

Kleben im Bauwesen – gestern, heute, morgen

Eine Übersicht - ein Ausblick auf die Forschung im Konstruktiven Glasbau an der Fachhochschule München (FHM).

Zusammenfassung

Kleben im Bauwesen hat eine lange Tradition. Die Geschichte des Klebens beginnt spätestens mit der Entwicklung des Mörtels im vorchristlichen Rom. Seither hat die Technologie des Klebens bedeutende Fortschritte erzielt - und auch Rückfälle erlitten. Der moderne Bauingenieur klebt in vielen Bereichen des Bauens, ohne dass ihm meist bewußt ist, dass er die Technologie "Kleben" anwendet. Dieser Bericht soll zum einen eine allgemeine Übersicht über die im Bauwesen üblichen "Klebstoffe" geben, zum anderen soll insbesondere die Technologie des Klebens im Glasbau beleuchtet werden. An der Frage nach den Eigenschaften der Klebstoffe für den Glasbau soll aufgezeigt werden, welche Aspekte bei der Erforschung dieser neuen Verbindungstechnologie bedacht werden müssen.

Bonding in Civil Engineering – yesterday, today, tomorrow

An overview – a look forward on research in the field of Structural Glazing at the Munich University of Applied Sciences.
Conclusion

Bonding in the field of Civil Engineering has a long tradition. According to today's knowledge the history of adhesions began latest in the pre-Christian Rome with the invention of mortar. Since this time, the technology of bonding had become a great progress – and also meet relapses. The modern Civil Engineer is using bondings in many areas of building, mostly without being aware that he is using this technology. By one hand this report shall give a general overview about the usual adhesives in Civil Engineering, at the other hand focus shall be given at the usage of bonding in the field of structural glazing. On the question about the material properties for adhesives used in Structural Glazing the essential aspects should be shown by doing research on this new joint technology.

1. Hier wird überall geklebt!

1.1. So fing alles an

Die Bionik an sich ist eine junge Wissenschaft, die technische Anwendungen von in der Natur vorgefundenen "Technologien" für praktische Anwendung umsetzt. Das dürfte allerdings nicht wirklich neu sein. Doch es ist anzunehmen, dass bereits in der Frühgeschichte sich der homo sapiens, im Vorgriff auf den heutigen Begriff Bionik, Anregungen in der Tierwelt für die Entwicklung von Klebstoffen geholt hat. Insekten, Fische und Vögel verstehen sich auf die Bildung von körpereigenen schleimigen Substanzen, die für Verklebungen geeignet sind. Die lasttragende Funktion dieser ausgehärteten Klebstoffe ist durchaus vergleichbar mit unseren modernen strukturellen Klebstoffen [1].

1.2. Mauerwerksbau, Naturstein

Die uns als erste "Klebeverbindung" bekannte Anwendung ist wohl die des Mörtels. Irgendwann hat der Mensch festgestellt, dass ein Mauerwerk, durch die Einsparung der passgenauen Zurichtung der Steine, mit Mörtel schneller herstellbar und außerdem durch die Klebwirkung des Mörtels standfester ist. Aus ästhetischen Gesichtspunkten heraus ersannen sich die römischen Baumeister Mischbauweisen aus Steinschalen, die mit dem römischen Beton (opus caementitium) ausgegossen wurden [2]. Heute sind im Mauerwerksbau diverse Dünnbettmörtel im Einsatz. Insbesondere unter Berücksichtigung des immer höheren Wärmeschutzes, der mit dem Ziegel selbst erreicht werden kann, ist es sinnvoll, die bislang dicke Mörtelschicht immer mehr zu verringern. Im Prinzip der gleiche Dünnbettmörtel (Kleber) kommt seit längerem bereits für Porenbetonsteine zum Einsatz oder beim Verkleben von Fliesen und Platten. Basis für diese Klebstoffgruppe ist Zement der mit verschiedenen Additiven, wie z. B. Kunstharzen, vergütet wird. Eine sehr neue Entwicklung stellt das Verkleben von Natursteinplatten mit anderen Materialien dar. Bild 1 zeigt z. B. eine Verklebung von Onyxplatten mit Glas. Diese Verbundelemente wurden für eine Deckenverkleidung hergestellt. Um beim Bruch einer Steinplatte das Herabfallen von Bruchstücken oder gar der ganzen Platte zu vermeiden, wurde auf die Oberseite der Natursteinplatte eine Scheibe aus teilvorgespanntem Glas (TVG) aufgeklebt und am Labor für Stahl- und Leichtmetallbau an der FHM auf ihr Resttragfähigkeitsverhalten untersucht. Die Verklebung erfolgte mit hochtransparenten Acrylatklebefilmen mit einer Dicke von 1,1 mm der Fa. 3M [3].

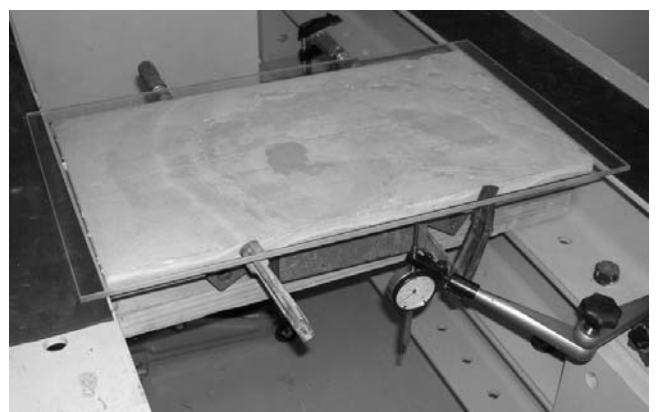


Bild 1: Verbundelement aus Onyx und Glas, Versuchsstand der FHM

Fig. 1: Laminated onyx-glass element, test rig

1.3. Betonbau und Dübeltechnik

Eine hier seit ungefähr 20 Jahren gängige Methode für die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen ist das Aufkleben von Stahllaschen. Mittlerweile kommen hierfür verstärkt Kohlefaserlamellen zum Einsatz. Als Klebstoffe werden dabei zementvergütete Kunstharze verwendet. Die Fa. Laumer benutzt z. B. für die Verklebung der Lamellen an Stahlbetonbauteilen den Klebstoff Sikadur-30 [4].



Bild 2: Aufgeklebte Kohlefaserlamellen an einem Stahlbetonunterzug [Laumer]

Fig. 2: Laminated carbon fibre lamellas on a concrete beam

Für die nachträgliche Befestigung von größeren Lasten oder für das nachträgliche Verankern von Bewehrungsstäben in bestehenden Betonbauteilen sind diverse Verbunddübel, sogenannte Klebedübel, mit entsprechenden Verbundmörteln im Einsatz. Als ein Vertreter dieser Werkstoffgruppe sei hier beispielhaft der Verbundmörtel der Fa. Hilti, Hilti HIT-HY 150 [5] genannt, der modifiziert als Hilti HIT HY 50 [6] auch im Glasbau als lastübertragender Vergruß eingesetzt wird.

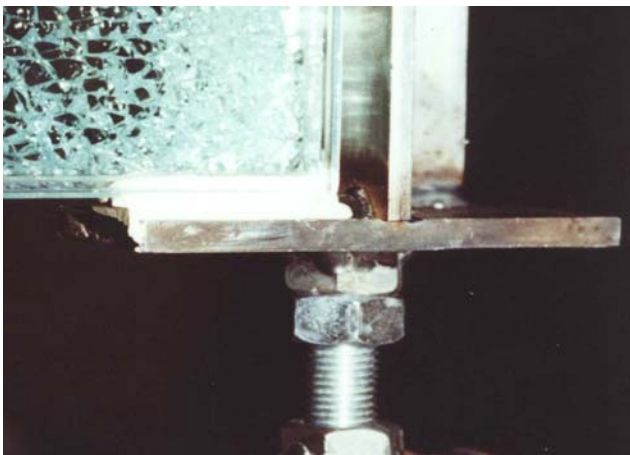


Bild 3: Auflagervergruß des horizontalen Glasschwerts der Herz-Jesu Kirche im Versuchsstand

Fig. 3: Support sealing of the horizontal glass beam of the Herz-Jesu Church in test setup]

1.4. Holzbau

Seit ca. 40 Jahren ist die Bauweise des Leimholzes, bekannt als Brettstichholz, geläufig und erlangte wegen der hiermit möglichen großen Spannweiten eine weite Verbreitung im Konstruktiven Ingenieurbau. Anfang dieses Jahres erlangte diese Bauweise unrühmliches Aufsehen, als die Eissporthalle in

Bad Reichenhall einstürzte [7]. Im Fokus der laufenden Untersuchungen stehen zur Zeit unter anderem Fragen hinsichtlich der Schädigung des Klebstoffs durch die Einwirkung von Kondenswasser. Dennoch stellt diese Bauweise eine hervorragende Möglichkeit für die Verwirklichung weitgespannter moderner Konstruktionen dar. Zum Einsatz kommen im Holzbau im Wesentlichen Melamin- und Phenolresorzinharze. Eingeleimte Gewindestäbe verstärken Leimholzbinder senkrecht zu den Lamellen. Als neuere Entwicklung sind hier im Holz eingeleimte Verbindungsteile zu nennen. Aber auch die altbekannte Sperrholz- oder Spanplatte ist verklebt.

1.5. Stahlbau, Metallbau

Im Stahlbau ist die Technologie des Klebens noch relativ jung. Nach anfänglichen Versuchen in den 1950er Jahren verdrängte die Entwicklung des Schweißens vorläufig dieses damals noch in den Kinderschuhen steckende Fügeverfahren. Zum Einsatz kommen heute im Stahlbau Epoxidharze, Acrylate und auch Polyurethane [8]. Ein in Zukunft interessanter Einsatzbereich von Verklebungen könnten Metall-Metall-Verklebungen sein, die als neue Ertüchtigungsmöglichkeit für Straßenbrücken dienen. Erste Voruntersuchungen hierzu laufen derzeit bereits bei der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). An Teilen einer nunmehr demontierten Stahlbrücke der Bundesanstalt für Wasserwesen (BAW), bei der vor längerer Zeit die durchgerosteten Stegbleche mittels aufgeklebter Stahllaschen ertüchtigt wurden, werden derzeit im Labor für Stahl- und Leichtmetallbau an der FHM Ermüdungsversuche an entnommenen Materialproben durchgeführt.

Eine weitere Anwendung für elastische Silikonverklebungen eröffnet sich im Fassadenbau, wie zum Beispiel bei der Fassadenverkleidung des Guggenheimmuseums in Bilbao realisiert. Hier wurden mit Silikon verklebte Titanblechtafeln eingesetzt.



Bild 4: Guggenheimmuseum, Bilbao, Spanien, Titanblechverkleidung mit zweikomponentigem Silikon verklebt

Fig. 4: Guggenheim museum, Bilbao, Spain, titanium cladding fixed with two-part silicone

Ähnlich wie beim Betonbau stellt auch im Stahlbau das kraftschlüssige Ausgießen von Anschlusskonstruktionen einen bereits üblichen Einsatz von Klebstoffen dar.

Derzeit laufen verschiedenen Untersuchungen zur Verstärkung von Leichtbauprofilen mit dünnen Blechen zur Erhöhung der Traglast gegen Stabilitätsversagen.

1.6. Konstruktiver Glasbau

Im gleichen Maß wie sich das Glas mittlerweile ein weites Einsatzgebiet im Ingenieurbau erobert hat, erhob sich auch die Frage nach einer werkstoffgerechten Verbindungstechnik. Zur Herstellung von Verbundgläsern sind seit langem Zwischenschichten im Einsatz wie z. B. Polyvinylbutural (PVB) und Kunstharz. Mehrere Forschungsarbeiten haben sich mit der besseren Ausnutzung dieser Verklebung zwischen den Glasscheiben befaßt.

Beispielhaft sei hier eine Ausarbeitung zum Ansatz der Verbundwirkung von Verbundgläsern unter unterschiedlichen Temperaturen genannt [9]. Ein aktuelles AIF-Forschungsvorhaben an der FHM [10] befasst sich mit weiteren neu entwickelten Verbundschichten. Siehe hierzu auch den Beitrag Bucak, Schuler, Meißner, Koch in diesem Heft zum Thema Verbundglas.

Eine weitere, bekannte Anwendung stellen Isolierglaseinheiten dar, die über die Randversiegelung miteinander verklebt sind. Die Nutzung von Klebstoffen im Bereich des Glasfassadenbaus, insbesondere die von Silikon, ist mittlerweile zumindest für linienförmige tragende Verklebungen Stand der Technik und über entsprechende Technische Regeln, wie der ETAG 002 [11], in Verbindung mit europäischen Zulassungen ausreichend geregelt. Für die Erweiterung der möglichen Verklebungsgeometrien und Anwendungsgebiete des Werkstoffs Silikon und der damit zusammenhängenden Absicherung des Anwenderwissens hinsichtlich Fragestellungen zu Alterung, Kriechen und Temperaturabhängigkeit ist derzeit an der FHM das AIF-Forschungsvorhaben „Geklebte Verbindungen im Glasbau“ [12] in Bearbeitung.

Tabelle 1 gibt eine allgemeine Übersicht über die wesentlichen Klebstoffarten und deren Einsatzgebiete.

Klebstoff	Bekannt als / Einsatzgebiet
Polyvinylbutural (PVB)	Glasbau als Verbundschicht bei VSG ¹⁾
Cyanacrylat	Sekundenkleber, niedrigviskos
Strahlungshärtende Klebstoffe	z. B. Delo Fotobond
Methacrylatklebstoffe, Methmethacrylat	In Erforschung für den Glasbau
Epoxidharze	Verbundschicht im Glasbau Vergütet als Klebemörtel
Ein- und zweikomponentige Polyurethanklebstoffe	Randverbund von Isoliergläsern, Wetterfugen
Phenol-Formaldehyde	Modifiziert im Flugzeugbau
Resorzin- / Melamin- / Harnstoff-Formaldehydharz-Klebstoffe	Holzverklebungen
Ein und zweikomponentige Silikone	Glasbau, SSG ²⁾

¹⁾ Verbundsicherheitsglas

²⁾ Structural Sealant Glazing, geklebte Glaskonstruktionen

Tab. 1: Übersicht über Klebstoffarten und deren Einsatzgebiet

Table 1: Kinds of adhesives and their field of application

2. Was unterscheidet das Kleben im Bauwesen am Beispiel des Glasbaus vom Kleben im Automobilbau?

Wie erwähnt, begann man bereits in den 1950er Jahren mit dem Kleben. Auch im Automobilbau konnte das Schweißen das Kleben weitgehend verdrängen. Dennoch ist hier zu erwähnen, dass bereits seit mehreren Jahren verstärkt Forschungsaktivitäten hinsichtlich des Klebens im Automobilbau stattfinden. Schwerpunkt dieser Verklebungen ist das Fügen gleichartiger Teile (z. B. Karosserieteile), bestehend aus gleichen Materialien (z. B. Stahl), wohingegen im Bauwesen Bauteile unterschiedlicher Funktion und verschiedener Materialien zu verbinden sind. Aus diesem Unterschied begründet sich die Art und Weise, wie Verklebungen im Automobilbau versuchstechnisch meist erforscht wurden, nämlich als Gesamtes – Bleche und Klebstoff – ein Bauteil. Diese Betrachtung ist hier durchaus berechtigt, da im wesentlichen schubbelastete Blechüberlappungen durchgehend geklebt wurden, die beteiligten Werkstoffe in ihrer Leistungsfähigkeit ausgenutzt sind und sich die hier zum Einsatz gebrachten dünnen Klebstoffschichten schubsteif verhalten. Je dünner eine Klebstoffschicht ist, je höher wird zudem der Einfluss der Grenzschichten und der Übergangszonen zwischen Metall und Klebstoff auf die Tragfestigkeit des Gesamtsystems, sodass außer dem Klebstoff eine Vielzahl von Parametern zur Beurteilung einer solchen Verklebung maßgebend sind.

Im modernen Glasbau werden im Gegensatz hierzu jedoch sehr unterschiedlich duktile Werkstoffe – sprödes Glas mit elastischem Stahl – zudem mit verhältnismäßig dicken Bauteildimensionen verklebt. Zudem kommen hier derzeit eher dickere, elastische Klebstoffschichten (Silikone) zum Einsatz. Die sich hieraus ergebende große Variation der beteiligten Materialien und des damit verbundenen Einflusses auf das Gesamttragverhalten der Konstruktion führt zur Notwendigkeit, sich mit allen beteiligten Werkstoffen genauer zu befassen. Repräsentative Wertstoffwerte sind Tabelle 2 [13] zu entnehmen.

Werkstoff	Temperaturdehnung α [10^{-6} K]	Elastizitätsmodul E bzw. E_0 [N/mm ²]	Querkontraktionszahl ν
Glas	9	70.000	0,23
Edelstahl	12	170.000	~ 0,30
Aluminium	24	70.000	~ 0,30
Kupfer	16	124.000	0,33
Acrylate	~ 200	~ 2.900	~ 0,40
Epoxidharze	~ 60	~ 2.000	~ 0,42
Polyurethan hart	110	12.200	~ 0,40
Polymethmethacrylat	70	2.500	0,39
Silikone	~ 190	~ 2	~ 0,50

Tab. 2: Übersicht über ausgewählte Werkstoffkennwerte

Table 2: Overview of several material properties

3. Klebstoffe für den Glasbau

3.1. Übersicht über relevante Klebstoffe

Die hier betrachteten Klebstoffe, die als Kunststoffe anzusehen sind, bestehen aus langkettigen Molekülen (Polymere), die sich aus Grundeinheiten (Monomeren) zusammensetzen. Klebstoffe lassen sich hinsichtlich chemischer Gesichtspunkte in verschiedene Polymergruppen einordnen, siehe hierzu Tabelle 3.

Eine weitere Möglichkeit der Gliederung kann hinsichtlich der Viskosität der Klebstoffe im unausgehärteten, nicht vernetzten Zustand erfolgen. Als Viskosität versteht man eine Kenngröße, welche die Fließeigenschaften eines Stoffs als Maß der inneren Reibung zwischen den Molekülen beschreibt.

Klebstofftyp	Polymerart	Anwendung im Glasbau, Eigenschaften	Wesentliche Materialgesetzmäßigkeiten
Polyvinylbutural (PVB)	Thermoplast: lange untereinander nicht verbundene Kettenmoleküle	Verbundschicht in Verbundgläsern, schmelzbar, schweißbar, quellbar, bauaufsichtlich für Verbundglas geregelt	Linear-elastisches Verhalten, bei Normaltemperatur, kleine Dehnungen bei Temperaturen über ca. 30°C, Erweichung unter Verlust der Verbundwirkung
Polsulfid Polyethylen Polyurethane	Elastomer: kneuelartig untereinander physikalisch und chemisch schwach vernetzte ungeordnete Kettenmoleküle	Elastische Klebstoffe, Versiegelungen von Wetterfugen und Isolierglasrandverbund, unlöslich, quellbar	Gummielastisches Verhalten, große Dehnungen möglich, Hyperelastische Materialgesetze, Eigenschaften deutlich temperaturabhängig
Silikone		Isolierglasrandverbund, tragende Verklebungen im Glasbau, unlöslich, sehr gering quellbar, bauaufsichtlich über Europäische Zulassungen geregelt	große Dehnungen möglich, Hyperelastische Materialgesetze, gleichbleibende Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich
Polyesterharze Polyurethane Silikonharze Acrylate	Duromer: Kettenmoleküle stark untereinander vernetzt	Anwendung für geklebte Konstruktionen in der Erforschung nicht schmelzbar, schweißbar, unlöslich, quellbar	Linear-elastisches Verhalten, kleine Dehnungen, teilweise deutliches Schrumpfen bei Erhärtung,
Epoxidharze		Verbundschicht bei Verbundgläsern mit speziellen Anforderungen	hohe thermische Ausdehnung

Tab. 3: Übersicht über Klebstoffarten, deren Einsatzgebiet und wesentliche Gesetzmäßigkeiten

Table 3: Kinds of adhesives, their fields of application and main properties

Ein niedrigviskoser Stoff (geringe Reibung innerhalb der Molekülketten) ist flüssig (z. B. Wasser mit 1 m Pa s); ein hochviskoser Stoff ist dickflüssig (z. B. dickflüssiges Öl mit 2000 m Pa s) [14]. Ein Beispiel für einen niedrigviskosen Klebstoff ist Cyanacrylat, bekannt als Sekundenkleber, der in der Lage ist in dünnste Spalten kapillar einzudringen. Hochviskos sind elastomere Klebstoffe wie z. B. Silikone. Die Viskosität spielt beim Aufbringen des Klebstoffs in Zusammenarbeit mit der Oberflächenrauigkeit des Fügeteils eine entscheidende Rolle, wie später noch erläutert wird.

Eine weitere Unterscheidung kann hinsichtlich der Erhärtungsmechanismen von Klebstoffen erfolgen. Beispielhaft sind in Tabelle 4 einige Klebstoffe hierzu aufgelistet.

Als wesentliche Unterscheidung der Klebstoffe dienen auch die Anzahl der Komponenten der Klebstoffe. So wird für die an sich als sehr dauerhaft bekannten Silikone für einkomponentige Silikone durchaus ein Einfluss der Alterung beobachtet, wohingegen zweikomponentige Silikone nahezu keine Alterungsabhängigkeit zeigen. Der Grund hierfür mag indem beim einkomponentigen Material immer weitergehenden

Abbindeprozess, also der Reaktivität mit der Luftfeuchtigkeit, zu sehen sein. Die Erfordernis einer Komponente aus der Luft schränkt außerdem den Anwendungsbereich des jeweiligen einkomponentigen Klebstoffs auf bestimmte Verklebungsgeometrien ein. Zweikomponentige Klebstoffe, die auf Grund einer chemischen Reaktion der beiden Komponenten abbinden, können daher in beliebigen Verklebungsgeometrien eingesetzt werden. Strahlhärtende Klebstoffe setzen voraus, dass die zur Erhärtung notwendige Strahlung an den Ort der Verklebung gebracht werden kann, z. B. über das durchsichtige Glas im Fall einer UV-Härtung.

Klebstoff	Erhärtung mit /durch	Erhärtungszeit
Cyanacrylat	Luftfeuchtigkeit	Sekunden
Photoinitiert härtende Klebstoffe	UV oder sichtbares Licht	Sekunden
Epoxidharze	Luftfeuchtigkeit	Einige Stunden
1K Polyurethane und Silikone	Luftfeuchtigkeit	Mehrere Stunden
2K Silikone	Chemische Reaktion	24 Stunden

Tab. 4: Beispiele ausgewählter Erhärtungsmechanismen und -zeiten

Table 4: Examples of a few hardening mechanism and times

3.2. Wirkmechanismen von Klebstoffen und Klebungen

3.2.1. Adhäsion und Kohäsion

Warum kleben Oberflächen aneinander [15]?

Seit langem ist bekannt, dass insbesondere Metall und auch Glasoberflächen ohne zusätzliche Klebstoffe aneinander haften, wenn sie sich nur „nahe genug“ kommen, was durch extrem glatte Oberflächen erreicht werden kann. Dann wirken physikalisch bedingte Anziehungskräfte („van der Waals“-Kräfte) zwischen den Oberflächen. Dieser Effekt kann mit einer sehr dünnen Flüssigkeitsschicht noch erhöht werden. Man bezeichnet diese Kräfte auch als Adhäsionskräfte. Beim Kleben erreicht man eine ausreichende Adhäsion durch das Schaffen geeigneter Oberflächen mit einer klebstoffgerechten Vorbereitung und -behandlung. Je nach Klebstoffpartner werden hierzu neben physikalischen Kräften auch chemische Bindungen zur Erhöhung der Adhäsionskräfte herangezogen. Zum Einsatz kommen hierfür im Wesentlichen Primer aus Siliziumwasserstoff (Silane), welche die Adhäsion für eine Vielzahl von verschiedenen Klebstoffen deutlich verbessern. Generell sind alle Klebstoffe auf eine saubere, fettfreie Fügeteiloberfläche angewiesen. Selbst die auf sauberen Glasoberflächen unter Einwirkung der Luft sich bildende Gelschicht führt auf Grund der Wassereinlagerung für einige Klebstoffe bereits zu einer bedeutenden Beeinträchtigung der Klebung. Feuchtigkeit oder andere Substanzen können die Klebefuge außerdem „hinterwandern“ und so eine Schädigung der Adhäsion verursachen. Daher kommt der Grenzschicht und der Oberflächenstruktur der Fügeteile eine besondere Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang sind Themen wie Oberflächenkorrosion, Wasserempfindlichkeit oder Oberflächenbehandlungen von Bedeutung für die Tragfähigkeit und auch für den Versagensmechanismus Adhäsionsbruch, den es zu vermeiden gilt. Diverse Versuche zur Haftung auf den jeweiligen

Oberflächen sind daher Standardversuche bei der Beurteilung von Verklebungen.

Als Kohäsion wird die Bindekraft innerhalb des Klebstoffs selbst bezeichnet. Die kohäsiven Eigenschaften eines Klebstoffs in Verbindung mit der Belastungsart bestimmen die Klebstoffauswahl für die jeweilige Verbindung. Das kohäsive Versagen einer Klebefuge, da es einzig vom Klebstoff her bestimmt ist und daher das Leistungspotential des Klebstoffs voll ausnutzt, stellt den gewünschten, „planbaren“ Versagensmechanismus dar. Die Forderung der ETAG 002 nach einem mehr als 90%igem Kohäsionsbruchverhalten für die durchgeführten Versuche erklärt sich hieraus. Kenndaten für das Kohäsionsverhalten sind aus der Untersuchung des „Kleb-Werkstoffs“ zu ermitteln.

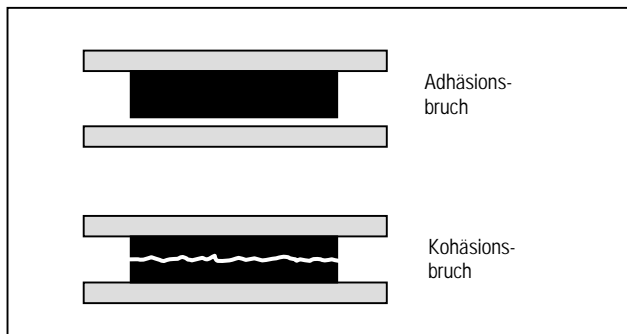


Bild 5: Unterscheidung von Adhäsionsbruch und Kohäsionsbruch

Fig. 5: Difference of adhesive failure and cohesive failure

3.2.2. Die Fügeiteile

Verallgemeinernd kann gesagt werden, dass, wie noch gezeigt werden wird, bei „harten“, schubsteifen Klebstoffen eine rauhere Oberfläche der Fügeiteile konstruktiv besser ist. Bei elastischen, schubweichen in der Verarbeitung hochviskosen Klebstoffen ist für eine gute Benetzung der Klebfläche eine glatte Oberfläche erforderlich für eine maximale Klebstoffkontaktfläche. Der Benetzungsgrad der zu verklebenden Oberfläche mit dem Klebstoff ist ausschlaggebend für eine funktionsgerechte Verklebung.

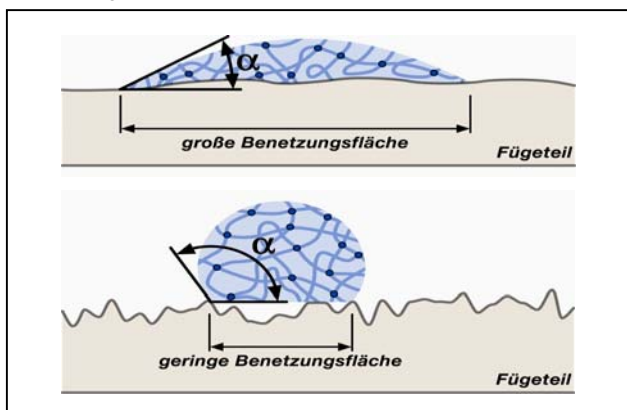


Bild 6: Oberflächenbenetzung von Fügeiteilen durch Klebstoffe [Delo]

Fig. 6: Wetting of adherend by adhesives

Eine raue Oberfläche in Verbindung mit einem niedrigviskosen Klebstoff bildet durch die erreichte „Schubverzahnung“ der Klebschicht mit dem Fügeiteil eine optimale Wirkung. Hingegen ist für eine optimale Adhäsionsbindung z. B. eines Silikons die glatte Oberfläche des Fügepartners erforderlich um die chemischen Bindungen an der Glas- bzw. an der geprimerten Metalloberfläche zu gewährleisten. Zur Vorbereitung einer

Klebfläche, über die Vorbereitung der Oberflächen durch Reinigen und Entfetten hinaus, werden eine Vielzahl unterschiedlicher Vorbehandlungsverfahren angewandt. Die wesentlichen Vorbehandlungsverfahren sind:

- Strahlen
- Ätzen oder Beizen
- Plasma- oder Flammbehandlung

3.2.3. Einfluß der Klebschichtdicke

Generelle Wirkmechanismen, die sich aus der Klebstoffdicke ableiten lassen, sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Wie bereits angesprochen, kommt beim Kleben mit niedrigviskosen Klebstoffen der Oberflächenrauigkeit der Fügeiteile eine große Bedeutung zu. Daher soll die Klebstoffdicke hier ungefähr die Rauigkeitstiefe des Fügeiteils betragen [16].

Tabelle 5: Abhängigkeit von der Klebstoffdicke

Die relative Dicke der einzelnen Kleb-Werkstoffe lässt sich an der Viskosität des jeweiligen ungehärteten Klebstoffs festmachen, siehe auch Tabelle 5. So betragen übliche Klebstoffdicken bei Duromeren (niedrigviskos) ca. 0,05 – 1 mm; bei Elastomeren (hochviskos) ca. 4 – 8 mm; bei Thermoplasten wie der Verbundfolie 0,76 – 2,3 mm.

3.2.4. Lastübertragungsmechanismen

Der Mechanismus der Lastübertragung innerhalb einer Klebung stellt sich bei den verschiedenen Werkstoffgruppen unterschiedlich dar. Klebstoffe wie Thermoplaste (im erhärteten Zustand) und Duromere tragen hauptsächlich über die Aktivierung von Schubkräften in der Klebefuge. Man kann sie daher auch als schubsteife Klebungen bezeichnen. Elastomere hingegen reagieren auf Schubbelastungen mit großer Nachgiebigkeit, führen jedoch über die Aktivierung der Querkontraktionsbehinderung innerhalb von Verklebungen zu steifen Verbindungen [17].

4. Die Forschung an Kleb-Werkstoffen für die Anwendung im Bauwesen

4.1. Allgemeines zum Werkstoff

Betrachtet man „Klebstoff“, so ist dieser als Werkstoff selbst zu behandeln. Kleben bedeutet also ein Verbinden zweier Fügepartner (Werkstoffe) mit Hilfe eines dritten Werkstoffs, ohne die Materialeigenschaften der beteiligten Werkstoffe zu verändern. Die für den Glasbau üblichen Klebstoffe sind organischer Natur – wie Kunststoffe generell. Man hat sich also beim ausgehärteten Klebstoff mit dem Material „Kunststoff“ auseinanderzusetzen. Diese Werkstoffgruppe zeichnet sich durch eine nahezu unendliche Stoffvielfalt aus und auch durch ein weit gefächertes, durchaus sehr verschiedenes mechanisches Verhalten. Die Herstellung geeigneter Prüfkörper orientiert sich daher an den Vorgaben für die Kunststoffprüfung. Für Klebstoffe kann die Prüfung der Zugfestigkeit, der Schubfestigkeit und der Reißigenschaften als ausreichend angesehen werden. Insbesondere im Hinblick auf die Berechnung von Klebefugen mit modernen Rechenmethoden (Methode der Finiten Elemente) können aus diesen Versuchen die wesentlichen elastischen und plastischen Materialkenndaten gewonnen werden. Hinsichtlich temperaturabhängiger Kenngrößen oder der Kenngrößen für das Kriech- bzw. Relaxationsverhalten, sind weitere Versuche erforderlich.

4.2. Geeignete Material-Prüfkörper für die Erforschung von Verklebungen im Bauwesen

4.2.1. Zugprüfungen

Geeignete Zugprüfkörper für diese Versuche sind Schulterprüfkörper, wie sie z. B. der DIN 53504 [18] entnommen werden können. Bei Elastomeren und für folienartige Thermoplaste werden diese Prüfkörper aus gefertigten dünnen Platten (1-4 mm dick) ausgestanzt. Diese Herstellung führt zu gleichen Materialwerten innerhalb des Prüfkörpers, wie sie auch in der tatsächlichen Klebschicht anzutreffen sind. Bei Kunststoffen (und auch bei Duromerklebstoffen) werden Prüfkörper häufig durch Spritzgießen, bzw. Ausgießen einer Hohlform hergestellt. Dies führt zwar innerhalb des Meßbereichs zu gleichmäßigen Materialwerten, die sich jedoch vom tatsächlichen Bauteil aus diesem Werkstoff deutlich unterscheiden können. Grund hierfür ist die Ausrichtung der Kettenmoleküle innerhalb des Prüfkörpers durch den Spritz- bzw. Gießvorgang. Daher scheint die richtige Methode der Prüfkörperherstellung für Duromerklebstoffe das Ausgießen einer Tiefform oder das Ausfräsen des Prüfkörpers aus einer ausgehärteten Materialplatte des Klebstoffs zu sein. Im Vorfeld eines Forschungsvorhabens wurden an der FHM vergleichende Zugversuche an diversen Materialien durchgeführt. Bild 7 zeigt im Vergleich Kraft-Weg-Diagramme eines Duromer-, eines Thermoplast- und eines Elastomerklebstoffs. Aus den Versuchsergebnissen kann bei linearem Kurvenverlauf der E-Modul ermittelt und eine Abschätzung getroffen werden hinsichtlich des Tragfähigkeitsvermögens des jeweiligen Werkstoffs.

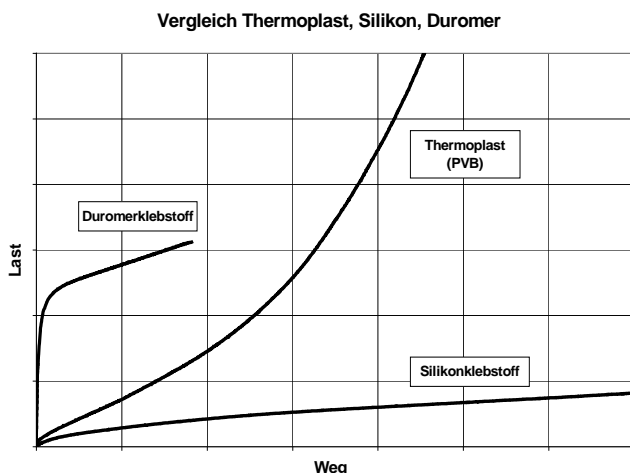


Bild 7: Vergleich verschiedener Klebstoffe

Fig. 7: Comparison of several adhesives

Als Versuchsmethode, insbesondere für Zugversuche, ist eine berührungslose Messwertaufnahme über Video- oder Laserextensiometer anzustreben, wie in Bild 8 dargestellt.

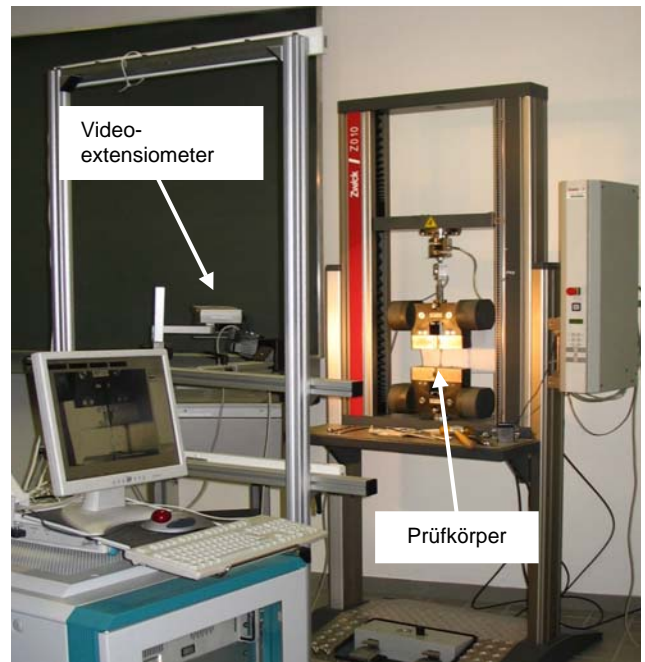


Bild 8: Versuchseinrichtung für Zugversuche mit Videoextensiometer
Fig. 8: Test equipment for tension tests with videoextensiometer

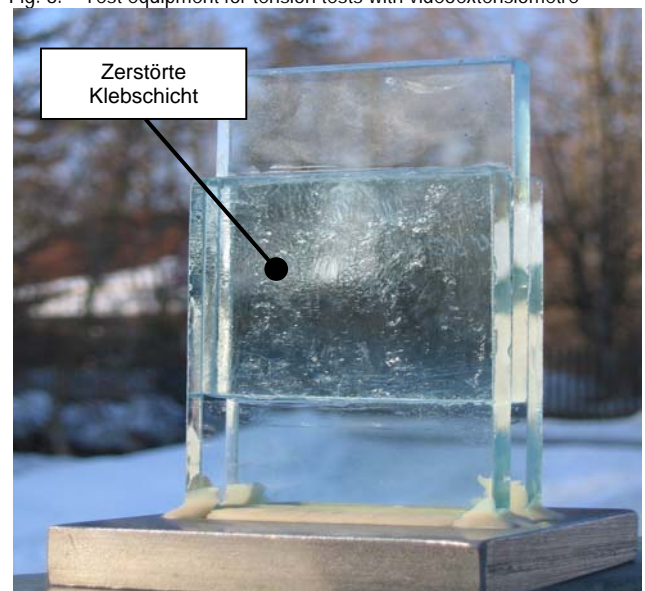


Bild 9: Schubprüfkörper für Duromere, nach dem Versuch (FHM)
Fig. 9: Shear specimen for duromers, after test

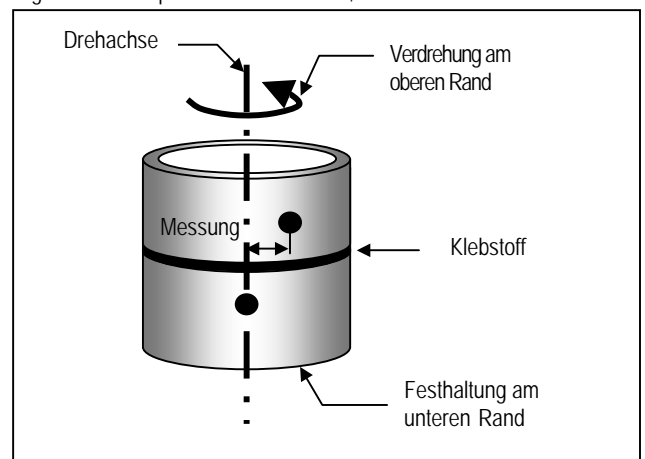


Bild 10: Prüfkörper für Torsionsversuch
Fig. 10: Specimen for torsion test

4.2.2. Schubprüfungen

Als praktikabler Versuchskörper für Schubversuche an Duromerklebstoffen haben sich an der FHM „Doppelschubprüfkörper“ gezeigt, vergleiche Bild 9. Für Elastomerverklebungen können mit dem Prüfkörper nach ETAG 002 gut brauchbare Ergebnisse erzielt werden. Rohrscher- bzw. Torsionsversuche nach DIN ISO 11003 [19], wie in Bild 10 skizziert, weisen den Vorteil einer sehr gleichmäßig über die Verklebungsfläche verteilten Schubbelastung auf. Sie sind für alle Klebstoffarten gleichermaßen geeignet.

4.2.3. Zähigkeitsversuche

Physikalisch betrachtet versteht man unter „Zähigkeit“ den Widerstand eines Materials gegen Reißausbreitung. Zur Ermittlung der Reiß Eigenschaften, bzw. der Ermittlung des Weiterreißverhaltens innerhalb einer Verklebung sind aus der Kunststoffprüfung bekannte Reißversuche hilfreich. Es lassen sich damit Aussagen zum bruchmechanischen Verhalten (spröde - zäh) und dem Verhalten bei Rissausbreitung (instabil – stabil) treffen. Diese Fragestellungen sind relevant im Hinblick auf die Anforderungen an die Resttragfähigkeit eines geklebten Systems, nach dem eine Schädigung eingetreten ist. Geeignete Versuche stellen hier Kerbzug- oder instrumentierte Kerbschlagzugversuche dar [20].

4.3. Versuche an Bauteilen

Um die gewonnenen Erkenntnisse aus den Materialversuchen und die darauf beruhenden Berechnungen abzusichern, ist es erforderlich, Kleinbauteile, z. B. Punkthalter wie in Bild 11 (Klebstoff Acrylat), zu untersuchen. Mit den hieraus gewonnenen Erkenntnissen können zum einen die Berechnungen des Werkstoffs selbst validiert werden, zum anderen dienen sie als Basis für Erkenntnisse zur klebgerechten Konstruktion von Bauteilen.

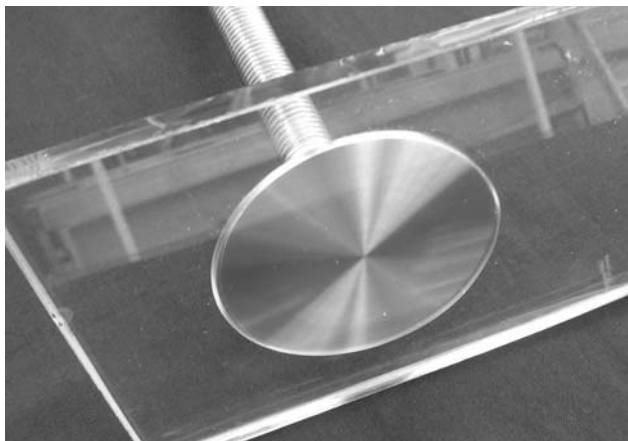


Bild 11: Punkthalter aus Edelstahl mit Acrylat verklebt (FHM)

Fig. 11: Point support with an acrylic adhesion

Ausgangspunkt für dieses Vorgehen sind Versuche und Berechnungen an der FHM gewesen, welche die konstruktive Relevanz dieses Vorgehens belegen. Wie aus Bild 12 ersichtlich, treten z. B. beim Zugversuch nach ETAG 002 an einem Silikonwerkstoff deutliche Spannungsspitzen in den Prüfkörpercken auf. Im Zugversuch wird im Bereich dieser Spannungsspitzen regelmäßig der Beginn des Versagens beobachtet. Das bedeutet, dass das Bestimmen der Tragfähigkeit (Last / Fläche) eines derartigen Prüfkörpers wenig

Einblick in das tatsächliche Tragverhalten eines Werkstoffs für eine Verklebung gibt. Ausgehend von diesen Erkenntnissen zeigen Versuche und Berechnungen an einem Punkthalter eine deutlich andere Spannungsverteilung. Hier treten höhere Spannungen im Innenbereich der Verklebung auf – siehe hierzu den Beitrag der Zweitautorin „Die Innovation - Kleben“ in diesem Heft.

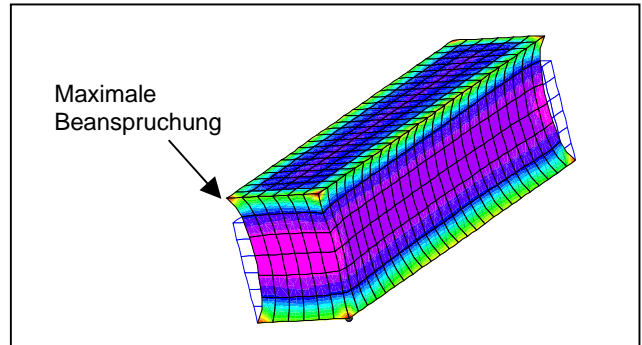


Bild 12: Spannungsverteilung am ETAG Prüfkörper unter Zugbelastung

Fig. 12: Stress distribution on ETAG specimen under tension load

Wie im konstruktiven Glasbau üblich, geben Versuche wie sie für Zustimmungen im Einzelfall erforderlich sind, Aufschluß über die Gesamtfunktion verklebter Bauteile. Haftungsversuche an den beteiligten Fügebauteilwerkstoffen dienen dazu eine geeignete Oberflächenvorbehandlung für eine optimale Haftung der Klebstoffe sicherzustellen. Versuche zum Verhalten der Verklebungen unter künstlicher Alterung, unter Einfluss von Reinigungsmitteln und unter Temperaturbelastung gehören zu den Standardversuchen im Rahmen von Zustimmungen und Zulassungen. Ebenso ist die chemische Verträglichkeit mit anderen Werkstoffen, die mit der Verklebung in Kontakt kommen, zu überprüfen. In Zukunft können möglicherweise viele Tragfähigkeitsversuche eingespart werden, wenn sich das Wissen hinsichtlich der „Berechenbarkeit“ von Verklebungen mit unterschiedlichsten Klebstoffen vergrößert und konsolidiert hat. Als erstes Beispiel einer Versuchsreihe im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall sei hier der Resttragfähigkeitsversuch herangezogen, der für eine auf Punkthaltern elastomer verklebte Treppenstufe durchgeführt wurde. An Bild 13 erkennt man, dass die Glasstufe zerstört ist, die mit Silikon geklebten Punkthaltern bereits eingerissen sind, das Gesamtbauteil jedoch trotz Auflast noch ausreichend in seiner Lagerung gehalten werden kann.

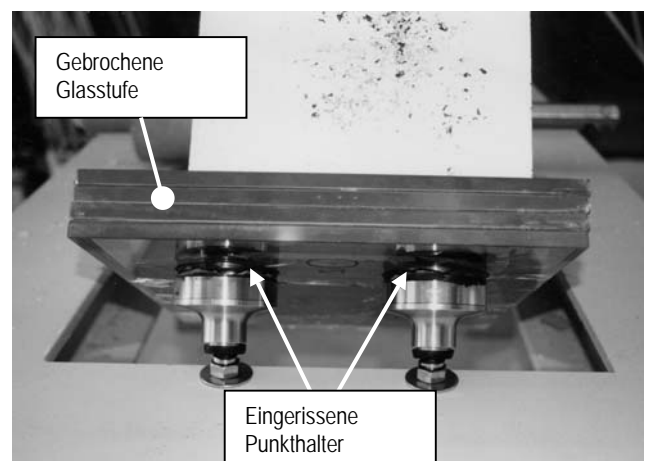


Bild 13: Resttragfähigkeitsuntersuchung an einer Treppenstufe, Glasstufe gebrochen und Punkthalter eingerissen (FHM)

Fig. 13: Remaining bearing capacity test of a glass step, broken glass step and damaged point support

Als weitere Beispiele von Versuchsdurchführungen im Rahmen von Zustimmungen können hier einige interessante Bauvorhaben dienen. Bild 14 zeigt Versuche für eine elastomere Verklebung von Glasschwertern und Glasscheiben im Zusammenhang mit der Überdachung einer Glasbrücke. Bild 15 gibt einen Einblick in Versuche an einer U-förmigen, elastomeren Verklebung wie sie für Schallschutzwände entlang der Autobahn in der Nähe von Würenlos in der Schweiz (Planung: Glasconsult, Dr. Hess) geprüft wurde. Vermehrt kommen mittlerweile verklebte Glasecken zum Einsatz. Hier ist zu berücksichtigen, dass die an Gebäudeecken auftretenden Windlasten durchaus als dynamisch betrachtet werden können. Für eine derartige Anwendung wurden vor kurzem an der FHM dynamische Versuche an verklebten Glasecken durchgeführt. Bild 16 zeigt einen derartigen Versuchsaufbau.



Bild 14: Versuche f. d. verklebte Dachverglasung einer Glasbrücke. (FHM)
Fig. 14: Tests for a bonded roof glazing of a glass bridge

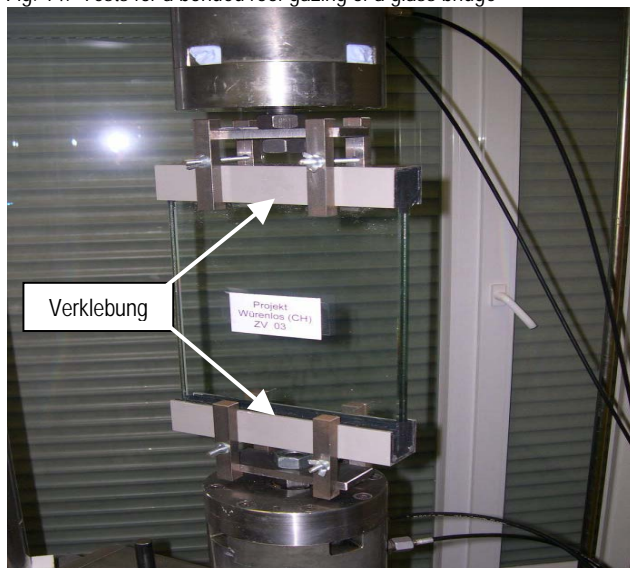


Bild 15: Zugprüfung an einer U-förmigen Verklebung für die Schallschutzwand in Würenlos, Schweiz (FHM)
Fig. 15: Tension test on a u-shaped bonding for the sound insulation wall in Würenlos, Switzerland

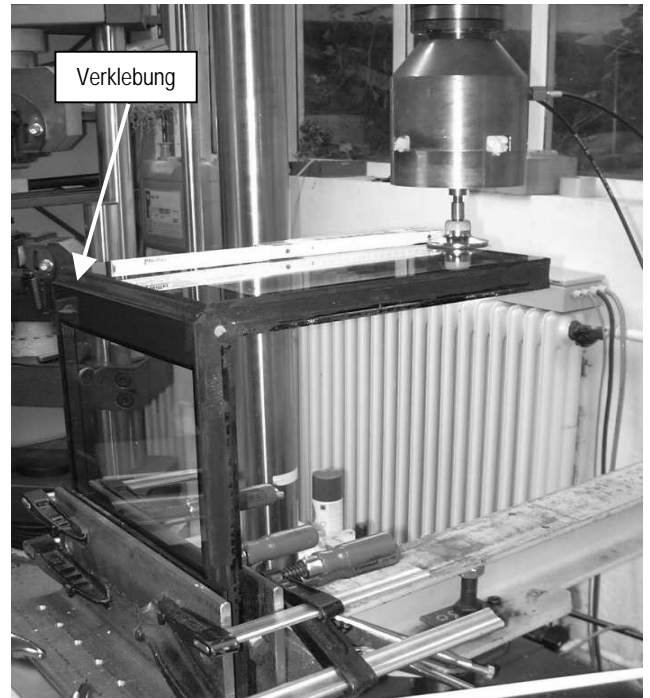


Bild 16: Dynamischer Versuch an über Eck mit Silikon verklebten Isolierglaseinheiten (FHM)

Fig. 16: Dynamic test on over edge bonding of insulated glass units with silicone

5. Ausblick

Der Trend im Konstruktiven Glasbau geht in den letzten Jahren, aus welchen Gründen auch immer, verstärkt zu geklebten Konstruktionen. Die Anzahl der Anträge für Zustimmungen im Einzelfall haben sich bereits deutlich erhöht. Zu erwarten ist, dass auf Grund der zur Zeit laufenden Forschungsaktivitäten und der hieraus gewonnenen Erkenntnisse in Zukunft noch mehr Zustimmungen im Einzelfall für geklebte Konstruktionen beantragt werden. Bauaufsichtlich zugelassene verklebte Bausysteme werden daher vermehrt den Markt drängen. Erforderliche Fremdüberwachungen derartiger Bauteile werden deshalb künftig mehr Raum innerhalb der auf diesem Gebiet aktiven Forschungsinstitute einnehmen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die derzeit nicht geregelten Klebstoffarten zu erwarten. Eine neue Bewertung der anzusetzenden Sicherheitsbeiwerte im Bereich des Klebens mit Silikonem ist durch die Ergebnisse laufender Forschungsvorhaben zu erwarten. Durch die Weiterentwicklung des Klebens im Bauwesen – ob im Stahl- oder im Glasbau – wird verstärkt den Vorstellungen der Architekten nach einer nahezu unsichtbaren klaren und logischen Verbindungstechnologie Rechnung getragen. Nicht zuletzt stellt die Anwendung von modernen Berechnungsmethoden (FEM) unter Berücksichtigung geeigneter Werkstoffmodelle im Bereich des strukturellen Klebens neue Anforderungen an bauaufsichtliche Genehmigungsverfahren und natürlich auch an das Know How der planenden Ingenieure.

6. Literatur

- [1] G. Salomon, Adhesion, Adhesion and Adhesives, Ed. R. Houwink and G. Salomon, Volume 1 - Adhesives, Elsevier Publishing Company, Amsterdam / London / New York, 1965.
- [2] W. v. Wölfel, Brunnen - Brücken – Aquädukte, Berichte zum Bauen in der Antike, Bautechnik Spezial, Ernst & Sohn, Berlin, 1997
- [3] VHB Hochleistungs-Verbindungssysteme 4905 / 4910 / 4915 / 4918, Produktinformation der Fa. 3M Deutschland GmbH, Ausgabe 11/2004, GG/CH 01.02.
- [4] Sikadur-30, Armierungskleber, Technisches Merkblatt der Fa. Sika, Ausgabe 01/02, GG/CH 01.02.
- [5] Hilti HIT-HY 150 mit HIT-TZ, Kraftkontrollierter spreizender Verbunddübel mit Ankerstange aus galvanisch verzinktem Stahl zur Verankerung in Beton, Hilti Aktiengesellschaft, Deutsches Institut für Bautechnik, Europäische Technische Zulassung, ETA-04/0084, 2004.
- [6] Hilti-Injektionsanker System HIT-HY 50 zur Verankerung im Vollsteinmauerwerk, Hilti Deutschland GmbH, Deutsches Institut für Bautechnik, Zulassungsnummer Z-21.3-1736, 2002.
- [7] M. Maier-Albang, Die Addition unglücklicher Umstände, Süddeutsche Zeitung GmbH, München, 31.01.06
- [8] Das Kleben von Stahl und Edelstahl Rostfrei, Merkblatt 382, Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf
- [9] BMBF Forschungsvorhaben, Bestimmung des Tragverhaltens von Verbundsicherheitsglaselementen in Abhängigkeit von Temperatur-, Lagerungs- und Belastungsbedingungen, BU 410/3-2.
- [10] AIF Forschungsvorhaben, Trag- und Resttragfähigkeitsuntersuchungen an Verbundglas mit einer Zwischenfolie „Sentry Glas Plus“, FKZ: 170 02 03, 2003.
- [11] EOTA (European Organisation for Technical Approvals), ETAG No.2 Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems, Brüssel, 1998.
- [12] AIF Forschungsvorhaben, Geklebte Verbindungen im Konstruktiven Glasbau, AIF-Nr.: 170 40 255, 2003.
- [13] G. Habenicht, Kleben / Grundlagen / Technologie / Anwendungen, 3. Auflage, Springer, Berlin, 1997.
- [14] Bond it – Nachschlagewerk zur Klebtechnik, Delo Industrieklebstoffe, Landsberg, 2002.
- [15] W. Endlich, Kleben und Dichten – aber wie?, Leitfaden für den Praktiker, Schweißtechnische Praxis, Band 32, Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996.
- [16] Kuhlmann U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2005, H. Pasternak, A. Schwarzlos, Kleben von Stahl, Verlag Ernst & Sohn Stahlbaukalender 2005,
- [17] Kuhlmann U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2005, A. Hagl, Kleben im Glasbau, Verlag Ernst & Sohn Stahlbaukalender 2005,
- [18] DIN 53504, Prüfung von Kautschuk und Elastomeren, Deutsches Institut für Normung, 1994
- [19] DIN ISO 11003, Klebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens von Strukturklebstoffen, Teil 1: Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpf geklebter Hohlzylinder, Deutsches Institut für Normung, 2001
- [20] K. Reincke, Bruchmechanische Bewertung von ungefüllten und gefüllten Elastomerwerkstoffen, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mensch & Buch Verlag, Berlin, 2005.