

# **Strahlungshärtende Acrylate im Konstruktiven Glasbau**

Light curing adhesives  
in glass construction

An der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) vorgelegte  
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Silke Tasche

aus Magdeburg.

Erster Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Bergard Weller Technische Universität Dresden
Zweiter Gutachter	Prof. Dr.-Ing. habil. Eckhard Beyer Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Technische Universität Dresden
Dritter Gutachter	Dr. Jan Wurm ARUP, London
Tag der Verteidigung	12.11.2007

## Kurzfassung

Das Kleben im Konstruktiven Glasbau erfolgt seit über zwanzig Jahren nahezu ausschließlich mit ein- und zweikomponentigen Silikonen. Die physikalischen Eigenschaften und das Alterungsverhalten dieser Klebstoffe sind weitgehend bekannt.

Die vorliegende Arbeit will den Kenntnisstand erweitern und alternative Klebstoffe betrachten: Rund 3000 Laborversuche an lastabtragenden Verbindungen aus Glas und verschiedenen Metallen mit transparenten, UV- und lighthärtenden Acrylaten werden beschrieben und bewertet. Dieses umfangreiche Versuchsprogramm wurde durch einige Bauteilversuche an geklebten Anwendungen im Konstruktiven Glasbau sinnvoll ergänzt.

UV- und lighthärtende Acrylate können die Gestaltungsmöglichkeiten beim Kleben im Konstruktiven Glasbau auf Grund ihrer Transparenz, ihrer verarbeitungstechnischen Vorteile und ihrer höheren Festigkeit erweitern. Dazu ist es notwendig, das Alterungsverhalten dieser Klebstoffe an Klebungen aus Floatglas und Metall zu untersuchen, wobei verschiedene Metalle und Oberflächen der Beschlagstechnik in die Untersuchungen einbezogen wurden.

Die künstlichen Alterungstests wurden in Anlehnung an die europäische Richtlinie ETAG 002 an Prüfkörpern vorgenommen, wobei das Spektrum der Alterungstests in Abhängigkeit von den Anwendungen sinnvoll ergänzt wurde. Unter anderem wurden die Prüfkörper einer mehrjährigen natürlichen Alterung unterzogen. Neben dem Einfluss der Bad- und Atmosphärenseite des Floatglases wurde der Einfluss der Schichtdicke und der Oberflächenvorbehandlung zur Verbesserung der Langzeitbeständigkeit in die Untersuchungen einbezogen. Das Kriechverhalten der untersuchten Acrylate wurde dem bauüblichen Silikone bei Raumtemperatur gegenübergestellt.

Das Potenzial von UV- und lighthärtenden Acrylaten wurde außerdem über Trag- und Gebrauchstauglichkeitsprüfungen in verschiedenen Anwendungen entsprechend den geltenden Richtlinien im Konstruktiven Glasbau geprüft. Im Speziellen wurden Glasausfachungen in Absturzsicherungen, Glaslamellen im Fassadenbereich, Überkopfverglasungen sowie Türen in geklebten Varianten untersucht. Die Prüfungen wurden an ungealterten Bauteilen vorgenommen. Teilweise wurden gleichartig geklebte Bauteile der Freibewitterung ausgesetzt. Diese werden regelmäßig kontrolliert und nach mehrjähriger Freibewitterung geprüft. Zudem wurde untersucht, inwiefern die Klebungen in der Lage sind, Zwangsbeanspruchungen infolge Temperatur auszugleichen.

Unter Einhaltung bestimmter Anwendungsgrenzen wird in dieser Arbeit erstmalig die grundsätzliche Eignung von UV- und lighthärtenden Acrylaten für Anwendungen im Konstruktiven Glasbau nachgewiesen.

## Summary

Adhesive joints in glass construction were done exclusively using one- and two-component silicones for more than twenty years. The physical properties and ageing characteristics of these materials have been examined in depth.

The objective of this study is to raise the current body of knowledge and to investigate alternative types of adhesives; nearly 3000 laboratory tests on load-bearing adhesive joints comprised of glass and various metal surfaces and bonded together with UV- and light-curing acrylates were analysed and evaluated. The comprehensive examination of material samples under laboratory conditions was rounded off by a number of tests on large-scale samples with load-bearing adhesive joints.

The use of UV- and light-curing acrylates in glass construction may broaden the variety of connection details possible due to their inherent transparency, their advantages in the production process, and an increased material strength. In order to initiate this development, it is essential to study the ageing process of bonded connections between float glass and metal surfaces. Furthermore, the investigation should incorporate combinations of different types of materials utilized for brackets and surface treatments in order to examine punctual and linear adhesive joints.

Accelerated ageing tests were carried out in accordance with the European guideline ETAG 002. The scope of the ageing tests was reasonably extended with regard to the intended use. Among other test scenarios, the test samples were exposed to natural weathering for a period of several years. The interpretation of test results was conducted with a focus on the quality of the bonded connection relative to the influence of the "tin" side or the "air" side, along with other parameters such as the effect of the adhesive layer's thickness and glass surface treatments on improved long-term stability of the joints. The creep behaviour of the acrylate adhesives was monitored and evaluated in comparison to the characteristic behaviour of silicones, as well.

Furthermore, the maximum load capacity and serviceability of adhesive connections using UV- and light-curing acrylates was tested in accordance with current regulations for glass structures. This examination covers glass units acting as barriers to prevent people from falling, glass louvers in façades, overhead glazing and doors with bonded infill panels. The majority of tests were conducted on new building components, some of which had been exposed to natural weathering for a few years prior to testing. In addition to the load capacity tests, the capability of adhesive joints to absorb constraint forces due to temperature changes was investigated.

For the first time this work verifies the fundamental suitability of UV- and light-curing acrylates in glass constructions under consideration of specific limitations of applicability.

## **Strahlungshärtende Acrylate im Konstruktiven Glasbau**

### **Thesen zur Dissertation**

Unter Berücksichtigung bestimmter Anwendungsgrenzen sind mit UV- und lichthärtenden Acrylaten hochtransparente Klebungen im Konstruktiven Glasbau möglich. Zahlreiche Anwendungen im Innen- und Außenbereich sind unter Beachtung bauaufsichtlicher Anforderungen dazu geeignet, Langzeiterfahrungen zu sammeln.

Entsprechend der Anforderungen, die sich aus den geklebten Anwendungen ergeben, können UV- und lichthärtende Acrylate zähelastisch bis fest modifiziert werden. Die Verformbarkeit erreicht die der Silikone, bei teilweise wesentlich höheren Festigkeiten vor und nach Alterung.

Bei Raumtemperatur zeigen die untersuchten UV- und lichthärtenden Acrylate ein deutlich geringeres Kriechverhalten als bauaufsichtlich zugelassene Silikone.

An geeigneten Prüfkörpern können für dünnsschichtige Klebungen die Klebfestigkeiten vor und nach Alterung senkrecht und parallel zur Klebung ermittelt werden. Auf Grund der größeren Klebfläche fallen die Ergebnisse an Zugprüfkörpern nach Alterung deutlich besser aus.

Die untersuchten Acrylate zeigen gegenüber UV-Bestrahlung und Klimawechsellagerung ein sehr gutes Alterungsverhalten. Gegenüber Wasserlagerung und Einlagerung in Reinigungsmittel zeigt sich in Anlehnung an die ETAG Nr. 002 bisher ein nicht ausreichendes Alterungsverhalten. Die Restfestigkeit nach Alterung ist jedoch teilweise höher als die der Silikone.

UV- und lichthärtende Acrylate zeigen eine gute Haftung auf Glas. Vor und nach Alterung liegt häufig ein Adhäsionsverlust auf der Metallseite vor.

Die Langzeitbeständigkeit der Klebungen kann in Abhängigkeit von der Metalloberfläche durch das Pyrosil<sup>®</sup>-Verfahren, das Atmosphärenplasma und vor allem durch das Sandstrahl-Coating verbessert werden. Ein adhäsives Versagen auf der Metalloberfläche kann an gealterten Prüfkörpern auch durch Oberflächenvorbehandlung nicht verhindert werden. Wegen der teilweise höheren Beständigkeiten sollten für weitere Materialkombinationen Vorbehandlungsmaßnahmen untersucht werden.

Die durchgeführte Prüfung zum Einfluss von angrenzenden Materialien ist sinnvoll zur Überprüfung von Ablösungs-, Trübungs- und Färbungserscheinungen. Alterungsversuche sollten noch mal mit einer schützenden Silikonfuge wiederholt werden, um zu beurteilen, inwiefern sich die Restfestigkeiten in den besonders aggressiven Medien verbessern lassen.

Die Ergebnisse der Alterungsprüfungen zeigen, dass keine untersuchte Materialkombination vollständig den Anforderungen der ETAG Nr. 002 genügen kann. In Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung müssen kritische Alterungseinflüsse konstruktiv vermieden werden. Alternativ sind insbesondere bei Vertikalverglasungen mechanische Sicherungen möglich, die die optische Qualität der transparenten Klebungen nahezu nicht schmälern.

Kleine Prüfkörper weisen ein ungünstiges Verhältnis von Klebfläche zum bewitterten Klebrand auf. Sind die Ergebnisse aus Prüfkörperversuchen auf Grund ihrer kleinen Klebfläche nicht aussagekräftig, sollte die Restfestigkeit nach Alterung an original großen Beschlägen ermittelt werden.

Für ungealterte Bauteile konnte die Trag- und Resttragfähigkeit an geklebten Glaslamellen und Überkopferverglasungen nachgewiesen werden. Darüber hinaus weisen geklebte defekte Glaslamellen auch nach mehrjähriger Freibewitterung eine ausreichende Resttragfähigkeit auf. Auch der Einsatz der geklebten Beschläge an Innentüren kann durch die durchgeführten Bauteilversuche abgesichert werden.

## Light curing acrylates in glass structures

### Theses pertaining to the dissertation

Considering their limitations of applicability, UV- and light-curing adhesives are suitable options for highly-transparent, bonded connections in glass construction. There is a large variety of potential applications, both inside and outside, which lend themselves to the potential gain of long-term experience in the use of acrylates in glass construction.

To meet the requirements of adhesive joints for specific applications, UV- and light-curing acrylates can be modified from viscoplastic state to a solid state. The deformability may reach the elastic range of silicones, while the material strength before and after ageing is slightly higher.

At room temperature, the UV- and light-curing adhesives show a considerably lower tendency to creep in comparison to building approved silicones.

The shear and tension capacity of thin adhesive layers, regardless of ageing, can be determined by testing adequately prepared samples. Because of larger contact surface, the tensile capacity usually reaches higher values on aged samples. It should be noted that the tensile capacity of aged samples normally results in a slightly higher value due to increased contact surface.

The samples tested generally showed resistance to ageing as a result of UV-radiation or climatic variations. The ageing resistance for water immersion and exposure to cleaning detergents does not meet the requirements as set forth in ETAG Nr. 002; on the contrary, the residual strength of the aged material is slightly higher than the strength of silicones.

UV- and light-hardening acrylates show good adhesion to glass surfaces. The actual adhesion failure present on both aged and non-aged samples often occurred on the metal surface.

The long-term durability of adhesive joints can be improved by specific surface treatments such as the Pyrosil<sup>®</sup>-method, atmospheric plasma and, most notably, the sandblast-coating. Pre-treated metal surfaces do not necessarily prevent adhesive failure. However, selected surface treatments should be incorporated into the investigation of suitable material combinations with regard to a focus on notably improved long-term durability.

Test series conducted to examine the influence of various material surfaces are a reasonable means by which to obtain results with regard to the peel-off resistance, as well as effects concerning the visual appearance, such as clouding and colouring, within the adhesive layer. Ageing tests should be re-administered with a perimeter silicone seal to evaluate how the residual strength can be improved, particularly if exposed to aggressive media.

The results of ageing tests show that none of the material combinations tested strictly meets the requirements under ETAG Nr. 002 without fail. Critical parameters that may contribute to ageing should be considered and minimised during the design process for each individual application. Alternatively, mechanical fixings may be designed, in addition to bonded connections, in order to safely transfer loads in case of adhesive failure, particularly in vertical glazing applications. These fixings can be designed without significant impact on the visual appearance of highly transparent adhesive joints.

Small test specimens have an inappropriate ratio between the contact surface and the perimeter edge. If the test results are not sufficiently meaningful, due to a small bonded surface, then the residual strength after ageing should alternatively be tested on full-scale samples of metal fittings or brackets.

The maximum load capacity and post-breakage behaviour of non-aged adhesive connections could be verified on bonded glass louvres and overhead glazing panels. Broken glass louvres with adhesive connections showed sufficient post-breakage robustness even after being exposed to natural weathering for several years. The suitability of bonded fittings on interior glass doors could equally be verified by testing.