

## **KLEBEN IM STAHLBAU Herausforderung und Innovation**

Yvonne Ciupack

BTU, Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau, Cottbus, Deutschland

### **EINLEITUNG**

Trotz vieler Weiterentwicklungen klassischer Verbindungstechniken im Stahlbau, bleiben grundsätzliche Probleme, wie Schweißspannungen oder Querschnittsschwächungen, bestehen. Die Anwendung struktureller Klebverbindungen könnte hier Abhilfe schaffen. Die Automobilindustrie beweist seit vielen Jahren eindrucksvoll das Potential des Fügeverfahrens „Kleben“. Auch im Bauwesen und speziell im Stahlbau wird kontinuierlich an der Etablierung der Klebtechnologie als strukturelles Element gearbeitet. Dass Klebverbindungen einerseits Herausforderungen, aber andererseits auch Innovation bedeuten, soll in diesem Beitrag demonstriert werden.

## **1 HERAUSFORDERUNGEN**

### **1.1 Klebgerechtes Konstruieren**

Für die Gestaltung geklebter Strukturen steht dem Anwender eine große Vielzahl an Klebstoffen zur Verfügung, die verschiedene Verarbeitungseigenschaften sowie Trag- und Verformungsverhalten aufweisen. Die Auswahl geeigneter Systeme hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit für das Bauwesen, fällt dem Tragwerksplaner aus diesem Grund und fehlender Erfahrungen entsprechend schwer. Wesentliche Anforderungen an die Klebstoffe können durch eine gewisse Viskosität für die Herstellung einer Klebung sowie ausreichende Trag- und Verformungsfähigkeit der Klebfuge beschrieben werden. Neben der geeigneten Wahl des Klebstoffsystems ist die Oberflächenbeschaffenheit der Fügepartner von wesentlicher Bedeutung für den Verbund. So ist das Reinigen und Entfetten von Stahlfügeteilen im Klebprozess unentbehrlich. Zusätzliche mechanische Vorbehandlungsmethoden, wie z.B. Strahlen, können die Adhäsionseigenschaften außerdem verbessern. Weiterhin spielt die Art der Belastung eine wichtige Rolle für die Tragfähigkeit der Verbindung. So können ungleichmäßige und kombinierte Beanspruchungen sowie Schälspannungen durch Klebverbindungen schlecht ertragen werden.

Gleichmäßig verteilte Druck- und Schubbeanspruchungen hingegen, sind gut geeignet. Durch das konstruktive Ausbilden „glatter“ Übergänge, z.B. durch Abschrägen der Fügeitenden, werden Spannungsspitzen vermieden, was wiederum die Tragfähigkeit der Klebfuge erhöht.

## **1.2 Trag- und Verformungsverhalten von Klebverbindungen**

Das Trag- und Verformungsverhalten von Klebschichten ist nichtlinear und zeitabhängig. Je nach Art des Klebstoffes, können ausgeprägte Kriech- und Relaxationsprozesse beobachtet werden. Das mechanische Langzeitverhalten wird zusätzlich durch Umwelteinflüsse, z.B. Temperatur, UV-Strahlung und Feuchtigkeit, beeinflusst. Diese Einwirkungen können zu einer irreversiblen Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften einer Klebschicht führen. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Temperaturabhängigkeit gelegt, da Klebstoffe durch die sogenannte Glasübergangstemperatur charakterisiert werden. Wird eine Klebfuge Temperaturen ausgesetzt, die oberhalb des Glasübergangs liegen, so neigt sie zu großen Verformungen und weist eine verminderte Bruchspannung auf. Tiefe Temperaturen führen hingegen zu erhöhter Steifigkeit und Kerbempfindlichkeit. Diese Zusammenhänge, können für die Anwendung sinnvoll genutzt werden. So werden elastische Kleb- und Dichtstoffe oberhalb der Glasübergangstemperatur eingesetzt, um thermische Eigenspannungen zu vermeiden und Verformungen zu kompensieren.

Aufgrund der Komplexität des Trag- und Verformungsverhaltens von Klebschichten, ist eine adäquate Beschreibung des Spannungsverlaufes bis heute nur mit großem Aufwand, z.B. unter Zuhilfenahme der numerischen Simulation möglich. Da für das Bauwesen einfache und normungsnahere Berechnungsmethoden benötigt werden, stellt die Entwicklung geeigneter analytischer Modelle eine besondere Herausforderung dar. Dies gilt ebenso für die Bestimmung von charakteristischen Materialkennwerten für die Bemessung von Stahlklebverbindungen. Während für die Stahlfügeteile eine Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften lediglich bei einer Warmbemessung zu berücksichtigen ist, ist dies bei einer Klebfuge nicht ausreichend. Die Ermittlung von zeitabhängigen Materialkennwerten unter Berücksichtigung von schädigenden Umwelteinflüssen ist daher unumgänglich. Aktuell stehen allerdings nur einfache Prüfmethode zur Verfügung, die eine umfassende Betrachtung der Einflussfaktoren erschweren. Zum einen kann das Schubspannungs-Gleitungsverhalten mit Hilfe von Zugscherproben nach DIN EN 14869-2 [1] beschrieben werden. Aussagen über das Tragverhalten von Klebfugen bei Normalspannungszuständen können über Kopfzugproben in Anlehnung an DIN EN 15870 [2] gewonnen werden. Durch diese zerstörenden Tests können Klebschichteigenschaften, zunächst ohne Berücksichtigung von zeit- und umgebungsabhängigen Faktoren, charakterisiert werden.

Interaktionsbeziehungen lassen sich aus mehrachsigen Versuchen an Rohrproben oder aus Arcan-Tests ableiten. Eine Übertragung der Erkenntnisse aus solchen Kleinteilproben auf stahlbautypische Dimensionen, ist jedoch nicht ohne Weiteres möglich. Bauteilprüfungen bleiben daher weiterhin erforderlich.

## **2 INNOVATION**

### **2.1 Das Potential von Klebverbindungen richtig nutzen**

Dass die Komplexität und das Langzeitverhalten von Klebschichten nicht als Hindernis, sondern als Herausforderung für das Bauwesen verstanden werden muss, zeigen erfolgreiche Anwendungen der Klebtechnik, welche das Innovationspotential dieses Fügeverfahrens optimal ausnutzen. Denn bei geeigneter Klebstoff- und Fügepartnerwahl, können langlebige und zuverlässige Konstruktionen realisiert werden. Außerdem können die speziellen Eigenschaften von Klebfugen vielseitig und vorteilhaft genutzt werden. So können durch Feuchtigkeit und Korrosion induzierte Schäden vermieden werden. Durch das „Kleben“ wird eine flächige Lasteintragung in die Fügeteile ermöglicht, was eine geringe Kerbwirkung zur Folge hat. Im Vergleich zu Schweißverbindungen werden wärmebedingte Verzüge und Eigenspannungen reduziert bzw. vollständig vermieden. Gegenüber typischen Schraub- oder Bolzenverbindungen, wird auf eine Querschnittsschwächung der Fügepartner verzichtet. Ein wesentlicher Vorteil des Fügeverfahrens „Kleben“ liegt in der Möglichkeit, verschiedene Materialien mit einander zu verbinden und somit innovative Hybridsysteme herzustellen.

Einige herausragende Beispiele der Klebanwendung im Stahlbau und Stahl-Glasbau sollen im Folgenden vorgestellt werden.

### **2.2 Geklebte Fachwerkbrücke**

In den Jahren 1955 bis 1956 entstand über dem Lippe-Seitenkanal bei Marl die erste „geklebte“ Rohr- und Fußgängerbrücke mit einer Stützweite von 56 m (*Abb. 1a*). Grundgedanke der Konstruktion war der Ersatz bzw. die Steigerung des Gleitwiderstandes hochfestvorgespannter Schraubverbindungen. Die Füllstäbe des gebildeten Viergurtfachwerkes wurden über geklebte Flanschverbindungen an die Fachwerkgurte angeschlossen, wobei zur Sicherstellung einer einfachen Montage zusätzlich Schrauben angeordnet wurden. Diese weisen ein Lochspiel von 2 mm auf (*Abb. 1b*), sodass die Schrauben erst nach Versagen der Klebfuge auf Abscheren beansprucht werden. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse während der Planung, des Baus und der Nutzung dieser Fußgängerbrücke

wurde eine weitere „geklebte“ Brücke geplant. Dabei kamen erstmals planmäßig vorgespannte Klebverbindungen zum Einsatz.

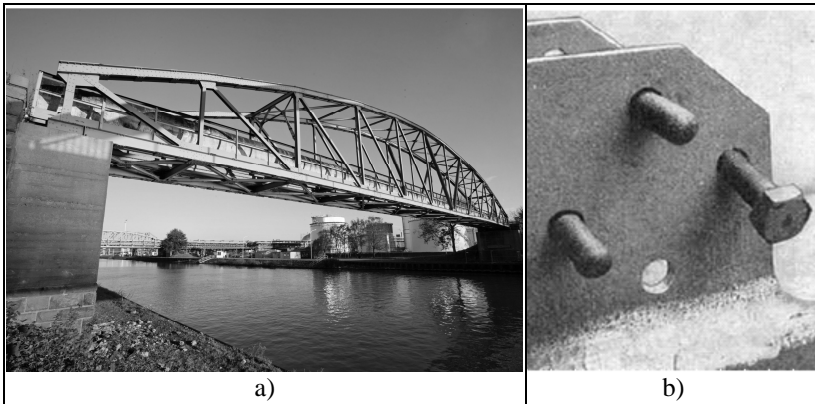


Abb. 1. a) Erste „geklebte“ Rohr- und Fußgängerbrücke (Copyright: Infracor GmbH); b) Spiel von 2 mm der Schraubverbindung [3]

### 2.3 Herz-Jesu-Kirche

Eines der wohl bedeutendsten Bauwerke in Deutschland, zur Demonstration der Funktionsweise von lastabtragenden Klebverbindungen ist die Herz-Jesu-Kirche (Abb. 2a) in München, welche durch die A. Hagl Ingenieurgesellschaft in der Tragwerksplanung realisiert wurde. Das Wesen der imposanten Glasfassade wird durch lastabtragende horizontal und vertikal verlaufende Glasschwerter definiert. Zur Weiterleitung der auftretenden Lasten in die primäre Tragkonstruktion sind die Glasschwerter mit C-förmigen Edelstahlprofilen durch Silikonklebstoffe verklebt (Abb. 2b). Die Vorteile des neuartigen Systems sind durch die optischen, konstruktiven und ökonomischen Vorzüge zu begründen [4]. Um die Verformungen des Stahlskeletts möglichst klein zu halten und somit den Einfluss auf die Glasfassade zu minimieren, kam es bei der Herz-Jesu-Kirche zur Anwendung des eingespannten Rahmens als statisches System. Als Klebstoff kam ein „Structural Glazing“ Klebstoff auf Silikonbasis mit einer Klebschichtdicke von 5 mm zum Einsatz. Die Verklebung wurde vollständig im Werk unter kontrollierten Bedingungen vorgefertigt und die vorkonfektionierten Bauteile anschließend auf der Baustelle montiert. Da das Glasschwert inklusive der tragenden Klebschicht eine nicht geregelte Bauart ist, musste eine Zustimmung im Einzelfall erwirkt werden. Hierfür wurden experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten und Bauteilversuche in Anlehnung an ETAG-002 [5] unternommen.

Tragfähigkeitsversuche der Glasschwerter und Experimente zur Leistungsfähigkeit der Silikonverklebung zwischen dem Verbundglasbauteil und dem C-Profil standen dabei im Vordergrund. Maßgebend für das Versagen der Klebschicht war hierbei eine Zugbeanspruchung, die zusätzlich unter Variation der Einflussgrößen Temperatur und Dauerlast analysiert wurde. Die Silikonverklebung wurde so dimensioniert und ausgeführt, dass ein Abschälen oder adhäsives Versagen ausgeschlossen werden konnte. Die neuartige Synthese aus Glas, Stahl und Silikonklebstoffen, welche an der Herz-Jesu-Kirche beeindruckend umgesetzt wurde, ist richtungsweisend für die angewandte Klebtechnologie im deutschen Bauwesen.

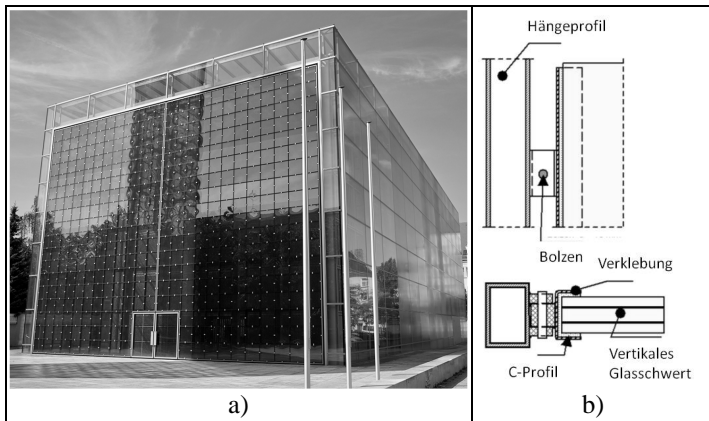


Abb. 2. a) Ansicht der Herz-Jesu-Kirche; b) Detail: Anschluss vertikales Glasschwert [4]

## 2.4 SPS-Anwendungen

Im Jahr 1993 wurde an der Carleton University in Ottawa als Forschungsprojekt zur Entwicklung von Eisbarrieren zum Schutz von Offshore-Anlagen ein innovatives Hybridsystem entwickelt. Die SPS-Technologie (Sandwich-Plate-System oder Steel-Polymer-Steel) stellt einen neuartigen Verbundquerschnitt aus Doppelblech und Verfüllung dar. Der Verbund wird dabei durch Adhäsion eines Polymers an die Stahlfügeteiloberflächen hergestellt. Durch entsprechende Geometriewahl, wie Blech- und Elastomerdicken, lassen sich Biegesteifigkeit und Festigkeit der Sandwichplatte anpassen und so wählen, dass diese denen einer konventionell ausgesteiften Stahlkonstruktion entsprechen. Die Stahlbleche werden durch das vollständig verbundene Elastomer kontinuierlich gestützt. So wird lokales Beulen verhindert, ohne dass zusätzliche Steifen angeschweißt werden müssen.

Erste kommerzielle Anwendung fand SPS seit 2000 bei der Reparatur von Schiffdecks im sogenannten Overlay-Verfahren (Abb. 3). Dabei bleibt die ursprüngliche Konstruktion erhalten und es werden neue Deckbleche über Distanzstücke auf den Rahmen der einzelnen Segmente angebracht. Die dadurch entstehenden Hohlräume werden abschließend mit einem Elastomer ausgegossen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Reparaturmethoden ist dieser Prozess zeitsparend und kostengünstig [6].

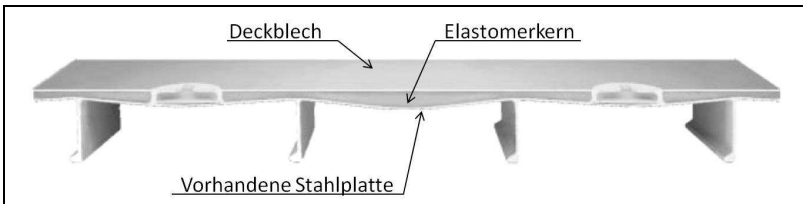


Abb. 3. SPS-Auflegetechnik (SPS-Overlay) im Schiffsbau [7]

Im Bauwesen finden sich viele Anwendungsmöglichkeiten für den SPS-Verbundquerschnitt. Als isotrope Fahrbahnplatte wird SPS im Brückenbau eingesetzt, bei der die Aussteifung der Rippen durch die Bettung des Kunststoffs ersetzt wird. Z.B. wurden SPS-Verstärkungen an der Schönwasserparkbrücke in Krefeld für eine verbesserte Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit bestehender Stahlfahrbahnen eingesetzt [7].

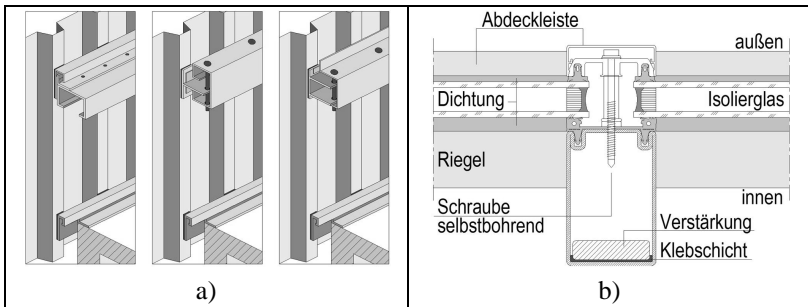
Das innovative Potential von SPS wird im Vergleich zu bewehrten Betonkonstruktionen aufgrund der starken Gewichtsreduzierung besonders deutlich. Untersuchungen für Stadiontribünen, Deckensystemen und Brückenfahrbahnen zeigen, dass bis zu 70% der statischen Dauerlast vermieden werden können und außerdem von einer erhöhten Lebensdauer auszugehen ist. Gleichzeitig kann der Elastomerkern bauphysikalische Aufgaben, wie z.B. Schallisolierung erfüllen.

## 2.5 Anwendungen aus dem Stahlfassadenbau

In unterschiedlichen Forschungstätigkeiten beschäftigte sich der Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau der Brandenburgischen Technischen Universität (BTU) mit zwei Anwendungsbeispielen der Klebtechnologie im Stahlfassadenbau. Untersucht wurden ein geklebter Anschluss einer Trapezprofilfassade sowie eine geklebte Hohlprofilverstärkung einer Pfosten-Riegel-Fassade. In den Vorhaben konnten die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erfolgreich demonstriert sowie ein Eurocode-basiertes Bemessungskonzept für diese Konstruktionen entwickelt werden.

Trapezprofilfassaden kommen überwiegend für den Industrie- und Hallenbau zum Einsatz. Nach der Errichtung des Stahlskeletts, als primäre Tragkonstruktion, wird im Allgemeinen eine Unterkonstruktion aus

Stahlleichtbau-Profilen montiert, die dem Anschluss der Trapezprofile mit Schrauben oder Setzbolzen dient. Dies schwächt jedoch den Querschnitt und kann zu ungewollten Dellen, Kratzen und gar zu Löchern in der Fassadenansicht führen. Weiterhin ist der Selbstreinigungseffekt im Bereich der herausstehenden Verbindungsmittel gestört. Aus diesen Gründen wurden, die in *Abb. 4a* dargestellten Lösungsmöglichkeiten für mittelbar geklebte Anschlüsse entwickelt. Die Anschlusskonzepte sind so gestaltet, dass das Elementeigengewicht über die Fuß- oder Kopfpunkte der Fassadenelemente abgetragen werden kann.



*Abb. 4.* a) Geklebter Fassadenanschluss, verschiedene Anschlussformen (von links): L-, T-, Pi-Anschluss; b) geklebte Fassadenverstärkung [8]

Eine wesentliche Forderung durch die Architekten und Bauherren sind eine erhöhte Seitenblicktransparenz, hochwertige, weitgehend transparente und strukturierte Fassaden, die hauptsächlich für repräsentative Gebäude genutzt werden. In vielen Fällen kommt dafür die Pfosten-Riegel-Fassade zum Einsatz. Um die gewünschte Wirkung zu erzielen, ist es notwendig, dass das primäre Traggerüst in den Hintergrund tritt. Das bedeutet, dass eine Minimierung der Außenabmessung der Tragglieder, bei gleichzeitiger Steigerung der Steifigkeit zu erzielen ist. Eine Lösung für das Problem bietet die Klebtechnologie. Durch eine innenliegende Verstärkung des Fassadenhohlprofils aus einem Flachstahl und einer Klebschicht entsteht ein Verbundquerschnitt mit einer erhöhten Steifigkeit und Tragfähigkeit. Der wesentliche Vorteil eines verstärkten Pfosten-Profils, gegenüber einem Hohlprofil mit veränderter Höhe, ist die geringere Schlankheit der Stege. Somit wird ein Ausbeulen der Stege unter Druckbeanspruchungen vermieden. Das Prinzip der Fassadenhohlprofile mit eingeklebter innenliegender Verstärkung ist ähnlich dem Brettschichtholz. Anders als beim Holzbau jedoch, ist aufgrund der höheren Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften der Stahlfügeteile ein Klebschichtnachweis erforderlich.

Die vorgestellten Konstruktionen wurde auf diese Weise entwickelt, dass die Klebverbindung vollständig in der Werkstatt unter definierten Bedingungen hergestellt und das vorkonfektionierte Bauteil auf der Baustelle lediglich montiert werden muss. Das Fügen mit Hilfe der Klebstoffe wird lediglich als zusätzlicher Prozessschritt eingefügt, ohne die gewohnten Prinzipien und Verfahren im Fassadenbau zu verändern.

### 3 ZUSAMMENFASSUNG

Dass die Klebtechnologie mehr als eine Alternative für klassische Verbindungsmittel bedeutet, kann durch Anwendungsbeispiele und Forschungsarbeiten in vielen Bereichen bewiesen werden. Trotz vieler Vorzüge steht das Bauwesen und speziell der Stahlbau diesem innovativen Fügeverfahren dennoch zurückhaltend gegenüber. Dies wird oft durch Zweifel an der Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit sowie fehlenden Erfahrungen begründet. Solche Zweifel als offene Fragen und somit als Herausforderungen zu verstehen, schafft die Möglichkeit und das Potential für außergewöhnliche Innovationen.

### LITERATUR

- [1] DIN EN 14869: Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen, Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügebauteile, (ISO 11003-2:2001, modifiziert); Deutsche Fassung EN 14869-2:2004; Oktober 2004.
- [2] DIN EN 15870: Klebstoffe – Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebungen (ISO 6922:1987, modifiziert); Deutsche Fassung EN 15870:2009, August 2009.
- [3] Trittler, G „Neue Entwicklungen der Verbindungstechnik im Stahlbau“, VDI Zeitschrift 105, Nr. 8, S. 325-364, 1963.
- [4] Hagl, A „Synthese aus Glas und Stahl: Die Herz-Jesu-Kirche München“, Stahlbau, Heft 7, S. 498-506, 2002.
- [5] Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems (SSGS): Teil 1: Supported and unsupported systems. November 1999.
- [6] Kaufmann, S „Sandwich Plate System ersetzt Stahlplatten“, Plastverarbeiter 52, Nr. 10, S. 196-198, 2001.
- [7] Feldmann, M, Völling, B, Geßler, A, Wellershof, F, Geiß, P.L, Wagner, A „Kleben im Stahlbau“, Stahlbau 75, Heft 10, S. 834-846, 2006.
- [8] Meinz, J, *Kleben im Stahlbau: Betrachtungen zum Trag- und Verformungsverhalten und zum Nachweis geklebter Trapezprofilanschlüsse und verstärkter Hohlprofile in Pfosten-Riegel-Fassaden*, Weißensee-Verlag, Berlin, 2010.