

VERSTÄRKUNG VON STAHLKONSTRUKTIONEN

Reparatur von Ermüdungsschäden mit Hilfe aufgeklebter CFK-Lamellen

Yvonne Ciupack

Brandenburgische Technische Universität (BTU), Lehrstuhl für Stahl- und
Holzbau

EINLEITUNG

Die Klebstofftechnologie ist in vielen Bereichen des täglichen Lebens unverzichtbar geworden. Beispielsweise wird sie seit vielen Jahren in der Verpackungs-, Geräte- und Elektroindustrie eingesetzt. Für die Automobil- und Luftfahrtindustrie gewinnt das Fügen unter Verwendung von Klebstoffen zunehmend an Bedeutung. Strukturelle Verklebungen im Bauwesen sind jedoch kaum vertreten, obwohl einige Beispiele mit lastabtragenden Klebfugen die innovativen Möglichkeiten deutlich aufzeigen [1]. Die rasch fortschreitenden Entwicklungen in der Klebstofftechnologie sowie die wachsenden Anforderungen im Stahlbau, wie z. B. leichte und filigrane Konstruktionen, erhöhen das Interesse an der Fügetechnik Kleben. Dies spiegelt sich in zahlreichen Forschungsarbeiten wider, von denen einige im Folgenden exemplarisch dargestellt werden. Zur Vermeidung eines Beulversagens bei dünnwandigen Profilen und zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Rahmenecken mit schlanken Stegen bieten geklebte Verstärkungen eine innovative Lösung. Diese Möglichkeit wird in [2] diskutiert. Feldmann [3] präsentiert verklebte Hohlplattenelemente als Alternative zu konventionellen, geschweißten orthotropen Platten. Im europäischen Forschungsprojekt INNOGLAST [4] wurde ein ästhetisch ansprechender Einsatz von strukturellen Klebverbindungen untersucht. Ziel war es, die Tragfähigkeit von Hybrid-Stahl-Glas-Trägern zu ermitteln, wobei die Flansche aus Stahl und die Stege aus Glas hergestellt wurden und die Verbindung der Querschnittsteile durch eine lineare Klebeschicht realisiert wurde. Geklebte Fassadenverbindungen, Hohlprofilverstärkungen und Brückendeckkonstruktionen wurden im Projekt [5] untersucht. Dabei wurde eine ganzheitliche Betrachtung hinsichtlich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Reproduzierbarkeit der Konstruktionen vorgenommen. Die Untersuchungen zu verklebten Hohlprofilverstärkungen und Trapezprofilverbindungen wurden in den Projekten IGF-Projekt 16494 BG [6] und IGF-Projekt 18161 BG [7] fortgesetzt. Hier wurden Bemessungskonzepte entwickelt und kalibriert sowie

erste Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von geklebten Fassadenelementen durchgeführt. In [8] wurde ein vereinfachtes zweiparametrisches Modell für die Schadensakkumulation in Klebschichten entwickelt. Eine mögliche Anwendung von CFK-Lamellen als Verstärkungsmaßnahme im Stahlbau wurde im IGF-Projekt 17700 BG [9] untersucht. Dabei wurden Modelle für den rechnerischen Nachweis abgeleitet und Empfehlungen für die Ausführung gegeben.

Die Liste der genannten Forschungsaktivitäten erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und kann beliebig erweitert werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen jedoch deutlich die erheblichen Vorteile von Klebverbindungen auf, insbesondere im Vergleich zu den klassischen Fügeverfahren im Stahlbau. So kann eine Querschnittsschwächung durch Schrauben oder Bolzen vermieden werden, wenn das Befestigungselement durch eine Klebeschicht ersetzt wird. Im Vergleich zum Schweißen können wärmebedingte Eigenspannungen umgangen werden. Die kapazitätsreduzierenden Einflüsse sind insbesondere bei zyklischer Belastung als kritisch anzusehen, da sie aufgrund ihrer Kerbwirkung zu Ermüdungsproblemen führen können. Darüber hinaus haben Klebeschichten ein hohes Dämpfungsvermögen. Die genannten Vorteile legen nahe, Klebstoffe insbesondere bei einer oszillatorischen Belastung zu verwenden und vorhandene Verbindungen zu ersetzen oder zu ergänzen, z. B. bei der Sanierung von ermüdungsgefährdeten Stahlkonstruktionen. Laut einer Studie des Deutschen Instituts für Urbanistik [10] sind Deutschlands Straßenbrücken in einem desolaten Zustand und müssen bis 2030 größtenteils ersetzt oder repariert werden. Danach sind Investitionen von 16 bis 17 Milliarden Euro erforderlich. Die wirtschaftlichen Vorteile effizienter Sanierungsmethoden für Stahlkonstruktionen sind enorm. In einem nationalen Forschungsprojekt wird die Wirksamkeit verschiedener Rissreparaturverfahren im Stahlbau mit aufgeklebten CFK-Lamellen untersucht. In diesem Beitrag werden ausgewählte Ergebnisse vorgestellt.

1 STAND DER TECHNIK

Wenn bei der Inspektion einer Stahlkonstruktion Ermüdungsrisse festgestellt werden, ist es wünschenswert, diese zu sanieren und die erforderliche Tragfähigkeit wiederherzustellen, um einen Abriss der Konstruktion zu verhindern. Derzeit stehen mehrere Methoden zur Verfügung. In jedem Fall muss zuerst die Rissgeometrie erfasst werden, was z. B. durch Magnetpulver-, Farbeindringprüfung oder Wirbelstromverfahren erzielt werden kann. Um die scharfe Kerbe sofort zu entfernen, kann die Risspitze angebohrt werden. Solche Bohrungen bilden jedoch häufig den Ausgangspunkt für neue Risse [11]. Ferner ist das Reparaturschweißen eine bekannte Technik,

die die verbleibende Lebensdauer der durch Ermüdung geschädigten Stahlstruktur verbessern kann. Dazu wird der Riss vollständig ausgefräst und anschließend verschweißt. In einigen Fällen kann es auch erforderlich sein, lokale Verstärkungen durch geschraubte oder geschweißte Stahlkomponenten anzubringen. Je nach Anforderung können die verschiedenen Reparaturmaßnahmen kombiniert werden, um die Wirksamkeit zu erhöhen. Ein wesentlicher Nachteil der hier vorgestellten Methoden ist der eingebrachte Kerbeffekt durch die Reparatur selbst. Eine Querschnittsschwächung durch Bohren oder Schrauben löst bei zyklischer Belastung häufig neue Risse aus. Aufgrund des hohen Wärmeeintrags beim Schweißen treten Eigenspannungen, geometrische Kerben und Gefügeänderungen als neue Rissquelle auf. Durch den Einsatz von höherfrequente Hämmerv Verfahren kann diesen negativen Einflüssen entgegengewirkt werden [12], gänzlich vermeiden lassen sie sich jedoch nicht. Darüber hinaus sollte das Schweißen nur bedingt, z. B. bei Anwendung aufwendiger Klemmvorrichtungen, während des laufenden Verkehrs durchgeführt werden [13], da eine relative Verschiebung der zu schweißenden Bauteile die Qualität der Schweißnähte erheblich beeinträchtigen und die Reparatur obsolet machen kann. Außerdem ist das Reparaturschweißen für Altstahl, wie Puddelstahl, der bis 1900 hauptsächlich verwendet wurde, aufgrund der unregelmäßig verteilten lamellaren Einschlüsse von Schlacke [14] nicht möglich.

Aufgeklebte CFK-Lamellen können den genannten Nachteilen entgegenwirken. Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zeichnen sich durch eine hohe Zugfestigkeit und einen hohen Elastizitätsmodul bei sehr geringem Eigengewicht aus. Darüber hinaus sind CFK-Werkstoffe beständig gegen Korrosion und Ermüdung [15]. Erste Erkenntnisse und Erfahrungen mit diesem Ertüchtigungsverfahren sind in [16] und [17] beschrieben. In [18] wird ein Vergleich von Sanierungsmethoden ermüdungsgeschädigter Stahlkomponenten mit geschweißten Stahlblechen und geklebten CFK-Laminaten gegeben. Empfehlungen für die Verstärkung von Stahlkonstruktionen mit extern geklebten CFK-Materialien können dem "CIRIA Design Guide" [19] entnommen werden. Trotz des hohen Potenzials werden Stahlkonstruktionen nur selten mit CFK verstärkt. Im Betonbau kann CFK als Biege- oder Querkraftbewehrung, Umschnürungsbewehrung von Stützen sowie lokale Verstärkungsmaßnahme gemäß technischer Zulassung eingesetzt werden. Bei erhöhten Anforderungen an die Sanierung können die CFK-Lamellen mit speziellen Vorrichtungen vorgespannt werden. Im Vergleich zu Stahlkonstruktionen ist die Betonoberfläche jedoch das schwächste Glied im Verbundquerschnitt, bestehend aus Beton, CFK und Klebschicht. Somit sind die etablierten Klebstoffsysteme der Lösungen im Betonbau nicht auf den Stahlbau übertragbar [9].

2 RISSANIERUNG MITTELS CFK-LAMELLEN

2.1 Materialeigenschaften

Bei der Auslegung von Verstärkungsmaßnahmen mit aufgeklebten CFK-Lamellen ist es unbedingt erforderlich, die Materialien genau zu definieren. Zu diesem Zweck werden experimentelle Versuche an CFK-Lamellen und verschiedenen Klebstoffen durchgeführt. Die Lamellen mit einer Dicke von 1,5 mm und einer Breite von 20 mm werden im Zugversuch nach DIN EN ISO 527-4 an der BTU geprüft. Das Materialverhalten ist bis zum spröden Versagen als quasi linear zu beschreiben. Im Durchschnitt haben die Probekörper eine Zugfestigkeit von 3'400 MPa und einen E-Modul von 192'000 MPa. Zur Charakterisierung der Klebstoffe werden die Eigenschaften von Substanzproben nach DIN EN ISO 527 verwendet. Hierfür werden die Hantelprüfkörper (siehe Abbildung 1a) für 5 verschiedene Klebstoffe durch Injektion hergestellt und anschließend im Zugversuch bei einer Dehnungsrate von 1% / min an der RWTH Aachen zerstörend geprüft.

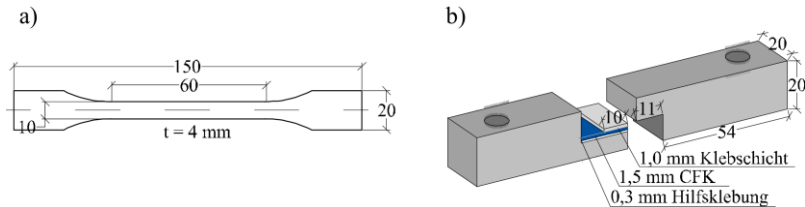


Abb. 1. a) Schematische Darstellung der Substanzprobe; b) Modifizierte Zugscherprobe [20]

Die Ergebnisse sind in Form der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls in Tabelle 1 für zwei ausgewählte Klebstoffe angegeben, die in diesem Beitrag als System 1 und System 2 bezeichnet werden. Für die Reparatur von Rissen in ermüdungsgeschädigten Stahlstrukturen ist das Scherverhalten der Klebstoffschicht von besonderem Interesse aufgrund eines auftretenden "Pflaster"-Effektes. Dies wird durch Zugscherversuche nach DIN EN 14869-2 an der RWTH ermittelt, wobei eine Modifikation der Probekörper nach [20] vorgenommen wird, um die Einflüsse der Stahl- und CFK-Oberflächen zu erfassen (siehe Abbildung 1b). Das Experiment wird mit einer Geschwindigkeit von 0,9 mm/min geregelt durchgeführt, bis die Klebschicht versagt. Da es bekannt ist, dass Klebschichten mit sehr hohen Festigkeitsverlusten auf Temperatureinwirkung reagieren können [21], werden die modifizierten Zugschertests bei verschiedenen Temperaturen realisiert. Als Beispiel ist das Verhalten bei einer Umgebungstemperatur von 80 °C in Abbildung 2 gezeigt.

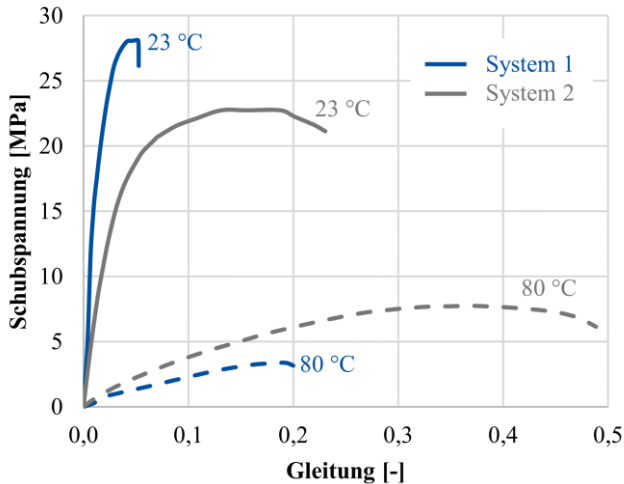


Abb. 2. Schubspannungs-Gleitungs-Kurven für ausgewählte Klebstoffe und Temperaturen

Man erkennt die charakteristische Abnahme der Scherfestigkeit und Steifigkeit mit zunehmender Temperatur. In allen Experimenten konnte ein spezielles Kohäsionsversagen festgestellt werden.

Tabelle 1. Materialeigenschaften für zwei ausgewählte Klebstoffe

Materialeigenschaften	System 1	System 2
E-Modul [MPa]	8812	3858
Zugfestigkeit [MPa]	33,5	23,1
Schubmodul [MPa]	1780	450
Zugscherfestigkeit bei 23 °C	32,6	24,4
Zugscherfestigkeit bei -30 °C	33,3	37,2
Zugscherfestigkeit bei 50 °C	4,8	14,9
Zugscherfestigkeit bei 80 °C	3,4	9,9

Wie aus den Testergebnissen in Tabelle 1 ersichtlich ist, werden zwei Klebstoffe ausgewählt, die sich in ihrem Verhalten unterscheiden. System 2 ermöglicht größere Verformungen, was Vorteile hinsichtlich eines möglichen Ablösens der Lamelle unter Ermüdungsbelastung nahelegt. Darüber hinaus weist System 1 eine höhere Zugfestigkeit und einen höheren Elastizitätsmodul auf und reagiert empfindlicher auf den Temperatureinfluss. Die

Scherfestigkeit nimmt bei 80 °C um etwa 90 % im Vergleich zur Referenzfestigkeit bei Raumtemperatur (23 °C) ab. Bei dieser Temperatur hat System 2 noch eine Scherfestigkeit von etwa 40 % des Ausgangswertes. Beide Klebstoffe sind Zweikomponentensysteme auf Epoxidharzbasis.

Da für die Rissanierung im Stahlbau mit Hilfe von verklebten CFK-Materialien die Vorspannung der Lamellen vorteilhaft sein kann, ist eine Analyse des Kriechverhaltens unerlässlich. Im Rahmen des Projektes werden die ausgewählten Klebstoffe 1000 h mit 40 % der statischen Scherfestigkeit an der BTU belastet. Dies soll das primäre und sekundäre Kriechen der modifizierten dicken Zugscherproben charakterisieren. Die mittleren Verläufe der Verformungszeitkurven sind in Abbildung 3 für einen Temperaturbereich von -30 °C bis 50 °C gezeigt.

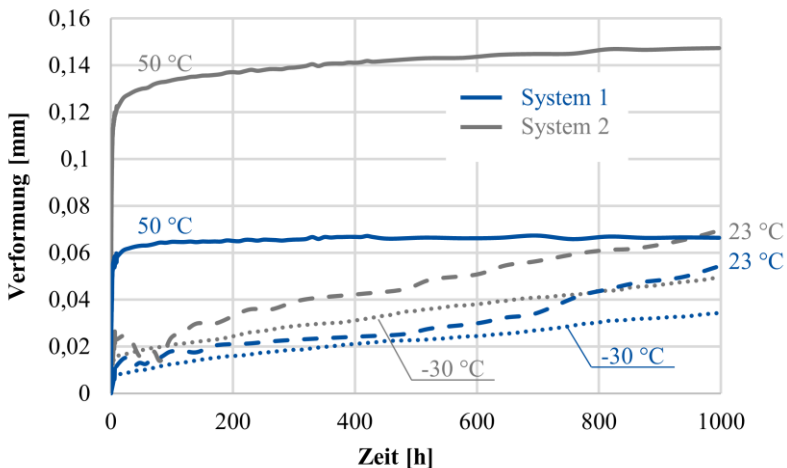


Abb. 3. Ergebnisse der Kriechversuche

Die ermittelten Verläufe spiegeln eine Zunahme der Kriechverformung mit zunehmender Temperatur wider. Die Analyse des Kriechverhaltens bestätigt, dass System 2 auch im Bereich des sekundären Kriechens bei konstanter Kriechgeschwindigkeit ein höheres Verformungsvermögen aufweist. In diesem Bereich lösen sich schwache und starke Molekülbindungen, wobei sich nach einer molekularen Verschiebung neue intermolekulare Kräfte ausbilden können.

Die Untersuchungen zum Materialverhalten zeigen die Dringlichkeit für die genaue Definition der Anwendungsbedingungen. Um Stahlkonstruktionen mit aufgeklebten Bauteilen zu verstärken, ist es notwendig, das Verbundverhalten einschätzen zu können und den Temperaturbereich vorherzusa-

gen. Diese Informationen sind mindestens erforderlich, um eine geeignete Materialkombination auszuwählen.

2.2 Rissanierung und Prüfkörperherstellung

Um die Effizienz von Sanierungsmaßnahmen mit aufgeklebten CFK-Lamellen im Stahlbau zu untersuchen, werden experimentelle Untersuchungen an CT-Proben (compact tension) an der BTU durchgeführt, die üblicherweise zur Bestimmung der Bruchzähigkeit nach DIN EN ISO 12737 verwendet werden. Anbohren der Risspitze, Reparaturschweißen und Aufkleben von vorgespannten und nicht vorgespannten CFK-Lamellen sowie Kombinationen dieser Verfahren werden dabei berücksichtigt. Abbildung 4 zeigt die Geometrie des Prüfkörpers und die Schritte der etablierten Verfahren, wie sie im Projekt realisiert wurden.

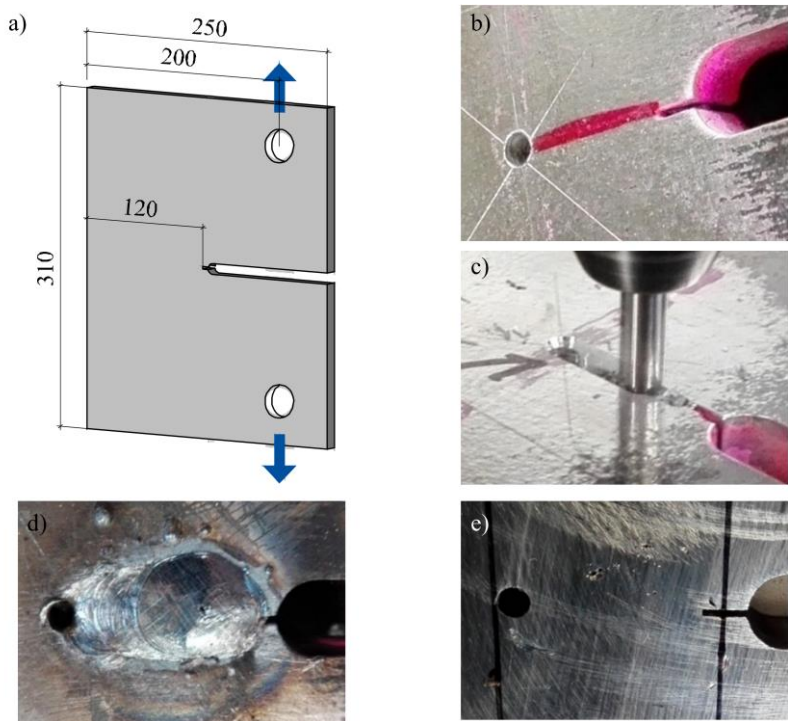


Abb. 4. a) CT-Probe; b) Anbohren der Risspitze (Durchmesser: 4 mm); c) Ausfräsen des Risses (X-förmig); d) Reparaturschweißen (Lichtbogenschweißen); e) Abschleifen der Oberfläche

Für die Verfahren, bei denen CFK-Lamellen verwendet werden, ist zusätzlich eine Oberflächenvorbehandlung durch Strahlen der Stahlprüfkörper erforderlich. Somit kann die Haftung der Klebschicht wesentlich verbessert werden. Vor dem Fügeprozess sollten auch die Oberflächen der Lamellen und der CT-Probe gründlich mit Aceton von Fetten und anderen Verunreinigungen befreit werden. Um eine Klebschichtdicke von 1 mm zu realisieren, werden Glasperlen mit dem entsprechenden Durchmesser in die aufgebraute Klebstoffraupe eingestreut. Anschließend wird die vorbereitete Lamelle aufgetragen und der Prüfkörper härtet 7 Tage bei Raumtemperatur ($23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ und relative Luftfeuchtigkeit $65\% \pm 4\%$) aus. Wird die Lamelle außerdem vorgespannt, kommt ein speziell für diesen Zweck im Rahmen des Projekts am KIT in Karlsruhe entwickeltes Vorspanngerät zum Einsatz. Es besteht aus einer Unterkonstruktion aus einem U240-Profil (S355), festen Verankerungspunkten und beweglichen Einspannbacken (siehe Abbildung 5).

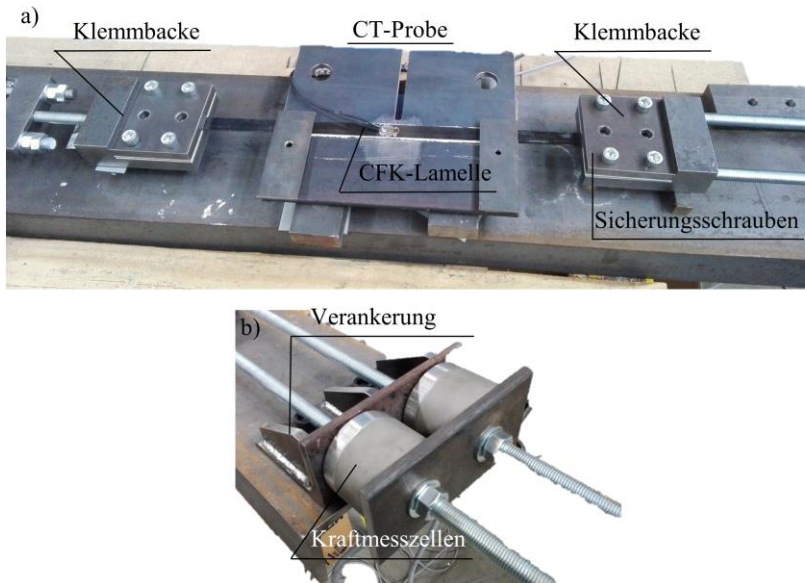


Abb. 5. a) Vorspanntisch mit CT-Probe; b) Detail der Verankerung im Vorspannbereich

Vor dem Vorspannen wird die Lamelle in die Klemmbacken einglegt. Um ein Verrutschen der glatten CFK-Lamellen zu verhindern, werden gestrahlte Aluminiumplatten eingesetzt, die einen höheren Reibungskoeffizienten und eine gleichmäßigere Anpresskraftverteilung bieten. Nach dem Ausrichten

von Prüfkörper und Klemmbacken, wird die Lamelle durch Anziehen der Sicherungsschrauben an den Klemmbacken fixiert. Ein System aus Gewindestangen, Muttern und Verbindungsstücken verbindet die Klemmbacken und die Verankerung miteinander. Die Vorspannung erfolgt schließlich durch Anziehen der Muttern an der festen Verankerung des Vorspanntisches (Abbildung 5b). Zur korrekten Einstellung der erforderlichen Vorspannkraft werden über die Aushärtezeit (7 Tage) kontinuierlich Kraftmessungen an der Verankerung und Dehnungsmessungen in der Lamellenmitte durchgeführt. Die Prüfkörper, welche mit System 1 geklebt werden, werden mit 5 kN, System 2 mit 3 kN, vorgespannt. Unmittelbar vor der Versuchsdurchführung und der Entspannung der Lamelle werden, wie in Abbildung 5 gezeigt, Verankerungsplatten an den Lamellenenden angebracht (im Bild nur aufgelegt und nicht fixiert).

Während des Aushärtens konnte kein Vorspannungsverlust registriert werden, was bedeutet, dass die Vorspanneinrichtung keine Nachgiebigkeit für den ausgewählten Kraftbereich aufweist. Von besonderem Interesse ist, ob die Vorspannung der Lamelle durch Verformungen der Klebeschicht oder des Prüfkörpers nach dem Entspannen verringert wird. Um dies zu untersuchen, werden die Spannungen auf der Lamellenoberfläche während der Entspannung und einige Minuten danach aufgezeichnet. Bei allen Probekörpern ist eine Abnahme der Lamellenvorspannung zu beobachten. Abbildung 6a zeigt die mittleren zeitlichen Vorspannungskurven für die verwendeten Klebstoffe. Die Bestimmung der Vorspannkraft in der Lamelle für die Darstellung in Abbildung 6 basiert auf den gemessenen Dehnungen in der Mitte des Prüfkörpers. Positiv zu werten, ist die Bildung eines Vorspannkraftplateaus nach dem Ende der Relaxationsphase. Es ist ersichtlich, dass die Verwendung von System 2 zu größeren Vorspannungskraftverlusten führt (siehe Abbildung 6b), was aufgrund der in Tabelle 1 gezeigten geringeren Steifigkeit verständlich ist. Dieser Effekt wird mit dem Kriechen der Klebschicht überlagert. Wie in Abbildung 3 gezeigt, treten innerhalb von 7 Tagen (168 Stunden) große Kriechverformungen auf. Aufgrund des Kriechverhaltens kann im Anwendungsfall davon ausgegangen werden, dass sich die Vorspannkraft über die Lebensdauer noch weiter verringert, als dies im Kurzzeitversuch gezeigt werden kann.

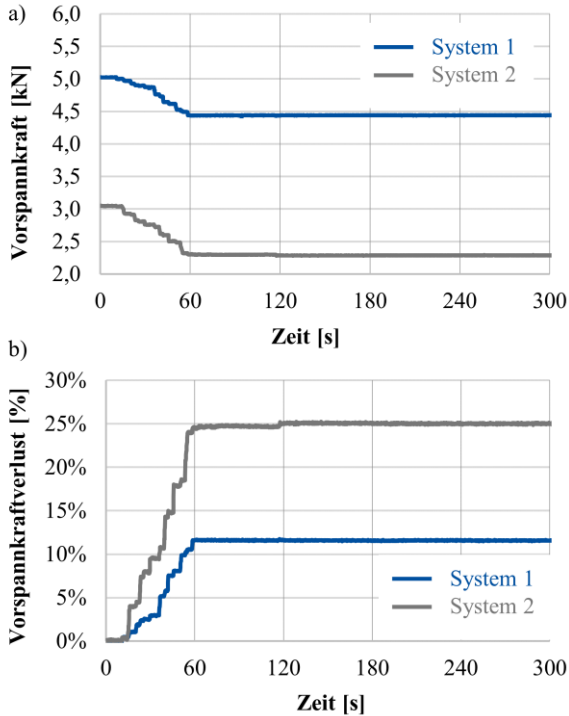


Abb. 6. a) Entwicklung der Vorspannkraft der CFK-Lamellen während der Entspannung;
 b) Vorspannkraftverlust während der Entspannungsphase

2.3 Experimentelle Untersuchungen

Ziel der experimentellen Untersuchungen an CT-Proben ist es, verschiedene Reparaturmethoden zu vergleichen und die Wirksamkeit von geklebten CFK-Lamellen zu bestimmen. Die Tests werden in drei Phasen durchgeführt: In der ersten Phase wird der ungeschädigte Prüfkörper mit einer Frequenz von 14 Hz, einem Spannungsverhältnis von $R = 0,5$ und einer Kraftamplitude von 10 kN belastet, bis sich ein 20 mm langer Riss bildet. Die zweite Phase umfasst die Durchführung der oben beschriebenen Rissreparaturmaßnahmen. Darauf folgt eine zyklische Belastung des sanierten Probekörpers unter den genannten Testbedingungen, bis der Riss auf eine Gesamtlänge von 40 mm angewachsen ist. Während des Versuches werden Maschinenkraft, Verformung und Rissausbreitung durch Rissmesssensoren aufgezeichnet. Bei allen Probekörpern, die mit einer aufgeklebten CFK-Lamelle versehen sind, werden die Dehnungen in der Lamellenmitte kontinuierlich registriert. Die Rissausbreitung für die vorgestellten Reparaturver-

fahren und Kombinationen dieser sind den Abbildungen 7 bis 9 zu entnehmen. Die Kurven spiegeln nur die Testphase 3 wider, weshalb die Rissausbreitung zwischen 20 mm und 40 mm dargestellt ist. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse für die Tests, bei denen kein Anbohren der Risssspitze erfolgte.

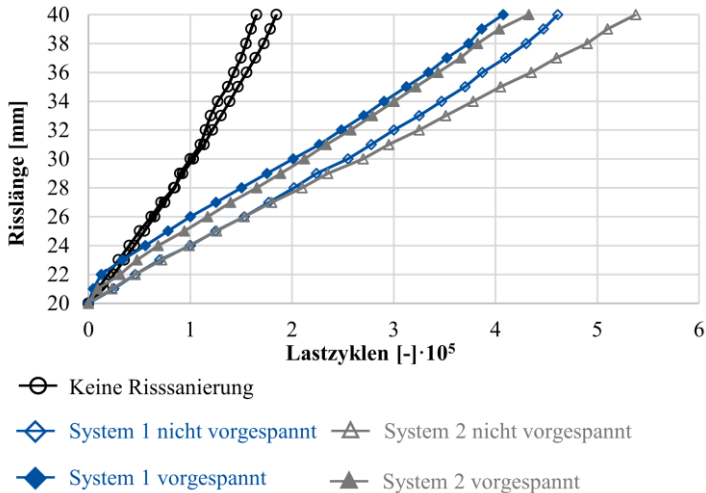


Abb. 7. Rissfortschritt der Versuchsserie ohne Anbohren der Risssspitze

Im Vergleich zu den Referenzversuchen zeigt sich allein aufgrund der "Pflaster"-Wirkung ein positiver Effekt, wobei der Einfluss der Klebstoffformulierung nachrangig zu sein scheint. Die Restlebensdauer kann um 180 % durch das Aufkleben nicht vorgespannter CFK-Lamellen erhöht werden. Die Vorspannung der Lamellen führt jedoch zu einer leichten Abnahme der ertragbaren Lastzyklen. Dies ist durch die Ausführung einer einseitigen Verstärkung zu begründen. Bei der Vorspannung wird nur auf einer Seite der 10 mm starken Stahlplatte eine Zugkraft eingeleitet, die eine Vorkrümmung des Prüfkörpers verursacht. Wenn die Probe anschließend in Längsrichtung belastet wird, führen die Verformungen zu einem sekundären Biegemoment.

Wird die Risssspitze zusätzlich angebohrt, ergeben sich die in Abbildung 8 gezeigten Rissfortschrittskurven. Der Sprung der Verläufe zwischen 20 mm und 22 mm ergibt sich aus der Geometrie der Bohrung mit einem Durchmesser von 4 mm und wird in Abbildung 9 erläutert. Um die Wirksamkeit des Anbohrens der Risssspitze zu quantifizieren, wird die Risslängenausbreitung ohne weitere Maßnahmen mit den Referenztests verglichen. Im Vergleich zu zusätzlich aufgeklebten Lamellen ist die Verlängerung der Restle-

bensdauer gering (nur 60%). Die Anwendung einer vorgespannten Lamelle führt zu einer weiteren Erhöhung der Anzahl der ertragbaren Zyklen um etwa 300 % bis zu einer Gesamtrisslänge von 40 mm.

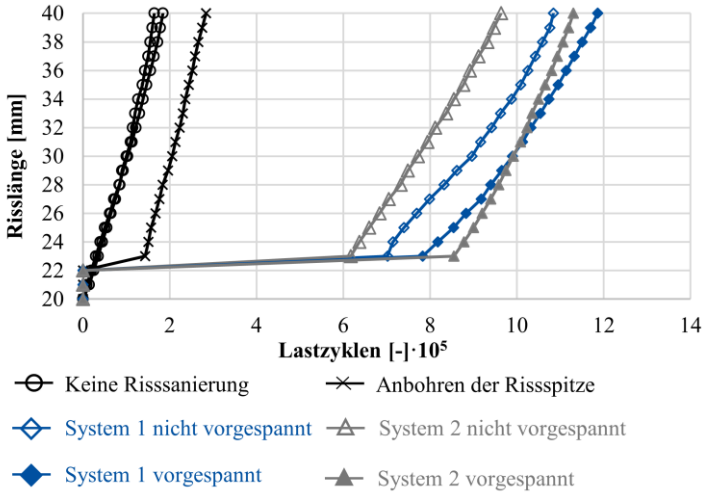


Abb. 8. Rissfortschritt der Versuchsserie mit Anbohren der Rissspitze

Bei diesen Versuchen ist kein negativer Einfluss der einseitigen Vorspannung erkennbar, der auf die Rissinitiierung am Bohrloch zurückzuführen ist. Dadurch wird die Belastung im Bereich der Lamelle gleichmäßiger verteilt als ohne Anbohren. Um dieses Phänomen genauer zu untersuchen, sind weitere Experimente erforderlich.

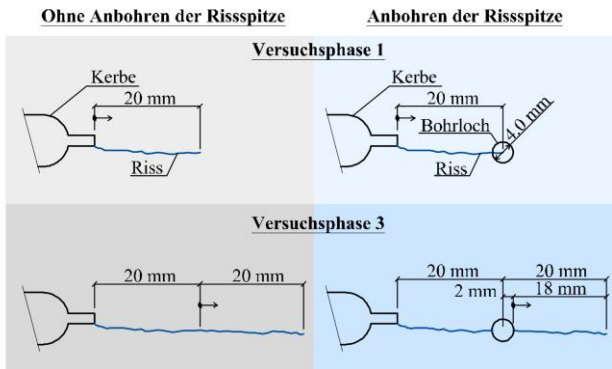


Abb. 9. Schematische Darstellung des Rissfortschrittes ohne und mit Anbohren der Rissspitze.

In Abbildung 10 wird das Reparaturschweißen (mit angebohrter Rissspitze) mit den Verfahren mit zusätzlich aufgeklebten CFK-Lamellen verglichen.

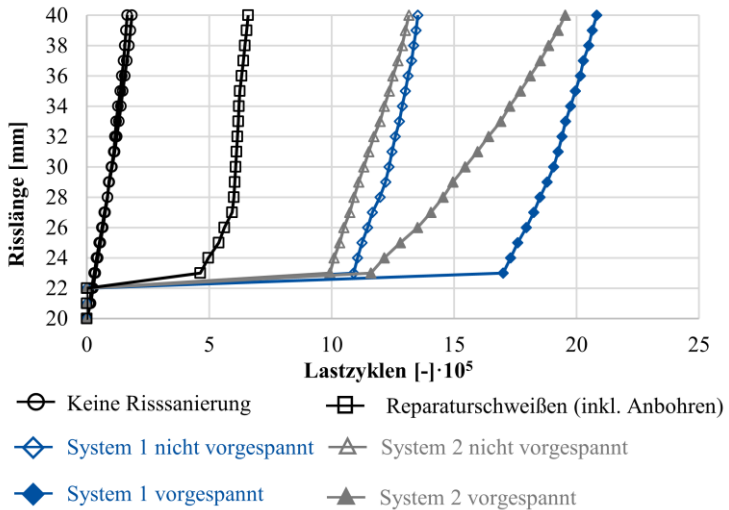


Abb. 10. Rissfortschritt der Versuchsserie mit Reparaturschweißen (inkl. Anbohren der Rissspitze)

Auch hier kann das große Potenzial der innovativen Ertüchtigungstechnologie hervorgehoben werden. Das Aufbringen der Vorspannkraft führt zu einer um 50 % höheren Restlebensdauer im Vergleich zur nicht vorgespannten Variante. In Kombination mit dem Reparaturschweißen ist die Vorspannung aufgrund der Steifigkeit der Schweißnaht besonders effektiv. Wenn die Rissspitze angebohrt wird (ohne Reparaturschweißen), ermöglicht die Vorspannung eine Erhöhung der Restlebensdauer von 9 % für System 1 - 17 % für System 2 - im Vergleich zur nicht vorgespannten Verstärkung. Zum Vergleich aller Reparaturmaßnahmen und möglichen Kombinationen sind in Abbildung 11 die experimentell bestimmten Zyklen, bis zu einer Gesamtrisslänge von 40 mm, dargestellt.

In allen Untersuchungen zeigt sich der positive Effekt von aufgeklebten Lamellen deutlich. Wenn das zu sanierende Bauteil empfindlich auf eine Vorkrümmung reagiert, sollte eine doppelseitige Verstärkung vorgesehen werden. Ist dies aus konstruktiven Gründen nicht möglich, sollte zusätzlich das Reparaturschweißen ausgeführt werden. Bei erhöhten Anforderungen an die Restlebensdauer von Stahlkonstruktionen können die Reparaturmaßnahmen sehr effektiv miteinander kombiniert werden.

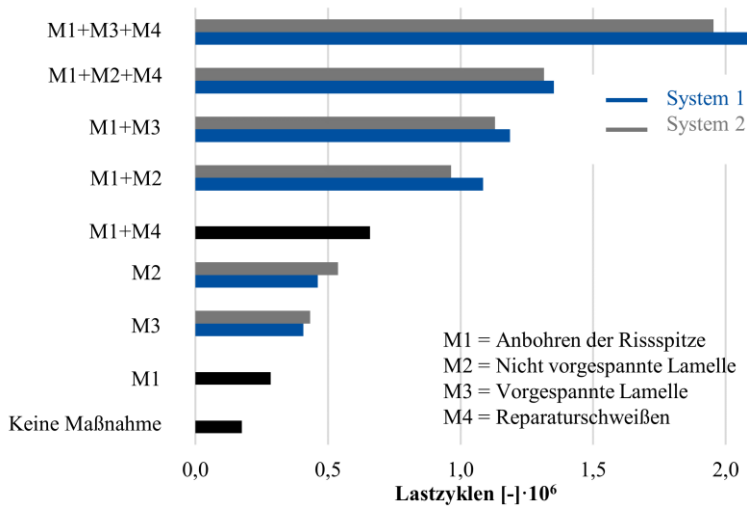


Abb. 11. Vergleich unterschiedlicher Reparaturmaßnahmen

2.4 Numerische Simulation

Ausgewählte Experimente werden im Projekt an der BTU numerisch simuliert. Dafür wird die erweiterte Finite-Elemente-Methode (XFEM) mit der Software ABAQUS® verwendet. Um die erneute Netzdefinition nach dem Anriss zu vermeiden, wird eine netzunabhängige Modellierung für die Bruchmechanik angewendet. Für das Modell werden C3D8-Elemente in der vorhergesagten Risszone und teilweise C3D6-Elemente für die einfache Unterteilung des restlichen Bereiches verwendet. Die Elementgröße im Bereich des erwarteten Risses wird dabei entsprechend klein gewählt (hier: 0,5 mm). Abbildung 12 zeigt das Modell mit dem Netz für die Simulation eines Versuchs mit aufgeklebten CFK-Lamellen.

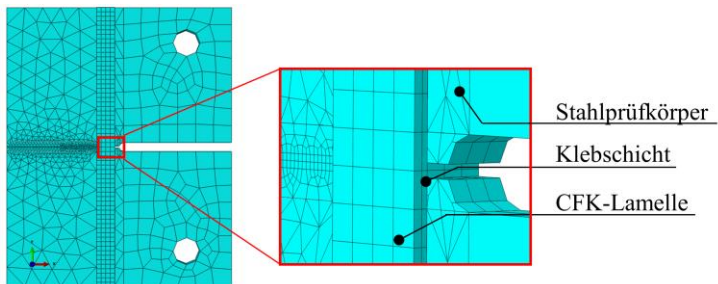


Abb. 12. XFE-Modell mit Detail der Kerbe

Die zugewiesenen Materialeigenschaften basieren auf eigenen experimentellen Untersuchungen an CFK-Lamellen und den zuvor beschriebenen Versuchen an Hantelproben. Der Kontakt zwischen den einzelnen Komponenten wird als quasi-starr (Tie) angenommen, wobei die Stahloberfläche als Master- und die Klebschicht als Slave-Oberfläche definiert werden. Modellierung und Simulation erfolgen in drei Schritten: Im ersten Schritt wird der Ort der Rissinitiierung manuell festgelegt. Dies ist hier aufgrund der einfachen Geometrie ohne weiteres möglich. Die Definition des Risswachstums erfolgt im zweiten Schritt unter Bezugnahme auf das Pariser Gesetz. Die Materialkonstanten für die Rissinitiierung und des Risswachstums werden auf Basis der vorherigen experimentellen Untersuchung mit $c_1 = 1,8 \cdot 10^5$, $c_2 = -0,3$, $c_3 = 1,6 \cdot 10^{-6}$ und $c_4 = 3,6$ angenommen und anhand der Referenzversuche ohne Reparaturmaßnahmen kalibriert. Es konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment erreicht werden (siehe Abbildung 13). Im letzten Schritt wird die kumulative Ermüdung simuliert. Da die Simulation der einzelnen Versuchsperioden (static, general) zu sehr langen Rechenzeiten führen würde, wird eine Fourier-Reihen-Annäherung mit der zeitlichen Integration des Materialverhaltens (direct, cyclic) kombiniert. Die konvergierte Lösung für die zyklische Belastung kann unter Verwendung einer modifizierten Newton-Methode iterativ erhalten werden. Dazu wird die Periodendauer aus den Experimenten verwendet und das Zeitinkrement für die Approximation pro Periode auf $1/10$ festgelegt. Um die Simulation zu beschleunigen, wird der Schadensfortschritt extrapoliert. Jedes Inkrement extrapoliert den aktuellen beschädigten Zustand im Material über viele Zyklen hinweg in einen neuen beschädigten Zustand, nachdem sich der aktuelle Lastzyklus stabilisiert hat. In Abbildung 13 werden die Simulationsergebnisse für nicht vorgespannte CFK-Lamellen (ohne weitere Reparaturmaßnahmen) mit den Testergebnissen der dritten Versuchsphase verglichen. Wie aus den Rissfortschrittskurven ersichtlich wird, unterschätzt die Simulation die Restlebensdauer der sanierten CT-Probe. Im Falle von System 1 ist der Unterschied relativ klein: 10 %. Unter der Annahme von System 2 beträgt die Differenz der erreichten Zyklen bis zum Abbruchkriterium jedoch etwa 35 %. Inwieweit die Abweichungen charakteristisch sind, kann nicht anhand des aktuellen Wissensstandes vorausgesagt werden. Weitere experimentelle und numerische Untersuchungen sind erforderlich. Es ist jedoch ersichtlich, dass die Definition der Klebschicht auf Grundlage der Testergebnisse der Hantelproben nicht ausreichend ist. Hier wird die Querdehnungsbehinderung durch die steifen Füge-teile vernachlässigt.

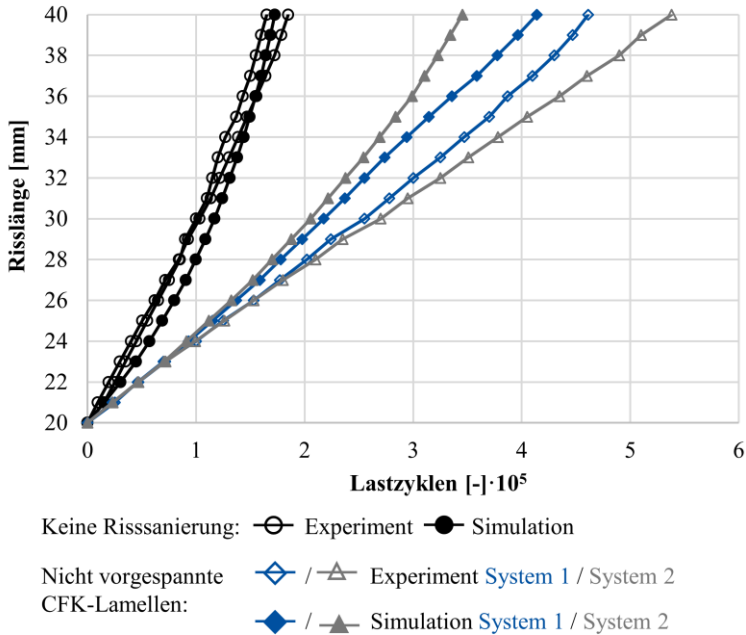


Abb. 13. Rissfortschritt – Vergleich von Simulation und ausgewählten Versuchsergebnissen

3 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Während im Betonbau die Verstärkung mit CFK-Materialien Stand der Technik ist, steht man dieser Methode im Stahlbau zurückhaltend gegenüber. In den vorgestellten experimentellen Untersuchungen konnte das große Potenzial des innovativen Sanierungsverfahrens mit aufgeklebten CFK-Lamellen von ermüdungsgeschädigten Stahlkonstruktionen durch Versuche an CT-Proben demonstriert werden. Durch einfaches "Überkleben" eines Ermüdungsrissses mit nicht vorgespannten CFK-Lamellen kann die Restlebensdauer um 180 % erhöht werden. In Kombination mit etablierten Reparaturmethoden kann die Anzahl der ertragbaren Zyklen je nach verwendetem Klebstoff um den Faktor 11 bis 12 erhöht werden. Eine Abhängigkeit der Wirksamkeit von der Klebstoffformulierung ist zum Teil erkennbar. Dies zeigt sich bereits im Materialverhalten, das an Kleinteilproben ermittelt werden kann. In Untersuchungen an zentrisch gekerbten Proben konnte dieser Einfluss bestätigt werden [22]. In einigen Versuchen wird ein negativer Einfluss der einseitigen Vorspannung von CT-Prüfkörpern

registriert. Laufende Untersuchungen an zentrisch gekerbten Blechen am KIT bestätigen diese Annahme. Gegenwärtig werden auch Analysen zum Einfluss des Kriechens auf die Entwicklung der Vorspannkraft in Abhängigkeit von der Temperatur durchgeführt, da mit zunehmender Temperatur eine Zunahme der Kriechverformungen festgestellt werden konnte. Um die entwickelte Verstärkungsmaßnahme in einer baupraktischen Anwendung zu untersuchen, wird eine bestehende Brückenkonstruktion lokal verstärkt und Deformationsmessungen durchgeführt. Darüber hinaus soll das numerische Modell weiter verbessert und validiert werden.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Als Alternative zu klassischen Reparaturmaßnahmen ermüdungsgeschädigter Stahlkonstruktionen bieten sich aufgeklebte CFK-Lamellen an. Auf diese Weise können Nachteile der etablierten Verfahren umgangen werden. Gegenüber verschraubten Verstärkungsmaßnahmen wird eine Querschnittschwächung durch die Schraubenlöcher vermieden. Wärmeinduzierte Eigenspannungen und Verzüge, wie sie beim Reparaturschweißen üblicherweise auftreten, können ebenfalls ausgeschlossen werden. Diese Nachteile stellen aufgrund der Kerbwirkung eine Schwachstelle bei zyklischer Belastung dar. Die Wirksamkeit von aufklebten CFK-Lamellen wird in einem nationalen Forschungsprojekt untersucht. In diesem Beitrag werden ausgewählte Ergebnisse vorgestellt. Zur Charakterisierung der Materialien werden Versuche an Proben im kleinen Maßstab durchgeführt. Mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen an CT-Proben wird ein Vergleich mit etablierten Methoden wie Anbohren der Rissspitze und Reparaturschweißen realisiert. Anhand des Rissfortschritts kann auf das große Potenzial der Sanierungsmethode mit CFK-Lamellen geschlossen werden. Durch das Vorspannen der Lamellen kann die Restlebensdauer generell weiter erhöht werden. Es ist jedoch zu beachten, dass bei einseitiger Vorspannung eine Vorkrümmung des Prüfkörpers und während der Belastung ein sekundäres Biegemoment auftreten können. Die Kombination von aufgeklebten CFK-Lamellen mit etablierten Methoden kann als besonders effektiv bezeichnet werden.

5 DANKSAGUNG

Das IGF-Forschungsvorhaben (IGF-Nr. 19032 BG/ DVS-Nr. 09.072) der "Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf" wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Ener-

gie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Projektbearbeitung erfolgt in Kooperation mit dem KIT Stahl- und Leichtbau, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine und dem Institut und Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen.

LITERATUR

- [1] Hagl, A., „Synthese aus Glas und Stahl: Die Herz-Jesu-Kirche München“, Stahlbau, Vol. 71, Nr. 7, S. 498-506, 2002.
- [2] Pasternak, H., Meinz, J., „Versuche zu geklebten Verstärkungen im Stahlhochbau“, Bauingenieur, Vol. 81, Nr. 5, S. 212-217, 2006.
- [3] Feldmann, M., Völling, B., Geßler, A., Wellershof, F., Geiß, P.L., Wagner A., „Kleben im Stahlbau“, Stahlbau, Vol. 75, Nr. 10, S. 834-846, 2006.
- [4] Feldmann, M., Abeln, B., Baitinger, M., „Analysis of bonded hybrid steel-glass-beams by small scale tests“, *Challenging Glass 2 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, Delft, Netherlands, 2010.
- [5] Pasternak, H., Meinz, J. et al., *Neue Konstruktionen durch Einsatz von Klebverbindungen im Stahlbau*, Forschungsbericht für die Praxis P654, AiF-Projekt-Nr. 169 ZBG, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Verlags- und Vertriebsgesellschaft, Düsseldorf, 2008.
- [6] Entwicklung eines Eurocode-basierten Bemessungskonzepts für Klebverbindungen im Stahlbau (in Anlehnung an DIN EN 1990), IGF Projekt-Nr. 16494 BG. 05.2010 - 04.2012, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., im Druck.
- [7] Untersuchungen zum Tragverhalten und der Lebensdauer von Klebverbindungen im Stahlbau unter zyklischer Belastung – LebKleb, IGF Projekt-Nr. 18161 BG. 04.2014 - 09.2017, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., im Druck.
- [8] Stojkovic, N., Pasternak, H., „Fatigue of adhesively bonded structural elements - residual strength models“, *14th International Scientific Conference VSU 2014*, Sofia, Bulgaria, 2014.
- [9] Systematische Untersuchungen zur Verstärkung von Stahlkonstruktionen mit kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) – STAKOK. IGF Projekt-Nr. 17700 BG. 03.2013 - 09.2015, Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, 2016.
- [10] difu Deutsches Institut für Urbanistik, „Infrastruktur: Viele kommunale Straßenbrücken müssen bis 2030 neu gebaut werden“, Medieninformation vom 30. September 2013. <http://www.difu.de/presse/2013-09-30/infrastruktur-viele-kommunale-strassenbruecken-muessen-bis.html>.
- [11] Sedlacek, G., Paschen, M., Feldmann, M., Geßler, A., Möller, S., Steinauer, B., Scharnigg, K., „Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berück-

- sichtigung des Belagssystems, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 76. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2011.
- [12] Günther, H.-P., Kuhlmann, U., „Nachweiskonzepte zur Bemessung ermüdungsbeanspruchter Bauteile unter Berücksichtigung von Schweißnahtnachbehandlungsverfahren durch höherfrequentes Hämmern“, *Stahlbau*, Vol. 78, Nr. 9, S. 613-621, 2009.
- [13] Hanswille, G., Piel, W., Gutachterliche Stellungnahme - Sanierung der Schäden an der orthotropen Fahrbahnplatte der Stabbogenbrücke über den Rhein-Herne Kanal im Zuge der A42 - Stellungnahme hinsichtlich zukünftiger Schweißarbeiten unter Verkehr - Bw.-Nr. 4407510A. Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen, 2007.
- [14] Lüddecke, F., Ein Beitrag zur Ertüchtigung bestehender Stahltragwerke unter besonderer Berücksichtigung des Fügeverfahrens Schweißen, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2018.
- [15] Dehn, F., *Faserverbundwerkstoffe*, 1. Auflage, Berlin: Bauwerk (Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft der Universität Leipzig und der HTWK Leipzig), 2005.
- [16] Hollaway, L.C., Cadei, J., “Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 4, Nr. 2, S. 131-148, 2002.
- [17] Shaat, A., Schnerch, D., Fam, A., Rizkalla, S., “Retrofit of steel structures using Fiber-Reinforced Polymers (FRP): State-of-the-art”, *Transportation research board (TRB) annual meeting*, 2004.
- [18] Jiao, H., Mashiri, F., Zhao, X.-L., “A comparative study on fatigue behaviour of steel beams retrofitted with welding, pultruded CFRP plates and wet layup CFRP sheets”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 59, S. 144-152, 2012.
- [19] Cadei, J. M. C., Stratford, T. J., Hollaway, L. C., Duckett, W. G., *Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers*, Design Guide. CIRIA, London, 2004.
- [20] Meschut, G., Teutenberg, D., Wünsche, M., „Prüfkonzept für geklebte Stahl/CFK-Strukturen“, *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, Vol. 59, Nr. 3, S. 16-21, 2015.
- [21] Ciupack, Y., Pasternak, H., Mette, C., Stammen, E., Dilger, K., “Adhesive bonding in steel construction - Challenge and innovation”, *Procedia Engineering*, Vol. 172, S. 186 – 193, 2017.
- [22] Ciupack, Y., Ledecy, L., Pasternak, H., Geßler, A., Feldmann, M., Kasper, Y., Albiez, M., Ummenhofer T., “Application of Fibre Composite Materials for the Rehabilitation of Fatigue Damage in Steel Structures”, *the 7th international conference on structural engineering, mechanics and computation*, Kapstadt, Südafrika, 2019, Paper eingereicht.