

**Spannglasträger
Glasträger mit vorgespannter Bewehrung**

Spannglass Beams
Glass Beams with Post-Tensioned Reinforcement

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

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Michael Engelmann

geboren am 08. 12. 1983 in Merseburg/Saale

Erster Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller Technische Universität Dresden
Zweiter Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Geralt Siebert Universität der Bundeswehr München
Dritter Gutachter	Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich Technische Universität Berlin
Tag der Verteidigung	24. 08. 2017

Kurzfassung

Glas und Beton sind sich in wesentlichen Materialeigenschaften ähnlich: Beide zeigen gegenüber einer hohen Druckfestigkeit eine vergleichsweise geringe Zugfestigkeit und versagen spröde. Diese Analogie führte zur Entwicklung bewehrter Glasträger, die sich durch eine aufgeklebte Stahllasche an ihrer Biegezugkante auszeichnen. Dadurch wurden die Übertragung von Zugkräften auch im Rissfall möglich, sodass ein duktiler Bauteilverhalten erreicht und der im konstruktiven Glasbau notwendige Nachweis der Resttragfähigkeit erfüllt wird.

Glasträger mit verbundlos vorgespannter Bewehrung – Spannglasträger – stellen die Fortführung dieses Analogiegedankens dar. Neben einer gezielten Steigerung der Erstrisslast, können die Träger planmäßig überhöht werden. Damit wird einer bisher üblichen Überdimensionierung mit der Anordnung nicht ausgenutzter „Opferscheiben“ entgegen gewirkt und sichere sowie materialeffiziente Konstruktionen mit maximaler Transparenz ermöglicht.

Diese Konstruktionsweise wurde bislang ausschließlich für einzelne Sondierungsuntersuchungen in breiter Variantenvielfalt genutzt. Eine Systematik und einheitliche Bezeichnungsweise ist nicht vorhanden. Darüber hinaus beschränken sich verfügbare Ergebnisse auf die Beschreibung der Tragfähigkeit, ohne die Resttragfähigkeit explizit zu belegen oder die Dauerhaftigkeit nachzuweisen.

Mit dieser Arbeit wurde anhand einer Analogiebetrachtung zum Eurocode 2 eine Bezeichnungsweise für bewehrte und vorgespannte Glasträger entwickelt und für vorhandene Konstruktionen erfolgreich angewendet. Darin zeigt sich, dass der Stand der Technik auf diese Weise charakterisierbar ist.

Zusätzlich wird die These aufgestellt, dass sich das Tragverhalten von Spannglasträgern wie im Stahlbeton- und Spannbetonbau beschreiben und die auftretenden Spannkraftverluste analog berechnen lassen. Diese These wird mithilfe experimenteller Studien als Kern dieser Arbeit untersucht und durch eine ergänzende numerische Modellierung bestätigt.

Zunächst wird das Tragverhalten im Kurzzeit-Biegeversuch an 15 Prüfkörpern unter variierten Bewehrungsgraden und Vorspannkraften untersucht. Dabei zeigen sich gesteigerte Erstrisslasten sowie ein sicheres Verhalten im Anschluss an die Belastung. Durch die Vorspannung wird das Tragverhalten gezielt beeinflusst.

Zusätzlich erbringt eine zerstörungsfreie Untersuchungsreihe an 28 Prüfkörpern unter konstanter Gebrauchslast über 1000 Stunden erstmals eine Beschreibung der auftretenden Spannkraftverluste. Diese sind maßgeblich von der horizontalen Durchbiegung sowie der daraus resultierenden Belastung der Zwischenschicht im Verbund-Sicherheitsglas abhängig. Aus der Größenordnung der Verluste lässt sich schlussfolgern, dass eine Begrenzung dieses Verformungsanteils sowie eine konstruktive Entlastung der Zwischenschicht notwendig sind. Zudem wird die Änderung der Vorspannkraft unter einer Temperaturlast beschrieben. Im Ergebnis zeigt sich, dass dieser Lastfall mittels der linearen Balkentheorie beschreibbar und der damit assoziierte Spannkraftverlust berechenbar ist.

Die Resttragfähigkeit von 24 Spannglasträgern wird mithilfe eines eigens entwickelten Prüfverfahrens bestätigt. Während die Bewehrung einerseits eine Überbrückung von Rissflanken ermöglicht, verursacht die Vorspannkraft andererseits im teilzerstörten Tragsystem bisweilen ein frühzeitiges Versagen. Daher wird empfohlen, die baukonstruktive Detailentwicklung zu intensivieren, um einen größeren Sicherheitsvorteil aus der Konstruktionsweise zu generieren.

Die Arbeit beinhaltet erstmals eine systematische Datensammlung zum Tragverhalten von Spannglasträgern. Es zeigt sich, dass auf eine Anordnung von „Opferscheiben“ zugunsten einer steigenden Materialeffizienz nicht nur verzichtet werden kann, sondern im Sinne eines effektiven Tragverhaltens verzichtet werden muss. Mit der vorgeschlagenen Bezeichnungsweise, den abgeleiteten konstruktiven Maßnahmen sowie den gezeigten Untersuchungsmethoden besteht nunmehr die Möglichkeit, sichere und dauerhafte Spannglasträger zu entwerfen und deren Trageffizienz zu belegen.

Abstract

Glass and concrete share essential material characteristics: Their compressive strength exceeds their tensile strength considerably and both of them fail in a brittle manner. This analogy led to the development of reinforced glass beams, which are improved by means of adhesively bonded steel sections in the tensile zone. This improvement allowed for a direct transfer of tensile loads in a post-breakage state and resulted in a ductile structural element, which met the special demand of structural glass for a sufficient residual load-bearing capacity.

Glass beams with unbonded, post-tensioned reinforcement – Spannglass Beams – carry this analogy concept on. The members will comprise an increased initial fracture strength and may be uplifted intentionally. This development has rendered the need for over-dimensioning by removing unnecessary sacrificial layers, which will result in a material efficient structure and will maximise transparency.

Solely single exploratory investigations have used this idea in a wide variety of options so far. There is neither a uniform classification nor a consistent nomenclature. Furthermore, available results are limited to the concise description of the short-term load-bearing properties without proving the residual load-bearing capacity explicitly and confirming long-term durability.

This thesis describes the development and the application of a nomenclature for reinforced and pre-compressed glass beams in an analogy study according to Eurocode 2. The state of technology can be characterised in this manner.

Additionally, the research describes the load-bearing behaviour as well as the calculation of the loss of pre-stress of Spannglass Beams by analogy with concrete structures. As the key section of this thesis, this statement is examined by means of comprehensive experimental studies and completed by a numerical calculation.

Primarily, the load-bearing behaviour of 15 specimens in short-term bending tests and a variety of reinforcement ra-

tios and pre-stress levels were determined. The results show an increase of initial fracture strength as well as safe behaviour after failure. The pre-stress changes the load-bearing performance significantly.

Furthermore, a non-destructive study including a constant loading for 1000 h describes the loss of pre-stress in 28 specimens for the first time. The horizontal deflection and the thus resulting shear stresses of the interlayer material of a laminated glass section are the critical parameters. From the magnitude of losses it may be concluded that the deflections need to be limited and the interlayer foils need to be relieved from stress. Moreover, the structural response during a change in temperature is in good agreement with the results obtained from linear beam theory. This allows for an estimation of the associated losses.

Finally, a specifically developed test approach confirms the residual load-bearing capacity of 24 specimens. The reinforcement shows the ability to bridge cracks in the glass. However, it should be noted that pre-stress occasionally causes an early failure of the partially broken Spannglass cross-section. Therefore, intensifying the development of structural details in order to generate an increased advantage concerning safety is recommended.

This contribution contains a systematic acquisition of analytical, experimental and numerical data regarding the load-bearing characteristics of Spannglass Beams for the first time. The use of a sacrificial layers is not necessary. Even more, to reach the most effective load-bearing behaviour, it is necessary to abandon them completely. Implementing the developed nomenclature, realising the recommended structural provisions and using the proposed methods, it is now possible to compose safe and durable Spannglass Beams as well as prove their structural efficiency.