



Kurzbericht

Praxisgerechte Bemessungsansätze für das wirtschaftliche Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung

Projektleiter/Sachbearbeiter: Udo Wiens (DAfStb)
Konrad Zilch; Roland Niedermeier; Wolfgang Finckh (TUM)
Harald Budelmann; Thorsten Leusmann (iBMB)

Lehrstuhl/Institut: **Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb)**
Budapester Straße 31, 10787 Berlin

Technische Universität München (TUM)
Institut für Baustoffe und Konstruktion
Lehrstuhl für Massivbau
80290 München

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig

Datum: **30.06.2010**

Das Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumwesen gefördert.

(Aktenzeichen: Z6- 10.08.18.7-08.23/ II 2 –F20.08.032)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor

1 Problemstellung

Etwa 60% des gesamten Bauvolumens in Deutschland entfallen auf das Bauen im Bestand. Das nachträgliche Verstärken von Bauteilen mit geklebter Bewehrung ist häufig die Voraussetzung für die Umnutzungsfähigkeit bestehender Gebäude und leistet als materialsparendes Verfahren einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Nutzung der vorhandenen Bausubstanz. Für Betonbauwerke steht mit der geklebten Bewehrung ein bewährtes Verfahren zur Verfügung, welches eine nachträgliche Erhöhung bzw. Wiederherstellung der Tragfähigkeit sowie eine Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit ermöglicht. Als zusätzliche Bewehrung werden Stahllaschen und Faserverbundwerkstoffe in Form von Lamellen und Gelegen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen in Verbindung mit Epoxidharzklebern eingesetzt.

Derzeit existieren für die Verstärkung mit geklebter Bewehrung für die Bemessungsfälle Biegung und Querkraft bauaufsichtliche Zulassungen, für die in Deutschland entsprechend der Anwendungsbereiche bereits Erfahrungen vorliegen. Diese Zulassungen beruhen im Wesentlichen auf Versuchen unter idealisierten Bedingungen, deren Aussagefähigkeit begrenzt und deren Übertragbarkeit auf andere Situationen, insbesondere auf die Verhältnisse an großformatigen Bauteilen, nicht immer sicher ist.

Die heute verfügbaren Modelle gelten deshalb nur in bestimmten Anwendungsfällen mit eingeschränkten Randbedingungen. So wurden z.B. die ausnutzbare Dehnung der geklebten Bewehrung und der Verstärkungsgrad begrenzt. Ein allgemeingültiges Modell, welches eine breitere Anwendung der Technologie des Verstärkens mit deutlich gesteigerter Effizienz und Wirtschaftlichkeit ermöglichen würde, existiert derzeit noch nicht. Weiterhin sind zusätzliche für die Praxis bedeutsame Anwendungsbereiche nicht erschlossen, die in Deutschland bislang entweder nicht Gegenstand der bauaufsichtlichen Zulassungen sind oder dort nur unzureichend geregelt sind. Dazu gehören die Verstärkung von vorgespannten Bauteilen sowie die Erhöhung der Tragfähigkeit von Bauteilen, die auch einer nicht ruhenden Beanspruchung, z.B. durch Wind oder durch ihre Nutzung (z.B. Kranbahn, befahrbare Parkdecks, Geschossdecken von Lagerhallen mit Staplerbetrieb), ausgesetzt sind.

Voraussetzung für die Erschließung zusätzlicher, durch die Forschung bereits abgebildeter Anwendungsbereiche und Wirtschaftlichkeitspotentiale ist die Aufarbeitung des nationalen und internationalen Kenntnisstandes. Der Erfahrungsbereich wurde vor allem in den letzten Jahren erheblich erweitert, konnte aber bislang nicht in der Gesamtheit ausgewertet und durch ergänzende experimentelle Untersuchungen zu gezielten Fragestellungen, die als Lückenschluss im Hinblick auf die Übertragbarkeit der einzelnen Forschungsergebnisse und Ausweitung der spezifischen Anwendungsbereiche notwendig sind, vervollständigt werden. Der abschließende Arbeitsschritt langjähriger, bislang allerdings weitgehend unkoordinierter Forschungsaktivitäten, der den vorliegenden Kenntnisstand kurzfristig für die Bauwirtschaft in Form von wirtschaftlichen und praxisgerechten Bemessungsansätzen und Ausführungshinweisen nutzbar macht, steht noch aus.

Die Forschung in Deutschland war in den vergangenen Jahren grundlagenorientiert mit der Zielsetzung, das Tragverhalten zunächst auf der Mesoebene isoliert betrachteter Querschnitte oder Trägerabschnitte zu beschreiben und anschließend auf die Makroebene des Bauteils zu übertragen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Grundlagenforschung in allgemein gültigen Bemessungsmodellen erfolgte aber bislang nicht. Im Hinblick auf die Anwendung der bauaufsichtlich zugelassenen Verfahren wurden andererseits einzelne Aspekte des Tragverhaltens in bauaufsichtlichen Forschungsvorhaben unter ungünstigen Randbedingungen untersucht, die angeregt vom DIBt aus Mitteln der ARGEBAU finanziert wurden. Auf der Grundlage der Ergebnisse aus diesen Forschungsvorhaben entwickelte das DIBt für die bauaufsichtlichen Zulassungen ein Bemessungsverfahren, das in vielen Fällen zu einer Unterschätzung der Verbundtragfähigkeit führt und die Anwendungsmöglichkeiten der Verstärkungsverfahren stark einschränkt bzw. unwirtschaftlich macht. Die sowohl im Bereich der Grundlagenforschung als auch der Forschung im bauaufsichtlichen Bereich bereits entwickelten Bemessungsmodelle stellen jedoch eine gute Ausgangsbasis für ergänzende Untersuchungen im Rahmen dieses Verbundprojektes dar.

Die durchgeführten Untersuchungen wurden in drei Arbeitspaketen gebündelt, die in Kooperation der beteiligten Forschungseinrichtungen durchgeführt wurden. Die Arbeitspakete widmen sich den folgenden Bestandteilen eines vollständigen Bemessungskonzeptes, die vom Verbundverhalten der geklebten Bewehrung abhängen:

- Arbeitspaket I: Verbundtragfähigkeit unter statischer Belastung
- Arbeitspaket II: Verbundtragfähigkeit unter nicht ruhender Belastung
- Arbeitspaket III: Querkrafttragfähigkeit

2 Untersuchungen

2.1 Arbeitspaket I: Verbundtragfähigkeit unter statischer Belastung

Allgemeines

Im konventionellen Stahlbetonbau wird zum Nachweis des Verbundes üblicherweise ein Endverankerungsnachweis durchgeführt, welcher auf Verbundwerten aus Ausziehversuchen basiert. Führt man einen solchen Nachweis in ähnlicher Weise, so können bei Bauteilen mit aufgeklebter Bewehrung nicht die vollen Zugkräfte verankert werden, da ab einer bestimmten Verankerungslänge die Verbundkraft nicht mehr gesteigert werden kann. (Siehe auch Bild 2.1). Aus den Bauteilversuchen geht jedoch hervor, dass deutlich höhere Lamellenkräfte an der Stelle des Momentenmaximums erreicht werden, als allein durch den Endverankerungsnachweis möglich wären. Gerade bei CFK-Lamellen, die eine sehr hohe Zugspannung aufnehmen können, wäre somit die alleinige Betrachtung des Endverankerungsnachweises stark unwirtschaftlich. Die Verbundkraftübertragung muss wie in Bild 2.1 vielmehr an der Stelle stattfinden, an welcher die Kräfte auftreten.

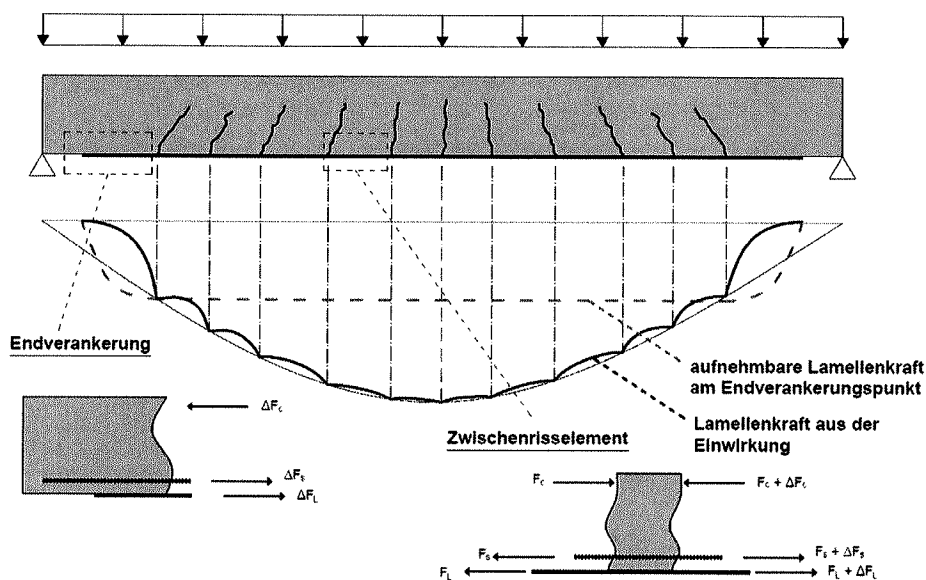


Bild 2.1: Prinzip der Verbundkraftübertragung bei Bauteilen mit aufgeklebten CFK-Lamellen unterteilt in Endverankerung und Zwischenrisselement

Aus diesem Grund werden für eine Nachweisführung zwei Bereiche unterschieden, der Endverankerungsbereich und der restliche Bereich des Bauteils.

Am Endverankerungspunkt müssen die Lamellenkräfte verankert werden, welche sich am auflager-nächsten Biegeriss einstellen. Die aufnehmbaren Verbundkräfte im Endverankerungsbereich werden durch sogenannte idealisierte Endverankerungsversuche bestimmt, bei welchen die aufgeklebte Bewehrung in Längsrichtung abgezogen wird.

Im restlichen Bereich des Bauteils kann die Verbundkraft an Elementen, welche durch Biegerisse getrennt werden, den sogenannten Zwischenrisselementen, übertragen werden. An einem solchen Zwischenrisselement herrschen immer eine Grundlamellenkraft am niedrig beanspruchten Rissufer und diese Grundlamellenkraft mit einer zusätzlichen Kraft am höher beanspruchten Rissufer. Diese zusätzliche Lamellenkraft muss über Verbund ins Bauteil übertragen werden.

Endverankerung

Zur Ermittlung der Verbundenergie der verwendeten Kombination aus Beton, Klebstoff und CFK-Lamellen wurden sechs Verbundversuche an Doppellaschenkörpern durchgeführt.

Als Probekörper dienten sogenannte Doppellaschenkörper, welche beidseitig mit CFK-Lamellen der Abmessungen 50 mm x 1,4 mm verklebt waren.

Da das Verbundverhalten der einbetonierten Bewehrung einen Einfluss auf die Verbundkraftübertragung der CFK-Lamellen am Bauteil hat, wie zum Beispiel auf die Länge der Zwischenrisselemente, wurden im Rahmen des Arbeitspakets I zusätzlich 23 Ausziehversuche an den verwendeten Betonstählen durchgeführt.

Idealisiertes Zwischenrisselement

Zur Ermittlung des Verbundverhaltens am Zwischenrisselement wurden 38 Versuche am idealisierten Zwischenrisselement durchgeführt.

Bei diesen Versuchen wird ein Betonkörper beidseitig mit CFK-Lamellen der Abmessungen 50 mm x 1,4 mm verklebt. An beiden Enden wird so lange mit unterschiedlichen Kräften gezogen, bis es zu einer vollständigen Ablösung der CFK-Lamelle kommt.

In Bild 2.2 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. In der Mitte des Versuchsaufbaus befindet sich der Betonkörper, welcher das Zwischenrisselement darstellen soll und der beidseitig mit CFK-Lamellen verklebt ist.

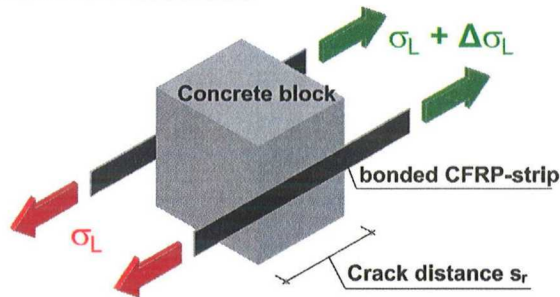


Bild 2.2: Schematischer Aufbau der Versuche am idealisierten Zwischenrisselement

Zwischenrisselement am Bauteil

Zur Bestimmung der Verbundkraftübertragung am Bauteil wurden Dreipunktbiegeversuche an sieben Bauteilen mit einem speziellen Versuchskonzept durchgeführt, so dass mehrere Bereiche geprüft werden konnten. Bei diesem Versuchskonzept, welches in Bild 2.3 dargestellt ist, werden immer verschiedene Bereiche am Träger untersucht, im restlichen Träger wird eine Verbundschädigung der Lamelle durch einen aktiven Anpressdruck verhindert. Nach der Durchführung eines Versuches wurde in dem geprüften Bereich die Lamelle angepresst und in einem anderen Bereich wurde die Anpressvorrichtung abgenommen, um diesen Bereich prüfen zu können. In der Regel konnten so drei bis vier Bereiche pro Bauteil geprüft werden.

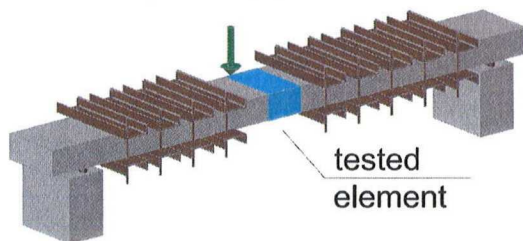


Bild 2.3: Versuchsaufbau der Versuche am Zwischenrisselement am Bauteil

Durch die Messung der Lamellendehnungen kann die Verbundentkopplung beobachtet werden. Ab dem Punkt, wo die Differenz aus den Lamellendehnungen an den beiden Rissufern abfällt, beginnt sich die Lamelle zu entkoppeln. Die Entkopplung zeigt sich aber auch in der Zunahme der Verschiebung zwischen Lamelle und Beton, welche bei den Versuchen durch optische Deformationsmessung bestimmt wurde.

2.2 Arbeitspaket II: Verbundtragfähigkeit unter nicht ruhender Belastung

Die Verbundtragfähigkeit unter nicht ruhender Belastung wurde in Arbeitspaket II in drei unterschiedlichen Versuchen untersucht. Die Schädigung des Verbundes wurde über die Zunahme der Relativverschiebung zwischen Betonkörper und aufgeklebter CFK-Lamelle in Dauerschwingversuchen an ausschließlich mit CFK-Lamellen verstärkten Doppellaschenkörpern untersucht. Ober- und Unterlasten sowie die Betonfestigkeiten wurden variiert. Zur Übertragung der Ergebnisse auf Biegebauteile wurden Versuche an zwei mit CFK-Lamellen bewehrten Platten durchgeführt. Die Zugkraftaufteilung auf Betonstähle und CFK-Lamellen bei einsetzender Schädigung des Lamellenverbundes wurde an gemischt bewehrten Doppellaschenkörpern untersucht.

Die Versuchsergebnisse wurden in einem Goodman-Smith-Diagramm ähnlich Bild 2.4 ausgewertet. Das Diagramm ermöglicht es, die Bereiche zwischen Ober- und Unterlast darzustellen, in denen keine Schädigung stattfindet. Zwischen den Grenzlängen der Oberlast F_L^O und der Unterlast F_L^U lässt sich die

Schwingbreite ablesen, bei der keine Schädigung eintritt. Bei den Ober- und Unterlasten handelt es sich hier um Lamellenkräfte, die am lastzugewandten Ende von Probekörpern oder oberhalb von Rissen auftreten.

Die Grenzlinie der Oberlast wurde zur Abschätzung der Laststufen für das Versuchsprogramm zunächst als Gerade angenommen. In vorangegangenen dynamischen Versuchen wurde festgestellt, dass bei Oberlasten F_L^O im elastischen Bereich und bei voller Schwingbreite mit einem Faktor $R = F_L^U / F_L^O \sim 0,4$ (bei reiner Schwellbeanspruchung mit $F_L^U = 0$) keine Schädigung eintritt. Diese Lastkombination markiert den linken unteren Punkt auf der Geraden im ersten Quadranten von Bild 2.4. Ein weiterer Punkt dieser Gerade ist die maximale Verbundbruchkraft F_{Lb} , die in statischen Versuchen ermittelt wurde. Es wurden Unterlasten F_L^U von 15, 30, 45 und 60% der Verbundbruchkraft F_{Lb} untersucht. Als Schwingbreite wurde zunächst ein geringerer Wert als die in Bild 2.4 dargestellte Differenz zwischen Ober- und Unterlast festgelegt. Trat bei den Untersuchungen keine Schädigung ein, wurde die Schwingbreite erhöht. Die zu untersuchenden Laststufen sind durch gefüllte Punkte in Bild 2.4 dargestellt. Zur Bestimmung der Grenzlinie waren mindestens 2 Versuche erforderlich. Trat auch im 2. Versuch keine Schädigung ein, erfolgte ein 3. Versuch mit erhöhter Oberlast, angedeutet durch offene Punkte in Bild 2.4. Tab. 2.1 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm:

Tab. 2.1: Versuchsprogramm

Serie A - unbewehrte Zug-Druckkörper				
	Laststufe	C 20/25	C 40/50	C 50/60
Statische Versuche	F_{Lb}	x	x	x
Dynamische Versuche	LS A	x	x	x
	LS B	x		
	LS C	x	x	
	LS D	x		x
Serie B - bewehrte Zug-Druckkörper				
	Laststufe	C 20/25		
Dyn. Versuche	LS A	x		
	LS B	x		
Serie C - Plattenversuche				
	Laststufe	C 20/25		
Dyn. Versuche	LS 1	x		
	LS 2	x		

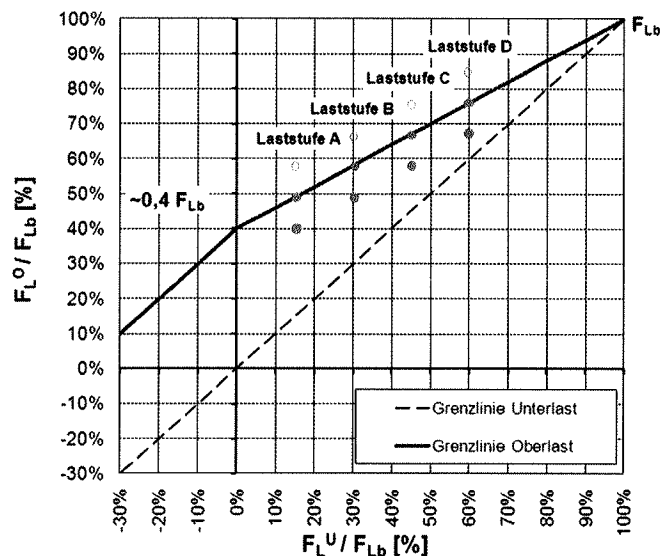


Bild 2.4: Lineares Goodman-Smith-Diagramm mit bezogenen Ober- und Unterlasten

Bild 2.5 zeigt den Aufbau der Versuche an Zug-Druckkörpern. Die Relativverschiebungen wurden mit Wegaufnehmern gemessen. Die Lamellendehnungen wurden mit einer Kette von Dehnmessstreifen untersucht.

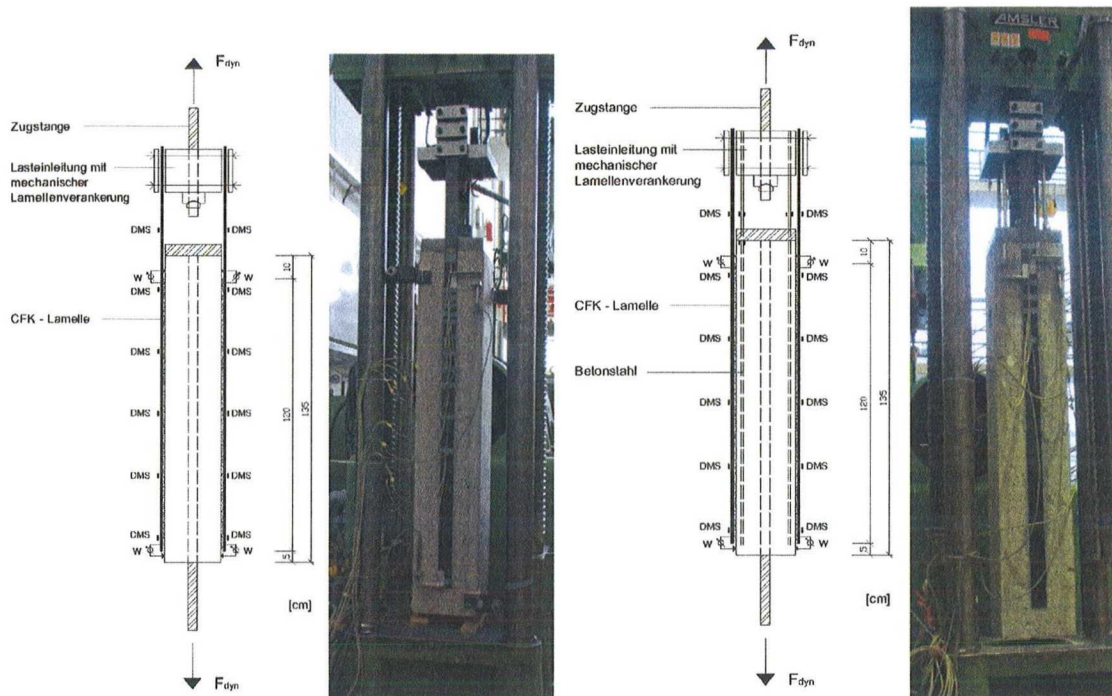


Bild 2.5: Versuchsaufbau für unbewehrte (links) und bewehrte (rechts) Probekörper

Die Platten wurden ohne Bewehrung in der Zugzone hergestellt. Die dynamischen Versuche wurden als Vierpunkt-Biegeversuche durchgeführt. Entkopplungserscheinungen waren im Bereich der Lasteinleitung und an den Auflagern zu erwarten. In diesen Bereichen wurden Sägeschnitte angebracht um das Rissbild vorzugeben. Die Lamellendehnungen wurden über den Sägeschnitten aufgezeichnet. Der Versuchsaufbau ist in Bild 2.6 dargestellt.

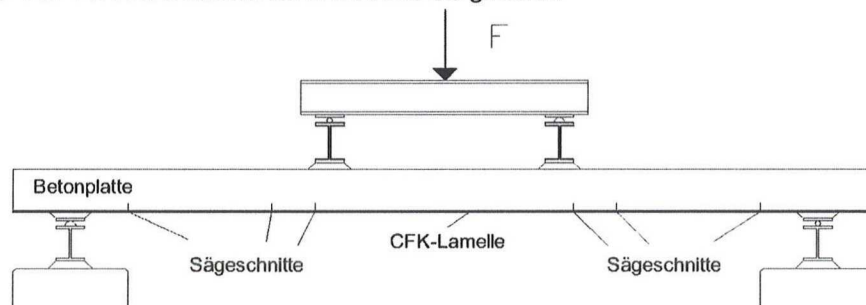


Bild 2.6: Versuchsaufbau für Plattenversuche

2.3 Arbeitspaket III: Querkrafttragfähigkeit

Im Arbeitspaket III wurden Querkraftversuche mit Betonbauteilen, welche durch aufgeklebte und in Schlitzen verklebte CFK-Lamellen auf Biegung verstärkt wurden, durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Betonfestigkeit als auch die Verstärkung variiert. Neben der Biegeverstärkung wurden einige Versuchsbereiche auch mittels aufgeklebten Stahllaschenbügeln auf Querkraft verstärkt. An einem Bauteil wurden immer mindestens zwei Versuche durchgeführt. Bei den Versuchen mit aufgeklebten CFK-Lamellen wurden zwei Betonbalken und eine Platte geprüft, bei den Bauteilen mit in Schlitze verklebten CFK-Lamellen wurden zwei Betonbalken geprüft. Insgesamt konnten elf Querkraftversuche mit dem Versuchsaufbau nach Bild 2.7, bei welchem immer ein Trägerbereich geprüft wurde, durchgeführt werden. Ein Versagen oder eine Vorschädigung des ungeprüften Bereiches wurde durch Stahlprofile, welche mit Gewindestangen verbunden waren und somit als externe Bügel wirkten, verhindert.

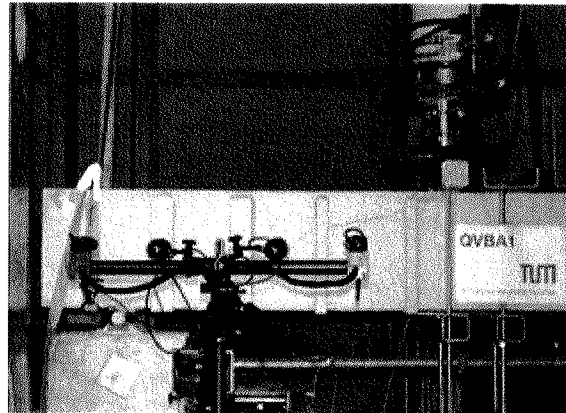
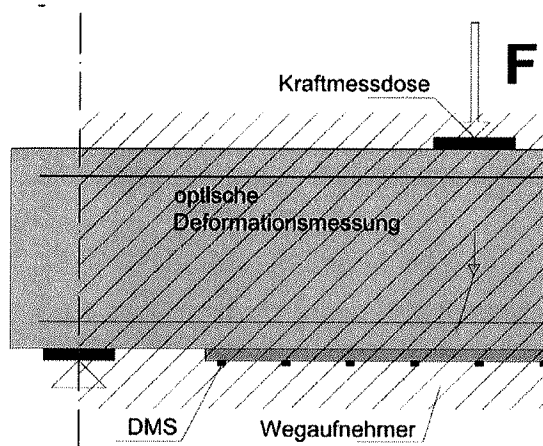


Bild 2.7: Versuchsaufbau für die Querkraftversuche und Darstellung der Messtechnik

3 Ergebnisse

3.1 Arbeitspaket I: Verbundtragfähigkeit unter statischer Belastung

Endverankerung

Aufgrund der Ergebnisse der im Forschungsvorhaben durchgeführten Endverankerungsversuche sowie zahlreicher Versuche, welche in der Vergangenheit an den beteiligten Forschungsstellen bzw. Materialprüfämtern durchgeführt wurden, konnte ein Einfluss des verwendeten Verstärkungsmaterials festgestellt werden. So verhalten sich die CFK-Lamellen aufgrund des höheren Dehnungsniveaus etwas günstiger als die aufgeklebten Stahllaschen. Der Grundwert der Verbundkraftübertragung am Endverankerungspunkt wurde deshalb für CFK-Lamellen und Stahllaschen unterschiedlich angegeben. Bei der Verwendung von Stahllaschen wird empfohlen, das bisherige Modell von Niedermeier beizubehalten, wenn jedoch CFK-Lamellen verwendet werden, sollte das Verbundmodell von Zehetmaier verwendet werden.

Idealisiertes Zwischenrisselement

Durch die Versuche am idealisierten Zwischenrisselement konnte eine Verbundreibung zwischen bereits entkoppelter Fläche und dem Beton festgestellt werden, welche sich aufgrund der Verzahnung der rauen Oberfläche ausbildet. Dieser Effekt wurde dann in Abhängigkeit der Betonfestigkeit ausgewertet und es wurden Mittelwerte und charakteristische Werte für die Reibverbundspannungen ermittelt. Die so ermittelten Werte wurden mit den Versuchswerten von Thorenfeldt und Schilde, welche einen ähnlichen Versuchsaufbau wählten, verglichen. Die in den hier durchgeführten Versuchen auftretenden Reibverbundspannungen lagen teilweise deutlich unterhalb der Werte aus den anderen beiden Versuchsserien, was auf die hier verwendete Betonkörnung zurückzuführen ist. Damit stellt der hier ermittelte Wert für die Reibverbundspannung einen unteren, auf der sicheren Seite liegenden Grenzwert da.

Bauteilspezifische Effekte

Bei den Versuchen am Zwischenrisselement am Bauteil wurden durch einen neuen Versuchsaufbau unterschiedliche Bereiche und somit unterschiedliche Zwischenrisselemente direkt am Bauteil untersucht. Mit diesen Versuchen war es möglich, die auftretenden Einflüsse auf die Verbundkraftübertragung direkt am Bauteil zu bestimmen. Neben den aus den vorherigen Versuchen festgestellten Einflüssen wurde festgestellt, dass sich dünnere Bauteile günstiger als dickere Bauteile verhalten. Dies ist auf die Wirkung der Krümmung zurückzuführen. Die Krümmung kann prinzipiell in eine Vorkrümmung und eine Verkrümmung durch die Durchbiegung des Bauteils unterteilt werden. Eine positive konvexe Krümmung wirkt auf die Verbundkraft immer positiv, da durch die Umlenkkräfte eine selbstinduzierte Anpressung der CFK-Lamelle erfolgt. Eine negative Krümmung bewirkt jedoch eine abhebende Zugspannung an der Lamelle und muss deshalb auch berücksichtigt werden. Der Effekt der Krümmung muss deshalb sowohl aus wirtschaftlichen Gründen wie auch aus Gründen der Sicherheit mit einbezogen werden. Durch die durchgeführten Versuche konnte sowohl die positive wie auch die negative Wirkung der Krümmung dargestellt und quantifiziert werden.

Modellbildung

Aus den gewonnenen Ergebnissen kann die Verbundspannungsschlupfbeziehung stufenweise erweitert werden. Aus den idealisierten Endverankerungsversuchen erhält man den Grundwert, auf welchen nachfolgend weiter aufgebaut wird. Mit den Ergebnissen der idealisierten Zwischenrisselementversuche kann diese Beziehung um ein konstantes Reibplateau erweitert werden. Dieser Effekt der Bauteilkrümmung muss nun als Veränderung der Parameter in die Beziehung mit einfließen. Somit erhalten alle Werte eine Abhängigkeit von der Bauteilkrümmung. Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Verbundspannungsschlupfbeziehung in Bild 3.1.

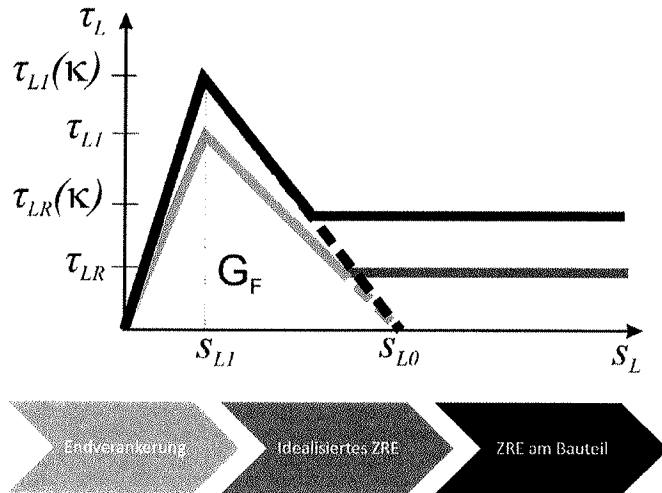


Bild 3.1: Stufenweise Modellierung der auftretenden Verbundenergie am Zwischenrisselement

Aufbauend auf der Quantifizierung der vorgestellten Effekte und den angegebenen Bemessungsempfehlungen wurde eine vereinfachte Bemessungsformel für die aufnehmbare Verbundkraftänderung am Bauteil hergeleitet. Diese Bemessungsformel ist abhängig von der Lamellendicke, der Betonfestigkeit, den Rissabständen sowie der Bauteildicke, durch welche die Krümmung berücksichtigt wird. Mit dieser Formel und allgemein anerkannten Betrachtungen am Endverankerungspunkt wurde eine Empfehlung für einen Verbundnachweis für mit aufgeklebten CFK-Lamellen biegeverstärkten Bauteilen angegeben.

Mit diesem Nachweis ist es nun möglich, biegeverstärkte Stahl- und Spannbetonbauteile realitätsnah, sicher und wirtschaftlich nachzuweisen.

3.2 Arbeitspaket II: Verbundtragfähigkeit unter nicht ruhender Belastung

Voraussetzung für die Durchführung der dynamischen Versuche ist die Ermittlung der Verbundbruchkraft. Die Verbundbruchkraft F_{Lb} wird im statischen Zugversuch an Doppellaschenkörpern ermittelt. Der Versuchsaufbau ist mit dem Aufbau der dynamischen Versuche identisch, vgl. Bild 2.5.

In der Laststufe A wurden Unterlasten von ca. 15 % der statischen Verbundbruchkraft F_{Lb} auf die Lamellen aufgebracht. Im ersten Versuch dieser Laststufe wurde keine Schädigung in Form einer Zunahme der Relativverschiebung s_L festgestellt. Auch im zweiten Versuch trat keine Schädigung ein. Im dritten Versuch der Laststufe A konnte eine deutliche Zunahme der Relativverschiebung s_L mit den Wegaufnehmern registriert werden. Aus den Messdaten lässt sich auf Seite A eine Steigung der Relativverschiebung von $6,07 \mu\text{m}$ pro 100.000 Lastwechsel ablesen. Zur Ermittlung der Steigung werden Bereiche mit einem linearen Anstieg verwendet. An der Seite A wird in einer Regressionsrechnung aus den Messdaten bis zu einer Lastspielzahl von 1,2 Mio. Lastwechseln die Steigung bestimmt. Zur Ermittlung der Lastspielzahl, die zum Erreichen einer Relativverschiebung s_{L0} erforderlich ist, wird extrapoliert. Bei Erreichen der oberen Lamellendehnung von $1367 \mu\text{m/m}$ liegt eine Relativverschiebung s_L von $68 \mu\text{m}$ vor. Über die Steigung und die vorhandene Relativverschiebung bei Erreichen der Oberlast lässt sich errechnen, dass nach 1.383.802 Lastwechseln eine Relativverschiebung s_{L0} von $152 \mu\text{m}$ erreicht ist und eine vollständige Entkopplung eingetreten ist.

Die Ermittlung der Dauerschwingfestigkeit erfolgt mit dem von Block beschriebenen interaktiven Verfahren. Aus den Lastspielzahlen N bis zum Erreichen der vollständigen Entkopplung und den dabei anliegenden Schwingbreiten der Lamellenkräfte $\Delta F_{L,i}$ lässt sich eine Wöhlerlinie aufstellen, mit der die dauerhaft ertragbare Schwingbreite für reine Schwellbeanspruchung ermittelt werden kann. Bei reiner Schwellbeanspruchung, d.h. bei einer Unterlast von 0 kN, ist eine Schwingbreite in Höhe der Verbundbruchkraft F_{Lb} einmal ertragbar. Die ertragbare Schwingbreite sinkt mit zunehmender Lastspiel-

zahl ab und nähert sich asymptotisch einem Grenzwert, der Dauerfestigkeit, an. Wenn eine lineare Beziehung im Goodman Smith-Diagramm unterstellt wird, folgt daraus, dass sich die Wöhlerlinien für unterschiedliche Laststufen durch eine einfache Transformation ineinander überführen lassen.

Bild 3.2 zeigt die angepasste Wöhlerlinie im Vergleich zu den Messdaten. Im Umkehrschluss kann aus der Wöhlerlinie die Abnahme der ertragbaren Schwingbreite mit zunehmender Unterlast im Goodman-Smith-Diagramm beschrieben werden. Die Dauerfestigkeit $\Delta F_{L,D,0}$ bestimmt die Steigung, mit der die ertragbare Schwingbreite im Goodman-Smith-Diagramm abnimmt. Durch die Anpassung ist somit auch die Grenzlinie der Oberlast im Goodman-Smith-Diagramm festgelegt. Bild 3.3 zeigt die Versuchsergebnisse zusammen mit der angepassten Grenzlinie der Oberlast. Versuche, in denen keine deutliche Zunahme der Relativverschiebung festgestellt werden konnte, sind mit einem geschlossenen Symbol, Versuche, in denen eine Schädigung in Form einer deutlichen Zunahme der Relativverschiebung festgestellt werden konnte, sind dagegen mit einem offenen Symbol gekennzeichnet.

Die Anpassung zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen im Bereich hoher Unterlasten. Im Bereich geringerer Unterlasten ist die angepasste Grenzlinie etwas konservativ. Es liegen einige Versuchsergebnisse ohne Schädigung oberhalb der Grenzlinie. Daher wurde in Bild 3.3 eine bilineare Grenzlinie der Oberlast benutzt.

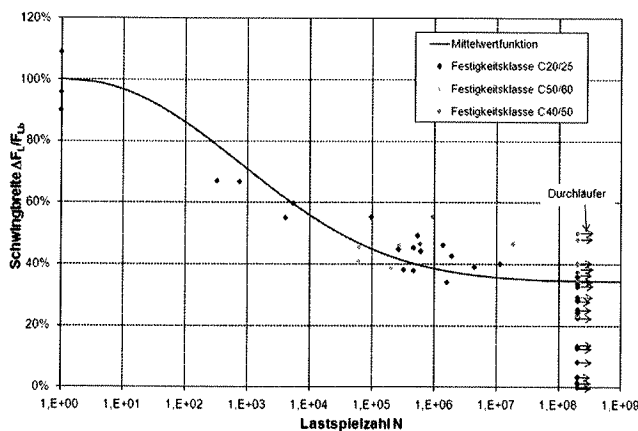


Bild 3.2: Wöhlerlinie im Vergleich mit Messdaten aus den Relativverschiebungsmessungen

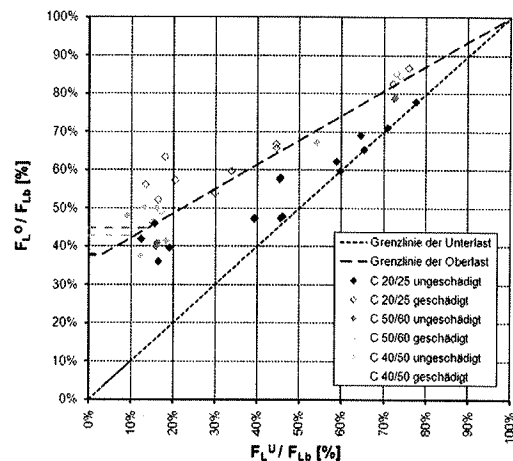


Bild 3.3: Goodman-Smith-Diagramm mit Ergebnissen aus Versuchen an unbewehrten Probekörpern

Der horizontale Bereich der Grenzlinie markiert die Grenze des elastischen Bereichs. Nach Hankers liegt keine Schädigung vor, wenn die Oberlast F_L^O bezogen auf die Verbundbruchkraft F_{Lb} unterhalb von $0,348 \cdot f_{ct}^{3/4}$ liegt. In diesem Fall wird die maximale Verbundspannung τ_{L1} nicht erreicht, Be- und Entlastungspfade liegen übereinander und es kommt zu keiner Zunahme der Relativverschiebung und damit auch zu keiner Schädigung.

In den Versuchen an bewehrten Zug-Druckkörpern konnte bei einsetzender Lamellenentkopplung ein deutlicher Umlagerungsprozess beobachtet werden. Die Abnahme der Lamellendehnungen bzw. die Zunahme der Stahldehnungen weist mit zunehmender Lastspielzahl eine abnehmende Tendenz auf. Es ist davon auszugehen, dass der Umlagerungsprozess abklingt bis ein Zustand erreicht ist, bei dem die Lamellenkräfte soweit abgenommen haben, dass diese zu keiner weiteren Schädigung des Verbundes führen.

Die Bewertung der Plattenversuche erfolgt anhand der maximal aufnehmbaren Lamellenkraft am Zwischenrisselement. Analog zu dem oben beschriebenen Verfahren werden die Schwingbreiten der Lamellenkräfte bei reiner Schwellbeanspruchung $\Delta F_{L,D}/F_{Lb}$ aus den Lamellendehnungen über den Sägeschnitten ermittelt. In Abhängigkeit der Lastspielzahl bis zum Eintritt der vollständigen Lamellenentkopplung lassen sich die Daten mit der Wöhlerlinie aus Bild 3.2 vergleichen. Das Bemessungskonzept basiert auf der bilinearen Grenzlinie der Oberlast aus Bild 3.3 und somit auf zwei Nachweisen. Zum einen kann der Nachweis geführt werden, dass die Oberlast im elastischen Bereich liegt. Wird diese Bedingung nicht eingehalten, muss der Nachweis der Schwingbreite geführt werden.

3.3 Arbeitspaket III: Querkrafttragfähigkeit Querkrafttragfähigkeit

Die Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit aufgeklebter Bewehrung wurde bislang durch die Grenzwerte der DIN 1045 (7.88) und durch das Querkraftmodell von Schmidhuber beschrieben. Bei dem Modell von Schmidhuber wird bei erhöhter Lamellendehnung die Querkrafttragfähigkeit abgemindert, da Schmidhuber davon ausgeht, dass aufgrund von erhöhten Rissbreiten die Rissverzahnung abnimmt.

Aufgrund der Versuche konnte gezeigt werden, dass die Regelungen der DIN EN 1992-1-1 sowie der DIN 1045-1 (8.08) für Bauteile mit aufgeklebter Bewehrung übernommen werden können. Desweiteren wurde das Modell von Schmidhuber mit dem Verbundansatz nach Arbeitspaket I und realistischen maximalen Rissabständen, welche sich aufgrund der unterschiedlichen im Bestand vorhandenen Bewehrungsstähle einstellen, neu berechnet. Aufbauend auf dieser Neuberechnung konnte gezeigt werden, dass das Modell von Schmidhuber nicht maßgebend werden kann, da es vorher zu einer Verbundablösung der Lamelle kommt. In Abhängigkeit der Verbundeigenschaften der im Bestand vorhandenen Bewehrungsstähle wurden abschließend Bemessungsempfehlungen für die Querkrafttragfähigkeit von verstärkten Stahlbetonbauteilen angegeben.

Bauteile mit in Schlitzen verklebter Bewehrung können derzeit nur im Schubereich 1 und 2 der DIN 1045 (7.88) ausgeführt werden. Da die in Schlitzen verklebten CFK-Lamellen ein sehr effektives Verbundverhalten zeigen, welches das von geripptem Betonstahl übersteigt, kommt es hier zu deutlich geringeren Rissbreiten und somit zu einer Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit. Aus diesem Grund und aufgrund der Versuchsergebnisse kann die Querkraftbemessung nach DIN 1045-1 (8.08) bzw. nach DIN EN 1992-1-1 angewendet werden.

Versatzbruchbildung

Bei einem Versatzbruch löst sich die Betondeckung am Lamellenende von der internen Bewehrung ab. Bisher wurden zur Vermeidung des Versatzbruches Bügel am Lamellenende angeordnet, wenn die Schubspannung einen Grenzwert nach DIN 1045 (7.88) überschreitet. Da es dadurch gerade bei Balken mit geringen Verstärkungsgraden zu einer unnötigen Verbügelung kam und dieser Nachweis nicht kongruent zu den Regelungen nach DIN 1045-1 (8.08) bzw. DIN EN 1992-1-1 ist, waren hier Untersuchungen notwendig. Aufbauend auf einem international anerkannten Modell zur Versatzbruchbildung von Jansze und zahlreichen Versuchen, bei welchen ein Versatzbruch aufgetreten ist, wurde eine neue Grenze angegeben, bei welcher kein Versatzbruch eintritt. Dieser Grenzwert ist in Abhängigkeit von der Querkrafttragfähigkeit nach 1045-1 (8.08) bzw. DIN EN 1992-1-1 beschrieben.

Querkraftverstärkung

Da in einigen Fällen bei zu verstärkenden Bauteilen die Querkrafttragfähigkeit für die Lasten nach der Verstärkung nicht ausreicht, ist hier eine Querkraftverstärkung notwendig. Aufbauend auf den durchgeführten Versuchen und zahlreichen Versuchen aus der Literatur wurden für die Querkraftverstärkung Bemessungsmodelle entwickelt. Diese Bemessungsmodelle berücksichtigen sowohl geschlossene als auch halbgeschlossene aufgeklebte Bügel aus Stahl oder Faserverbundwerkstoffen. Mit diesen Bemessungsmodellen, welche kongruent zu dem derzeitigen Normenkonzept sind, ist es möglich, ein Bauteil sicher und auch wirtschaftlich für die Querkraft zu verstärken.

4 Ausblick

Mit den durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnissen ist es nun möglich, die meisten noch vorhandenen Wissenslücken aus den bisherigen Forschungen, welche im Sachstandsbericht des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton zusammengefasst sind, zu schließen.

Durch die Erarbeitung von neuen praxisgerechten Bemessungsansätzen für die Verbundtragfähigkeit unter statischer und dynamischer Belastung sowie der Querkrafttragfähigkeit wurden auch Aspekte berücksichtigt, die erheblich zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit beitragen und den Anwendungsbereich der zur nachhaltigen Gebäudenutzung beitragenden Verstärkungsverfahren erweitern. Die Ergebnisse des Vorhabens bilden die Grundlage für die Erstellung einer Richtlinie des DAfStb, in der die entwickelten Ansätze in handhabbarer Form für Tragwerkplaner und Prüfsingenieure umgesetzt werden und Vorgaben sowie Hilfen für die Ausführung von Verstärkungsmaßnahmen enthalten sind. Für die Bauwirtschaft ergeben sich mit der Richtlinie auch im internationalen Wettbewerb günstige Bedingungen.

Die entwickelten Bemessungsansätze werden unmittelbar in die Richtlinie des DAfStb als allgemein anerkannte Regel der Technik einfließen, die kurzfristig europäische und nationale Regelwerke durch Bemessungs- und Ausführungshinweise ergänzen und so die Anwendung bauaufsichtlich zugelassener bzw. genormter Materialien auf einem einheitlichen hohen technischen Niveau sicherstellen wird. Da alle maßgebenden Stellen in das Verbundprojekt einbezogen worden sind und entsprechende Strukturen innerhalb des Projektes und projektbegleitend geschaffen wurden, ist eine Veröffentlichung der Richtlinie bereits Mitte 2011 vorgesehen.