Glas rund 1/3 geringer ist als von Stahl, reagiert Drahtglas empfindlicher auf thermische Belastung als Floatglas.

6.2 Ziehglas [6]

Darunter fallen verschiedene Methoden zur Glasherstellung mittels maschineller Einrichtungen im Ziehverfahren kontinuierlich hergestellter Tafelgläser. Der belgische Ingenieur Fourcault hat das erste Tafelglasziehverfahren entwickelt. Ein Teil des Fensterglases wird heute noch in Fourcault-Anlagen (Bild 12) hergestellt. Dies aber in der Hauptsache noch in Osteuropa oder in Entwicklungsländern.

Allen gezogenen Glassorten gemein ist die durch den Ziehprozess bedingte, mehr oder weniger stark auftretende optische Unruhe, die gleichzeitig das stärkste Charakteristikum darstellt. Die

Dicke des Glases wird ausschließlich durch Veränderung der Ziehgeschwindigkeit variiert. Langsames Ziehen ergibt dickes Glas, schnelles Ziehen liefert dünnes Glas. Ziehglas ist heute weitgehend durch Floatglas ersetzt und wird nur mehr in unbedeutenden Mengen angeboten. Das Ziehverfahren wird in Westeuropa nur noch für Dünngläser (0,2 mm – 2 mm) verwendet.

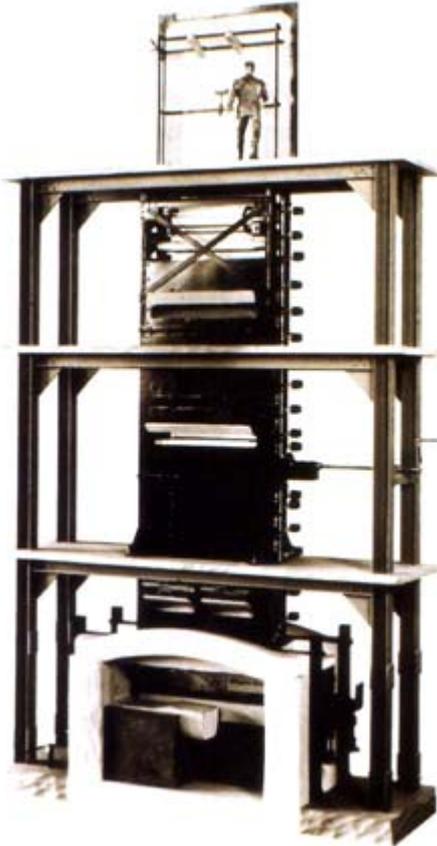


Bild 12: Flachglasherstellung nach dem Fourcault-Verfahren [6]

6.3 Floatglas [9]

Floatglas (früher Spiegelglas) ist ein planes durchsichtiges Kalknatronglas. Die moderne Floatglasherstellung hat zwischenzeitlich praktisch alle früheren Produktionsverfahren für Flachglas abgelöst. Der Name „Float“ bezeichnet das eigentliche Herstellungsprinzip. Zur Herstellung werden die Rohstoffe als Gemenge im Schmelzofen bei einer Temperatur von 1500 °C geschmolzen. Die Glasschmelze wird unter einer Schutzgasatmosphäre über einen schmalen Kanal auf ein flüssiges, ebenes Zinnbad geleitet. Die Temperatur der Schmelze beträgt beim Eintritt ins Zinnbad (Floatbad) etwa 1000 °C. Die leichtere Schmelze schwimmt (engl.: to float) auf der Oberfläche des flüssigen Metalls und breitet sich aus. In Folge der Oberflächenspannung der Glasschmelze und der planen Oberfläche des Zinnbades, bildet sich auf natürliche Weise ein absolut planparalleles Glasband. Über die Geschwindigkeit der Rollen im Kühlbereich wird die Dicke des Glases eingestellt. Bei der Herstellung von dünneren Gläsern (bis ca. 2 mm Dicke) wird eine höhere Geschwindigkeit der Rollen gefahren, bei dickeren Gläsern wird diese vermindert (bis theoretisch ca. 35 mm Dicke möglich) [3]. Im Kühlkanal auf der anschließenden Transportstrecke kühlt das Glas von ca. 600 °C bis auf Raumtemperatur ab. Nach dem Abkühlen wird das Glasband mittels Laser auf Fehler kontrolliert und zu Glastafeln geschnitten. In modernen Anlagen können täglich bis zu 33 t/h Glas in Dicken von 2 mm bis 19 mm und maximalen Bandmaßen von 321 cm x 600 cm gefertigt werden [1].

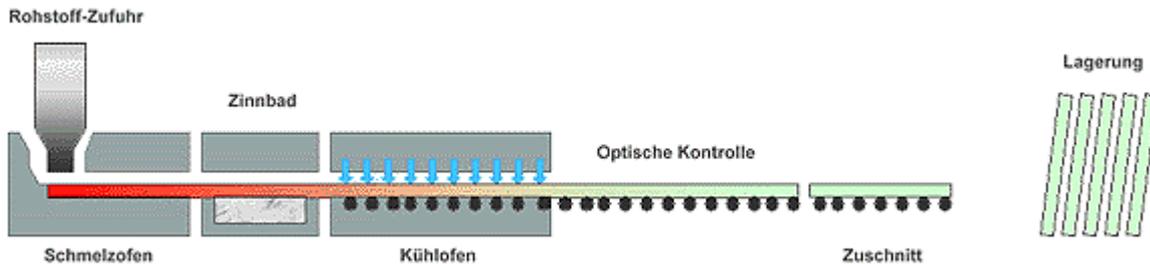


Bild 13: Floatglasherstellung

Floatglas ist das Basisprodukt für die Weiterverarbeitung zu vorgespannten Gläsern (ESG, TVG), Verbundgläsern und Isoliergläsern.

6.4 Flachglaswendungen

6.4.1 Wärmedämmglas („Isolierglas“)

6.4.1.1 Wärmeschutzverglasung

Der Wärmefluss durch konventionelles Isolierglas ohne Wärmeschutzbeschichtung (Bild 14) ergibt sich aus:

- Wärmestrahlung infolge des Emissionsvermögens der Scheibenoberfläche (Anteil ca. 65 %)
- Wärmeleitung und Konvektion (Anteil ca. 35 %)

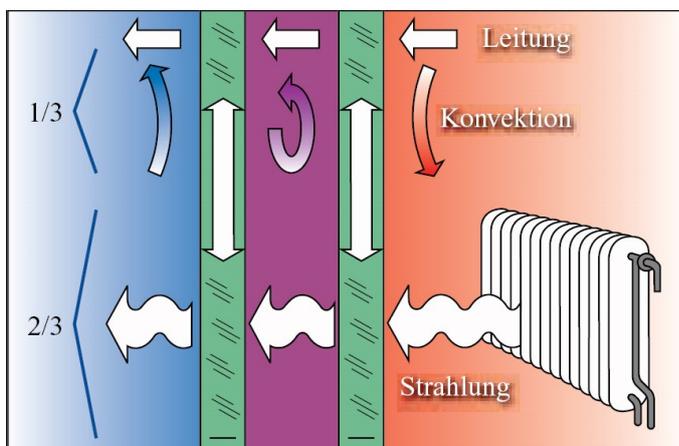


Bild 14: Schematische Verteilung des Wärmeverlustes einer Fensterverglasung [10]

Der Begriff irreführende Begriff „Isolierglas“ bezieht sich auf das Mehrscheiben-Dämmglas, eine Verglasungseinheit aus mindestens zwei Gläsern, die durch einen Scheibenzwischenraum (SZR) von meist 8 mm bis 16 mm getrennt und nur durch einen Randverbund miteinander verbunden sind. Isoliergläser werden zur Wärme- und Schalldämmung oder zum Sonnenschutz eingesetzt. Der Randverbund wird mittels eines Abstandhalters hergestellt, der mit einem Trockenmittel (Aluminiumsilicat, Zeolith) gefüllt ist und mit Polyisobutylen (Butyl) eingeklebt wird. Der Abstandhalter besteht aus perforiertem Aluminium, verzinktem Stahl oder Edelstahl. Für eine weitere Verbesserung des U-Wertes der Isoliergläser werden heute auch thermoplastische Abstandhalter eingesetzt („warme Kante“). Zur Abdichtung des Isolierglases wird der Hohlraum außerhalb des Abstandhalterrahmens bis zur Scheibenkante mit Polysulfidpolymer (Thiokol) oder – seltener – mit Polyurethan gefüllt. Für Überkopfverglasungen oder Structural-Glazing-Isoliergläser wird als Dichtmaterial auch

schwarzes Silikon verwendet, das zwar eine wesentlich bessere UV-Beständigkeit, aber eine deutlich höhere Diffusionsrate für die Füllgase aufweist. [11]



Bild 15: Ausführung von Mehrscheiben-Wärmedämmglas

Der wesentliche Teil des Wärmeverlustes (65 %) eines Fensters erfolgt über die Wärmestrahlung (vgl. Bild 14) und hängt damit vom Emissionsvermögen der Glasoberfläche ab. Dieses beträgt bei unbeschichtetem Glas ca. $\varepsilon = 0,85$, d. h., etwa 85 % der Wärme werden an der Glasoberfläche abgegeben. Mit einer sehr dünnen metallischen Beschichtung (Dicke nur ca. 10 nm) kann dieses Emissionsvermögen auf etwa 4 % ($\varepsilon = 0,04$) reduziert werden, ohne die optisch sichtbare Lichtdurchlässigkeit des Glases zu beeinträchtigen. Deshalb werden die Gläser/ Beschichtungen auch Low-E-Gläser bzw. Low-E-Beschichtungen genannt (Low-E = Low-Emissivity). Die Beschichtung ist so effizient, da die Schichten nur die langwelligen Wärmestrahlen reflektieren, die kurzwelligen sichtbaren Sonnenstrahlen aber hindurchlassen. Der weitgehend dampfdicht abgeschlossene SZR ist entweder luft- oder gasgefüllt. Die Wärmeleitung wird durch die Gasfüllung im SZR beeinflusst. Mit steigender Dichte des Gases wird die Wärmeleitung zunehmend behindert. In der Regel handelt es sich bei der Gasfüllung von Wärmeschutzverglasung um Krypton und seltener um Argon oder als extrem teure Variante um Xenon.

Die Konvektion im SZR hat Einfluss auf dessen optimale Größe. Für die Wärmeleitung einer Wärmeschutzverglasung wäre ein möglichst großer SZR wünschenswert. Durch den mit der Konvektion verbundenen Wärmeverlust wird dieser Vorteil wieder aufgehoben. Durch die beiden gegenläufigen Effekte ergibt sich in Abhängigkeit von der gewählten Gasfüllung ein Optimum für den SZR (Bild 16).

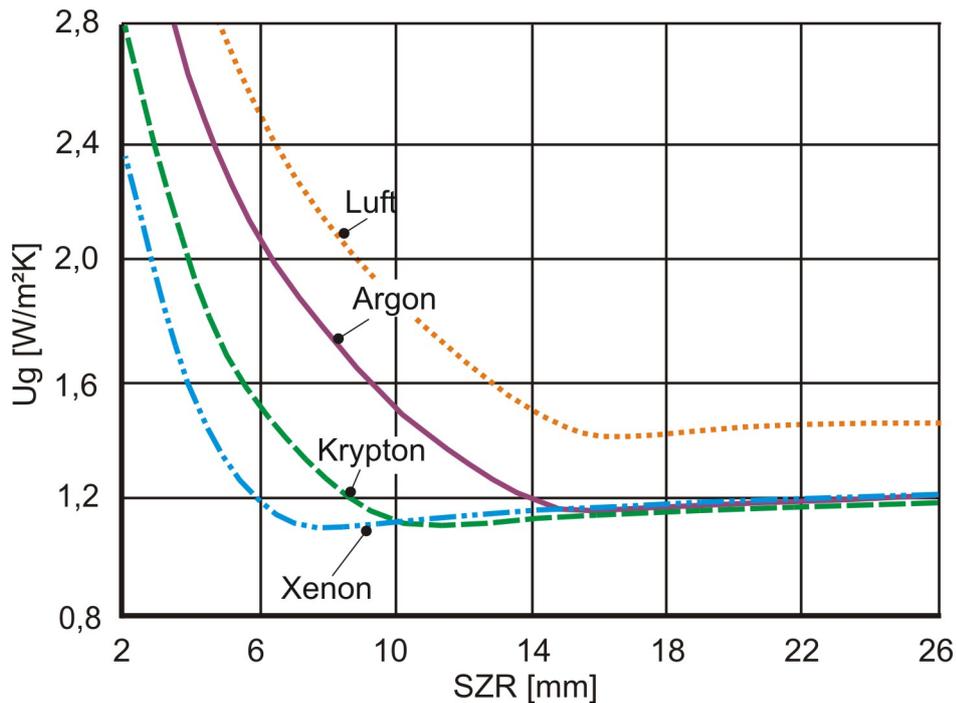


Bild 16: Einfluss des Scheibenzwischenraums (SZR) auf den erzielbaren Wärmedurchlasswiderstand der Verglasung U_g nach EN 673, Füllgrad 90 % [11]

In der großtechnischen Fertigung liegt der Gasfüllgrad der SZR bei etwa 90 %. Bild 17 zeigt den Einfluss des Gasfüllgrads auf den erzielbaren Wärmedurchlasswiderstand der Verglasung.

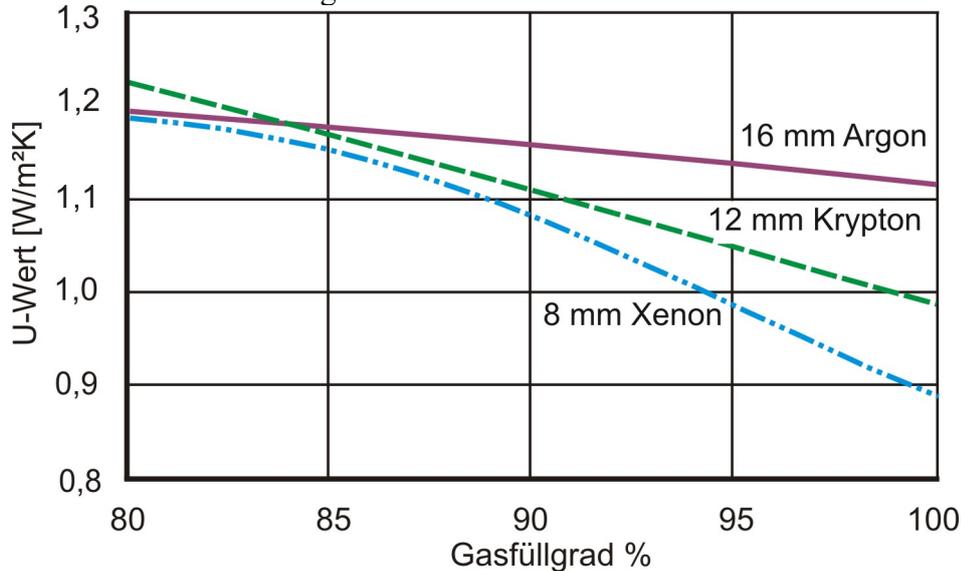


Bild 17: Einfluss des Gasfüllgrads im jeweils optimalen Scheibenzwischenraum (SZR) auf den erzielbaren Wärmedurchlasswiderstand der Verglasung U_g nach EN 673, Emissivität $\varepsilon = 4\%$ [12]

6.4.1.2 Schallschutzverglasung

Es gibt fünf Faktoren, die miteinander kombiniert werden können, um die Schalldämmung von Isoliergläsern positiv zu beeinflussen:

- Glasmasse,
- asymmetrischer Aufbau,
- großer Scheibenzwischenraum,
- Verwendung schwerer Gase und

- Verwendung von Gießharzen/speziellen Verbundsicherheitsgläsern.

Die einfachste Art, die Schalldämmung zu verbessern ist ein Erhöhen der Masse, also viel Glas zu verwenden. So hat eine 12-mm-Einfachscheibe einen R_w -Wert von 34 dB, eine 4-mm-Scheibe aber lediglich einen von 29 dB. Beim Vergleich der Spektren von 4 mm, 8 mm und 12 mm Floatglas (Bild 18), fällt in jedem Spektrum im rechten Teil einen Einbruch auf. Diese so genannte Koinzidenzfrequenz ist materialspezifisch und dickenabhängig. Als Faustformel gilt:

$$f_g \approx \frac{12000 \text{ Hz}}{d}$$

mit d : Dicke der Glasscheibe [mm]

Nach dieser Formel liegt f_g für 4 mm Floatglas bei 3000 Hz, für 8 mm Floatglas bei 1500 Hz und für 12 mm Floatglas bei 1000 Hz, was recht gut mit den Spektren in Bild 18 übereinstimmt. Ein Isolierglasaufbau mit unterschiedlich starken Einzelscheiben (z. B. 4-12-8), lässt zwar die äußere Scheibe Lärm um 3000 Hz gut passieren, dieser Teil wird jedoch durch die innere Scheibe weggefiltert und so die Schalldämmung verbessert.

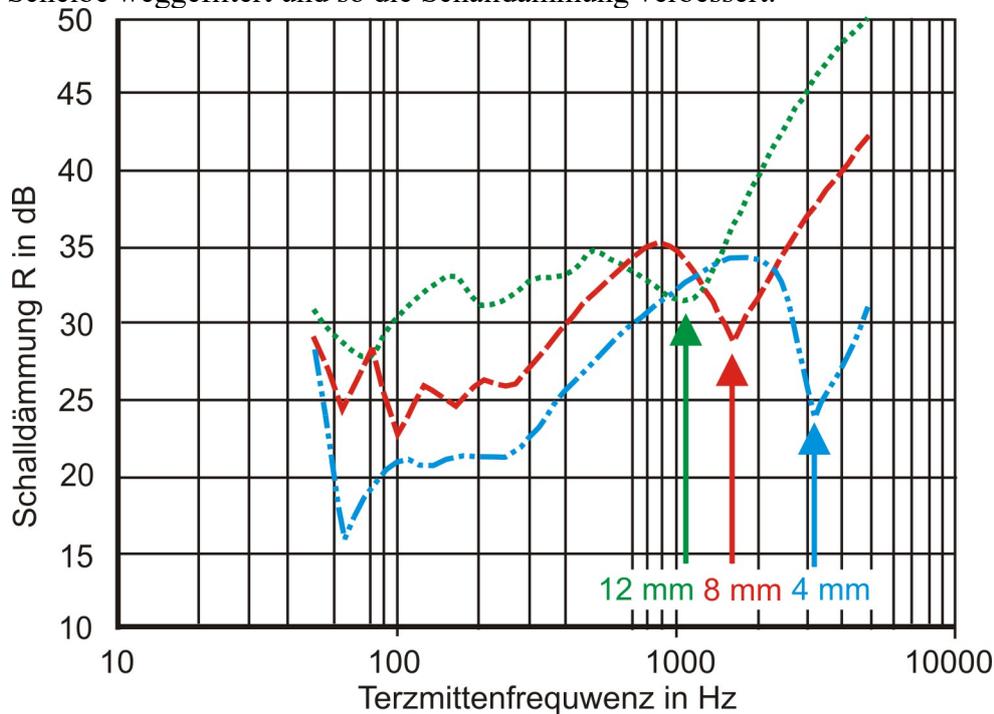


Bild 18: Einfluss der Scheibendicke auf die Koinzidenzfrequenz von Floatglas [13]

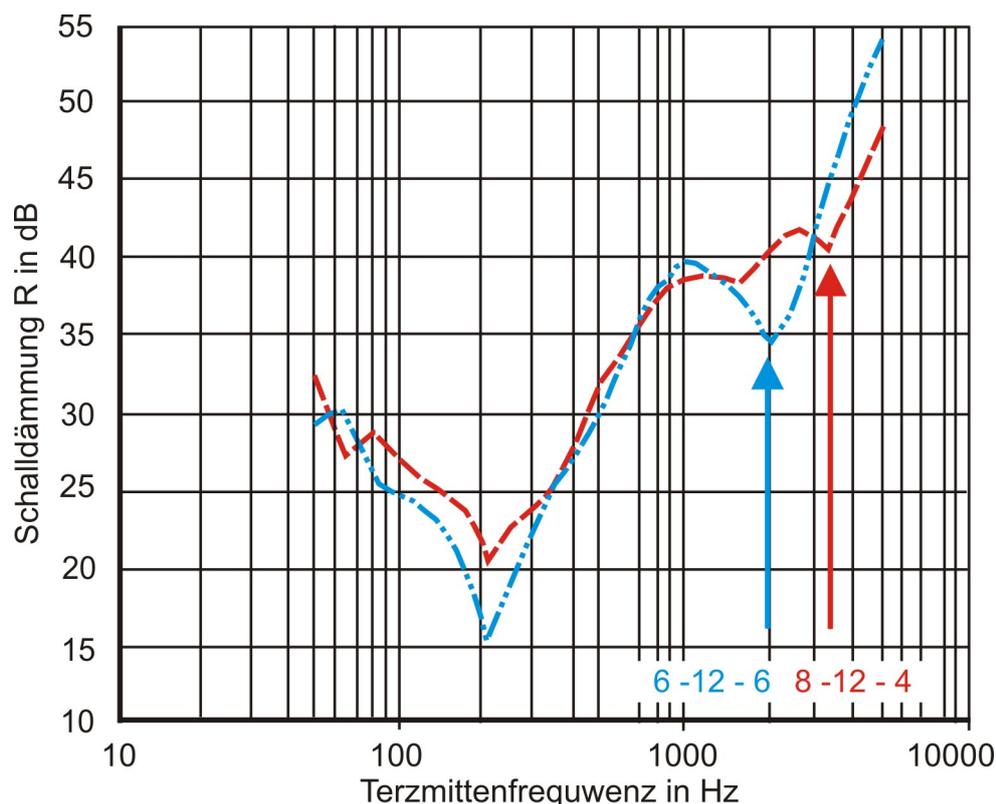


Bild 19: Einfluss eines asymmetrischen Glasaufbaus auf die Verringerung der Koinzidenz von Floatglas [13]

In den oberen Schallschutzklassen setzen sich die modernen Schalldämm-Verbundgläser im Vergleich zu den Gießharzprodukten immer mehr durch, da mit ihnen R_w -Werte von bis zu 50 dB erreichen werden können, sie zugleich als Bandmaße lieferbar sind, die Verträglichkeit von PVB mit anderen Materialien als weitgehend unproblematisch anzusehen ist und man zusätzlich eine Absturzsicherung/Überkopfverglasung erreichen kann.

6.4.2 Brandschutzglas

Normales Glas ist für den Brandschutz ungeeignet, da es bei einseitiger Brandbeanspruchung bereits nach kurzer Zeit in große Stücke zerfällt. Brandschutzgläser müssen spezielle Bedingungen erfüllen. Die Feuer hemmenden Gläser werden nicht allein, sondern nur als vollständige Bauteile – mit zugehörigen Rahmenkonstruktionen und Einbauvorschriften – zugelassen. Brandschutzgläser bestehen meist aus mehreren Schichten und erfüllen zusätzlich je nach Zusammensetzung gewisse Sicherheitsbedingungen. Brandschutzgläser können für Innen- und Außenanwendungen eingesetzt werden. Als Isolierverglasungen sind Kombinationen mit anderen Gläsern möglich.

Brandschutzgläser werden in zwei Kategorien eingeteilt (Bild 20):

- Die Raum abschließenden R-Gläser (auch G-Gläser) genannt verhindern Flammen- und Brandgasdurchtritt entsprechend der angegebenen Zeit; d. h., die Brandhitze darf sich erst nach Ablauf der vorgegebenen Zeitdauer ausbreiten können. Zum Beispiel bedeutet die Bezeichnung R 30 oder G 30, dass die Verglasung dem Brand 30 Minuten lang Stand halten muss.
- F-Gläser (F für Festverglasungen, T für Türverglasungen) verhindern bei einem Brand den Durchtritt von Rauch und Flammen. Zusätzlich schützen sie benachbarte Räume über eine bestimmte Zeitdauer vor der Abstrahlung der entstandenen Hitze. Von F-Gläsern wird verlangt, dass die dem Brand abgewandte Verglasungsseite im Mittel nicht über 140 K und die maximale Temperatur nicht mehr als 180 K über der Raumtemperatur zu Beginn der Prüfung liegt.



Bild 20: Funktionsprinzip von Brandschutzglas (links G-Verglasung, rechts F-Verglasung)

6.4.3 Sicherheitsglas

6.4.3.1 Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG)

ESG nach DIN EN 12150 ist ein thermisch voll vorgespanntes Glas. Die Vorspannung wird durch eine Wärmebehandlung des Glases erreicht. Der Herstellungsprozess von ESG besteht im raschen und gleichmäßigen Erhitzen einer Glasscheibe auf über 600 °C und dem anschließenden zügigen Abkühlen (Abschrecken) durch Anblasen mit kalter Luft.

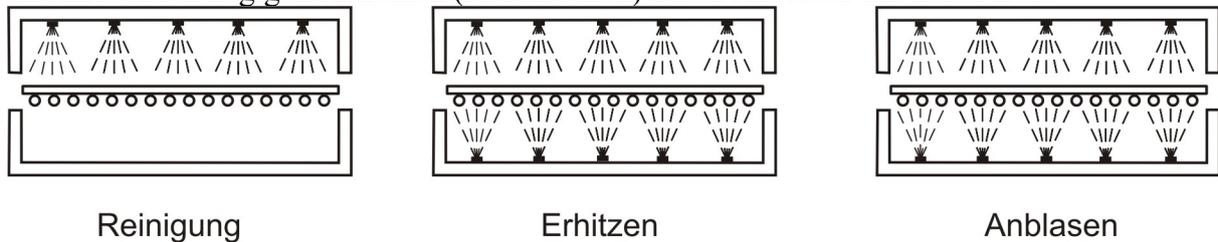


Bild 21: Herstellung von ESG [9]

Die charakteristische Spannungsverteilung im Einscheiben-Sicherheitsglas bewirkt, dass die äußeren Flächen zum Kern hin unter Druckspannung, der eigentliche Kern des Glases jedoch unter Zugspannung steht (Bild 22).

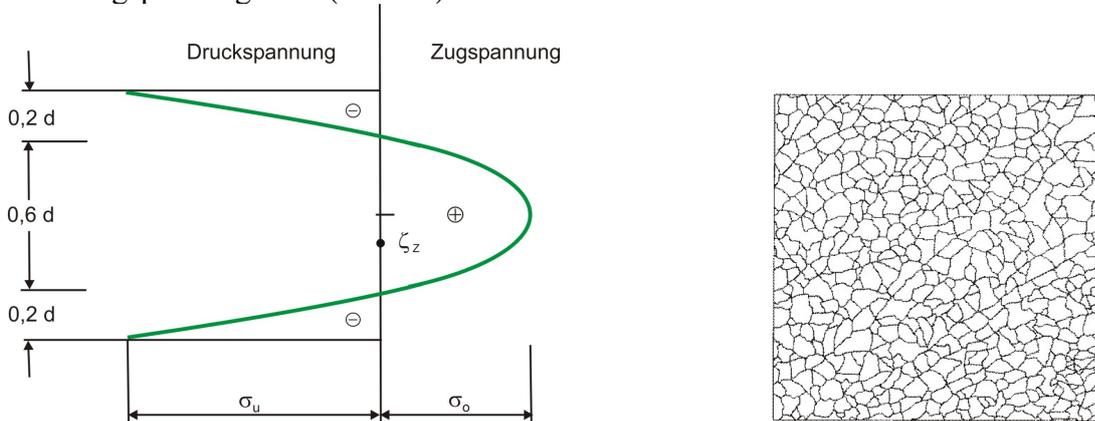


Bild 22: Eigenspannungsverlauf (links) und Bruchbild (rechts) von thermisch vorgespanntem Glas [2, 9]

ESG verfügt über einen erhöhten Verletzungsschutz, denn im Falle der Zerstörung entsteht ein engmaschiges Netz von kleinen, meist stumpfkantigen Bruchstücken mit einer Größe von weniger als 1 cm² und keine scharfkantigen Glassplitter (rechts). Zusätzlich zu dieser Sicherheitseigenschaft, zeichnet sich ESG durch weitere Vorzüge aus:

- erhöhte Biegefestigkeit min. 120 N/mm² (DIN 1249-10) gegenüber min. 45 N/mm² bei Floatglas,
- erhöhte Stoß- und Schlagfestigkeit nach DIN 52337 (Pendelschlagversuch) bzw. DIN EN 12600 und

- erhöhte Temperaturwechselbeständigkeit über die Scheibenfläche von 150 K bis 200 K statt 40 K bei normalem Floatglas.

6.4.3.2 Teilvorgespanntes Glas (TVG)

Teilvorgespanntes Glas nach DIN EN 1863-1 ist ein thermisch teilvorgespanntes Glas, das wie das Einscheibensicherheitsglas relativ hohe Zugspannungen aufnehmen kann und beim Bruch eine größere Biegefestigkeit bzw. ein geringeres Verformungsverhalten aufweist, d. h., das Bruchbild ist groß splittrig (Bild 23 rechts). TVG wird in dem gleichen Herstellprozess wie ESG hergestellt, jedoch langsamer abgekühlt, und unterscheidet sich so durch ein geringeres Maß der eingepprägten Vorspannung.

Die statische Festigkeit liegt zwischen Einscheiben-Sicherheitsglas und Einfachglas. Die Temperaturwechselbeständigkeit beträgt ca. 100 K. Die Mindestbiegezugfestigkeit von TVG wird mit 70 N/mm² angegeben.

TVG wird normalerweise nur als VSG aus 2 x TVG (siehe Kapitel 6.4.3.3) eingesetzt, um bei Bruch der Scheiben ein Resttragverhalten durch eine Verzahnung der Bruchstücke zu erreichen. Große Bruchstücke können sich dabei über den Folienverbund verzahnen.

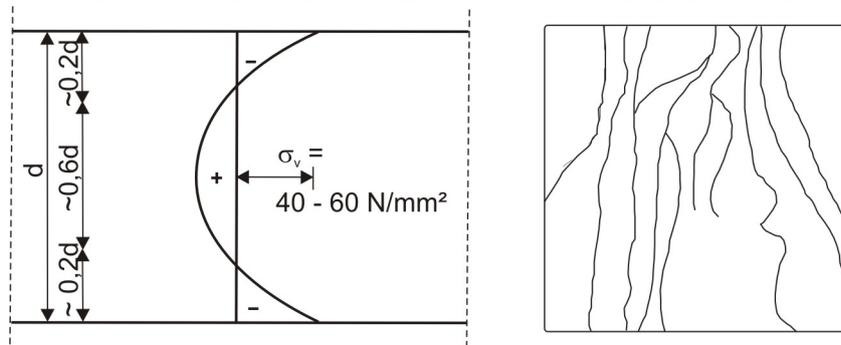


Bild 23: Eigenspannungsverlauf (links) und Bruchbild (rechts) von TVG [3]

6.4.3.3 Chemisch vorgespanntes Glas nach DIN EN 12337

Unterzieht man Glas einer definierten Behandlung im Salzbad, so erhält man durch Ionenaustausch innerhalb einer dünnen Oberflächenschicht starke Druckspannungen, die die Festigkeitseigenschaften des Glases erheblich verbessern. Für diese Art des Verfestigens eignen sich fast alle Gläser, die einen hohen Natriumanteil besitzen.

Das chemische Härten wird vor allem zur Verfestigung dünner Gläser bis 3 mm Stärke eingesetzt. Chemisch vorgespanntes Glas ist allseitig vorgespannt. Für ein chemisches Vorspannen spricht, dass die Oberflächen plan bleiben. Die Mindestbiegezugfestigkeit des chemisch vorgespannten Glases liegt bei 150 N/mm².

Chemisch vorgespanntes Glas bietet folgende Vorteile:

- Erhöhte Schlagfestigkeit,
- erhöhte Biegefestigkeit,
- erhöhte Temperaturwechselbeständigkeit und
- erhöhte Kratzfestigkeit

Durch den Einsatz dünneren Glases mit höherer Festigkeit ergeben sich weitere Vorteile:

- Erhöhte Transmission,
- verringertes Gewicht sowie
- verringerte Kosten für Rahmen und Befestigung.

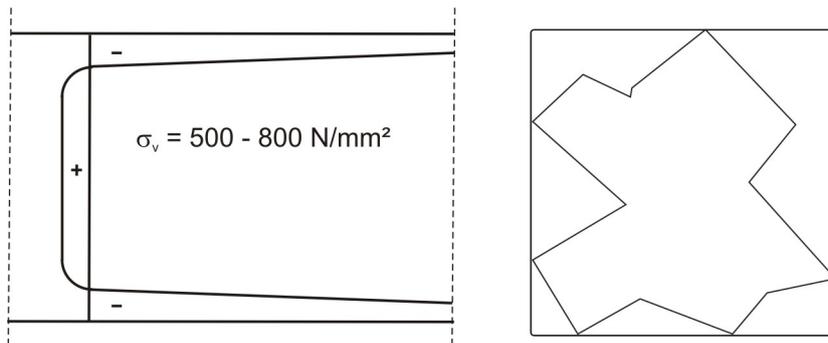


Bild 24: Eigenspannungsverlauf (links) und Bruchbild (rechts) von chemisch vorgespanntem Glas [2]

6.4.3.4 Verbundsicherheitsglas (VSG)

Verbundsicherheitsglas nach DIN EN 12337 ist ein splitterbindendes Glas. Es besteht aus zwei oder mehreren Scheiben nicht vorgespanntem Glas, Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) oder Teilvorgespanntes Glas (TVG), die ganzflächig jeweils durch eine zähe elastische durchsichtige Zwischenschicht aus Polyvinylbutyral (PVB) oder Gießharz miteinander verbunden sind. Bei einer Zerstörung der Glasscheibe haften die Splitterstücke an der Verbundfolie, deren Dicke die Resttragfähigkeit beeinflusst. Die Scheibengröße ist bei der PVB-Zwischenschicht produktionstechnisch auf die maximale Breite der Folie beschränkt. Mit der Gießharztechnologie sind dagegen Scheibengrößen bis zu 3 m x 8 m möglich.

Die wesentliche Funktion für den Gießharzverbund liegt in der Erhöhung der Schalldämmung. Dies ist bedingt durch die Elastizität des Scheibenverbundes. Der Gießharzverbund wird auch für dickere Einlagen, z. B. bei Photovoltaik-Modulen herangezogen.

VSG zeichnet sich besonders durch eine hohe Biegefestigkeit, eine hohe Schlagfestigkeit und eine große Temperaturbeständigkeit aus. Daher ist eine Verbundglasscheibe optimal für Überkopfverglasungen sowie Brüstungsverglasungen.

Verbundsicherheitsgläser sind für folgende Zwecke konzipiert:

- Absturz hemmend,
- Durchwurf hemmend,
- Einbruch hemmend,
- Durchschuss hemmend oder
- Sprengwirkung hemmend.

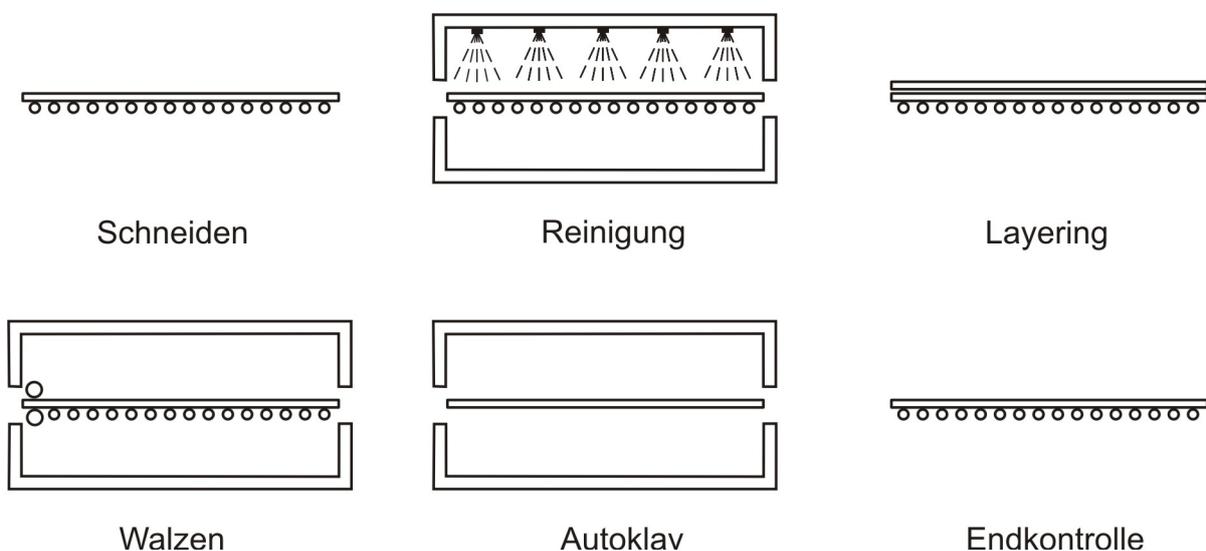


Bild 25: Herstellung von VSG [9]

7 Pressglas [2]

7.1 Glasbausteine (DIN 18 175)

Glasbausteine dienen zur Herstellung lichtdurchlässiger, nicht tragender Wände. Es gibt Voll-Glasbausteine (plattenförmig) und Hohl-Glasbausteine. Hohlsteine werden durch Zusammenschweißen zweier Pressglashälften hergestellt. Beim Abkühlen entsteht innen ein luftverdünnter Raum, wodurch die Wärmedämmung verbessert und die Schwitzwassergefahr vermindert wird.

7.2 Betongläser (DIN 4243)

Betongläser dienen zur Herstellung von Glasstahlbeton nach DIN 1045 (Oberlicht, Abdeckung von Lichtschächten usw.). Bei der Biegebemessung können die in der Druckzone liegenden Glaskörper als statisch mitwirkend in Rechnung gestellt werden.

7.3 Glasfliesen

Glasfliesen sind porenfreie, wasser- und luftundurchlässige Platten aus undurchsichtigem, gefärbtem Glas.

8 Bläh- und Schaumglas [2]

Ein Alkali-Erdalkali-Silikatglas üblicher Zusammensetzung wird geschmolzen und im heißen Zustand (beispielsweise in einem Walzenprozess) gefritten. Beim Fritten wird das Glasband mit Wasser besprüht, so dass es in kleine Krümel zerfällt. Diese werden aufgemahlen und mit gasbildenden Stoffen, wie Erdalkalicarbonaten, Sulfat und Wasser oder Kohlenstoff, gemischt. Als blähende Gase entstehen CO₂ und H₂S. Der Schwefelwasserstoff ist verantwortlich für den fauligen Geruch, der beim Schneiden oder Brechen von Schaumglas entsteht. Das Mahlgut wird in eine Form gebracht und durchläuft einen Tunnelofen. Hier erfolgt bei etwa 650 °C eine Sinterung des Glases und somit ein Einbinden des Schaumbildners. Bei der nachfolgenden Erwärmung auf etwa 900 °C läuft oberhalb der Erweichungstemperatur des Glases unter Schäumen der eigentliche Glasbildungsprozess ab [2, 4, 9]. Die sich bildenden kleinen Gasbläschen formen eine geschlossene Zellstruktur, ohne Kapillaren zu hinterlassen. Es entsteht ein sehr leichtes, sogar schwimmfähiges Glas, das **Schaumglas** (auch **Foamglas**) genannt wird. Am Ende der Produktionsstrecke muss das Schaumglas langsam abgekühlt werden, um ein Reißen der Platten zu vermeiden.

Schaumglas wird als Platten von 300 x 450 mm bis 1200 x 600 mm in Dicken von 30 mm bis 180 mm geliefert. Eine Produktionsvariante ist Schaumglasschotter. Hier werden die thermischen Spannungen beim Abkühlen gezielt genutzt, um das Schaumglas in Schotter zu zerlegen.

Im Gegensatz zu Schaumglas wird **Blähglas** im Drehrohrofen als leichte Gesteinskörnung hergestellt. Rohstoff für die Blähglasproduktion ist Altglas, das gemahlen und mit einem Kohlenstoffträger (Blähmittel) versetzt zu Rohgranalien geformt wird. Im Drehrohrofen expandieren die Rohgranalien bei Temperaturen bis 850 °C.

Tabelle 9: Eigenschaften von Blähglas und Schaumglas

		Schaumglas		Blähglas	Gesintertes Blähglas
Lieferform		Platten, Formteile	Splitt, Schotter	Granulat	Platten, Formteile
Abmessungen	mm	30 ≤ d ≤ 180	0 bis 90	0,04 - 16	beliebig
Rohdichte	Kg/m ³	110 - 220	250 - 600	270 - 1100	270
Schüttdichte	Kg/m ³		100 - 185	140 - 530	
Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)	0,040 - 0,058	0,074	0,05 - 0,07	0,08
Diffusionseigenschaften		dicht	offen	offen	offen
Festigkeit	MPa	0,5 – 3,5	0,9 – 1,6	0,8 – 6,5*	1,2

* Drucktopf nach DIN EN 13055-1

9 Glasfasern

9.1 Herstellung

Zur Faserherstellung werden vier Verfahren angewendet:

- das Ziehen der Fasern von einem Glasstab,
- das Ziehen von geschmolzenem Glas aus der Düsenziehwanne,
- das Schleuderverfahren und
- das Düsenblasverfahren.

9.1.1 Stabziehverfahren

Nach dem Stabziehverfahren werden vor allem Glasfaservliese und Textilglasgarne hergestellt. Dabei werden mehrere Glasstäbe mit einem Durchmesser von 3 bis 8 mm nebeneinander eingespannt. Das untere Ende der senkrecht hängenden Stäbe wird mit einer Brennerflamme bis zum Erweichen erhitzt. Infolge der Schwerkraft löst sich dann ein zähflüssiger Tropfen und zieht einen Faden hinter sich her, der rasch erstarrt. Die Fäden werden an einer rotierenden Trommel angeheftet, von ihr aufgespult und die aufgewickelte Faserschicht aufgeschnitten. Man erhält Stapelfasern. Die Glasstäbe werden entsprechend der abschmelzenden Glasmasse in den Wirkungsbereich der Flamme vorgeschoben. Dieses Verfahren ist diskontinuierlich, da die verbrauchten Glasstäbe erneuert werden müssen.

9.1.2 Düsenziehverfahren

Mit diesem kontinuierlichen Verfahren werden Glasgarne hergestellt. Am Boden eines Schmelzgefäßes aus Platin befinden sich 100 bis 800 Düsen mit einem Durchmesser von 1 bis 2 mm. Aus jeder Düse werden mit einer Geschwindigkeit von 25 bis 50 m/s Fäden senkrecht nach unten gezogen, mit einem Bindemittel benetzt, zusammengeführt, verklebt und auf eine Spule aufgewickelt.

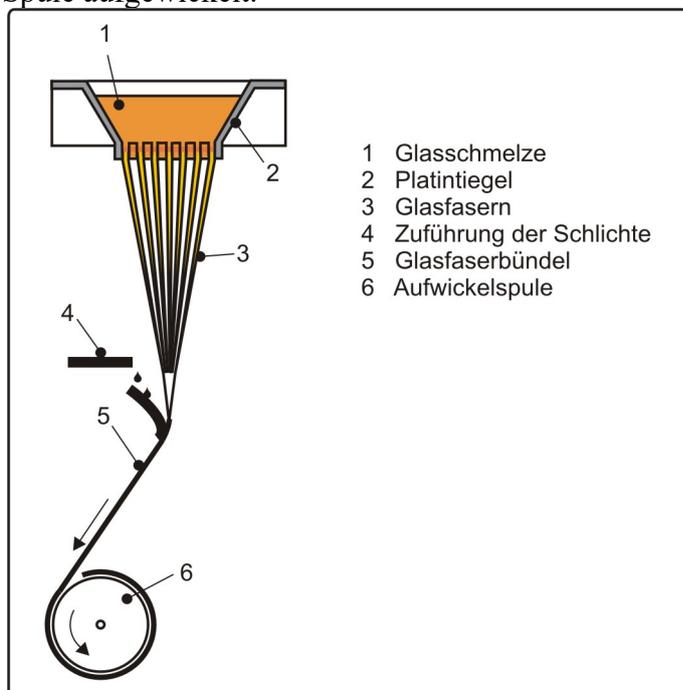


Bild 26: Herstellung von endlosen Glasfasern nach dem Düsenziehverfahren [3]

9.1.3 Schleuderverfahren (TEL-Verfahren)

Das TEL-Verfahren ist ein zweistufiges Schleuderverfahren zur Herstellung von gleichmäßigen und schmelzperlenfreien Glasfasern für Dämmstoffe. Mit dem

Schleuderverfahren werden kurze Fasern erzeugt. Ein etwa 10 mm dicker, dünnflüssiger Glasstrang fließt durch eine Bodenöffnung der Glasschmelzwanne auf eine sich drehende horizontale Scheibe mit gelochtem Ringmantel (Bild 27). Vom Rand der Scheibe werden Glaspfropfen weggeschleudert, von denen jeder einen Faden hinter sich herzieht. Die Bewegung des Tropfens und der Scheibe dehnen den Faden noch aus. Durch die Zentrifugalkraft wird der Schmelzstrahl unter Mitwirkung eines Luftstromes zu Mineralfasern zerfasert, die als Rohfilz in Sammelkammern, Fallschächten oder dergleichen gesammelt werden. Die Tropfen werden von den Fasern getrennt. Rund um die Scheibe sinkt ein schlauchartiges Fasergebilde nach unten, das aufgeschnitten wird.

9.1.4 Düsenblasverfahren/Sillanverfahren (TOR-Verfahren)

Für die Herstellung sehr feiner und kurzer Fasern wird das neuere Düsenblasverfahren (TOR-Verfahren) verwendet. Aus einer Glasschmelzwanne mit Düsen am Boden werden mithilfe eines hochgespannten Dampfes, der die unterhalb der Düsen entstehenden flüssigen Glasfäden mit hohem Druck und Geschwindigkeiten bis zu 100 m/s vorantreibt, senkrecht nach unten feine Fasern gezogen. Die Fasern zerreißen dabei in kurze Stücke.

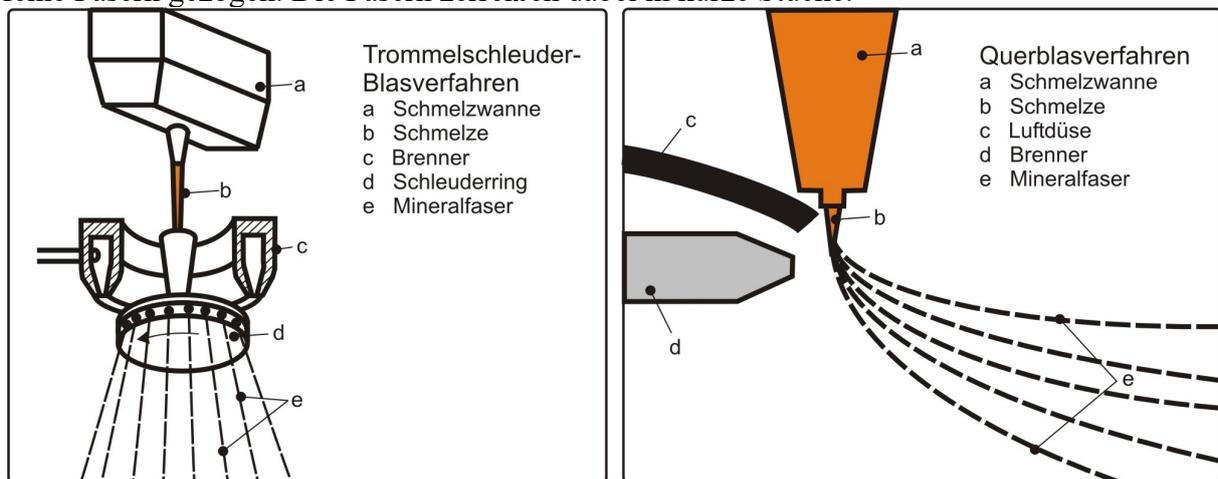


Bild 27: Schema der Glasfaserherstellung: TEL-Verfahren (links), TOR-Verfahren (rechts) [14]

9.1.5 Festigkeit [2, 9]

Die hohe Festigkeit der Glasfaser beruht auf dem Größeneffekt (vgl. Bild 7). Durch die Faserform ist die Fehlstellengröße in der Faser kleiner als im kompakten Werkstoffvolumen. Gleichzeitig steigt die fehlerfreie Länge in der Faserform an. Dadurch ist die Festigkeit der Glasfaser gegenüber dem kompakten Werkstoff größer. Die Bruchdehnung einer einzelnen Faser kann bis zu 5 % betragen.

9.1.6 Steifigkeit [2, 9]

Der Elastizitätsmodul von Glasfasern unterscheidet sich nur wenig von dem eines kompakten Glases. Anders als Aramidfasern oder Kohlenstofffasern hat die Glasfaser eine amorphe Struktur. Wie beim kompakten Fensterglas ist die molekulare Orientierung regellos. Die Glasfaser hat daher isotrope mechanische Eigenschaften. Glasfasern verhalten sich bis zum Bruch ideal linear elastisch. Sie weisen nur eine sehr geringe Werkstoffdämpfung auf.

Der Elastizitätsmodul der reinen Glasfaser liegt etwa in der Größenordnung von Aluminium. Der hohe Elastizitätsmodul der Glasfaser bleibt in realen Bauteilen (glasfaserverstärkter Kunststoff) nicht erhalten, da die Glasfasern mit nachgiebigeren Kunststoffen (EP-Harzen) gemischt werden.

9.1.7 Faserarten [2, 3]

- E-Glas (E = Electric): gilt als Standardfaser, mit einem Marktanteil von ca. 90 %; wird in basischer Umgebung angegriffen.
- S-Glas (S = Strength): Faser mit erhöhter Chemikalienbeständigkeit.
- R-Glas (R = Resistant): Faser mit erhöhter Festigkeit und Beständigkeit.
- C-Glas (C = Corrosion): Faser mit besonders hoher Korrosionsbeständigkeit.
- ECR-Glas (E-Glass Corrosion Resistant): besonders säurebeständiges E-Glas.
- D-Glas (D = Dielectric): Faser mit niedrigem dielektrischen Verlustfaktor, z. B. für die Radardome einer Radarstation.
- AR-Glas (AR = Alkaline Resistant): Für die Anwendung in Beton entwickelte Faser, die mit Zirkonium angereichert ist. Sie ist gegenüber einer basischen Umgebung weitgehend resistent (Bild 28).
- Hohlglasfasern: Fasern (meist E-Glas) mit einem Hohlquerschnitt.

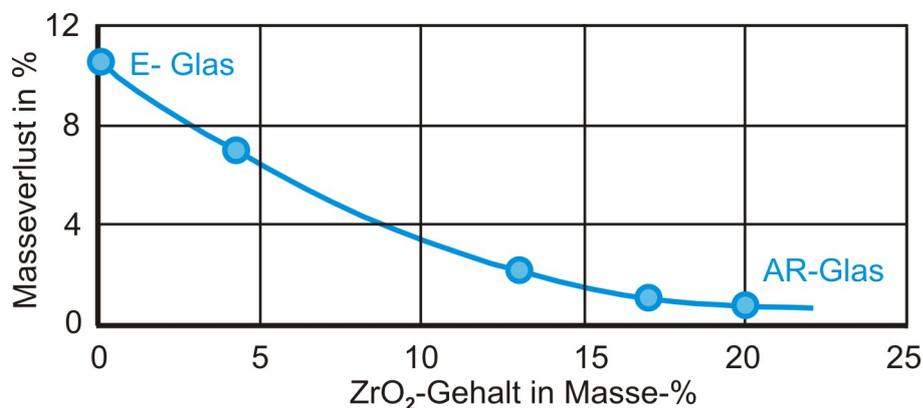


Bild 28: Abhängigkeit des Masseverlustes von Glasfasern bei Lagerung in gesättigter Zementlösung (pH = 12,9), T = 80 °C, t = 200 h

9.1.8 Anwendung von Verstärkungsfasern

Glasfasern werden als Bewehrung im Beton genutzt und als glasfaserverstärkter Beton bei Wellplatten, Fassadenplatten oder bei verlorenen Schalungen eingesetzt. Ebenso wird Glasfaser im Estrich verwendet. Für die Leistungsfähigkeit des Verbundwerkstoffs ist das Zusammenspiel von Faser und Matrix von entscheidender Bedeutung (Bild 29 und Bild 30). Eine große Bedeutung haben Glasfasern in glasfaserverstärktem Kunststoff (GfK) in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie der Automobiltechnik. In der Luft- und Raumfahrt werden aus Langglasfasern überwiegend tragende Strukturen gebaut. In der Automobilindustrie werden zur Zeit Langglasfasern noch hauptsächlich zur Versteifung von thermoplastischen Bauteilen (z. B. Verkleidungen) genutzt. Es geht aber hier ein Trend zu tragenden Bauteilen.

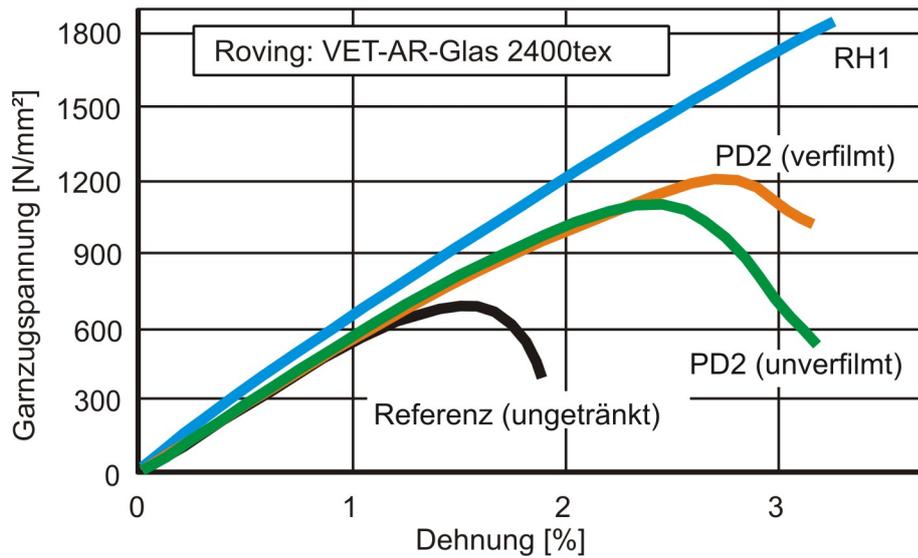


Bild 29: Auswirkung der Matrix aus unterschiedlichen Polymeren (RH: Epoxidharz, PD: Acrylatdispersion) auf die Spannungs-Dehnungslinie getränkter Rovings [15]

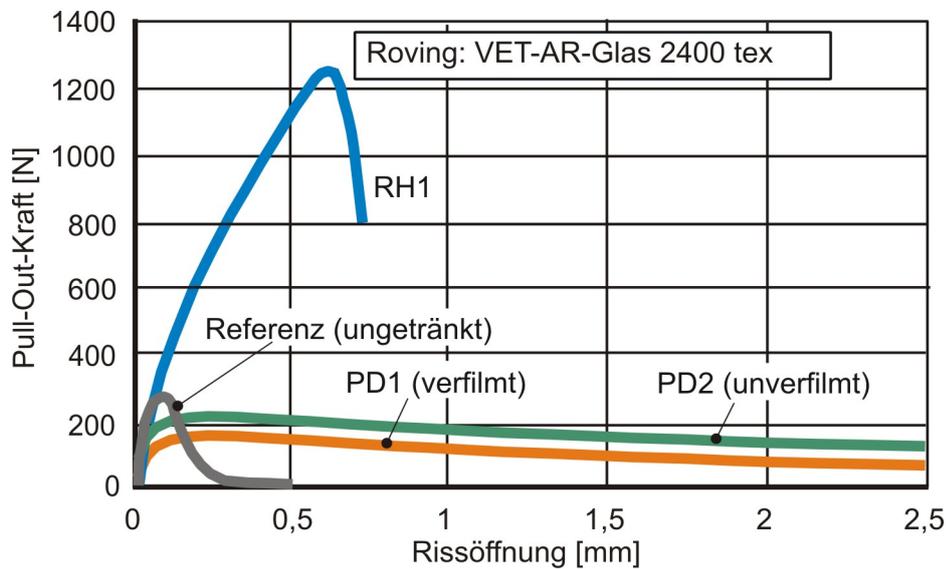


Bild 30: Auswirkung der Matrix aus unterschiedlichen Polymeren auf das Verbundverhalten getränkter Rovings im Pull-Out-Versuch [15]

10 Normen

DIN 1249	Flachglas im Bauwesen
DIN 1259	Glas, Begriffe für Glasarten und –gruppen
DIN 1286	Mehrscheiben-Isolierglas
DIN V 18054	Einbruchhemmende Fenster
DIN 18055	Fenster, Anforderungen und Prüfung
DIN 18056	Fensterwände
DIN 18308	Kochversuch an Verbundsicherheitsglas
DIN 52292	Prüfung von Glas und Glaskeramik
DIN 52293	Prüfung der Glasdichtheit von gasgefülltem Mehrscheiben-Isolierglas
DIN 52294	Bestimmung der Beladung von Trocknungsmitteln in Mehrscheiben-Isolierglas
DIN E 52299	Prüfung von Glas
DIN 52303	Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen
DIN 52337	Pendelschlagversuch an Glas für bauliche Anlagen
DIN 52338	Kugelfallversuch für Verbundsicherheitsglas
DIN 52344	Klimawechselprüfung an Mehrscheiben-Isolierglas
DIN 52345	Bestimmung der Taupunkttemperatur an Mehrscheiben-Isolierglas
DIN 52349	Prüfung von Glas; Bruchstruktur von Glas für bauliche Anlagen
DIN 52460	Fugen- und Glasabdichtungen, Begriffe
DIN EN 1863-1	Glas im Bauwesen, Teilvorgespanntes Glas
DIN EN ISO 12543	Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas
prEN 356	Glas im Bauwesen; Prüfverfahren und Klasseneinteilung für angriffshemmende Verglasungen für das Bauwesen
prEN 572	Glas im Bauwesen; Basis-Glaserzeugnisse
prEN 673	Wärmedämmung von Verglasungen. Berechnungsregeln zur Bestimmung des stationären U-Wertes (Wärmedurchgangskoeffizient) von Verglasungen
prEN 1748-1	Glas im Bauwesen; Spezielle Basiserzeugnisse: Borosilikatglas
DIN EN 12150	Thermisch vorgespanntes Sicherheitsglas

11 Literatur

- [1] Wikipedia. *Obsidian*. 2021 14.01.2021 [cited 2021 15.02.2021]; Available from: <https://de.wikipedia.org/wiki/Obsidian>.
- [2] Vismann, U., *Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln*,. 37 ed. 2021, Wiesbaden: Springer Vieweg p.
- [3] Weissmann, R., *Glastechnologie - Vorlesungsskript*, Erlangen-Nürnberg, I.f.W.I.G.u.K.U., Editor. 2008: Erlangen. p. 58.
- [4] *Baustoffe - Gläser und Kristalle oder was ist „Kristall-Glas?“*, in *Anorganische Chemie I – Verfahren und Stoffchemie - Sommersemester 2003*. 2003. pp. 75-78.
- [5] Neroth, G.; Engelfried, R.; Gerhardt, U.; Großkurth, K.P.; Krampe, P.; Raupach, M.; Weller, B. and Zander, U., *Wendehorst Baustoffkunde*. 27 ed, ed. Neroth, G.; Vollenschaar, D. 2011, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. XXXIX, 1220 p.
- [6] Bouwend Nederland Vakgroep GLAS. *Mechanische productie van vensterglas in de twintigste eeuw*. 2021 2021; Available from: <https://glasspecialisten.nl/glas-door-de-eeuwen-heen/6-mechanische-productie-van-vensterglas-in-de-twintigste-eeuw/>.
- [7] *Kurzzeitzugfestigkeit von Glas in Abhängigkeit von der wirksamen Risslänge*. 2021 [cited 2021 2021-02-15]; Available from: <https://media.baunetzwissen.de/dl/134756/kurzzeitfestigkeit.pdf>.
- [8] *Sonnenspektrum/Strahlungsangebot*, in *Pilkington Glaskompendium*. 2002, Pilkington Deutschland AG: Gelsenkirchen. p. 4.
- [9] *Baunetz_Wissen_Glas*. 2021 [cited 2021 16.02.2021]; Available from: www.baunetzwissen.de/glas.
- [10] Harzheim, H.; Breil, T., *Wärmedämmung mit Verglasung*, in *Pilkington Glaskompendium*. 2004, Pilkington Deutschland AG: Essen. p. 6.
- [11] Lemanczyk, D.; Harzheim, H., *Wärmedämmung mit Verglasungen*, in *Pilkington Glaskompendium*. 2007, Pilkington Deutschland AG: Gladbeck. p. 12.
- [12] Lemanczyk, D.; Harzheim, H., *U-Werte kleiner als 1,1 W/m²K*, in *Pilkington Glaskompendium*. 2003, Pilkington Deutschland AG: Essen. p. 6.
- [13] Breil, T.; Troska, C., *Schalldämmung*, in *Pilkington Glaskompendium*. 2004, Pilkington Deutschland AG: Essen. p. 6.
- [14] Pye, B.; Button, D., *Glass in Building*. 2 ed. 1994: Architectural Press. 384 p.
- [15] Dilthey, U.; Schleser, M.; Raupach, M. and Orłowsky, J., *Textilbeton mit polymergetränkter Bewehrung - Verbundverhalten und Alterung*. Beton, 2007. 57(3): pp. 92-99.