

2 Glas im Bauwesen

2.1 Produktion von Flachglas – Ein historischer Überblick

Der Werkstoff Glas ist der Menschheit bereits seit 3000 v. Chr. bekannt. Zunächst ausschließlich als Schmuck genutzt, wurden ab ca. 1000 n. Chr. die ersten Fenster aus Glas hergestellt. Hierfür wurden handtellergröße, flache, kreisförmige Butzenscheiben im *Walzverfahren* oder durch *Blasen* hergestellt und mit Hilfe von Bleifassungen zu Kirchenfenstern verarbeitet. Fensterglas im heutigen Sinne ist seit dem 17. und 18. Jahrhundert bekannt. Ab diesem Zeitraum sind Verglasungen nicht mehr nur für Kirchen und Klöster verwendet worden, sondern wurden fortan auch in Schlössern und Stadthäusern genutzt. Der stetig steigende Bedarf an Flachglas erforderte die Entwicklung neuer Produktionsverfahren. Schließlich gelang es dem Franzosen *Bernard Perrot* im Jahr 1687 das *Gussglasverfahren* zu entwickeln. Bei dieser Technik wird die Glasschmelze aus der Schmelzwanne auf eine glatte, vorgewärmte Kupferplatte gegossen und mit einer wassergekühlten Metallwalze zu einer Tafel ausgewalzt. Die Scheibendicke kann bei diesem Verfahren über die Arretierung der Walzen gesteuert werden. Im Anschluss werden die Glastafeln mit Quarzsand (später Korund (Al_2O_3) und Karborundum (SiC)) und Wasser geschliffen und anschließend mit einer Paste aus Eisenoxid poliert (Abb. 2.1). Vorteile dieses Verfahrens waren die bessere Qualität, der verringerte Arbeitsaufwand und bisher unerreichte Abmessungen von $1,2\text{ m} \times 2,0\text{ m}$ die den Platten auch den Namen *grandes glaces* oder *Spiegelglasscheiben* verliehen. Bedingt durch die verhältnismäßig zeitaufwändigen Polierarbeiten waren Fensterverglasungen dieser Machart weiterhin nur Wohlhabenden vorbehalten.

Der Amerikaner *John H. Lubbers* entwickelt um 1900 ein mechanisches Verfahren zur Herstellung gläserner Zylinder. Dieses Verfahren bietet die Grundlage des *Ziehglasverfahrens*. Aus der Schmelzwanne wird durch die Kombination von Blasen und Ziehen ein Zylinder an der Spitze mit vorgewärmter Druckluft beaufschlagt. Durch ständiges Nachpumpen der Druckluft wird der Zylinder langsam aus der Schmelzwanne herausziehend geformt. Um mit diesem Verfahren Glasplatten zu produzieren, mussten die Zylinder aus der Vertikalen in die Horizontale umgelegt, aufgeschnitten und umgeformt werden. Besonders das Umlegen erwies sich hierbei als riskanter Vorgang.

Weiterführende Fortschritte lassen sich erst wieder im frühen 20. Jahrhundert verzeichnen. Drei auf dem Ziehglasverfahren basierende Verfahren machten ihrerseits die Flachglasproduktion wirtschaftlicher und förderten somit die Verbreitung des Werkstoffs Glas. Der Belgier *Emile Fourcault* patentierte 1904 das nach ihm benannte *Fourcault-Verfahren*. Damit war es erstmals möglich Flachglas direkt aus der Glasschmelze zu ziehen. Das heiße und zähe Glasgemisch quillt dabei über eine rechteckige in die Glasschmelze eingelassene, aus gebranntem Ton hergestellte Ziehdüse und wird von Fangeisen seitlich gefasst und über eine Ziehmaschine in die Höhe gezogen. Anschließend befördern Walzenpaare die erstarrnde Glasmasse durch einen 8 m hohen Kühlschacht. Bedingt durch die Erdanziehung entsteht ein für dieses Produktionsverfahren typisches horizontales Wellenmuster. Um diesen Effekt unauffälliger zu machen, wurden mit diesem Verfahren hergestellte Fensterscheiben stets mit horizontal verlaufendem Wellenmuster verbaut. Bereits im Jahre 1899 begann der Amerikaner *Irving W. Colburn* damit, eine Methode zur Herstellung von Flachglas im Ziehverfahren zu entwickeln, die er 1904 patentieren ließ. Es dauerte jedoch noch bis zum Jahr 1913, bis die ersten erfolgreichen Ergebnisse zustande kamen. Zu der Zeit hatte *Colburn* das Patent bereits an die *Toledo Glass Company* verkauft. Drei Jahre später war das Verfahren ausgereift. Da die Firma zwischenzeitlich in *Libbey-Owens Sheet Glass Company* umbenannt wurde, erhielt die Methode 1917 die Bezeichnung *Libbey-Owens-Verfahren* (Abb. 2.2b). Ähnlich dem Fourcault-Verfahren wird hierbei das Glasband ohne Verwendung einer Düse aus der freien Oberfläche der Glasschmelze nach oben gezogen und nach 0,7 m über eine polierte Stahlwalze umgelenkt und horizontal gezogen. In einem bis zu 60 m langen Kühlkanal wurde das Glas auf etwa 30 °C abgekühlt und anschließend geschnitten. Über die Ziehgeschwindigkeit ließ sich die Glasstärke zwischen 0,6 mm und 20 mm einstellen. Die Breite des Glasbandes betrug 2,5 m. Ab 1928 verwendete die *Pittsburgh Plate Glass Company* eine Kombination beider vorangenannter Verfahren. Die Glasschmelze wurde hierzu wie beim Libbey-Owens-Verfahren ohne Ziehdüse aus der freien Oberfläche

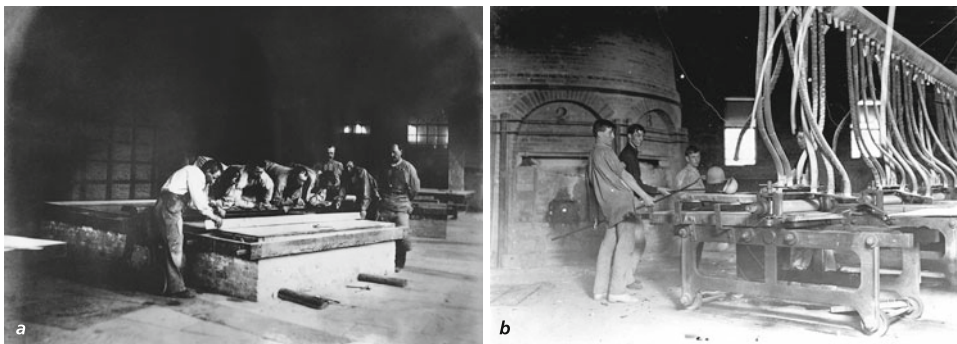


Abbildung 2.1 Gusstisch Ende des 19. Jahrhunderts – Beim *Tischwalzverfahren* wurde die Glasschmelze auf einen vorgeheizten Tisch gegossen (a) und anschließend gekühlt, geschliffen und poliert; Walzglasproduktion im Jahr 1908 (b). (Bildnachweis: Saint Gobain (a) und Lewis Wickes Hine (b))

entnommen. Die Ziehmaschine des Foucault-Verfahrens beförderte das frische Glasband in einen bis zu 12 m hohen Kühlschacht.

Die Entwicklung und Optimierung der Ziehglasverfahren sorgte dafür, dass die um 1900 entwickelte Spiegelglasherstellung zunehmend weniger Anwendung fand. Zwar war die Qualität des gezogenen Flachglases für Fensterscheiben ausreichend, jedoch waren Dickenunterschiede und optische Defizite wie Schlieren prozessbedingt nicht vermeidbar. Insbesondere die in dieser Zeit revolutionär wachsende Automobilindustrie verlangte eine Verbesserung der Qualität hinsichtlich Ebenheit und Transparenz. Zwischen 1910 und 1914 wird bei *Saint Gobain* in Herzogenrath das von *Max Bicheroux* entwickelte und nach ihm benannte *Bicheroux-Verfahren* (Abb. 2.2a) eingeführt: Bei diesem Gussglasverfahren wird die flüssige Glasmasse portionsweise aus der Schmelzwanne über eine geneigte Ebene gekippt. Zwei stählerne Walzen formen daraufhin unmittelbar ein Glasband mit der gewünschten Glasdicke. Durch die verkürzte Berührungszeit von Stahlwalze und Glas konnte eine für damalige Verhältnisse ebene Glasoberfläche erzeugt werden. Die geforderte Glasdicke konnte mit diesem Verfahren in guter Übereinstimmung hergestellt werden. Das Glas wurde nach dem Walzen in bis zu 3,0 m × 6,0 m große Glastafeln geschnitten und auf beweglichen Tischen in Kühlöfen abgekühlt. Durch den Gussvorgang konnten zu dieser Zeit bislang unerreichte Qualitäten hinsichtlich der Kontinuität der Glasdicke erreicht werden. Verbliebene Unebenheiten wurden nach dem Herunterkühlen durch Schleifen ausgeglichen. Bassierend

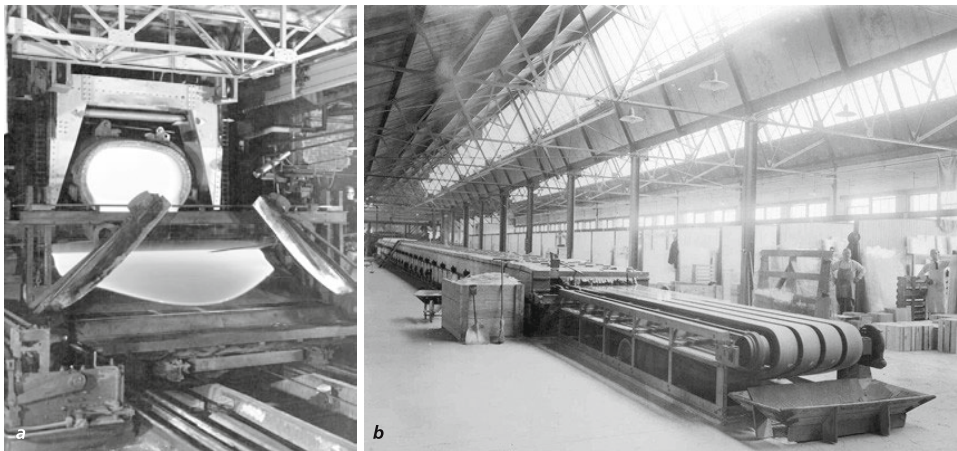


Abbildung 2.2 Beim *Bicheroux-Verfahren* ergießt sich das geschmolzene Glas aus einer Schmelzwanne auf eine schiefe Ebene. Zwei Walzen stellen sofort die gewünschte Glasdicke her. Durch das Walzen auf eine sich festbewegende Ebene konnten dünne, gleichmäßig starke Scheiben mit ebener Oberfläche hergestellt werden, sodass der Schleifvorgang erheblich reduziert wurde (a); Glasherstellung nach dem *Libbey-Owens-Verfahren*, aufgenommen in der Toledo Glass Company zwischen 1912-1914. Zu sehen ist der etwa 60 m lange Kühltunnel und der darauf folgende Schneidstisch (b). (Bildnachweis: Saint Gobain)

auf dem Bicheroux-Verfahren gelang es dem englischen Glashersteller *Pilkington* und dem amerikanischen Automobilkonzern *Ford* 1923 kontinuierliches Gussglas für den Automobilbau herzustellen. Geschmolzenes Glas wird hierbei in einem permanenten Prozess über Walzen von der freien Oberfläche der Glasschmelze abgenommen und in einen Kühlprozess eingeführt. Unmittelbar nach dem Abkühlen wird das Glas automatisch von beiden Seiten geschliffen und poliert. Letztgenannter Arbeitsschritt machte dieses Produktionsverfahren deutlich teurer und beschränkte somit den Einsatz auf anspruchsvolle Anwendungen. Noch heute findet dieses Verfahren in der Herstellung von ornamentierten Gläsern Verwendung. Je nach Ausbildung der Walzen werden dabei strukturierte Oberflächen erzeugt.

Das *Floatverfahren* (Abb. 2.8), der bis heute vorerst letzte Meilenstein in der Entwicklung der Flachglasherstellung, wurde von *Lionel Alexander Bethune Pilkington*, später *Sir Alastair Pilkington*, und *Kenneth Bickerstaff* 1953 zum Patent angemeldet. Bei diesem Herstellverfahren für Flachglas wird flüssiges Glas einem Floatbad aus geschmolzenem Zinn zugeleitet worauf es schwimmt (engl.: *to float*) und sich in Form eines endlosen Glasbandes ausbreitet. Infolge der Oberflächenspannung des Glases und der planen Oberflächen des Zinnbades bildet sich ein planparalleles, verzerrungsfreies Glasband von hoher optischer Qualität. Die Idee, flüssiges Zinn als Träger für Flachglas zu verwenden, geht auf den britischen Ingenieur und Erfinder *Henry Bessemer* zurück. Aufbauend darauf erhielt *William E. Heal* 1902 ein Patent in den USA auf das Herstellungsprinzip, Glas kontinuierlich über ein Zinnbad laufen zu lassen und so planparallele Oberflächen zu erhalten. Allerdings wurde dieses Patent nie kommerziell genutzt. Erst 1959 war die Entwicklung des Floatverfahrens so weit ausgereift, dass hiermit ab den 1960er Jahren eine Produktion im industriellen Maßstab erfolgen konnte; 1966 begann die Firma *Pilkington Brothers*, St. Helens/UK, mit der Produktion und vergab nachfolgend eine Vielzahl von Lizenzen an andere Flachglashersteller. Schon bald wurden die meisten Flachgläser im Floatverfahren hergestellt. Aufgrund der wirtschaftlichen Produktionsweise und der hervorragenden Glasqualität hinsichtlich Planität, Kontinuität der Glasdicke und kaum vorhandenen Luft- und Materialeinschlüssen, hat es heute bis auf wenige Spezialanwendungen die meisten anderen Methoden zur Flachglasherstellung weitgehend verdrängt.

2.2 Glas im konstruktiven Ingenieurbau

Die Materialeigenschaften von Glas sind durch eine hohe Druck- und eine niedrige Zugfestigkeit sowie eine erhebliche Kerbempfindlichkeit gekennzeichnet. Die Festigkeit von Glas wird somit durch dessen sprödes Materialverhalten bestimmt. Der Bruch eines überbelasteten Glases erfolgt unmittelbar aus der elastischen Deformation heraus. Dieses Verhalten ist auch als *Sprödbbruchverhalten* bekannt. Plastisches Fließen als Folge einer mechanischen Überbeanspruchung und daraus resultierende bleibende Verformungen können im makroskopischen Bereich im Gegensatz zu Stahl für Glas nicht erreicht werden, weshalb dem

Material in der praktischen Anwendung ein ideal-elastisches Verhalten unterstellt wird. Aufgrund der spröden Eigenschaften und der damit verbundenen geringen Zugfestigkeit war der Werkstoff Glas neben der herkömmlichen Verwendung als flächenfüllendes Fensterelement noch in den 1990er Jahren als Konstruktionswerkstoff nicht vollends akzeptiert. Intensive Forschungstätigkeiten haben seitdem ermöglicht, dass Glas in bauphysikalischer und konstruktiver Hinsicht den Anforderungen an die stetig steigenden Ansprüche des Energiehaushaltes eines Gebäudes und dem Streben nach immer mehr Transparenz gerecht wird, sodass sich der *konstruktive Glasbau* neben den Standarddisziplinen des Bauwesens (Stahl-, Beton- und Holzbau) etabliert hat. Letztendlich hat sich Glas in den letzten beiden Jahrzehnten durch die immer größeren Anforderungen auch baurechtlich aus seinem Hintergrunddasein gelöst (vgl. Abb. 2.3).

Eingesetzt als Bauteil mit lastabtragender Funktion wird der transparente Werkstoff heutzutage zu einem wichtigen Bestandteil innerhalb statischer Systeme. Immer größer werdende Produktionsabmessungen mit derzeitigen Scheibenabmessungen von $14,0\text{ m} \times 3,15\text{ m}^1$ zu produzieren, thermisch zu veredeln und anschließend zu Verbundsicherheitsglas weiter zu verarbeiten ist heute Stand der Technik. Dabei haben Veredelungen von Glaselementen, wie z. B. das thermische Vorspannen, die Realisierung von Ganzglas-Konstruktionen erst möglich gemacht. Mit zunehmender Forschungstätigkeit und Anwendung von Glaselementen im konstruktiven Ingenieurbau werden reale Anwendungen mit vertretbarem Prüf- und Genehmigungsaufwand umsetzbar. Jüngstes Beispiel ist die aktuell veröffentlichte Normenreihe DIN 18008. Speziell Teil DIN 18008-7 *Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 7: Sonderkonstruktionen*, momentan in Erarbeitung, wird zukünftig die Bemessung von aussteifenden, lastabtragenden und kalt verformten Bauteilen aus Glas regeln. Bis zur bauaufsichtlichen Einführung muss die Verwendbarkeit von statischen Glaselementen in Deutschland über Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) nachgewiesen werden. In der Regel sind dafür experimentelle Untersuchungen notwendig.

Typische Glasprodukte für den Einsatz im konstruktivem Ingenieurbau sind Einscheibensicherheitsglas (ESG), Teilvorgespanntes Glas (TVG) und Verbundsicherheitsglas (VSG). Generell gilt für alle konstruktiven Strukturen aus Glas, dass neben der Gebrauchstauglichkeit auch die Gewährleistung prinzipieller Sicherheitsanforderungen zu erfüllen ist. Dabei sind die Besonderheiten des spröden Werkstoffes, die Einwirkungen und die daraus resultierenden Beanspruchungen zu berücksichtigen. Mechanische, oberflächennahe Verschleißerscheinungen, häufig in Form von Kratzern infolge gewöhnlicher Nutzung (z. B. Reinigung), sind der Hauptgrund für verhältnismäßig geringe, für die statische Bemessung relevante Biegezugfestigkeiten. Da das Versagen eines Bauteils aus Glas nie gänzlich ausgeschlossen werden kann, ist im Voraus auch das Resttragfähigkeitsverhalten einer Konstruktion zu bewerten.

¹Verbundsicherheitsgläser aus $2 \times 12\text{ mm}$ Einscheibensicherheitsglas für das Projekt *Apple Campus 2* in Cupertino/USA.



Abbildung 2.3 Beispiele für Glasanwendungen im konstruktiven Ingenieurbau: *The Ledge* bzw. *Skydeck* am Willis Tower in Chicago/USA (a); Ganzglas-Brücke *Brücke 7*, hergestellt im Laminationsbiegeverfahren (b); Vorgespannte Stütze aus Borosilikatglas (c); Seilnetzfassade der *Markthal* in Rotterdam (d); Sphärische gekrümmte Verglasungen an der Fassade der *Elbphilharmonie* in Hamburg (e). (Bildnachweis: Skydeck Chicago at Willis Tower, Chicago (a), sedak GmbH & Co. KG, Gersthofen (b), Hi-Tec Glas, Grünenplan (c), Ossip van Duivenbode, Rotterdam (d))

In den vergangenen Jahren wurden einige sehr interessante Glaskonstruktionen realisiert. Dazu gehören die als begehbare Ganzglas-Konstruktion ausgeführten Glasbalkone *The Ledge* am Willis Tower in Chicago, von welchen die Besucher eine atemberaubende Aussicht über Chicago und den ungehinderten Blick in 400 m Tiefe genießen können (Abb. 2.3a), die *Brücke 7*, einer 7 m weit spannenden Glasbrücke, hergestellt im Laminationsbiegeverfahren (Abb. 2.3b), vorgespannten Stützen aus Borosilikatglasrohren, welche

ständige und veränderliche Geschosslasten in einem Privatgebäude tragen (Abb. 2.3c), Seilnetzfassaden wie solche der neuen *Markthal* in Rotterdam, bei denen die einzelnen Glasplatten infolge windinduzierter Verformung der biegeweichen Seilnetz-Konstruktion eine Verwindung (Zwängungslastfall) aus der Plattenebene erfahren (Abb. 2.3d) und schließlich die Fassade der *Elbphilharmonie* in Hamburg (Abb. 2.3e), welche ca. 600 sphärisch gekrümmte Verglasungen beinhaltet. Bedingt durch die exponierte Lage ist die Fassade hohen Windeinwirkungen ausgesetzt; die sphärische Krümmung der Gläser (hergestellt im Schwerkraftbiegeverfahren) führt bei Isolierverglasungen unter Zwängungsbeanspruchungen (z. B. Klimalasten) zu einer erhöhten Belastung des Glases. Alle diese Konstruktionen vertreten repräsentativ viele weitere Anwendungen des konstruktiven Glasbaus.

2.3 Chemie des Glases

2.3.1 Der Glaszustand

Der Begriff *Glas* charakterisiert einen inneren Zustand, der unabhängig von seiner chemischen Zusammensetzung (Abs. 2.3.2) zu verstehen ist. Zur Beschreibung der physikalischen Materialeigenschaften von Glas wird zwischen den Eigenschaften eines Festkörpers und denen einer Schmelze unterschieden (Scholze, 1988). Eine eindeutige Klassifikation des Aggregatzustandes ist nicht möglich, weshalb Glas eine Zwischenstellung zwischen fest und flüssig einnimmt. Eine der ersten wissenschaftlichen Definitionen von Glas wurde 1933 von *Gustav Tammann* vorgenommen:

»Der Glaszustand ist der eingefrorene Zustand einer unterkühlten Flüssigkeit, die ohne zu kristallisieren erstarrt ist.«

Für bauseitige Anwendungen wird Glas in DIN 1259-1 als »anorganisches nichtmetallisches Material, das durch völliges Aufschmelzen einer Mischung von Rohmaterialien bei hohen Temperaturen erhalten wird, wobei eine homogene Flüssigkeit entsteht, die dann zum festen Zustand abgekühlt wird, üblicherweise ohne Kristallation« definiert. Im üblichen Sprachgebrauch bezieht sich der Begriff Glas auf die Eigenschaften des Festkörpers. Der in Tammann (1933) verwendete Begriff der *unterkühlten Flüssigkeit* soll nicht suggerieren, dass es sich bei Glas um eine sehr zähe Flüssigkeit handelt, die unter Belastung zu fließen beginnt. Vielmehr ist hierbei die atomar unregelmäßige Gitterstruktur zu verstehen. Zahlreiche makroskopisch beobachtete Glaseigenschaften, wie Bruchverhalten und Festigkeit, sind in guter Übereinstimmung mit diesem Modell der unregelmäßigen Glasstruktur erklärbar.

Im flüssigen Aggregatzustand können sich Atome, Moleküle und Molekülgruppen relativ frei bewegen. Im Gegensatz zum gasförmigen Zustand, sind sie über zwischenmolekulare Wechselwirkungen (Kohäsionskräfte) miteinander verbunden. Dabei brechen

die Bindungen immer wieder und bilden sich neu, wodurch die Bindungspartner ständig wechseln. Bei diesen intramolekularen Bewegungen wird durch Reibung zwischen den benachbarten Teilchen eine Kraft übertragen, die von der Bewegungsgeschwindigkeit abhängig ist. Die Viskosität η ist die technisch messbare, makroskopische Eigenschaft dieser molekularen Beweglichkeit.

Wird eine Flüssigkeit unterhalb ihres Schmelzpunktes T_f abgekühlt, findet für gewöhnlich eine *Kristallisation* statt (Abb. 2.4), wobei durch die dichte Anordnung der Atome eine Volumenabnahme erfolgt. Infolge einer weiteren Temperaturabnahme wird das Volumen weiterhin kleiner, jetzt aber mit einem geringeren Temperaturkoeffizienten α_T . Die Steigung der Kurven in Abb. 2.4 kann über den gesamten Temperaturbereich als Temperaturausdehnungskoeffizient α_T interpretiert werden. Die Form des entstehenden Kristallgitters ist von der Art der chemischen Bindung und den beteiligten Bindungspartnern abhängig. Auf atomarer Ebene kommt es bei einem gewissen Teilchenabstand zu einem Ausgleich der entgegengesetzt gerichteten Anziehungs- und Abstoßungskräfte zweier benachbarter Teilchen. Anhand dieses vorgegebenen Abstandes, bildet sich eine dreidimensionale, regelmäßige Gitterstruktur. Alle Teilchen sind bestrebt, eine für sie günstige Position in dieser Anordnung anzunehmen. Der Aufbau eines kristallinen Festkörpers ist zeitabhängig. Wird eine Schmelze schneller abgekühlt, sodass es den Atomen nicht möglich ist eine optimale Position in der Struktur anzunehmen, kann eine Kristallisation verhindert werden. Eine Schmelze kann somit auch bei Temperaturen unterhalb von T_f flüssig bleiben. Ein solcher Zustand wird physikochemisch als *unterkühlte Flüssigkeit* oder als *unterkühlte Schmelze* bezeichnet und ist durch die durchgezogene Kurve in Abb. 2.4 schematisch dargestellt. Bei glasbildenden Systemen wird das Entstehen eines Kristallgitters zusätzlich

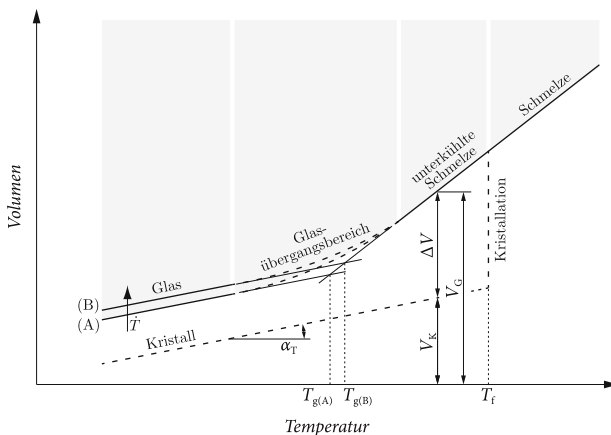


Abbildung 2.4 Schematische Darstellung der Temperaturabhängigkeit des Volumens von Glas. (nach Scholze, 1988; Schneider, 2005)

durch die Viskosität der Schmelze verhindert. Wenn bei T_f keine Kristallation einsetzt, verringert sich das Volumen stetig weiter entlang der oberen Kurve. Bei dem zwischen Schmelze und Glaszustand als *Glasübergang* bezeichneten Prozess, ist die dynamische Teilchenbewegung extrem verlangsamt. Hierdurch ist die Anordnung der Teilchen in eine bevorzugte Gitterstruktur unterbunden. Da nichtkristalline Festkörper eine höhere freie Energie als Kristalle besitzen, befindet sich das System in einem metastabilen thermodynamischen Gleichgewicht, welches durch die steigende Viskosität aufrecht erhalten wird. Durch weiteres Abkühlen wird das Verhalten der Flüssigkeitsstruktur immer langsamer, bis schließlich die Viskosität so hoch geworden ist, dass bei kontinuierlicher Abkühlung eine Gleichgewichtseinstellung nicht mehr möglich ist. Zu diesem Zeitpunkt ist aus der unterkühlten Flüssigkeit ein erstarrter Festkörper geworden. Da eine derartig unstrukturierte atomare Anordnung analog bei Flüssigkeiten zu beobachten ist, wird ein solcher nichtkristalliner Festkörper mit der inneren Struktur eines Fluids als amorpher Festkörper, nicht kristalliner Festkörper oder schlicht als Glas bezeichnet. In diesem Bereich verläuft die Gleichgewichtskurve parallel zu der des Kristalls (Abb. 2.4). Im Gegensatz zur Kristallation erfolgt der Phasenübergang von der Schmelze in den Glaszustand kontinuierlich und ohne abrupte Änderung der Materialeigenschaften. Aufgrund dieses kontinuierlichen Übergangs sollte statt von einer Transformationstemperatur T_g , von einem Transformationsbereich gesprochen werden. Dieser beträgt für Kalk-Natronsilikatglas etwa 500°C bis 550°C . Dabei gilt, dass der Schmelzpunkt oberhalb der Transformationstemperatur liegt, also $T_f > T_g$ ist, wobei T_g als Schnittpunkt der Geraden definiert wird, die das idealisierte lineare Materialverhalten im flüssigen und glasartigen Zustand beschreibt. Auch die Kühlrate hat einen Einfluß auf den Phasenübergang. Langsames Abkühlen bietet den Molekülen mehr Zeit sich in die bevorzugte Lage zu begeben. Das langsamer erstarrte Glas weist somit eine höhere Dichte auf. *Tammanns* Modell ist auch auf den thermischen Vorspannprozess (Abs. 2.5.1) von Gläsern übertragbar: Die Oberfläche des Glasbauteils wird aktiv über das Anblasen mit Luft mit einer hohen Abkühlgeschwindigkeit \dot{T} abgekühlt und erstarrt in einem offenen Zustand B (Abb. 2.5). Das Glas weist an dieser Stelle einen geringeren Ordnungsgrad der Struktur und eine geringere Dichte auf. Der Transformationsbereich liegt entsprechend bei höheren Temperaturen T , da die schnell ansteigende Viskosität zu einem schnellen Erstarren geführt hat. Hingegen kühlt das Glasinnere langsamer aus und nimmt einen dichteren und geordneteren Zustand A an.

Das Volumen ermöglicht eine einfache phänomenologische Beschreibung des Erstarrungsvorgangs (Abb. 2.4): Das Differenzvolumen ΔV ergibt sich als Differenz zwischen dem dargestellten Volumen einer Struktur im Glaszustand V_G und dem Volumen einer Kristallstruktur V_K in ihrer dichtest möglichen Konfiguration im Kristallgitter, welches sich nur durch eine thermische Ausdehnung ändert. Da die temperaturabhängige Volumenzunahme einer Glas- und einer Kristallstruktur gleich ist, bleibt das Differenzvolumen ΔV im Festkörper konstant. Hingegen benötigt jedes Teilchen im flüssigen Zustand einen

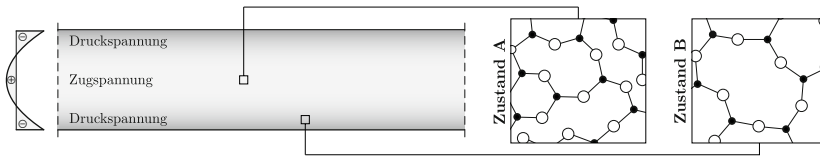


Abbildung 2.5 Dichteunterschiede infolge thermischer Vorspannung: Im Glasinneren können sich aufgrund der vergleichsweise längeren Abkühlzeit die Moleküle in einer dichteren Struktur (Zustand A) anordnen. An den Glasoberflächen wird das System beim Vorspannprozess sehr schnell abgekühlt, wodurch hier nur eine weniger dichte atomare Struktur möglich ist (Zustand B).

ausreichend großen Freiraum proportional zu ΔV . Deshalb steigt die Volumendifferenz im Bereich des Glasübergangsbereichs und der unterkühlten Schmelze an.

Im festen Aggregatzustand weist Glas ein ideal linear-elastisches und isotropes Materialverhalten auf. Der lineare Zusammenhang zwischen Dehnung ε und Spannung σ wird durch das *Hooke'sche Gesetz*

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

beschrieben. Der Elastizitätsmodul E ist als makroskopisches Maß für die Steifigkeit zu betrachten. Erklären lässt sich dieses Verhalten über die atomare Bindung eines Festkörpers: Moleküle und Atome sind wie oben beschrieben in einer gewissen Struktur positioniert. Um die Lage der Teilchen zu verändern, muss dem System Energie zugeführt werden. Dies kann beispielsweise durch eine äußere mechanische Belastung erfolgen. Wird die äußere Belastung wieder entfernt, kehren die Moleküle, angetrieben durch die gespeicherte potenzielle Energie, in ihre ursprüngliche Lage zurück. Bei kleinen Belastungen geschieht dies ohne Schädigung des Gefüges (Bruch atomarer Bindungen), sodass der Vorgang als reversibel bezeichnet werden kann.

2.3.2 Chemische Zusammensetzung

Im Bauwesen werden fast ausschließlich Silikatgläser verwendet. Der Hauptteil entfällt hierbei auf *Kalk-Natronsilikatgläser* (engl.: *soda-lime-silicate glass*) nach DIN EN 572-1, welches im Wesentlichen aus den Grundstoffen Quarzsand, Kalk und Soda besteht. Die chemische Zusammensetzung der Glasschmelze besteht aus Siliciumoxid (SiO_2), Calciumoxid (CaO), Natriumoxid (Na_2O), Magnesiumoxid (MgO) und Aluminiumoxid (Al_2O_3). Des Weiteren befinden sich noch geringe Anteile anderer Oxide wie Titandioxid (TiO_2) und Eisenoxid in der Schmelze. Die Eisenoxide geben dem handelsüblichen Flachglas normalerweise seine charakteristische grünliche Färbung. Für Spezialanwendungen, wie

Charakterisierung der Kratzanfälligkeit von Gläsern im
Bauwesen

Characterisation of the scratch sensitivity of glasses in
civil engineering

Schula, S.

2015, XXVIII, 406 S. 176 Abb., 65 Abb. in Farbe.,

ISBN: 978-3-662-47782-3