

## Abstract

After a long period of decreasing relevance for the construction industry, timber, a renewable and carbon dioxide storing material, is currently playing an increasingly central role. The material timber is on the one hand regenerative but on the other hand not available in unlimited quantities. A resource-saving use of timber is therefore desirable. Bar-shaped timber structures, such as truss or frame structures, are particularly efficient, appropriate to the material and architecturally appealing. The connecting areas in such constructions are critical and usually determine cross-section sizes. Metallic fasteners like bolts, nails or screws introduce high stresses into small areas, which is not appropriate to the material. Glued connections are generally suitable for the material timber and therefore have a high loadbearing capacity, but usually cannot be manufactured on the construction site. As a result, glued timber structures require large transport capacities and are limited by them. Nail plate connections combine the disadvantages of metallic fasteners and gluing.

In this thesis, two new connection technologies are investigated, which enable a materialappropriate load application into timber and at the same time allow simple assembly on the construction site. A central development criterion of this work was to avoid enlargement of the cross-section in the connection area and to fully activate the load-bearing capacity of the connected timber cross-section through the connections.

The first connection technology discussed in this thesis was developed for a tensile loaded connection. The general concept provides a load transfer from the timber cross-section to a glass fiber reinforced plastic (GRP) via a quasi-rigid adhesive of both materials. In the next step the load is transferred from the GRP to a steel bolt using a loop connection. The steel bolt enables an easy on-site assembly of the whole connection. In addition to theoretical investigations of the partial aspects of load transfer between timber and GRP as well as GRP and the steel bolt, test-based investigations were carried out. Final component tests confirm the theoretical considerations that this loop connection concept can bear the full load-bearing capacity of a timber cross-section in a compact space without the need for significant crosssectional enlargement in the connection.

The second connection technology presented has been developed for bars with a combined load from bending with a possible additional compression or tensile load. Similar to the first connection, the bending connection is also designed to be two-phase. In a first step, the load transferred from a timber section into a GRP-rod-reinforced polymer concrete cross-section in accordance with the material by means of gluing. In a second step an interlocking teeth connector transfer the load between two polymer concrete elements, which can be assembled on-site. For the implementation of this connection technology a modified polymer concrete, based on the building authority approved polymer concrete Compono®, was developed. The load-bearing behavior of this modified polymer concrete was tested with and without GRP reinforcement under pressure, tension and bending load. Based on the knowledge gained by these tests, a glued connection of timber and polymer concrete was theoretically analyzed and the GRP-reinforced finger jointing developed from it was subjected to tests. Including these results, the interlocking teeth connection made of polymer concrete has been developed and pre-designed with a strut and tie model. Concluding tests on the interlocking teeth connector verify the high load-bearing potential of the connection.

In the last chapter of this thesis, a material model is proposed for an estimation of the Young's modulus of polymer concrete. The model bases on the material properties and the percentage composition of the polymer concrete components. As a result, the model seems similar to the material model for cement-based concretes by Teddy J. Hirsch from 1962. Hirsch's model reproduces the Young's modulus of cement-based concrete with sufficient accuracy, but systematically underestimates the Young's modulus of polymer concrete due to their high content of aggregates. The proposed model is based on a different mechanical approach than Hirsch's. With this alternative approach, an empirically determined constant  $Z$  in Hirsch's model is replaced by a mechanical founded parameter that depends on the material content of the polymer concrete components.

## Kurzfassung

Der nachwachsende und Kohlenstoffdioxid speichernde Rohstoff Holz nimmt nach einer langen Periode abnehmender Relevanz im Bauwesen aktuell eine zunehmend zentralere Rolle ein. Dabei ist der Werkstoff Holz einerseits regenerativ aber andererseits nicht unbegrenzt verfügbar. Ein ressourcenschonender Umgang mit Holz ist somit anzustreben. Besonders effizient, materialgerecht und architektonisch ansprechend sind stabförmige Holztragwerke, wie beispielsweise Fachwerkträger oder Rahmenbaukonstruktionen. Kritisch und im Regelfall querschnittsbestimmend sind die Verbindungsbereiche solcher Konstruktionen. Metallische Verbindungsmittel, wie Bolzen, Nägel oder Schrauben leiten die Beanspruchungen punktuell und gegenüber dem Holz nicht materialgerecht ein. Geklebte Verbindungen sind materialgerecht und daher hoch tragfähig, können im Regelfall jedoch nicht auf der Baustelle ausgeführt werden. In der Folge erfordern geklebte Konstruktionen große Transportkapazitäten und werden durch diese begrenzt. Nageplattenverbindungen kombinieren die Nachteile von metallischen Verbindungsmitteln und Klebung.

In dieser Arbeit werden zwei Verbindungstechnologien untersucht, die eine für den Werkstoff Holz materialgerechte Lasteinleitung ermöglicht und gleichzeitig eine einfache Montage auf der Baustelle erlauben. Wesentliche Entwicklungskriterien dieser Arbeit waren zudem auf Querschnittsvergrößerungen im Verbindungsbereich weitestgehend zu verzichten und die Tragfähigkeit des angeschlossenen Holzquerschnitts durch die neuartigen Verbindungen vollständig zu aktivieren.

Die erste hier behandelte Verbindungstechnologie wurde für eine zugbeanspruchte Verbindung entwickelt. Das Tragkonzept sieht eine Lastübertragung von einem Holzquerschnitt zu einem glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK) mittels quasi starrer Klebung vor. Im Anschluss wird die Belastung mittels Schlaufenausbildung materialgerecht vom GFK in einen Stahlbolzen überführt. Der Stahlbolzen ermöglicht eine leichte Baustellenmontage. Neben theoretischen Untersuchungen der Teilaspekte Lastübertragung Holz-GFK und GFK-Bolzen werden versuchsgestützte Untersuchungen durchgeführt. Abschließende Bauteilversuche bestätigen die theoretischen Betrachtungen, dass dieses Zugschlaufenkonzept die volle Tragfähigkeit eines Holzquerschnitts auf kompaktem Raum übertragen kann, ohne dass wesentliche Querschnittsaufweitungen notwendig werden.

Die zweite vorgestellte Verbindungstechnologie ist für Stäbe mit einer kombinierten Belastung aus Biegung und Druck oder Zug entwickelt worden. Analog zu der Zugverbindung ist auch die Biegeverbindung zweiphasig konzipiert. In einem ersten Schritt wird die Beanspruchung für das Holz materialgerecht mittels Klebung in einen GFK-stabbewehrten Polymerbetonquerschnitt überführt. Der zweite Schritt stellt eine baustellenseitig montierbare und materialaffine Verzahnungsverbindung von Polymerbeton zu Polymerbeton dar. Für die Umsetzung dieser Verbindungstechnologie wurde auf Basis des bauaufsichtlich zugelassenen Polymerbetons Compono® eine eigene Polymerbetonrezeptur entwickelt und das Tragverhalten mit und ohne GFK-Bewehrung unter Druck-, Zug- und Biegebeanspruchung versuchsgestützt bestimmt. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde die geklebte Verbindung von Holz und Polymerbeton theoretisch analysiert und die daraus entwickelte bewehrte Keilzinkenverzahnung Versuchen unterzogen. Im Anschluss wird die montierbare Verzahnungsverbindung aus Polymerbeton vorgestellt und mit Stabwerkmodellen vorbemessen. Die abschließenden Versuche an der Verzahnung verifizieren das hohe Tragpotential der Verbindung.

In dem letzten Kapitel dieser Arbeit wird ein Materialmodell zur rechnerische Abschätzung des Elastizitätsmoduls von Polymerbetonen basierend auf den Materialkennwerten und prozentualer Zusammensetzung seiner Bestandteile vorgeschlagen. Im Ergebnis lehnt sich das Modell an das Materialmodell für zementgebundene Betone von Teddy J. Hirsch aus dem Jahr 1962 an. Hirschs Modell gibt den Elastizitätsmodul von Normalbetonen ausreichend genau wieder, unterschätzt jedoch, bedingt durch die hohen Zuschlaganteile, den Elastizitätsmodul bei Polymerbetonen systematisch. Das eigene vorgeschlagene Modell beruht auf einem anderen mechanischen Ansatz. Aus diesem alternativen Ansatz heraus wird die empirisch ermittelte Konstante Z in Hirschs Modell durch einen materialanteilabhängigen Parameter ersetzt.