

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 128 (2002)
Heft: 12: Fokus Glas

Artikel: Häute aus Glas und Stahl: Grundlagen und Hinweise zur Konstruktion und Berechnung von Fassadentragwerken
Autor: Meyer, Daniel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-80391>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.01.2025

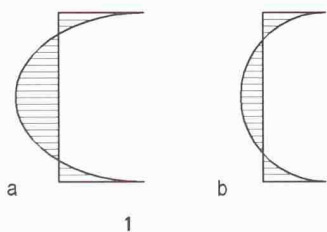
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Häute aus Glas und Stahl

Grundlagen und Hinweise zur Konstruktion und Berechnung von Fassadentragwerken

Glas ist nicht mehr nur Füllmaterial. Immer häufiger wird es in Fassaden als tragendes Element eingesetzt. Ausgereifte Konstruktionen aus Scheiben und Seilscharen treten an Stelle der Wände mit Kämpfern und Sprossen; die Wand wird zur Haut.

Grosse lichtdurchflutete Hallenräume in und zwischen Baukörpern verwischen die Unterscheidung in Innen und Aussen. Als wetterunabhängige Shoppingmalls oder Büro- und Hotellobbies hat der Typus sich durchgesetzt. Auf dem Hintergrund dieser Nachfrage haben in den vergangenen zehn Jahren die grossflächigen Glasdächer und -fassaden einen enormen Entwicklungsschub erfahren. Die Konstruktionen sind trotz der riesigen Ausmasse immer filigraner geworden, zum einen wegen des mittlerweile reichen Erfahrungsschatzes im Umgang mit Glas, zum anderen wegen der immer häufigeren Anwendung von biegeweichen Tragsystemen.

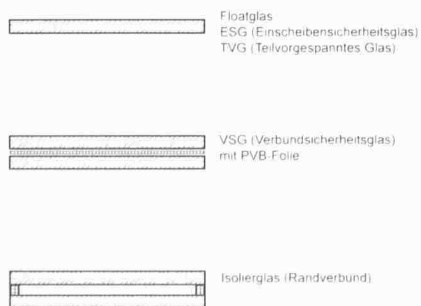


1
Eigenspannungszustand von (a) Einscheibensicherheitsglas (ESG) und (b) teilvorgespanntem Glas (TVG)

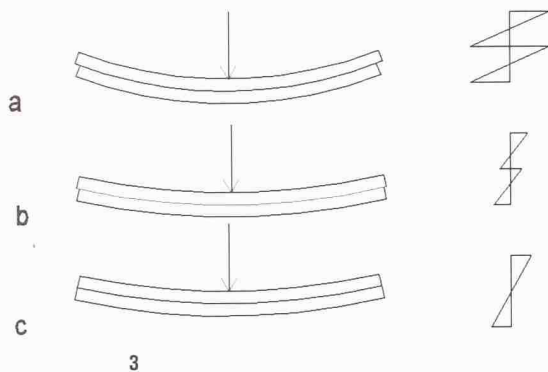
Werkstoff Glas

Die heute im Bauwesen am meisten verwendete Glasart ist *Floatglas*. Es handelt sich dabei um ein Flachglas, das in Dicken von 2 bis 19 mm und in maximalen Abmessungen von 320×600 cm noch wirtschaftlich produziert werden kann. Floatglas ist ein Ausgangsmaterial, das häufig entsprechend den gestellten Anforderungen weiterverarbeitet wird. Um seine relativ geringe Biegezugfestigkeit zu erhöhen, wird es thermisch vorgespannt und dann als *Einscheiben-Sicherheitsglas* (ESG) bezeichnet. Nachdem die Scheiben auf rund 650°C erhitzt worden sind, werden sie mit kühler Luft abgeschreckt. Unter dieser Behandlung kühlt der Glasquerschnitt ungleichmässig ab; die Glasoberflächen stehen unter Druck- und der Kern unter Zugspannungen. Die beiden äusseren unter Druck stehenden Schichten schützen das Glas gegen Rissbildung. So ist die Zugempfindlichkeit des Glases nun gewissermassen mit zwei äusseren Druckschichten gepolstert.

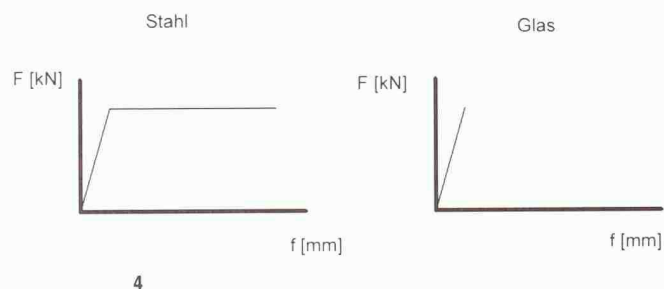
Teilvorgespanntes Glas (TVG) bezeichnet ein Floatglas, das analog dem ESG durch einen thermischen Vorspannprozess gehärtet wird (s. Abb. 1). Die Festigkeit liegt dabei höher als beim gewöhnlichen Floatglas und etwas tiefer als beim ESG. Dafür ist das Bruchbild bezüglich der Krümelgrösse mit jenem des Floatglases vergleichbar (s. Abb. 5). Im Bauwesen kommen hauptsächlich *Einfachglas*, *Verbundsicherheitsglas* und *Isolierglas* zur Anwendung (s. Abb. 2).



2
Glasarten



3
Verbundverhalten von zwei Scheiben:
(a) ohne Verbund, (b) teilweiser Verbund, (c) voller Verbund



4
Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Einfachglas wird im Fenster- und Fassadenbau vor allem in Form von Floatglas oder ESG verwendet. Bei einer Zerstörung des Einfachglases verliert das Glas seine Stabilität und fällt unwillkürlich in grosse scharfkantige Stücke auseinander. Es hat keine Resttragfähigkeit und verliert deswegen zusehend an Bedeutung.

Vorteilhafter bezüglich der Resttragfähigkeit verhält sich das *Verbundsicherheitsglas* (VSG). Es besteht aus mindestens zwei Scheiben, die mit Giessharzen oder Polyvinyl-Butyral-Folien (PVB-Folie) verbunden sind. Verbundsicherheitsgläser werden hauptsächlich aus Floatgläsern oder teilvorgespannten Gläsern zusammengesetzt. Bei VSG verlaufen die Risse der zerstörten Scheiben nicht in dieselbe Richtung, und es ergibt sich daraus – und dank der Splitterbindung durch die Folie – eine in der Regel hohe Resttragfähigkeit. Das Tragverhalten der Verbundsicherheitsgläser liegt wegen der elastischen Zwischenschicht zwischen dem vollen Verbund und dem ohne Verbund. Das Verbundverhalten von zwei oder mehreren Scheiben ist durch die Einflussgrößen *Schubmodul* und *Dicke der Zwischenschicht*, *Belastungsdauer* und *Umgebungstemperatur* bestimmt (s. Abb. 3).

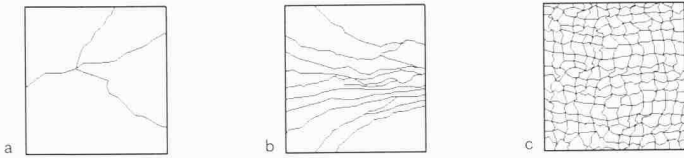
In der Praxis wird die elastische Verbundwirkung beim Nachweis der Tragsicherheit üblicherweise noch nicht berücksichtigt; an verschiedenen Hochschulen im In- und Ausland beschäftigen sich Forschungsprojekte mit der Verbundwirkung (s. auch den Beitrag von Andreas Luible in diesem Heft). Erste Bemessungsregeln werden in Kürze vorliegen. Verbundsicherheitsgläser finden im Fassadenbau, bei Glaskonstruktionen im Überkopfbereich und bei Geländern Anwendung.

Das *Isolierglas*, das in erster Linie als Abschluss von beheizten Räumen benutzt wird, besteht aus mindestens zwei Glasschichten mit Luftzwischenräumen; Abstandhalter verbinden und dichten die Scheiben am Rand ab. Die Scheibenzwischenräume bilden eine gegen die Aussenatmosphäre abgeschlossene Einheit und sind mit Luft oder Edelgasen gefüllt. Die Glasschichten bestehen den Anforderungen entsprechend aus Einfachglas oder Verbundsicherheitsglas.

Bruchverhalten von Glas

Das Werkstoffverhalten von Glas ist im Gegensatz zu den meisten Werkstoffen bis zum Bruch linear-elastisch. Es besitzt kein Fließplateau, mit dessen Hilfe sich Spannungsspitzen um vorhandene Risse in der Glasoberfläche abbauen können, wie es zum Beispiel beim Stahl der Fall ist (siehe Abb. 4). Die Festigkeit wird bei Glas vor allem von der Oberflächenbeschaffenheit bestimmt. Somit ist die Bruchfestigkeit von Glas keine Materialkonstante, sondern vom vorhandenen Oberflächenzustand abhängig. Kleinste Kratzer und Risse an der Oberfläche erzeugen Kerben, an denen Spannungsspitzen entstehen, die zum Aufreißen des Materials und somit zum spontanen unangekündigten Bruch führen können. Das Phänomen ist vom einfachen Glasschneiden her bekannt.

Floatglas zerfällt bei Zerstörung in sehr grosse scharfkantige Bruchstücke. Das Einscheiben-Sicherheitsglas zerbricht dagegen bei Überbelastung in unzählige klei-



5

Bruchbilder: (a) Floatglas, (b) Teilvorgespanntes Glas (TVG), (c) Einscheibensicherheitsglas (ESG)

Glasart	Charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)
Floatglas	45
Voll vorgespanntes Floatglas (ESG)	120
Teilvorgespanntes Floatglas (TVG)	70

Tab. 1

Charakteristische Biegefestigkeiten

Glasart	Zulässige Spannungen Vertikalverglasung (N/mm ²)	Zulässige Spannungen Überkopfverglasung (N/mm ²)
Floatglas	15	12
Voll vorgespanntes Floatglas (ESG)	50	50
Emailliertes ESG	30	30
Teilvorgespanntes Floatglas (TVG)	29	29
Emailliertes TVG	17	17
VSG aus Floatglas	15	15 25

(für untere Scheibe)

Tab. 2

Zulässige Spannungen

ne stumpfkantige Stücke, wie es zum Beispiel von zerstörten Windschutz-Scheiben bekannt ist. Das feine Bruchbild ist eine Folge der hohen Oberflächen-Druckspannung von ca. 100 N/mm². Ein einmal eingeleiteter Riss wird durch den vorhandenen Eigenspannungszustand fortlaufend abgelenkt; das Glas zerbricht in der Folge in unzählige kleine Krümel. Die Vorspannung bei TVG dagegen wird derart gewählt, dass die Oberflächenspannungen gerade so gross sind, dass bei Zerstörung nur Radialbrüche von Glaskante zu Glaskante auftreten und keine Krümel wie beim ESG. Die Druckspannung an der Oberfläche nach dem Vorspannprozess liegt zwischen 50 bis 70 N/mm². Die Produktion von TVG ist auf 12 mm beschränkt, da mit zunehmender Glasdicke die Krümelneigung zunimmt (s. Abb. 5).

Festigkeit von Glas

Die theoretische Zugfestigkeit von ungestörtem Floatglas liegt infolge der hohen atomaren Bindungskräfte der Moleküle bei ca. 6000 N/mm². Die ausnutzbare Festigkeit von Glas ist keine Materialkonstante und von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Dies sind etwa *Risse an der Oberfläche*, die infolge von Produktion, Transport und Veredelung entstanden sind. Die *Oberflächengrösse* beeinflusst die Festigkeit, ebenso wie *Belastungsdauer* und *Belastungsgeschwindigkeit*. Auch eine *korrodierende Umgebung* (Wasser) sowie die *Temperatur der Umgebung* haben Auswirkungen auf die Festigkeit. Die praktischen bzw. technischen Zug- und Biegefestigkeiten wurden aus zahlreichen Versuchen ermittelt und sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Sicherheit und Bemessung

Bisher erfolgt die Bemessung von Gläsern nach der Methode der zulässigen Spannungen. Diese beruhen im Wesentlichen auf Erfahrungswerten. Nach wie vor handelt es sich zurzeit mangels fehlender Richtlinien um das in der Praxis geläufigste Bemessungskonzept:

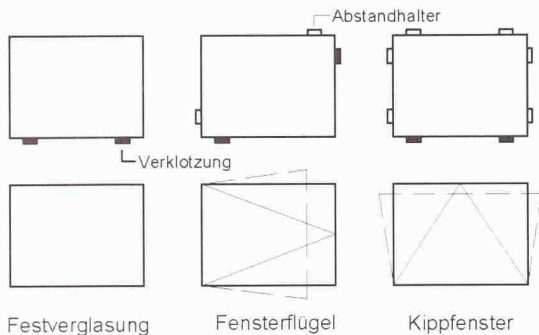
$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{zul}}$$

σ_{\max} maximale Spannung im Glas, Ermittlung ohne Teilsicherheitsbeiwerte

σ_{zul} zulässige Spannung des Glases

Die zulässigen Spannungen sind aus der Tabelle 2 ersichtlich.

Vorschläge für neue Bemessungskonzepte folgen der modernen Bemessungsphilosophie; das heisst, man versieht einerseits die Widerstandsseite mit den wesentlichen Einflüssen wie beispielsweise Oberflächenbeschaffenheit, Glasgrösse etc. und berücksichtigt andererseits auf der Einwirkungsseite nicht mehr die maximale Spannung, sondern die effektive Spannung. Dabei werden für den Tragsicherheitsnachweis von Glasbauteilen die Bemessungswerte derart festgelegt, dass die Bauteilfestigkeit mit ausreichender Zuverlässigkeit nicht überschritten wird. Die folgenden Konzepte werden zurzeit diskutiert: Vorschlag *Normentwurf CEN TC 129, Glas im Bauwesen WG 8*, Vorschlag *Wörner/Shen*, Vorschlag *Sedlacek/Güsgen/Blank*. Auf den Bemessungsvorschlag



6
Verklotzungsarten

von Sedlacek / Güssen / Blank wird nachfolgend näher eingegangen:

Beim vorgeschlagenen Bemessungskonzept wird der Bemessungswert der Einwirkungsseite analog zum Betriebsfestigkeitsnachweis von Metallkonstruktionen nach EC 3 demjenigen der Widerstandsseite gegenübergestellt. Die Bemessungsgleichung für vorgespanntes Glas lautet:

$$\alpha_{\sigma}(p, \sigma_v) \cdot \alpha(A_{red}) \cdot \alpha(t) \cdot \alpha(S_v) \cdot (\sigma_{max,d} - \sigma_{v,d}) \leq \frac{\sigma_{b,B,Ao,k}}{\gamma_M}$$

$\alpha_{\sigma}(p, \sigma_v)$ Faktor zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung in der Glasoberfläche, an der gilt $(\sigma_b - \sigma_v) > 0$

$\alpha(A_{red})$ Faktor zur Berücksichtigung der Grösse der beanspruchten Oberfläche, an der gilt $(\sigma_b - \sigma_v) > 0$

$\alpha(t)$ Faktor zur Berücksichtigung der Einwirkungsdauer

$\alpha(S_v)$ Faktor zur Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen

$\sigma_{max,d}$ Bemessungswert der maximalen Hauptzugspannung

$\sigma_{v,d}$ Bemessungswert der Druckvorspannung an der Stelle von $\sigma_{max,d}$

$\sigma_{b,B,Ao,k}$ Charakteristischer Wert der Prüfbiegefestigkeit

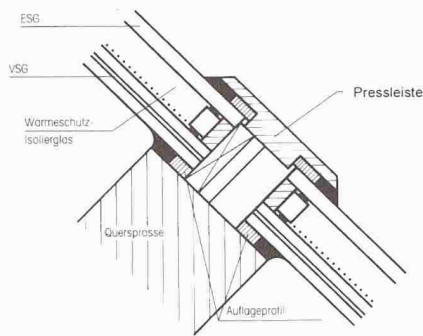
γ_M Teilsicherheitsbeiwert für $\sigma_{b,B,Ao,k}$

Fassadentragwerke

Die heutigen Glasbefestigungsmittel und das bessere Wissen um die Eigenschaften des Werkstoffs eröffnen dem Material Glas ein bedeutendes Potenzial in der Architektur. Das architektonische Repertoire ist um die Möglichkeit vollständig transparenter, leuchtender oder reflektierender Glasflächen erweitert worden. Dabei ist die frühe Beteiligung des Ingenieurs an der Fassadenplanung wichtig; die Zusammenarbeit von Architekt und Ingenieur ist nicht nur aus traditionellen Gründen erforderlich, sondern bestimmt entscheidend die Verwirklichung eines Entwurfs. Der Fassadenentwurf steht in klarer und logischer Verknüpfung mit den physikalischen Eigenschaften des Glases. Jede Verbindung, jeder Anschluss muss das Tragverhalten von Glas berücksichtigen. Im Folgenden sollen einige für die Umsetzung eines Tragwerkentwurfs wesentliche technische Punkte diskutiert werden.

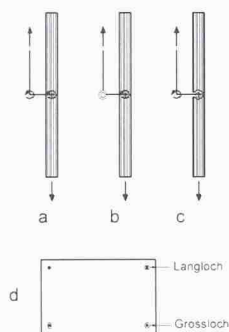
Lasten

Die nachstehend beschriebenen relevanten Lasteinwirkungen sind bei einer Fassade in der Regel zu berücksichtigen. Die *Windeinwirkungen* Druck und Sog sind der massgebende Lastfall und wirken senkrecht auf die Fassade. Insbesondere sind an den Gebäudekanten die erhöhten Windsogbeiwerte zu berücksichtigen. *Temperaturunterschiede* gegenüber der Einbautemperatur führen bei Glasfassaden zu Längenänderungen. Diese können unter Umständen Zwangsbeanspruchungen in den Gläsern verursachen, die detailliert zu untersuchen und überprüfen sind. Das *Eigengewicht* setzt sich aus dem Anteil der Gläser und dem Anteil der Fassadenkonstruktion zusammen; es spielt aber bei der Bemessung von Fassaden in der Regel eine untergeordnete Rolle.



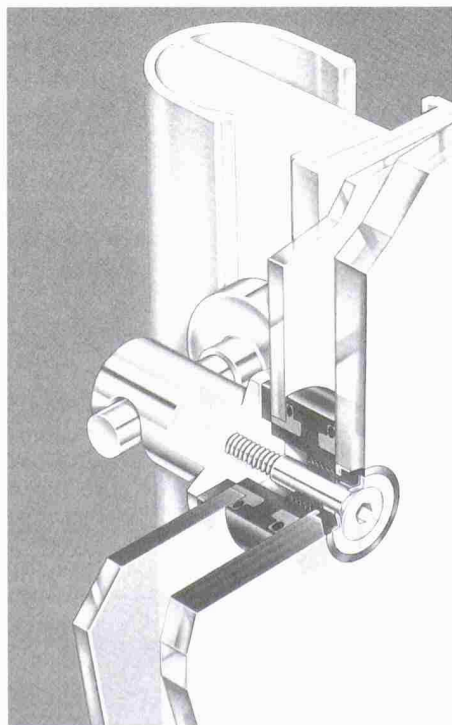
7

Detailschnitt Pressleiste



8

Punktförmige Glashalter, Befestigungsart und Lagerung: (a) Starre Befestigung, (b) Gelenk ausserhalb der Glasscheibe, (c) Gelenke innerhalb der Glasscheibe, (d) zwängungsfreie Lagerung der Scheibe



9

Punkthalter für Isolierverglasung

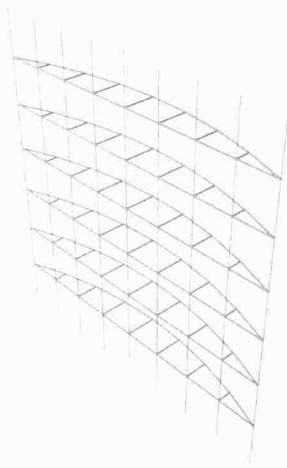
Glasscheibenbefestigung

Die gebräuchlichsten Glasbefestigungen sind die Verklotzung mit Verkittung, die Klemmhalterung, die gebohrte Punkthalterung und die Verklebung. Bei der Verklotzung werden Glasscheiben über so genannte Auflagerklötze zwängungsfrei in Rahmen aus Holz, Metall oder Kunststoff eingelegt. Die Fugen werden anschliessend mit Kitt verschlossen (s. Abb. 6). Mit der fortschreitenden Entwicklung vom klassischen Fensterbau hin zum grossflächigen Fassadenbau treten anstelle der Rahmen so genannte Pressleisten. Diese werden an der Unterkonstruktion der Fassaden befestigt. Die Pressleiste drückt eine elastische Zwischenschicht aus EPDM (Ethylen – Propylen – Dien vom Typ M) auf die Gläser und verhindert damit das Eindringen von Wasser. Die vertikale Kraftkomponente der Gläser wird üblicherweise durch eine Verklotzung aufgenommen. Die Klemmhalterungen kommen linienförmig oder punktförmig zur Anwendung (s. Abb. 7).

Um eine möglichst hohe Transparenz in der Fassade zu erreichen, wurden für die Glasscheiben Punkthalterssysteme entwickelt. Erstmals wurde der Punkthalter 1982 von Sir Norman Foster und Partner für die Fassade aus Einfachglas des Renault Centre in Swindon (GB) verwendet; danach fand er seinen endgültigen Durchbruch in den 1990er-Jahren. In den punktgehaltenen Glaselementen treten an den Bohrungen unvorteilhafte Spannungsspitzen auf, die wegen der Sprödigkeit des Glases nicht abgebaut werden können. Deshalb werden weiche Zwischenlager aus dauerelastischem Kunststoff oder Aluminium in die Glasebene eingebaut, um so eine homogene Lasteinleitung zu erreichen. Die Dicke der Zwischenschicht beträgt je nach Haltertyp 1 bis 5 mm. Die punktförmigen Glashalter lassen sich nach der Art ihrer Rotationsfähigkeit und Gelenklage unterscheiden. Es gibt die *starre Auflagerung* (fest verschraubt), das *Gelenk ausserhalb der Glasscheibe* (Kugelenk oder Neoprene) sowie das *Gelenk innerhalb der Glasscheibe* (Kugelenk). Punktförmige Auflager sind in Abbildung 8 dargestellt.

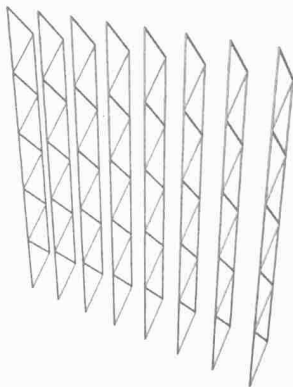
Alle drei Halterarten haben die Funktion, die vertikalen und die horizontalen Lasten an die Unterkonstruktion weiterzuleiten. Des Weiteren müssen die Punkthalter eine möglichst zwängungsfreie Lagerung der Scheibe gewährleisten. Dies erfolgt nach dem Prinzip von Fest- und Loslager und der Anordnung von Kugelenken. Die für das Glas gefährlichen lokalen Spannungsspitzen sind umso kleiner, je näher der Drehpunkt des Gelenks zur Scheibenschwerachse zu liegen kommt. Die Wahl für den am besten geeigneten Glashalter ist im Wesentlichen vom *Erscheinungsbild*, den *Scheibenabmessungen*, der *Scheibenart* (ESG, VSG oder Isolierverglasung), der *Steifigkeit der Unterkonstruktion* und nicht zuletzt von den *Kosten* abhängig (s. Abb. 9).

Werden Gläser linienförmig auf der Unterkonstruktion verklebt, spricht man von «Structural Glazing». Diese Befestigungsart wurde in den 1960er-Jahren in den USA entwickelt. Als Klebematerial werden in erster Linie Silikone, Polyurethane und Epoxidharzkleber verwendet. Die Klebeverbindungen erlauben eine bessere Lasteinleitung in das spröde Material Glas.



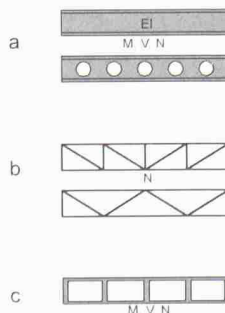
10

Horizontal orientierte Tragelemente



11

Vertikal orientierte Tragelemente



12

Biegesteife Systeme: (a) Biegeträger, (b) Fachwerkträger, (c) Vierendeelträger

Tragkonstruktionen von Glasfassaden

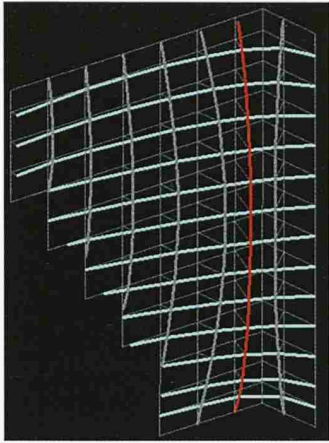
Es gibt zwei prinzipiell verschiedene Möglichkeiten der Lastabtragung, unterschieden nach der Orientierung ihrer Tragelemente. Bei *horizontal orientierten Tragelementen* (Prinzip 1) werden die Eigenlasten vertikal aufgehängt oder abgestellt und horizontal gegen Wind ausgesteift. Bei den *vertikal orientierten Tragelementen* (Prinzip 2) werden die Eigenlasten vertikal aufgehängt oder abgestellt und auch vertikal gegen Wind ausgesteift.

Beim ersten Prinzip erfolgt die Aufhängung über Stangen, Seile, Glasschwerter oder auch über die Glasscheiben selbst, indem die einzelnen Scheiben aneinander gehängt werden. Bei einer abgestellten Fassade kommen dagegen knicksteife Querschnitte zur Anwendung. Horizontal liegende Träger steifen die Fassade gegen Wind aus (s. Abb. 10). Beim zweiten Prinzip erfolgt die Aufhängung bzw. Abstützung analog dem ersten. Vertikal verlaufende Träger sorgen für eine ausreichende Steifigkeit gegenüber Wind. Die vertikal verlaufenden Aufhängungen bzw. Abstützungen und die Windträger werden sinnvollerweise miteinander kombiniert (s. Abb. 11).

Die Glasscheibe hat eine lokale lastabtragende Funktion; sie gibt die Lasten auf die eigentliche Tragkonstruktion der Fassade ab. Die Tragkonstruktion besteht aus Stahl, Aluminium, Holz oder auch aus Glas. So können eine Vielzahl von unterschiedlichen Tragwerken, den Randbedingungen des Projekts entsprechend, entwickelt werden. Für die Windlastabtragung kommen im Wesentlichen zwei Aussteifungsträger-Systeme in Frage, nämlich *biegesteife* und *biegeweiche* Systeme. Je nach dem gewünschten Erscheinungsbild oder den Befestigungsmöglichkeiten am Gebäude können beide Systeme sowohl vertikal als auch horizontal angeordnet werden.

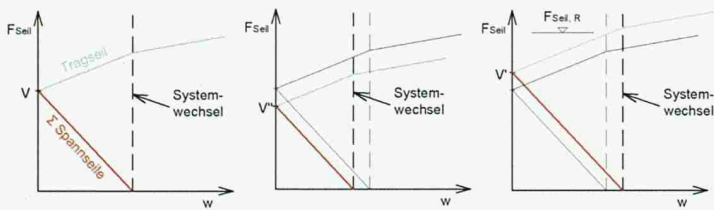
Die typischen Bauformen für biegesteife Träger sind *Hohlprofile* und *Walzprofile*, *Vollquerschnitte*, *Fachwerkträger* und *Vierendeelträger*. Bei den ersten beiden Bauformen werden die Lasten über Biegemomente, Quer- und Normalkräfte, beim Fachwerk über Zug- und Druckkräfte und beim Vierendeelträger über Rahmenmomente, Quer- und Normalkräfte abgetragen (s. Abb. 12). Bei den statischen Systemen handelt es sich um einfache Balken, Durchlaufträger oder auch Trägerroste. Die Bemessung der Träger erfolgt nach den entsprechenden materialspezifischen Normen. Bei Fassadenkonstruktionen werden immer mehr die biegeweichen Systeme bevorzugt, die mit ihren sehr filigranen Tragelementen grösste Transparenz versprechen. Dafür sind *hinterspannte Träger* und *Seilnetze* die typischen Bauformen.

Mit Hilfe von hinterspannten Systemen können sehr feingliedrige weit gespannte Fassadentragwerke gebaut werden. Die Hinterspannung ist an den Knickpunkten mittels Distanzhaltern (Spreizer) mit dem davor liegenden Versteifungsträger verbunden. Die Distanzhalter wirken als Druckelemente und für den Versteifungsträger als Zwischenauflagerpunkte. Der Verlauf der Hinterspannung wird in der Regel dem Momentenverlauf angepasst. Kräfte wie zum Beispiel Windsog, die in der



13

Wirkungsweise eines Seilnetzes, (s. Anm. 9). Das Tragseil ist gekoppelt durch die senkrecht dazu verlaufenden Spannseile. Es entsteht eine gegenseitige Beeinflussung der Seilkräfte



14

Links: Die schematisierte Last-Verschiebungs-Charakteristik einer Tragseil-Spannseil-Konstruktion. Die Steifigkeit der einzelnen Seile variiert mit der Seilgeometrie und der äusseren Belastung. Mitte: Ein zu geringer Vorspannungsgrad der Seile führt zu einem früher auftretenden Systemwechsel und damit zu einem Abfall der Systemsteifigkeit. Rechts: Ein zu hoher Vorspannungsgrad erhöht die Seilkräfte unter der massgebenden äusseren Belastung. Wird dieser Lastfall nicht berücksichtigt, führt dies zum Bruch des maximal belasteten Seiles (s. Anm. 9)

Gegenrichtung wirken, können in der Regel nicht aufgenommen werden. Sie müssen entweder durch die Biegesteifigkeit des Versteifungsträgers oder durch eine Gegenvorspannung aufgenommen werden. Hinterspannte Systeme sind statisch heikel bezüglich ihrer seitlichen Stabilität.

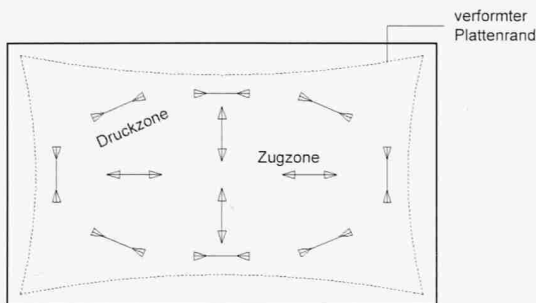
Die folgenden drei Massnahmen können diese Stabilität sicherstellen. 1. Die *Drehachse* der Unterspannung liegt hinter der Drehachse der gelenkig angeschlossenen Spreizer. 2. Die *Spreizer* sind im Versteifungsträger eingespannt. 3. Die gelenkig angeschlossenen Spreizer werden mit einer *quer verlaufenden Vorspannung* stabilisiert. Als Hinterspannung kommen Stabstangen, Rohre oder Seile zur Anwendung.

Seilnetze stellen in der Regel räumliche Tragwerke dar; sie eignen sich besonders für die Abtragung flächenhafter Lasten grosser Fassaden. Seilnetze erzielen ihre hohe Steifigkeit aus der Vorspannung unterschiedlich gekrümmter Seilscharen gegeneinander. Das heisst, dass ein Netz immer gegenseitig gekrümmt sein muss. Beim doppelt gekrümmten mit senkrecht zueinander verlaufenden Seilscharen wirken die Seile der einen Seilschar unter einer äusseren Belastung als Tragseile. Die zu dieser Seilschar senkrecht verlaufenden Seile wirken als Spannseile; sie beteiligen sich ebenfalls an der Lastabtragung, indem ihre Seilvorspannung abgebaut wird (Abb. 13 und 14). Die statischen Berechnungen haben wegen der auftretenden grossen Verformungen nach der Theorie 3. Ordnung zu erfolgen.

Bemessung von Glasscheiben

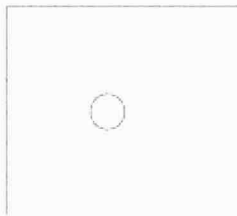
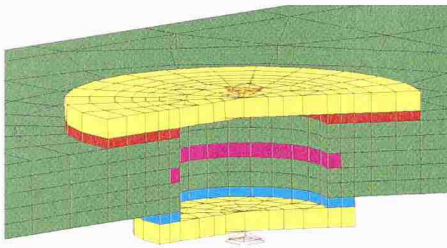
Glasscheiben sind entweder liniengelagert oder punktgestützt. Es sind sehr schlanke Bauteile mit relativ grossen Verformungen bezüglich ihrer Dicke. Bei vierseitig oder zweiseitig gelagerten Platten unter gleichförmiger Belastung liegen (nach Berechnungsmethode der linearen Plattentheorie) die maximalen Biegezugspannungen auf der lastabgewandten Oberfläche; das Spannungsmaximum liegt in der Plattenmitte. Bei Verformungen, die grösser als die Plattendicke sind, verliert die lineare Plattentheorie zusehends ihre Gültigkeit, denn den Biegespannungen überlagern sich die Membranspannungen. Das Zugspannungsmaximum verschiebt sich entlang der Plattendiagonale in Richtung der Plattenecken. Die Berücksichtigung von Membranspannungen führt zu einer Versteifung der Platte, d.h. sowohl die Spannungen als auch die Verformungen werden reduziert. Werden Glasplatten mit der linearen Plattentheorie bemessen, liefert sie für grössere Verformungen als die Plattendicke Ergebnisse, die in der Regel auf der sicheren Seite liegen; letztendlich sind sie aber unwirtschaftlich, da das Tragverhalten nicht zutreffend erfasst wird (Abb. 15).

Dasselbe gilt auch für punktgestützte Platten. Bei durchbohrten punktgehaltenen Glasscheiben sollten jedoch die Lochbereiche samt dem Punkthalter mit finiten Elementen modelliert werden. Sonst werden die wirklich auftretenden Spannungsspitzen am Loch ungenügend erfasst. Die Modellierung der Verbindung hat derart zu erfolgen, dass im Loch nur Druckkräfte übertragen werden können. Dies kann beispielsweise



15

Tragverhalten dünner Glasscheiben



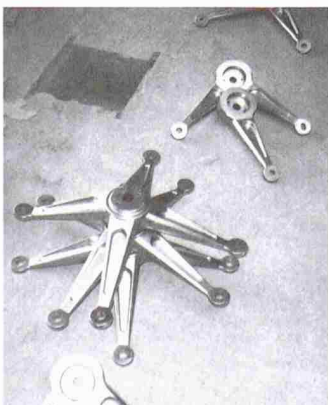
16

Lochmodellierung eines ESG mittels finiter Volumenelemente, (s. Anm. 9)



17

Fassade der Debis-Bauten B4 / B6 am Potsdamer Platz;
Arch: Richard Rogers Partnership



18

Punkthalter der Debis-Bauten am Potsdamer Platz

im 3D-Volumenmodell über so genannte intelligente Kontaktelemente modelliert werden. Eine solche Modellierung ist sehr aufwändig und setzt komplexe Statikprogramme wie z. B. Ansys oder Abacus voraus, Programme, die in der üblichen Alltagspraxis wenig Verbreitung haben. Ersatzsysteme können über Schalenelemente in Verbindung mit Federn und Druckstäben (Ausfall bei Zug) modelliert werden. Diese sind aber mit Bauteilversuchen (Benchmark-Modellierung) zu kalibrieren (Abb. 16).

Multi-Point-Fassaden in Berlin

Im Rahmen des Potsdamerplatz-Projekts in Berlin haben die Architekten Richard Rogers Partnership für Daimler Benz die zwei Bürogebäude B4 und B6 realisiert. Die Atrien der beiden Zwillingengebäude wurden mit grossen Stahl-Glas-Kuppeln überdacht. Im Eingangsbereich schliessen 24 m hohe Glasfassaden den Innenraum zur Strasse hin ab. Es handelt sich dabei um einfach verglaste *Multi-Point-Fassaden*. Das Gewicht der Stahlkonstruktion und der Verglasung hängt an vertikal durchlaufenden Stahlrohren, die an der obersten Geschossdecke über eigens gefertigte Einlageteile befestigt sind. Die Windaussteifung wird alle 3,6 m durch horizontal liegende Fischbauchträger, die in ihrer Spannweite von oben nach unten abnehmen, sichergestellt. Als Verbindungsmittel kamen speziell entwickelte Edelstahlbolzen (Duplex-Stahl 1.4462) zum Einsatz. Die grossflächigen ESG-Scheiben haben eine Glasdicke von 15 mm und Maximalabmessungen von $2,4 \times 1,8$ m. Diese sind an vier Punkthaltern mit Gelenken in der Scheibenebene über Edelstahlgussteile an der Stahlkonstruktion befestigt (s. Abb. 17 und 18).

Daniel Meyer, dipl. Bauing. ETH/SIA/SWB,
Dr. Lüchinger + Meyer, Hofackerstr. 13, 8032 Zürich

Literatur

- 1 Schock, B. und Meyer, D.: Glasfassaden. SI+A 27/28 (1996), Zürich.
- 2 Compagno, A. und Meyer, D.: Bürogebäude B4 und B6. Fassade 4/99, Schweizerische Zentralstelle für Fenster- und Fassadenbau (SZFF), Zürich.
- 3 Luessi, W.: Verglaste Netzkuppel, FASSADE 2/00, Schweizerische Zentralstelle für Fenster- und Fassadenbau SZFF, Zürich.
- 5 Laufs, W., Luble, A.: Voruntersuchung zur Typisierung von Gebäudehüllen aus Glas. Ecole polytechnique fédérale, Lausanne, 1999 (Rapport ICOM 403).
- 6 Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M., Sobek, W.: Glasbau-Atlas. Birkhäuser-Verlag 1998.
- 7 Sedlacek, G., Blank, K., Laufs, W., Güssen, J.: Glas im konstruktiven Ingenieurbau. Bauingenieur-Praxis, Verlag Ernst & Sohn, 1999.
- 8 Bucak, Ö.: Glas im konstruktiven Ingenieurbau. Stahlbau-Kalender 1999, Verlag Ernst & Sohn, 1999.
- 9 Weiss, Dominik: Atriumfassade der Debis-Gebäude Potsdamerplatz. Diplomarbeit Wintersemester 2001/02, IBK Sektion Stahl- und Holzbau, ETH Zürich.