

Investigations on the bond behaviour of a hybrid lap-spliced connection of GFRP and stainless steel bars

Untersuchungen zum Verbundverhalten einer hybriden
Überlappverbindung von GFK- und Edelstahlstäben

DISSERTATION

Vorgelegt an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

von Jiafeng Zhou, geboren am 11. November 1993
in Qidong, Jiangsu, China

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Otto
Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Prof. Renata Kotynia
apl. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Liebscher
Weitere Mitglieder: Univ.-Prof. Dr. Robert Jockwer

Eingereicht am: 17.04.2025
Verteidigt am: 17.10.2025

Investigations on the bond behaviour of a hybrid lap-spliced connection of GFRP and stainless steel bars

Abstract

As the global population continues to grow, the demand for energy also increases, leading to a significant rise in the resource consumption, notably the electricity and fuel oil. Consequently, enhancing energy efficiency has become an urgent necessity, not only to protect the environment but also to mitigate financial burdens. In the insulation joint of a traditional balcony structure, normal steel bars with high thermal conductivity are used as tension bars to connect the interior and exterior structures. This has caused significant energy losses due to the formation of serious thermal bridges. In comparison, the thermal conductivity of glass fiber reinforced polymer (GFRP) material is significantly lower, at only 1% of that of steel. It can be an ideal substitution for the tension steel bars in the joints. Thus, this introduces a novel hybrid lap-spliced connection between GFRP bars and steel bars in the adjacent structures, which has rarely been investigated.

In the first publication of this cumulative dissertation, comprehensive knowledge regarding the tensile lap-spliced steel and FRP bars in flexural concrete specimens is collected and systematically analyzed. Building on the results, a three-level based investigation method is outlined to study the mechanical behavior of the hybrid lap-spliced connection between GFRP bars and steel bars. In the second publication, the first two levels are presented. First, the tension tests on two types of GFRP bars and one type of stainless steel bar are conducted to obtain their mechanical properties, respectively. In the subsequent bond tests, the bond performance between concrete and one single bar is investigated using distributed fiber optical sensors (DFOSs). Four combinations of DFOSs and adhesives are applied in the grooves of one type of GFRP bars to investigate their influence on the measured bar strains. Next, the determined best variant is further implemented in other two types of bars to study their different bond behaviors in concrete. The third publication primarily focuses on investigating the third level, specifically the actual lap-spliced connections. In the first step, the microstructural characterization of GFRP bars is analyzed to comprehend their specific material properties. In the second step, the optimal direction of grooves for placing DFOSs in the bars is determined through cantilever tests. In the third step, the influence of lap-spliced length and lap-spliced type on the bond performances of hybrid lap-spliced bars is investigated with four-point flexural tests. The strain distributions of lap-spliced bars, in particular in the lap-spliced area are investigated in-depth. Besides, the strains and stresses at the lap-spliced ends at different loads are analyzed. Furthermore, the maximum experimental loads are compared with calculated

results of the ultimate strength method.

At the end of this work, several further studies are carried out. Firstly, the bar strain distributions in bond tests and four-point flexural tests are compared. Besides, the cracks focusing on the lap-spliced area in the four-point flexural tests are analyzed. Moreover, numerical simulations are conducted to validate the experimental results of the bond tests and the four-point flexural tests. Subsequently, parameter studies are carried out based on the validated models to determine the critical development length of the GFRP bars in bond test as well as the optimal lap-spliced length between GFRP bars and stainless steel bars in four-point flexural test. The results are then compared with the results calculated with different national and international standards.

Based on the abovementioned investigations, it can be concluded that the substitution of steel bars with GFRP bars not only enhances the thermal behavior of the lap-spliced connection, but also increases the mechanical performance such as load capacity of the reinforced concrete structures. In addition, the provisions in current standards to calculate the development and lap-spliced lengths require further improvements, including experimental investigations and numerical validations, to achieve more accurate results.

Untersuchungen zum Verbundverhalten einer hybriden Überlappverbindung von GFK- und Edelstahlstäben

Kurzfassung

Mit dem anhaltenden weltweiten Bevölkerungswachstum steigt auch der Energiebedarf, was zu einem erheblichen Anstieg des Ressourcenverbrauchs führt – insbesondere im Bereich Strom und Heizöl. Infolgedessen ist eine Steigerung der Energieeffizienz zu einer dringenden Notwendigkeit geworden, nicht nur zum Schutz der Umwelt, sondern auch zur Reduzierung finanzieller Belastungen. Bei traditionellen Balkonanschlüssen werden in den Isolationsfugen gewöhnliche Stahlbewehrungen mit hoher Wärmeleitfähigkeit als Zugstäbe eingesetzt, um Innen- und Außenbereiche miteinander zu verbinden. Dies führt zu erheblichen Energieverlusten aufgrund ausgeprägter Wärmebrücken. Im Vergleich dazu weist das Material glasfaserverstärkter Kunststoff (GFRP) eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit auf – nur etwa 1 % derjenigen von Stahl. Daher ist GFRP ein idealer Ersatz für Stahlstäbe in solchen Anschlussbereichen. In dieser Dissertation wird daher eine neuartige hybride Übergreifungs-Verbindung (Lap-Splice) zwischen GFRP-Stäben und Stahlstäben in benachbarten Bauteilen vorgestellt, die bisher kaum erforscht ist.

In der ersten Publikation dieser kumulativen Dissertation wird umfassendes Wissen über die Übergreifung von GFRP- und Stahlstäben in biegebeanspruchten Betonbauteilen zusammengetragen und systematisch ausgewertet. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird eine Untersuchungsmethodik in drei Stufen entwickelt, um das mechanische Verhalten der hybriden Übergreifungsverbindung zwischen GFRP- und Stahlstäben zu analysieren. In der zweiten Publikation werden die ersten beiden Stufen dieser Methodik vorgestellt. Zunächst werden Zugversuche mit zwei Typen von GFRP-Stäben und einem Typ Edelstahlstab durchgeführt, um deren mechanische Eigenschaften zu ermitteln. In nachfolgenden Verbundversuchen wird das Verbundverhalten zwischen Beton und jeweils einem Einzelstab untersucht. Dabei kommen vier Kombinationen aus verteilten faseroptischen Sensoren (DFOS) und Klebstoffen in den Längsnuten eines GFRP-Stabtyps zum Einsatz, um deren Einfluss auf die gemessenen Stabdehnungen zu analysieren. Die ermittelte optimale Kombination wird anschließend auch bei den anderen zwei Stabtypen eingesetzt, um deren unterschiedliches Verbundverhalten im Beton zu untersuchen.

Die dritte Publikation konzentriert sich hauptsächlich auf die dritte Stufe, nämlich auf tatsächliche Übergreifungsverbindungen. Im ersten Schritt wird die Mikrostruktur der GFRP-Stäbe analysiert, um deren spezifische Materialeigenschaften zu verstehen. Im zweiten Schritt wird durch Kragarmversuche die optimale Ausrichtung der DFOS-Nuten bestimmt. Im dritten

Schritt werden der Einfluss der Übergreifungslänge sowie des Übergreifungstyps auf das Verbundverhalten in hybriden Übergreifungsverbindungen mittels Vier-Punkt-Biegeversuchen untersucht. Besonders die Dehnungsverteilungen im Bereich der Übergreifung werden detailliert analysiert. Darüber hinaus werden die Dehnungen und Spannungen an den Übergreifungsenden bei unterschiedlichen Belastungen erfasst. Abschließend werden die maximalen experimentellen Lasten mit den Ergebnissen der Berechnung nach dem Grenzzustandsverfahren verglichen.

Am Ende der Dissertation werden mehrere weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Zunächst erfolgt ein Vergleich der Stabdehnungsverteilungen zwischen den Verbundversuchen und den Vier-Punkt-Biegeversuchen. Zusätzlich werden die Rissbilder im Übergreifungsbereich der Biegeversuche analysiert. Anschließend werden numerische Simulationen durchgeführt, um die experimentellen Ergebnisse aus den Verbund- und Biegeversuchen zu validieren. Darauf aufbauend werden Parameterstudien mit den validierten Finite-Elemente-Modellen (FEM) durchgeführt, um die kritische Verankerungslänge der GFRP-Stäbe sowie die optimale Übergreifungslänge zwischen GFRP- und Edelstahlstäben zu bestimmen. Die Ergebnisse werden abschließend mit Berechnungen nach verschiedenen nationalen und internationalen Normen verglichen.

Auf Grundlage der oben genannten Untersuchungen kann geschlossen werden, dass der Ersatz von Stahlstäben durch GFRP-Stäbe nicht nur das thermische Verhalten der Übergreifungsverbindung verbessert, sondern auch die mechanische Leistungsfähigkeit, wie beispielsweise die Tragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen, steigert. Darüber hinaus zeigt sich, dass die in den aktuellen Normen enthaltenen Regelwerke zur Bestimmung von Verankerungs- und Übergreifungslängen weiterer Überarbeitung bedürfen. Hierzu sind zusätzliche experimentelle und numerische Untersuchungen erforderlich, um genauere und verlässlichere Ergebnisse zu erzielen.