

**Formulierung von Prüfgrundsätzen  
bei Verbundversuchen mit ober-  
flächlich aufgeklebten Stahllaschen  
und CFK-Lamellen**

**T 3158**

T 3158

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

ISBN 978-3-8167-7535-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

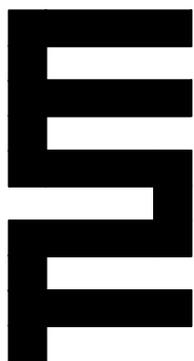
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
INSTITUT FÜR BAUSTOFFE UND KONSTRUKTION  
LEHRSTUHL FÜR MASSIVBAU

# **Formulierung von Prüfgrundsätzen bei Verbundversuchen mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen**

Konrad Zilch  
Roland Niedermeier

Forschungsbericht  
Dezember 2006

gefördert durch das  
Deutsche Institut für Bautechnik  
ZP 52-5- 19.51-1116/04

Technische Universität München  
Institut für Baustoffe und Konstruktion  
Lehrstuhl für Massivbau  
Univ.- Prof. Dr.- Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. K. Zilch

Briefanschrift:  
80290 München

Hausanschrift:  
Gebäude N6  
Theresienstraße 90  
80333 München

Tel.: +49 / 89 / 289 – 23039  
Fax.: +49 / 89 / 289 – 23046  
e-mail: [massivbau@mb.bv.tum.de](mailto:massivbau@mb.bv.tum.de)

## **Formulierung von Prüfgrundsätzen bei Verbundversuchen mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen**

Abweichungen in der Konzeption, Durchführung und Auswertung von experimentellen Untersuchungen zum Verbundtragverhalten aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen führten in der Vergangenheit zu abweichenden Ergebnissen in verschiedenen Forschungseinrichtungen. Auf der Grundlage der bislang durchgeführten Untersuchungen werden die verschiedenen Einflussgrößen aufgezeigt und Vorschläge für eine einheitliche Richtlinie für die Durchführung von Verbundversuchen mit aufgeklebter Bewehrung formuliert.

## **Determination of requirements for testing the bond behaviour of externally bonded steel plates and CFRP strips**

Divergences in the concept, realisation and evaluation of experimental investigations to the bond behaviour of externally bonded steel plates and CFRP strips led in the past to variant results in different research facilities. On the basis of the up to now carried out investigations the different parameters of influence are indicated and suggestions for a common guideline for the realisation of bond tests on externally bonded reinforcement are formulated.

## **Détermination de fondamentaux pour des essais concernant les essais d'union traitant des couvre-joints en acier, encollés en surface et des lamelles en fibres composites en carbone-plastique**

Des divergences au niveau de la conception, de la réalisation et de l'évaluation des investigations expérimentales concernant le comportement de la charge admissible de couvre-joints en acier, encollés en surface et des lamelles en fibres composites en carbone-plastique ont entraîné dans le passé des résultats divergents dans différentes institutions de recherche. Sur la base d'investigations effectuées jusqu' à présent nous signalons les différents paramètres d'influence et formulons des propositions pour une directive homogène en ce qui concerne la réalisation d'essais d'union de renforcements par collage.

# 1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurden in verschiedenen Forschungseinrichtungen experimentelle Studien zum Verbundtragverhalten aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen sowie auflaminierter CFK-Gelege unter quasi-statischer Kurzzeitbeanspruchung durchgeführt. Zwischen den einzelnen Versuchsreihen wurden dabei trotz identischer Trag- und Versagensmechanismen größere Abweichungen hinsichtlich der Verbundtragfähigkeit festgestellt.

Dies ist einerseits auf die unzureichende Kenntnis aller Einflussgrößen zurückzuführen, da umfangreiche systematische Untersuchungen bislang nicht erfolgten. Andererseits bestanden teilweise unterschiedliche Auffassungen hinsichtlich der Bedeutung einzelner bekannter Parameter für die Verbundtragfähigkeit, so dass deren exakte Einstellung nicht mit der gleichen Sorgfalt erfolgte. Als Einflussfaktoren wurden bislang identifiziert:

- Oberflächenzugfestigkeit des Betons
- Verfahren zur Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit
- Art und Intensität der Oberflächenvorbereitung
- Druckfestigkeit des Betons
- Lage der Klebefugen in Bezug auf die Betonierrichtung
- Zuschlagform
- Zuschlagskörnung
- Prüfkörperbreite/Laschenbreite
- Laschendicke
- Prüfkörperform
- Risszustand des Prüfkörpers
- Eigenschaften der Klebschicht: Steifigkeit der Klebschicht, Aushärtungsdauer
- Anordnung der Laschen: Verbundlänge, Unebenheit des Lamellenverlaufs
- Elastizitätsmodul der CFK-Lamellen

Auch bezüglich der Durchführung und Auswertung der Verbundversuche haben erst neuere Forschungsergebnisse gezeigt, dass nicht eine rein bruchmechanische Betrachtung der im Versuch erreichten maximalen Verbundtragfähigkeit zielführend ist, sondern die einsetzende lokale Verbundentkoppelung das maßgebende Kriterium für die Auswertung der Verbundversuche darstellen muss. Um die Verbundversuche entsprechend auswerten zu können müssen diese deshalb mit ausreichenden Verbundlängen und verformungsgesteuert durchgeführt werden, so dass am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs eine Entkopplung des Klebeverbundes erreicht werden kann.

So mittlerweile existierenden Erkenntnisse fanden bislang weder Berücksichtigung in der Formulierung von Prüfgrundsätzen noch wurden sie zusammenfassend veröffentlicht. Im Hinblick auf eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Verbundversuchen verschiedener Prüfstellen ist es deshalb unbedingt erforderlich, einheitliche Prüfgrundsätze zu formulieren und diese durch das Deutsche Institut für Bautechnik zu etablieren, um eine hinreichende Basis für Beurteilung der Bauprodukte und Verfahren im Rahmen der Zulassungsverfahren zu schaffen.

Am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München wurden deshalb im Rahmen des hier beschriebenen, vom Deutschen Institut für Bautechnik geförderten Forschungsvorhabens der Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Verbundtragfähigkeit aufgeklebter Stahllaschen

und CFK- Lamellen im Überblick beschrieben sowie Empfehlungen für die Formulierung von Prüfgrundsätzen bei Verbundversuchen ausgearbeitet. Den Ausgangspunkt hierfür bildeten die in den einschlägigen Zulassungsbescheiden enthaltenen Regelungen zur Ausführung und Bemessung von Verstärkungen mit aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen.

## 2 Ziele experimenteller Untersuchungen zum Verbundtragverhalten aufgeklebter Bewehrung

Zu Beginn der Entwicklung der Verstärkungsverfahren mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen und Faserverbundwerkstoffen wurden experimentelle Untersuchungen der Verbundtragfähigkeit vor allem mit dem Ziel einer grundsätzlichen Beschreibung des Verbundverhaltens durchgeführt. Die zunächst durchgeführten Versuche an biegebeanspruchten Stahlbetonträgern hatten in vielen Fällen zu einem Versagen des Bauteils infolge einer vollständigen Ablösung der Klebarmierung geführt. Da in der Fügetechnik üblicherweise der eingesetzte Klebstoff durch seine Adhäsions- bzw. Kohäsionsfestigkeit die Schwachstelle im Verbundsystem bildet und sich die Fügepartner üblicherweise bis zum Versagen der Verklebung linear elastisch verhalten, konnten die bekannten Ansätze für geklebte Verbindungen die an Betonbauteilen beobachteten Versagensformen nicht abbilden.

Mittlerweile wurde eine Vielzahl von experimentellen Studien in verschiedenen Forschungseinrichtungen vor allem zur Verbundtragfähigkeit unter quasistatischer Kurzzeitbeanspruchung durchgeführt. Anders als bei der Beschreibung des Verbundverhaltens von einbetonierten Bewehrungselementen, ist es im Fall der Aufgeklebten Bewehrung nicht möglich die experimentellen Untersuchungen auf kurze Verbundbereiche, z.B. entsprechend dem fünffachen Stabdurchmesser, zu beschränken und von über die Verbundlänge konstanten Verbundspannungen auszugehen. Dies liegt einerseits am abweichenden Verhältnis zwischen Querschnitt und verbundwirksamer Oberfläche und andererseits an Gründen der Ausführbarkeit. Die im Falle der nur ca. 1,2 bis 1,4 mm dicken CFK-Lamellen für dieses Vorgehen erforderliche Verbundlänge würde nur wenige Millimeter betragen. Derartig kurze Verbundlängen können im Laborbetrieb weder exakt hergestellt noch gehandhabt werden, so dass eine Beschädigung der Verbundflächen noch vor Versuchsbeginn nicht ausgeschlossen werden kann.

In den vergangenen Jahren wurden deshalb bevorzugt Verbundversuche mit mittleren Verbundlängen von einigen hundert Millimetern durchgeführt. Da die Verbundspannungen nicht mehr näherungsweise als gleichmäßig verteilt angenommen werden können, erfolgte die Auswertung der Versuche unter Berücksichtigung der Differenzialgleichung des verschieblichen Verbundes, wobei Betonverformungen und Fügepartiebiegung im Regelfall vernachlässigt wurden. Ziel dieser Versuche war die Formulierung eines Verbundgesetzes in der Form einer Relativverschiebungs-Verbundspannungs-Kurve, auf deren Grundlage zunächst die Nachweise für den Endverankerungsnachweis abgeleitet wurden [20], [25], [33]. Da die durchgeführten Verbundversuche den Endverankerungsbereich am Einzelriss bzw. am dem Momentennullpunkt nächstgelegenen Riss abbildeten, ist dieses Vorgehen schlüssig. Die durchgeführten Versuche wurden im Laufe der letzten Jahre ständig verbessert, so dass mittlerweile genügend Wissen und Erfahrung vorliegen, um allgemeine Prüfgrundsätze zu formulieren. Das folgende Kapitel 1 widmet sich deshalb vor allem den Verbundversuchen, die der Ableitung eines allgemeinen Verbundgesetzes für den Endverankerungsbereich bzw. der Überprüfung der Gültigkeit vorliegender Ansätze, z.B. im Rahmen der bauaufsichtlichen Zulassung neuer Bauprodukte dienen. Dazu werden am Ende eines jeden Abschnittes auf der Grundlage der dargestellten Erkenntnisse Empfehlungen formuliert, die in eine einschlägige Richtlinie des Deutschen Instituts für Bautechnik für die Durchführung von Verbundversuchen aufgenommen werden können.

In einer weiteren Entwicklungsstufe wurden auf der Grundlage des in den Verbundversuchen abgeleiteten Verbundgesetzes auch Nachweise für verbundbeanspruchte Bereiche außerhalb des

Endverankerungsbereiches abgebildet [23], [24], [34]. Mittlerweile haben erste gezielte Untersuchungen des Verbundtragverhaltens in diesen Bereichen gezeigt, dass mit den für den Endverankerungsbereich abgeleiteten Verbundgesetzen zwar eine konservative Abschätzung der Verbundtragfähigkeit möglich ist, diese jedoch weit auf der sicheren Seite liegt und damit in vielen Anwendungsfällen durch die bislang vorgesehenen Nachweisverfahren zu unwirtschaftlichen Ausbildung klebarmierter Bauteile führt. Auf der Grundlage der bislang durchgeführten Untersuchungen ist es derzeit nicht möglich, allgemeine Prüfgrundsätze für Untersuchungen zur Verbundtragfähigkeit außerhalb der Endverankerungsbereiche anzugeben. In Abs. 3.10 wird jedoch unter Berücksichtigung der vorliegenden Erkenntnisse ein Vorschlag für ein Verfahren zur Untersuchung des Verbundtragverhaltens in allen Bereichen eines biegebeanspruchten Stahlbetonbauteils vorgestellt, der eine realistische Erfassung der Trag- und Verformungsmechanismen unter den speziellen Randbedingungen dieses Bauteils zulässt.

### 3 Einflussgrößen auf die Verbundtragfähigkeit aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen und daraus resultierende Empfehlungen für Prüfgrundsätze

#### 3.1 Oberflächenzugfestigkeit des Betons

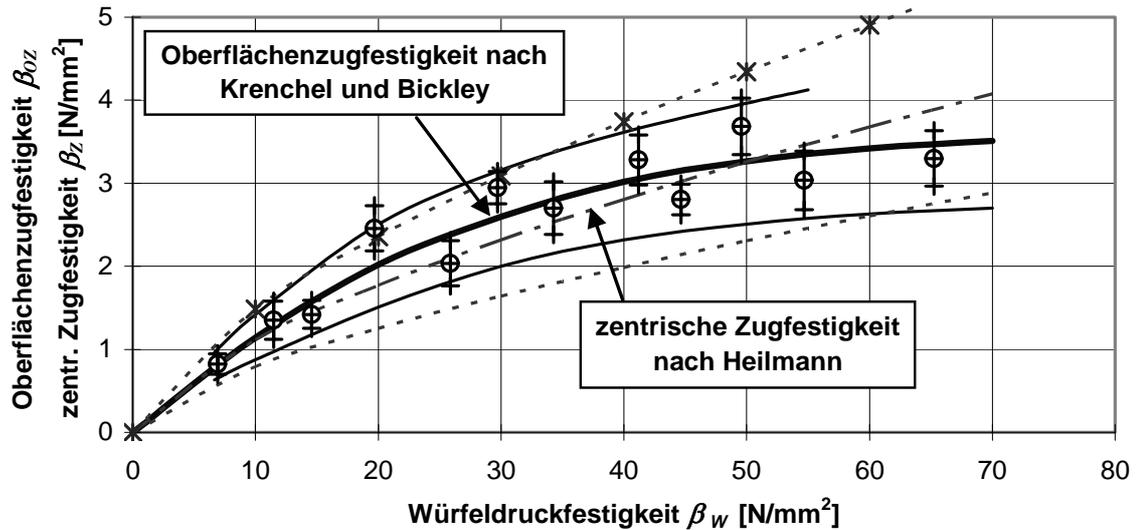
Für das Verbundtragverhalten oberflächlich aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen kann für normalfesten Beton in Temperaturbereichen, die einen ausreichend großen Abstand von der Glasübergangstemperatur des Epoxydharzklebers aufweisen, davon ausgegangen werden, dass das Adhäsions- und Kohäsionsvermögen der Klebschicht infolge einer Verbundbeanspruchung nicht erreicht wird, da stets die geringe Zugfestigkeit des Fügepartners Beton zunächst durch Entfestigungseffekte infolge auftretender Mikroschubrisse und im weiteren Beanspruchungsverlauf durch die Ausbildung einer oberflächenparallelen Bruchebene. Beschreibungen der beobachteten Entfestigungs- und Bruchvorgänge enthalten unter anderem die Arbeiten von Holzenkämpfer [20], Niedermeier [24] und Ulaga [34]. Der Zugfestigkeit des Betons im Bereich der auftretenden Bruchflächen kommt deshalb eine zentrale Bedeutung zu. Diese kann entweder direkt oder über korrelierte Größen wie die Betondruckfestigkeit Berücksichtigung finden.

Mit der in DIN 1048-2 (6.91) beschriebenen Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit steht ein geeignetes Verfahren zur Verfügung die maßgebende Zugfestigkeit in einer Stichprobe direkt am Bauteil zu ermitteln und diese als Eingangsgröße für die Bemessung zu verwenden. Anders als bei der Prüfung der zentrischen Zugfestigkeit, der Biegezugfestigkeit oder der Spaltzugfestigkeit, die z.B. nach den einschlägigen Teilen der DIN EN 12390 [16], [17] an Vergleichskörpern erfolgt, ermöglicht das Verfahren zur Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit die Erfassung bauteilspezifischer Einflüsse wie der Nachbehandlung und weiterer Erhärtingsbedingungen. Die Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit muss deshalb sowohl an den Verbundversuchskörpern als auch an den zu verstärkenden Bauteilen in Bereichen zu erfolgen, die an die Klebeflächen grenzen und vergleichbare Eigenschaften z.B. in Bezug auf die Betonierichtung ausweisen. Der Mittelwert der Oberflächenzugfestigkeit entspricht prinzipiell dem Mittelwert der Zugfestigkeit unter zentrischer Beanspruchung im oberflächennahen Bereich. Dies zeigt der in Abb. 3.1 dargestellte Vergleich der Ergebnisse von Krenchel und Bickley [21], die in weiteren Untersuchungen von Budnik und Dornauer [1] bestätigt wurden, mit den Ergebnissen von Heilmann [19], der den in Gleichung ausgedrückten Zusammenhang zwischen der mittleren Würfeldruckfestigkeit  $f_{cm,cube}$  ( $\beta_w$ ) und der zentrischen Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  ( $\beta_z$ ) angibt.

$$f_{ct} = 0,24 \cdot f_{c,cube}^{\frac{2}{3}} \quad (3.1)$$

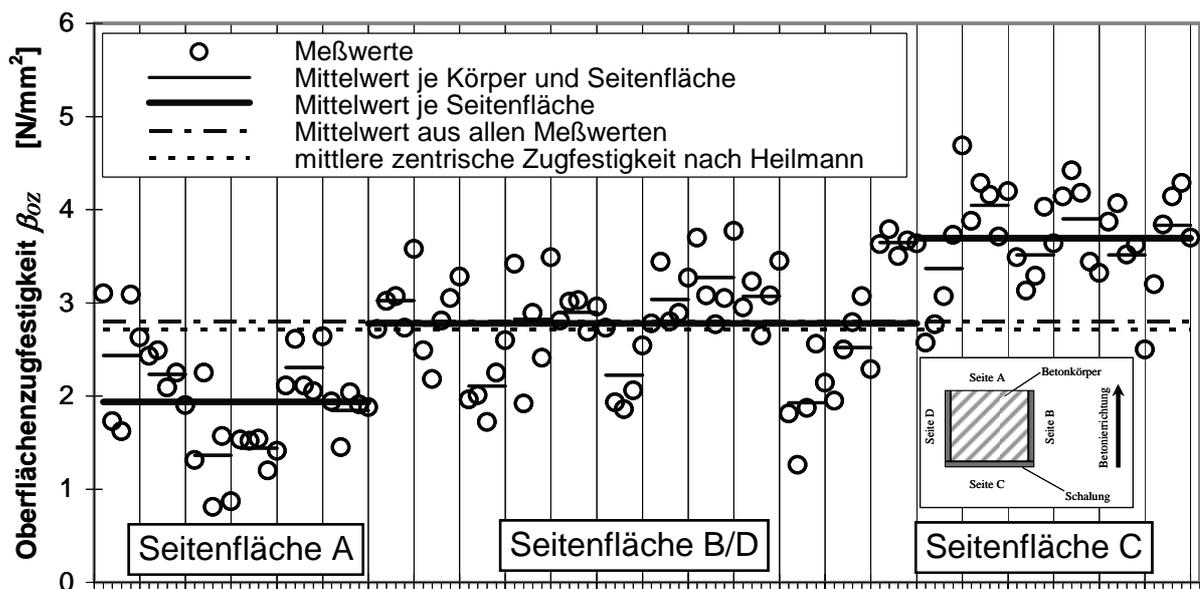
Dazu ist anzumerken, dass die Gültigkeit dieser Relation in starkem Maß von der Betonzusammensetzung abhängt. Während der w/z-Wert und der Luftporengehalt sich stärker auf die Druckfestigkeit als auf die Zugfestigkeit auswirken, so ist der Einfluss der Haftung zwischen Zementstein und Zuschlagkorn auf die Zugfestigkeit größer als auf die Druckfestigkeit. Deshalb wird die Zugfestigkeit bzw. das Verhältnis von Zugfestigkeit zu Druckfestigkeit durch die folgenden Größen beeinflusst: Zuschlagvolumen, Kornform, Sieblinie und Größtkorn, Oberflächenbeschaffenheit. Üblicherweise streut die Zugfestigkeit stärker als die Druckfestigkeit.

Der unterschiedliche zeitliche Entwicklung der Zug- und Druckfestigkeit dürfte bei den üblichen Verstärkungsaufgaben an bestehenden Bauwerken von untergeordneter Bedeutung sein.



**Abb. 3.1:** Vergleich der rechnerischen zentralen Zugfestigkeit mit der Oberflächenzugfestigkeit [1], [21]

Wie die in den folgenden Abbildungen aufgezeigten Zusammenhänge verdeutlichen, ist aber für diese Übereinstimmung eine Differenzierung der Lage der Prüfflächen für die Ermittlung Oberflächenzugfestigkeit hinsichtlich der Betonierichtung erforderlich. Die Abhängigkeit der Oberflächenzugfestigkeit von der Lage hinsichtlich der Betonierichtung zeigt sich bei üblichen Versuchskörperabmessungen auch an den Oberflächen, die während des Betoniervorgangs vertikal ausgerichtet sind. Die lokale Festigkeit ist vom Betongefüge abhängig. Die Lage in Bezug auf die Betonierichtung beeinflusst die Dichte durch den Grad der Verdichtung sowie Absetzvorgänge infolge des Schwindens der Zementsteinmatrix. Die Prüfstellen der Stichprobe zur Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit nach DIN 1048-2 sind deshalb so anzuordnen, dass deren Schwerpunkt im Bereich der Klebefuge liegt. Dies gilt für die Untersuchungen an Prüfkörpern wie an Bauteilen.



**Abb. 3.2:** Abhängigkeit der Oberflächenzugfestigkeit von der Betonierichtung [24]  
(Vergleichskörper:  $f_{c,cube\ 200\ mm} = 38\ N/mm^2$ )

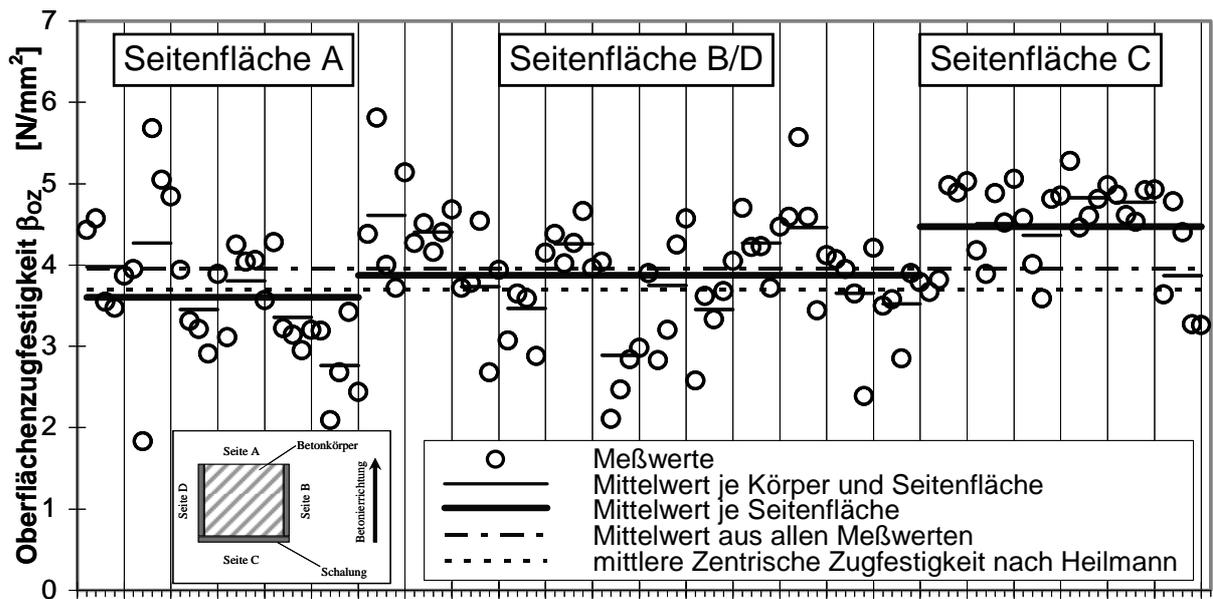


Abb. 3.3: Abhängigkeit der Oberflächenzugfestigkeit von der Betonierichtung [24]  
 (Vergleichskörper:  $f_{c,cube\ 200\ mm} = 59\ N/mm^2$ )

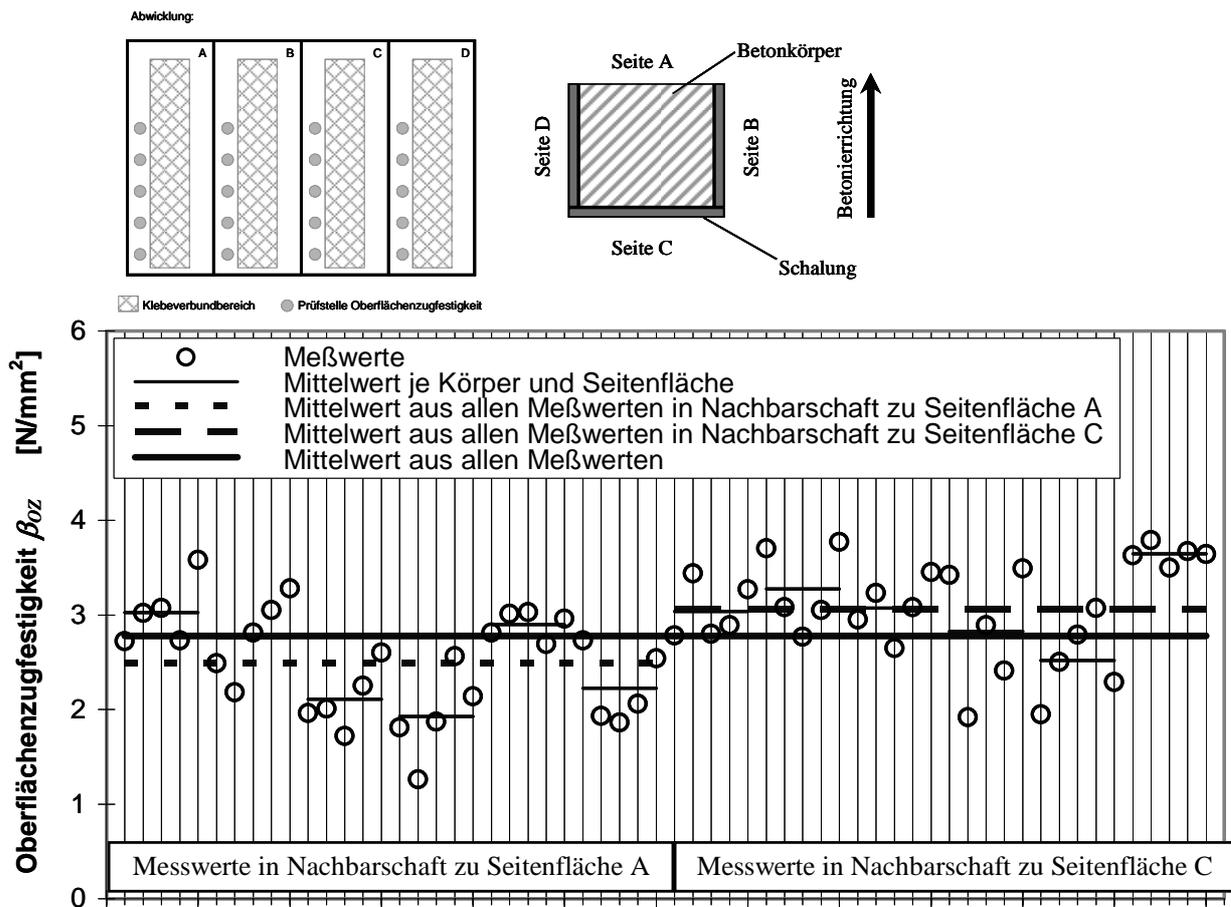
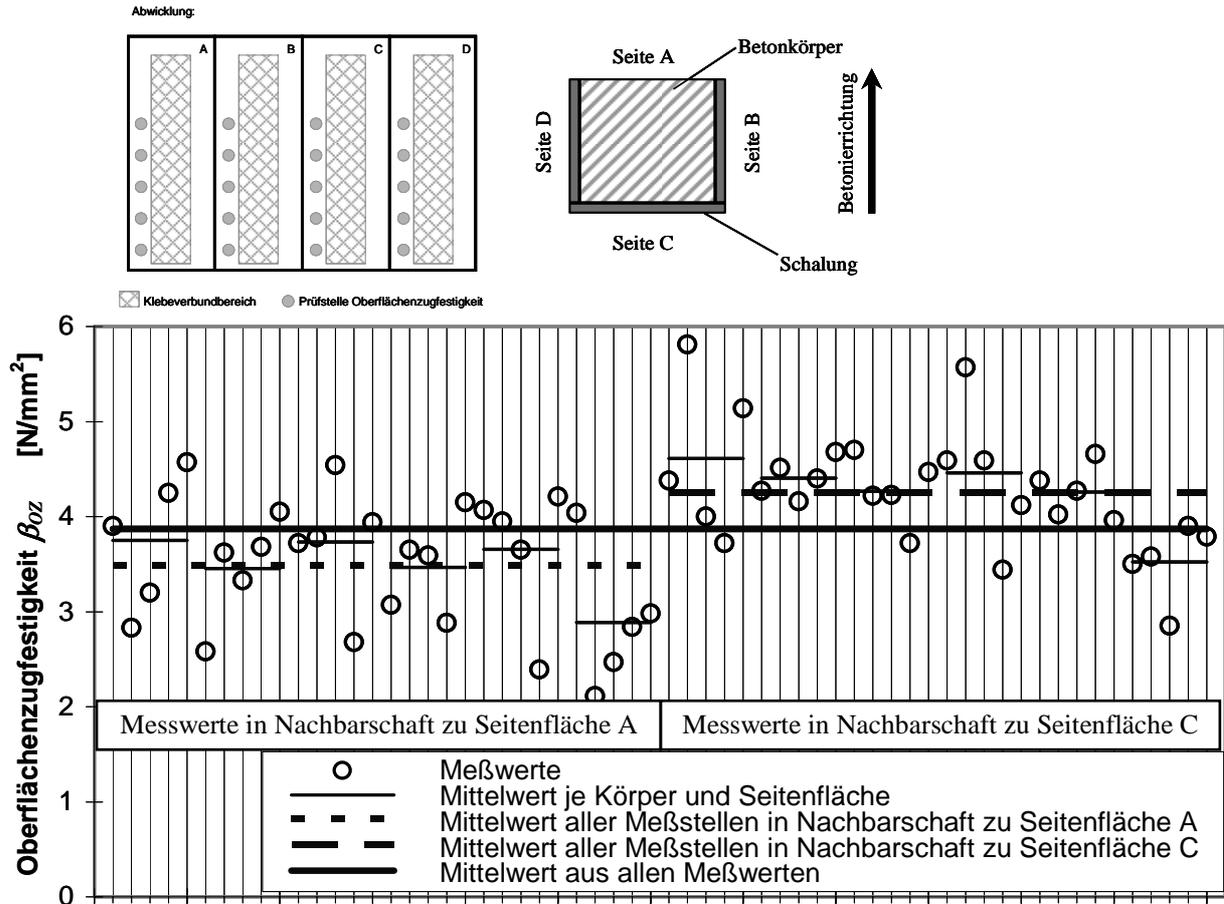


Abb. 3.4: Einfluss der Lage der Prüfstellen auf den Seitenflächen B und D [24]  
 (Vergleichskörper:  $f_{c,cube\ 200\ mm} = 38\ N/mm^2$ )



**Abb. 3.5:** Einfluss der Lage der Prüfstellen auf den Seitenflächen B und D [24]  
(Vergleichskörper:  $f_{c,cube\ 200\ mm} = 59\ N/mm^2$ )

Die zentrale Bedeutung der Oberflächenzugfestigkeit kommt zum Ausdruck in der Beschränkung einiger Ansätze zur Bestimmung der Verbundbruchenergie auf diese Betonkenngröße. Dabei handelt es sich um experimentell auf den eigenen Arbeiten der jeweiligen Forscher beruhende Ansätze, wie sie beispielsweise von Neubauer [23] oder Schilde [27] formuliert wurden. In anderen Arbeiten wird zwar ebenfalls auf die ausgeprägte Abhängigkeit der Verbundtragfähigkeit von der Zugfestigkeit des Betons verwiesen, da jedoch zumindest ergänzend aus der Literatur bekannte Versuche herangezogen werden, für die häufig keine Angaben zur Oberflächenzugfestigkeit bzw. zur Zugfestigkeit allgemein vorliegen, findet die Kalibrierung von Bemessungsansätzen anhand der an Vergleichskörpern ermittelten Druckfestigkeit statt. Hier sind beispielhaft die Arbeiten von Holzenkämpfer [20], Ulaga [34] und Dai et.al. [2] zu nennen, die entweder die Druckfestigkeit oder die daraus z.B. auf der Grundlage der Heilmann-Relation (3.1) abgeleitete Zugfestigkeit als Eingangswert benutzen.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Oberflächenzugfestigkeit herausragende Bedeutung als Eingangswert für die Ermittlung der Verbundtragfähigkeit besitzt und sie deshalb möglichst realistisch am Versuchskörper bzw. am zu verstärkenden Bauteil im Bereich der Klebeflächen zu bestimmen ist.

### **3.2 Verfahren zur Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit**

In DIN 1048-2 sind bezüglich der Vorbereitung der Prüffläche verschiedene Verfahren beschrieben, die je nach Prüfzweck und Anforderung anzuwenden sind. Nach Maßgabe dieser Norm sind die Prüfflächen entweder unbehandelt zu lassen oder vorzubehandeln. Der Zugversuch wird entweder ohne Ringnut oder an einer durch eine Ringnut begrenzten Prüffläche durchgeführt. Entsprechend der Zielsetzung der Versuche zur Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit ist es unbedingt zweckmäßig, wie in den einschlägigen Zulassungsbescheiden für die Ermittlung der Eigenschaften des zu verstärkenden Bauteils gefordert, die Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit an Prüfflächen durchzuführen, die in gleicher Art und Weise vorbereitet wurden, wie die Bauteiloberflächen im Bereich der Klebefugen. Für die Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit als im Bereich der Ausbruchfläche maximal aufnehmbare mittlere Zugspannung sind definierte Prüfflächen unumgänglich, so dass das Verfahren mit vorgebohrter Ringnut anzuwenden ist. Die in den Bereichen der Ringnut auftretenden Abweichungen von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung können nicht vermieden werden.

Auch hinsichtlich der Lage der Prüfflächen sollten einige grundsätzliche Anforderungen beachtet werden. Die Prüfflächen zur Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit sollten stets außerhalb der Klebeflächen liegen. Dies gilt sowohl für Verstärkungsmaßnahmen als auch für die Durchführung von Verbundversuchen. Eine Schädigung des Betongefüges infolge einer vorausgegangen Ermittlung der Oberflächenfestigkeit kann Auswirkungen auf die Verbundtragfähigkeit haben. Analog sollten Ermittlungen der Oberflächenzugfestigkeit an Versuchskörpern nicht im Bereich von Klebefugen erfolgen, da durch vorausgegangene Verbundbeanspruchungen geschädigte Bereiche vorliegen, die unter Umständen nicht vollständig abgelöst wurden. Schilde beobachtete im Bereich geprüfter Verbundflächen eine Abhängigkeit der ermittelten Zugfestigkeit von der Tiefe unter der Klebschicht [27]. Um Beeinträchtigungen der Prüfergebnisse zu vermeiden, sollte deshalb ein Mindestabstand der Prüfflächen von den geprüften oder ungeprüften Klebeflächen eingehalten werden. Geht man von den beobachteten Ausbruchtiefen aus, die nur wenige Millimeter betragen, so erscheint ein Mindestabstand von 20 mm ausreichend. Dieser Abstand entspricht bei einer Ausbruchtiefe von 5 mm einem Ausbruchwinkel von  $14^\circ$  gegen die Bauteiloberfläche.

### **3.3 Art und Intensität der Oberflächenvorbereitung**

Die einschlägigen Zulassungsbescheide sehen verschiedene Verfahren für die Vorbereitung der Betonoberflächen vor. Ausdrücklich genannt werden Druckluftstrahlen mit festem Strahlmittel, Kugelstrahlen, Druckwasserstrahlen, Nadelpistole oder Stockgerät (inkl. Nacharbeitung). Hinsichtlich der Intensität wird gefordert, die Oberflächenvorbereitung so durchzuführen, dass der Grobzuschlag ( $> 8$  mm) sichtbar wird. Ferner wird gefordert, dass die Betonoberfläche im Bereich der Klebeflächen staubfrei und frei von losen Teilen ist.

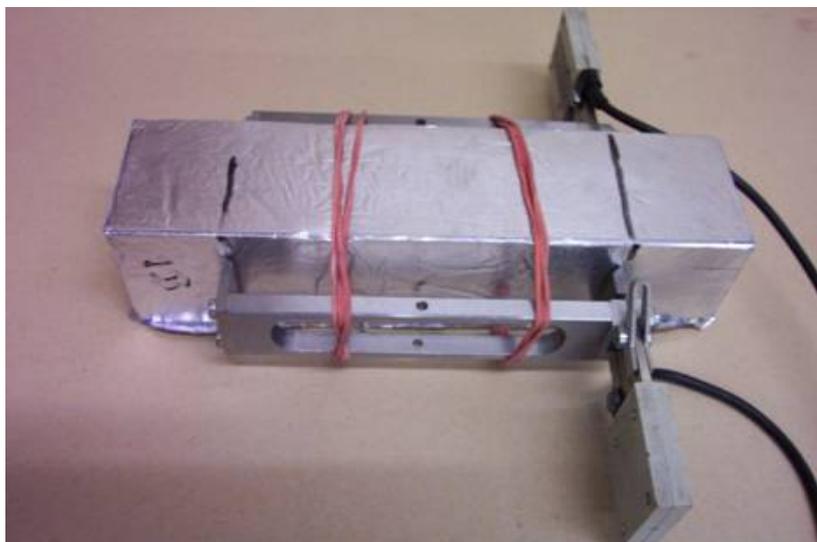
Gezielte Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenvorbereitung sind derzeit nicht bekannt. Das Adhäsions- und Kohäsionsvermögen der bauaufsichtlich zugelassenen Epoxydharzkleber ist jedoch so hoch, dass stets die geringe Betonzugfestigkeit versagensauslösend wirkt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass mit dem oben beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit mit Ringnut stets unabhängig vom angewandten Verfahren die

Betonzugfestigkeit ermittelt wird, sofern diese korrekt angewandt wurden und keine losen Teile an der Betonoberfläche haften.

Hinsichtlich der Intensität der Aufrauung der Oberfläche ist festzustellen, dass für die Quantifizierung im Zuge von Verstärkungsmaßnahmen an vertikalen Flächen oder an der Unterseite von Bauteilen keine baupraktisch geeigneten Verfahren zur Verfügung stehen. Auch optische Verfahren sind anders als bei der Aufrauung von Stahloberflächen nur mit großem Aufwand sinnvoll einzusetzen, so dass derzeit auf eine Quantifizierung der Rauheit verzichtet werden muss.

Nicht geklärt ist bislang der Einfluss der zeitabhängigen Verformungen der Klebschicht infolge Kriechen und Schwinden. Mit den Erkenntnissen aus ersten Tastversuchen kann derzeit nicht ausgeschlossen werden, dass lokal stark veränderliche Kleberdicken, wie sie sich bei einer intensiveren Oberflächenaufrauung einstellen würden, in Kombination mit verzögert ablaufenden Schwindvorgängen in Bereichen der Klebschicht zum Aufbau von Zugbeanspruchungen senkrecht zur Klebefuge führen. Bei realistischen Annahmen bezüglich der lokalen Unebenheiten können diese Zugbeanspruchungen in der Größenordnung der Betonzugspannungen liegen und zu lokalen Schädigungen des Klebeverbundes führen, die die Verbundtragfähigkeit verringern.

Wegen der besonderen Zielsetzung wurden die Tastversuche zum Schwindverhalten eines zugelassenen Epoxydharzklebers abweichend von der gängigen Versuchspraxis an drei unbelasteten Kleberprismen (40 mm x 40 mm x 160 mm) untersucht. Bei zwei der drei Prismen wurde die Lösungsmittelabgabe durch eine Aluminiumfolie verhindert, die bereits bei der Herstellung der Prismen in der Schalung angebracht worden war. Abb. 3.6 zeigt einen derartigen Prüfkörper mit applizierten Dehnungsmessern.



**Abb. 3.6** Epoxydharzkleberprisma mit Aluminiumfolie und applizierten Dehnungsmessern

Während der ersten 29 Tage des Untersuchungszeitraums blieben die beiden Prismen mit Aluminiumfolie in ihrem Schwindverhalten absolut etwa 0,1 ‰ hinter der Verformung des Referenzprismas zurück. Das Schwindmaß der Referenzprobe betrug absolut etwa 1,0 ‰. Hierzu ist anzumerken, dass die Applikation der Dehnungsmesser und der Start der Messwerterfassung ca. fünf Stunden nach der Herstellung der Klebermischung erfolgten. Zu diesem Zeitpunkt konnten die Prismen aus der Schalung genommen werden. Das Anfangsschwinden blieb somit unberücksichtigt.

Nach 29 Tagen wurde die Aluminiumfolie vollständig entfernt, worauf sich innerhalb weniger Stunden eine zusätzliche Schwindverformung von etwa 0,09 ‰ bzw. 0,23 ‰ (absolut) einstellte. Hierzu ist anzumerken, dass die beiden Prismen nach der Unterbrechung der Messung nacheinander von der Aluminiumfolie befreit wurden, die Schwindmessung aber zum gleichen Zeitpunkt fortgesetzt wurde. Abb. 3.7 zeigt das Schwindverhalten der Prismen während der gesamten Versuchsdauer.

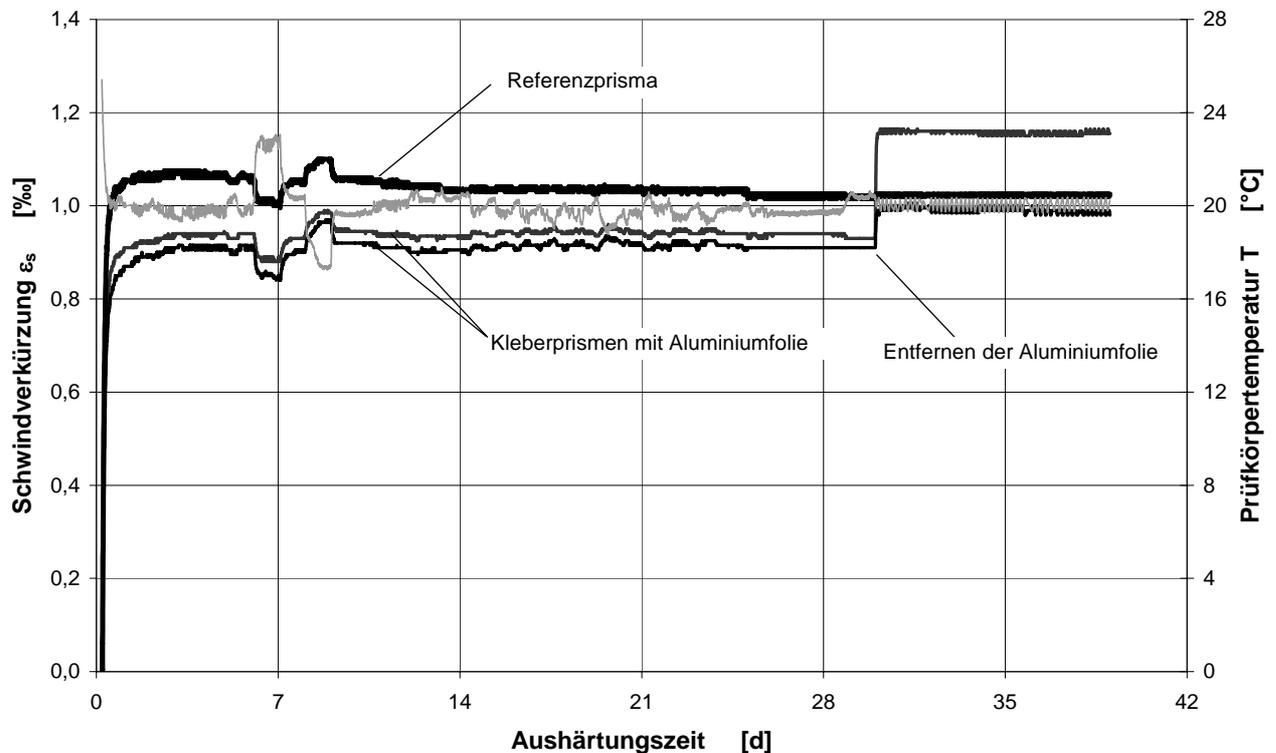
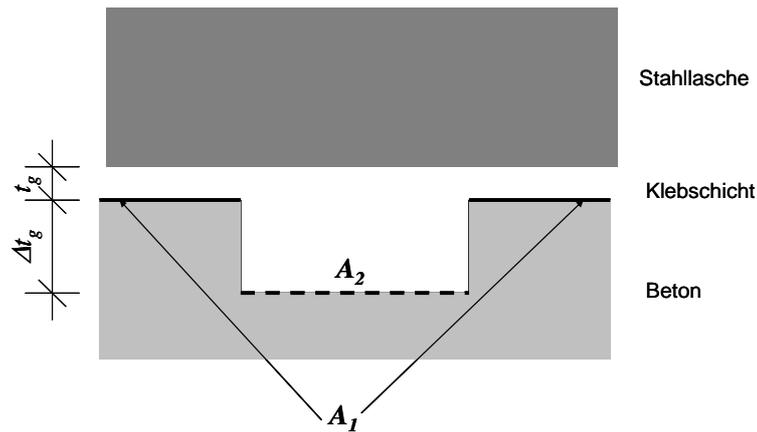


Abb. 3.7 Ergebnisse der Schwindversuche

Hinsichtlich des Schwindverhaltens können folgende Ergebnisse festgehalten werden. Das in den Versuchen an Prismen beobachtete Schwindmaß liegt deutlich über der Herstellerangabe [31]. Ein nicht unerheblicher Anteil von 0,2 des Schwindens ab einsetzender Aushärtung ist nach derzeitigem Kenntnisstand auf Lösungsmittelschwinden zurückzuführen.

Die Bedeutung des Schwindens und insbesondere der zeitverzögerten Anteile, die nicht in gleichem Maß durch Kriechvorgänge kompensiert werden können, wie anfangs kurzzeitig auftretende Reaktionsschwinden infolge der Vernetzung konnte in einem durch das Deutsche Institut für Bautechnik geförderten Forschungsvorhaben abgeschätzt werden, das sich mit dem Einfluss der Klebschichtdicke auf die Verbundtragfähigkeit aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen beschäftigte. Dazu wurden für in Abb. 3.8 idealisiert dargestellten Verhältnisse infolge der Oberflächenvorbereitung eine lokale Unebenheit  $\Delta t_g$  in Höhe von 3 mm angenommen. Für die folgenden Überlegungen werden Verformungen des Betons und der Stahllasche vernachlässigt, d.h. die Fügepartner werden als starr angenommen und alle Verformungen der Klebschicht zugewiesen. Dies ist für eine erste Abschätzung ausreichend.



**Abb. 3.8** Idealisierte Verhältnisse im Bereich lokaler Unebenheiten der Betonoberfläche

Für linear elastisches Verhalten der Klebschicht kann die senkrecht zur Klebefuge wirkende Zugspannung für  $A_1 = A_2$  mit folgender Gleichung bestimmt werden, wobei für die Klebschichtdicke  $t_g$  der nach den einschlägigen Zulassungsbescheiden minimal zulässige Wert von 1 mm und für den nicht durch Kriechvorgänge kompensierten Anteil der Schwindverformungen  $\varepsilon_{gs} = \varepsilon_{gs, solv} = 0,25 \text{ ‰}$  entsprechenden den Resultaten der Tastversuche angesetzt wurde..

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{F}{A} = \frac{\Delta t_g}{2 \cdot t_g + \Delta t_g} \cdot \varepsilon_{gs} \cdot E_g = \frac{3}{2 \cdot 1 + 3} \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 10.000 = \\ &= 1,5 \frac{N}{mm^2} \end{aligned} \quad (3.2)$$

mit	$F$	lokale, auf die Teilflächen $A_1$ bzw. $A_2$ wirkende Normalkraft infolge der Schwindverkürzung
	$A_1$	Teilfläche im Bereich erhabener Stellen der Betonoberfläche, auf die infolge der Schwindverkürzung des Epoxydharzklebers eine Druckkraft wirkt
	$A_2$	Teilfläche im Bereich vertiefter Stellen der Betonoberfläche, auf die infolge der Schwindverkürzung des Epoxydharzklebers eine Zugkraft wirkt
	$\varepsilon_{gs}$	Schwindmaß des Epoxydharzklebers
	$E_g$	Elastizitätsmodul des Epoxydharzklebers
	$t_g$	(minimale) Dicke der Klebschicht
	$\Delta t_g$	lokale Unebenheit der Betonoberfläche

Bis zur Klärung der Problematik durch gezielte Untersuchungen sollte die Oberflächenvorbereitung an Versuchskörpern entsprechenden den Anforderungen der Zulassungsbescheide so erfolgen, dass der Grobzuslag sichtbar wird und die Oberfläche zugleich möglichst eben verläuft.

### 3.4 Druckfestigkeit des Betons

Die zwischen Stahllaschen bzw. CFK-Lamellen und der Bauteiloberfläche auftretenden Verbundspannungen rufen einen komplexen Spannungszustand im Betonuntergrund hervor, der sich durch einen linear elastischen und einen plastisch entfestigten Traganteil auszeichnet. Unterstellt man die durch viele Untersuchungen tendenziell belegte Gültigkeit des idealisierten bilinearen Verbundansatzes, so wird das Verbundtragverhalten bestimmt durch die maximale Verbundspannung  $\tau_{LI}$  sowie die Grenzwerte der Relativverschiebung  $s_{LI}$  und  $s_{L0}$  bzw. die daraus abgeleiteten energetischen Kenngrößen  $G_F$  und  $G_e$ .

$$G_F = \frac{\tau_{LI} \cdot s_{L0}}{2} \quad (3.3)$$

$$G_e = \frac{\tau_{LI} \cdot s_{LI}}{2} \quad (3.4)$$

Die maximale Verbundspannung begrenzt das linear elastische Tragverhalten und ist – sofern Spannungen senkrecht zur Klebefuge nicht berücksichtigt werden - als reine Schubbeanspruchung von der Zug- und der Druckfestigkeit des Betons abhängig. Der plastisch entfestigte Traganteil hingegen wird nach dem von Holzenkämpfer [20] und Ulaga [34] beschriebenen Zahnmodell durch die Zugfestigkeit des Betons begrenzt. Durch einfache Überlegungen kann gezeigt werden, dass ein Großteil der der Relativverschiebungen aus Betonverformungen resultiert. Diese hängen in einem bestimmten Maß von der elastischen Verformung des Betons ab, die durch den Elastizitätsmodul ausgedrückt werden kann und mit der Druckfestigkeit des Betons korreliert ist.

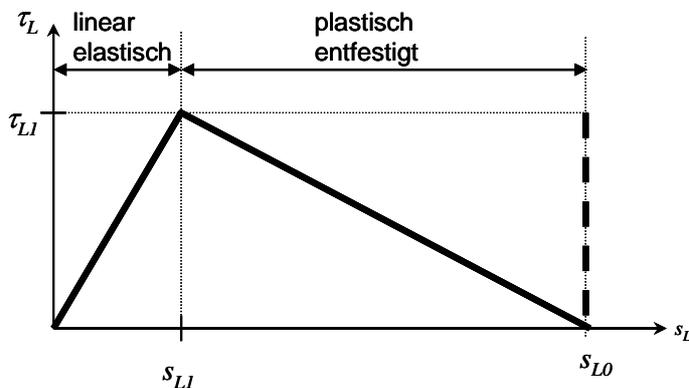


Abb. 3.9: Bilinearer Verbundansatz

In systematische Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit den folgenden Bestimmungsgleichungen die charakteristischen Werte der energetischen Kenngrößen des bilinearen Verbundansatzes sowie der maximalen Verbundspannung bestimmt werden können. Dabei geht neben der Zugfestigkeit oberflächennaher Betonschichten auch deren Würfeldruckfestigkeit  $\beta_W$  ein, die zweckmäßig zerstörungsfrei mit dem Rückprallhammer gemäß DIN 1048-2 [14] bestimmt wird.

### 3 Einflussgrößen auf die Verbundtragfähigkeit

$$G_{e,k} = 2,6555 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}} \quad (3.5)$$

$$G_{F,k} = 2,5260 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}} \quad (3.6)$$

$$\tau_{LL,k} = 2,7349 \cdot 10^{-1} \cdot \sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}} \quad (3.7)$$

Die bereits für die Oberflächenzugfestigkeit erläuterte Abhängigkeit von der Lage in Bezug auf die Betonierrichtung gilt analog auch für die Druckfestigkeit, wenn auch - besonders bei der höheren Betonfestigkeit - weniger ausgeprägt, wie die folgenden Abbildungen zeigen.

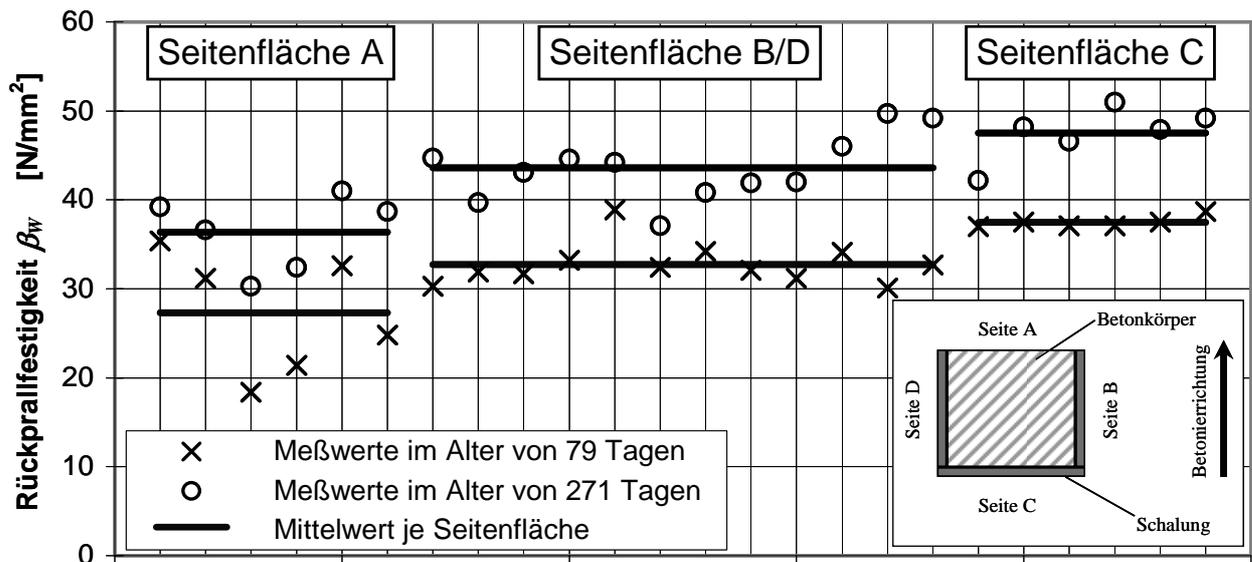


Abb. 3.10: Abhängigkeit der Druckfestigkeit oberflächennaher Betonschichten von der Betonierrichtung [24] (Vergleichskörper:  $f_{c,cube\ 200\ mm} = 38\ \text{N/mm}^2$ )

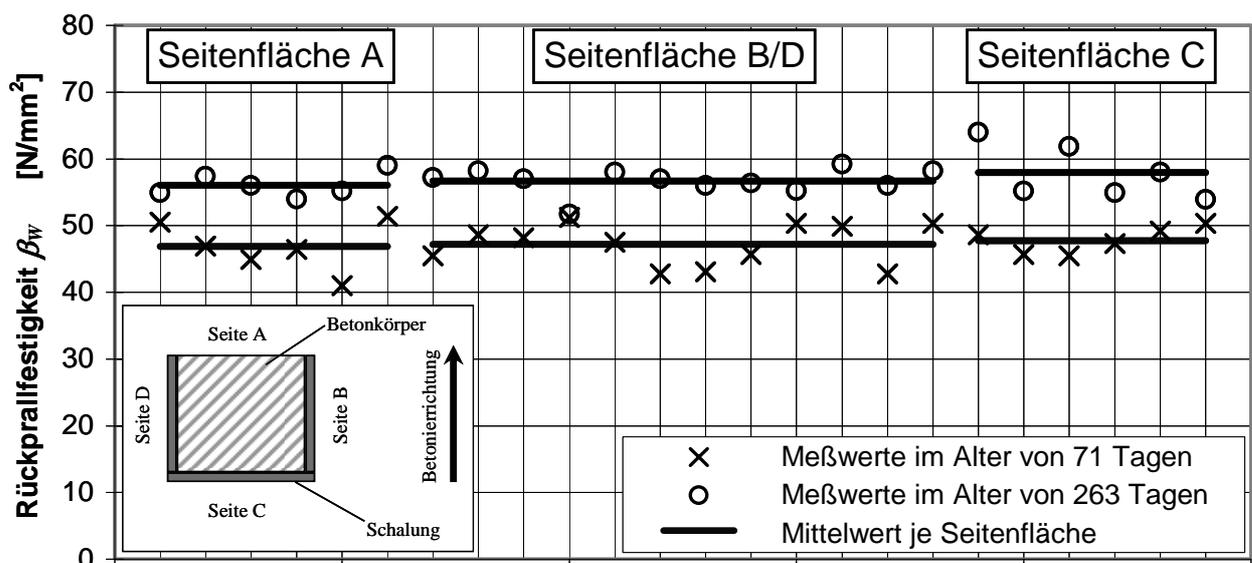
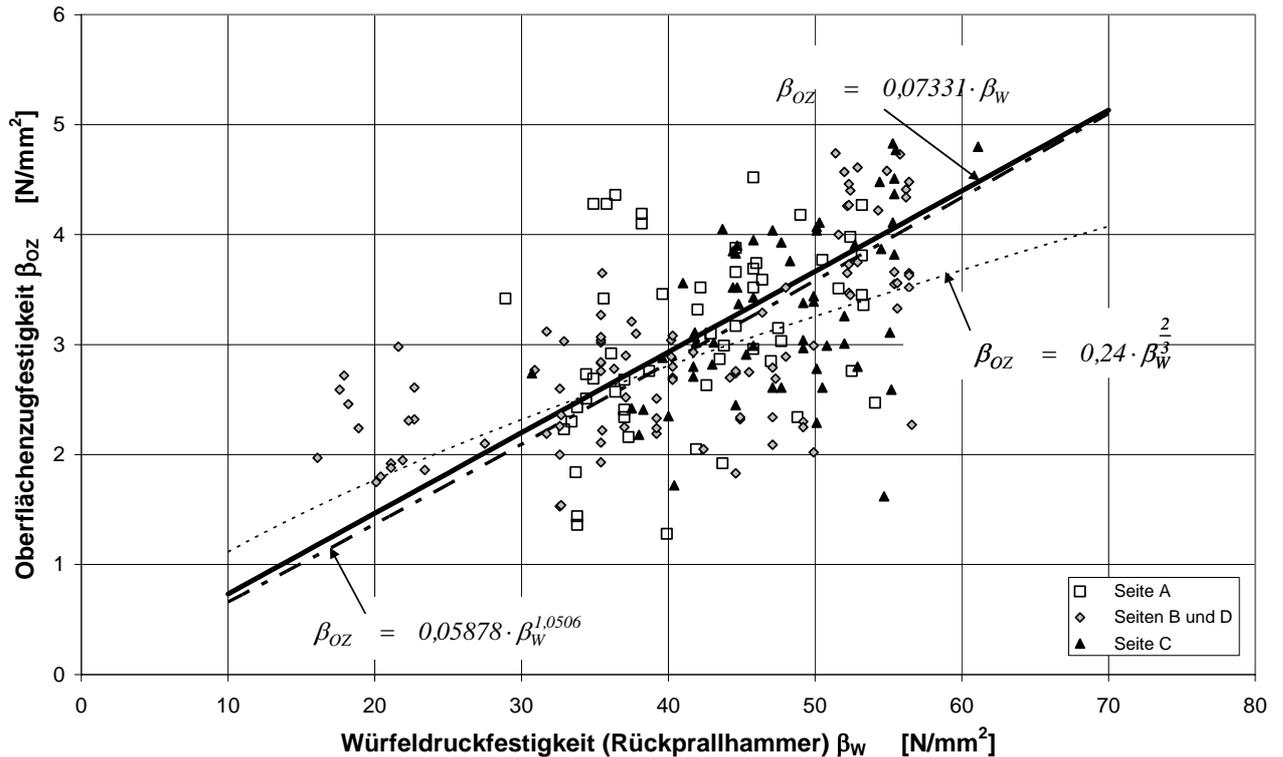


Abb. 3.11: Abhängigkeit der Druckfestigkeit oberflächennaher Betonschichten von der Betonierrichtung [24] (Vergleichskörper:  $f_{c,cube\ 200\ mm} = 59\ \text{N/mm}^2$ )

Nach Neubauer und Schilde ist die aufnehmbare Verbundbruchenergie nur von der Oberflächenzugfestigkeit, nicht aber von der Druckfestigkeit oberflächennaher Betonschichten abhängig. Dazu ist anzumerken, dass wie Abb. 3.12 zeigt näherungsweise von einem linearen Zusammenhang zwischen der Oberflächenzugfestigkeit und der Druckfestigkeit oberflächennaher Betonschichten, die zerstörungsfrei mit dem Rückprallhammer ermittelt wird, ausgegangen werden kann. Die verschiedenen Seitenflächen in Bezug auf die Betonierichtung zeigen keinen grundsätzlichen Unterschied. Die angegebenen Gleichungen der Regressionsfunktionen wurden deshalb auf der Grundlage aller Wertepaare ermittelt.



**Abb. 3.12:** Zusammenhang zwischen der Oberflächenzugfestigkeit  $\beta_{OZ}$  und der zerstörungsfrei ermittelten Druckfestigkeit  $\beta_W$  oberflächennaher Betonschichten

Für die oberflächennahen Betonschichten kann damit eine von den Verhältnissen an Vergleichskörpern abweichende Korrelation zwischen Zug- und Druckfestigkeit festgestellt werden. Der Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit  $f_{ct}$  und der Druckfestigkeit  $f_c$  wird üblicherweise durch den folgenden Ausdruck beschrieben:

$$f_{ct} = c \cdot f_c^{\frac{2}{3}} \quad (3.8)$$

Die Höhe des Faktors  $c$  hängt davon ab, ob für die Festigkeiten Mittelwerte oder Fraktilwerte angesetzt werden und um welche Festigkeitswerte – zentrische Zugfestigkeit, Biegezugfestigkeit oder Spaltzugfestigkeit bzw. Würfel oder Zylinderdruckfestigkeit es sich handelt.

Für einen linearen Zusammenhang zwischen der Oberflächenzugfestigkeit und Druckfestigkeit ist es möglich, die energetischen Kenngrößen nur in Abhängigkeit von der Oberflächenzugfestigkeit zu ermitteln. Jedoch führen die aus Abb. 3.12 ersichtlichen großen Streuungen, in welchen sich in

einem gewissen Umfang auch die in Abschnitt 3.1 beschriebenen unterschiedlichen Einflüsse einzelner Parameter auf die Zug- und Druckfestigkeit zeigen, zu höheren Abweichung zwischen den Versuchsergebnissen und den Rechenansätzen für die Verbundtragfähigkeit als bei Verwendung der Bestimmungsgleichungen (3.5) bis (3.7).

Die zerstörungsfrei an den zu verstärkenden Bauteiloberflächen ermittelte Druckfestigkeit ist deshalb eine notwendige Eingangsgröße für den Nachweis der Verbundtragfähigkeit. Ein Verzicht auf die Ermittlung dieser Eingangsgröße würde sich in geringeren charakteristischen Werten für die Verbundtragfähigkeit auswirken und somit zu Einbußen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Verfahren mit aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen führen. Für diesen Fall ist eine erneute Auswertung der bislang durchgeführten Verbundversuche erforderlich. Die zerstörungsfreie Ermittlung der Druckfestigkeit oberflächennaher Betonschichten ist im Zuge der Durchführung von Versuchen zum Verbundtragverhalten aufgeklebter Bewehrung deshalb unbedingt erforderlich. Hinsichtlich der Anordnung der Prüfstellen ist wegen der Abhängigkeit von der Betonierrichtung wie bei der Oberflächenzugfestigkeit zu fordern, dass deren Schwerpunkt im Bereich der Klebefuge liegt.

#### **3.5 Lage der Klebefugen in Bezug auf die Betonierrichtung**

Wie in den Abs. 3.1 und 3.4 erläutert wurde, sind die Oberflächenzugfestigkeit und die Druckfestigkeit oberflächennaher Betonschichten in erheblichem Maß von der Lage in Bezug auf die Betonierrichtung abhängig. In der Praxis werden Stahllaschen und CFK-Lamellen vor allem auf die Bauteilunterseite bzw. Bauteiloberseite geklebt. Bei diesen Flächen wird es sich im Regelfall um die beim Betonieren unten liegende geschalte Bauteilseite C sowie die nicht geschalte oben liegende Bauteilseite A handeln. Für die Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit ist das Verfahren mit Ringnut nach DIN 1048-2 anzuwenden. Durch die gebohrte Ringnut wird in vielen Fällen die Lage der Bruchfläche vorgegeben, so dass durch die Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit unter Umständen spezielle Eigenschaften des Betons im Bereich der beim Betonieren oben bzw. unten liegenden Oberflächen nicht hinreichend erfasst werden. Spezielle Eigenschaften können z.B. auf die Ausrichtung der Zuschlagkörner, die stark von der Kugelform abweichen, zurückzuführen sein. Für die zerstörungsfrei ermittelte Druckfestigkeit können ähnliche Überlegungen angestellt werden. Es ist deshalb zu überprüfen, ob im Hinblick auf die an den verschiedenen Seitenflächen aktivierbare Verbundtragfähigkeit Abweichungen festgestellt werden, die vermuten ließen, dass entweder zusätzliche Parameter zu erfassen sind oder die experimentellen Untersuchungen jeweils nur für die geprüfte Seitenfläche Gültigkeit besitzen und nicht auf andere Seiten übertragbar sind.

Für die Überprüfung werden an der Technischen Universität München durchgeführte Verbundversuche mit aufgeklebten Stahllaschen betrachtet, auf deren Grundlage die in den aktuellen Zulassungen enthaltene Bestimmungsgleichung für die aufnehmbare Verbundbruchkraft am Einzelriss  $T_{k,max}$  abgeleitet wurde. Diese Untersuchungen wurden im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik [36] durchgeführt und in umfangreichen Studien [24] ausgewertet. Wie die folgenden Abbildungen zeigen, ist für keine der energetischen Kenngrößen des bilinearen Verbundansatzes ein systematischer Einfluss der Betonierlage auf deren Abhängigkeit von den Betonfestigkeiten  $\beta_{OZ}$  und  $\beta_W$  zu erkennen. Variiert wurde in diesen Versuchen neben der Betonierlage die Stahllaschendicke  $t_L$  und die Betonfestigkeitsklasse. Die Stahllaschendicken betragen 5 mm, 10 mm und 20 mm. An Vergleichskörpern wurden Betondruckfestigkeiten  $f_{c,cube\ 200\ mm}$  von 38 N/mm<sup>2</sup> bzw. 59 N/mm<sup>2</sup> ermittelt.

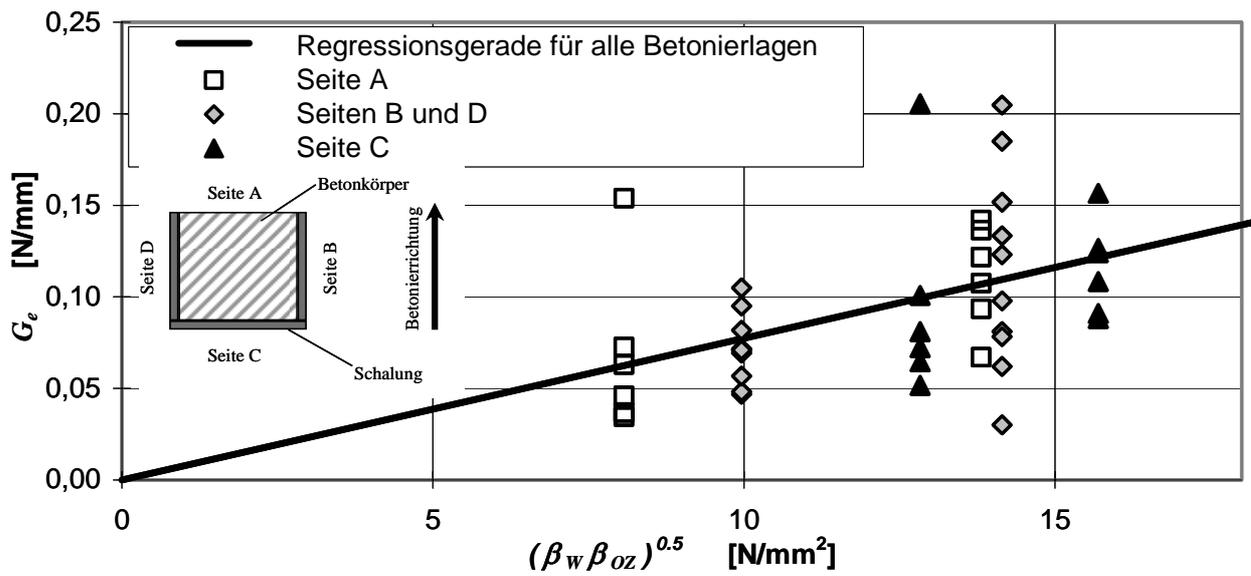


Abb. 3.13: Vergleich der experimentell ermittelten elastischen Verbundenergie  $G_e$  [24] für die verschiedenen Prüfkörperseiten im Hinblick auf die Betonierrichtung

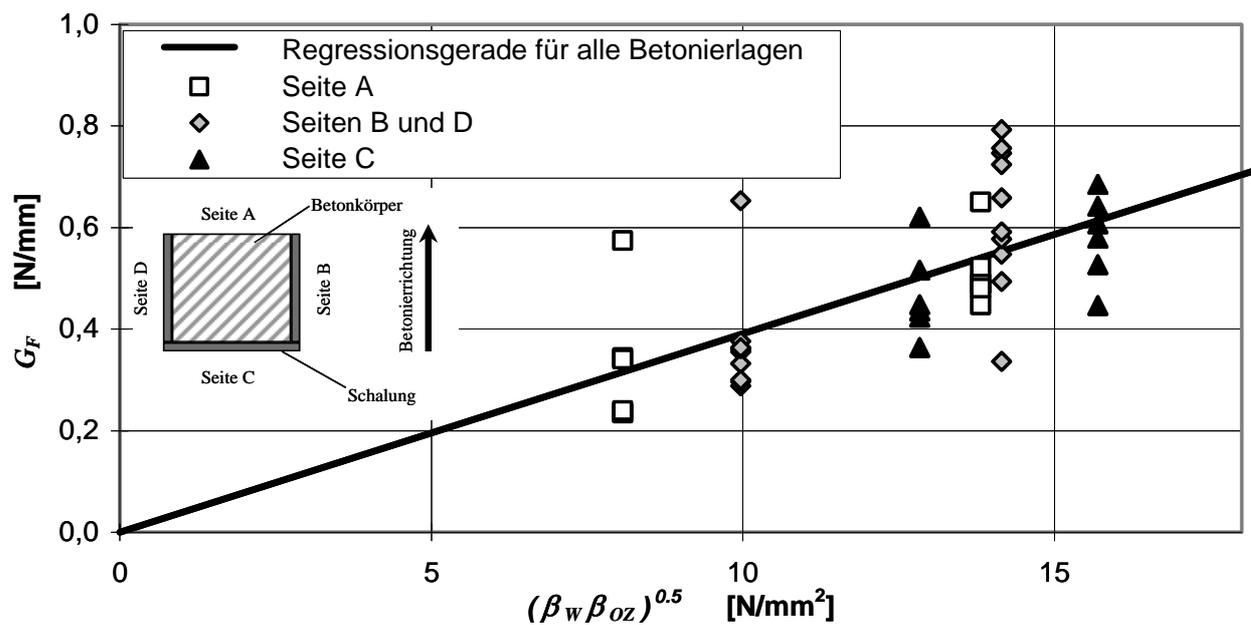
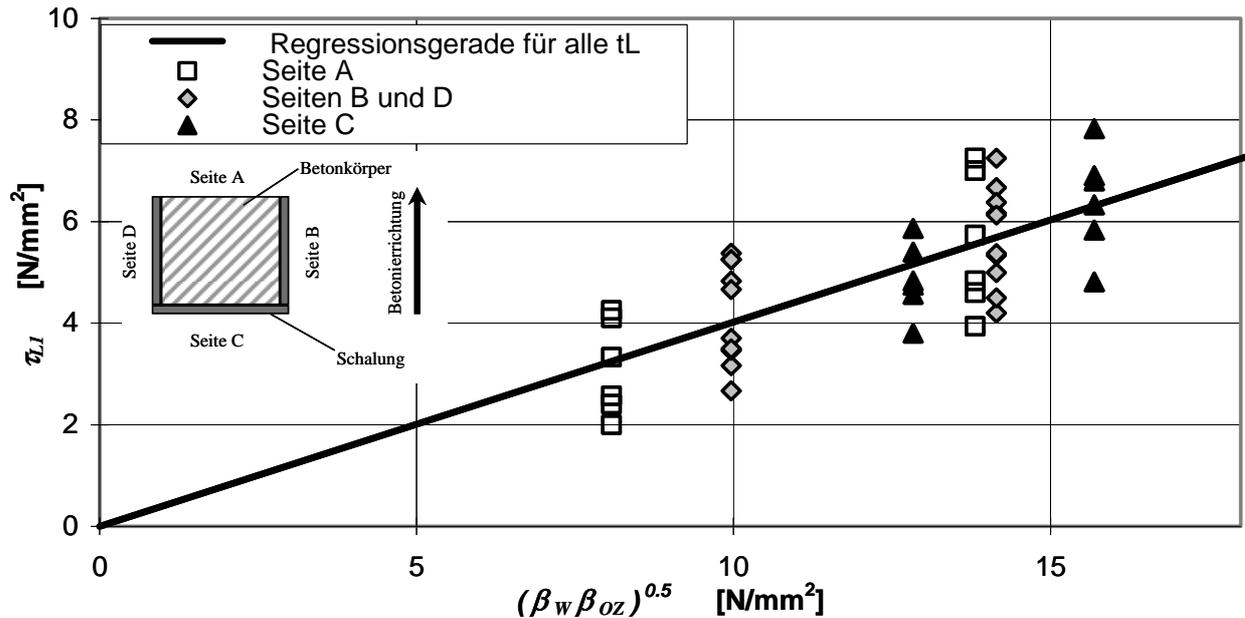


Abb. 3.14: Vergleich der experimentell ermittelten Verbundbruchenergie  $G_F$  [24] für die verschiedenen Prüfkörperseiten im Hinblick auf die Betonierrichtung



**Abb. 3.15:** Vergleich der experimentell ermittelten maximalen Verbundspannung  $\tau_{LI}$  [24] für die verschiedenen Prüfkörperseiten im Hinblick auf die Betonierichtung

Es kann somit zumindest für die in den betrachteten Untersuchungen vorliegenden rundkörnigen Zuschläge festgestellt werden, dass die experimentellen Untersuchungen zur Verbundtragfähigkeit an allen Seitenflächen eines Betonprüfkörpers erfolgen können und ein zusätzlicher Einfluss der Betonierlage ausgeschlossen werden kann, wenn die Oberflächenzugfestigkeit und die Druckfestigkeit an den geprüften Seitenflächen nach DIN 1048-2 ermittelt werden.

### 3.6 Zuschlagform

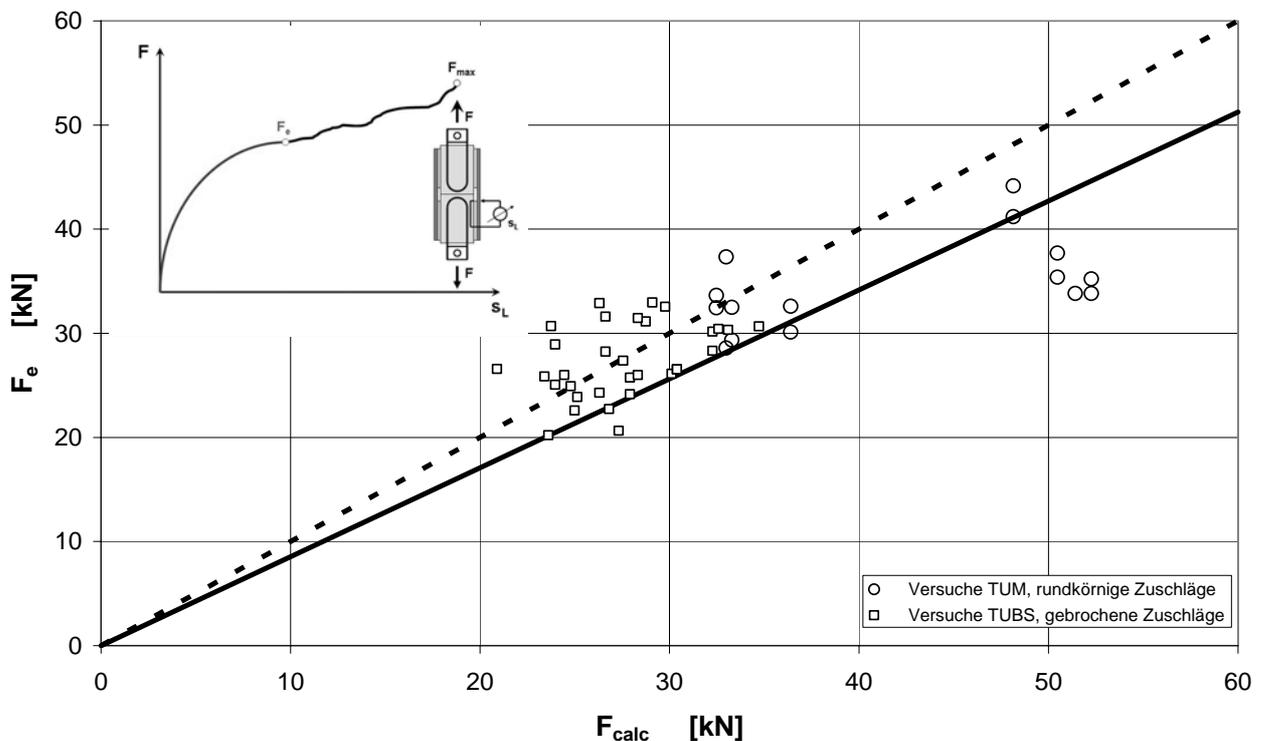
Die für die experimentellen Untersuchungen zur Verbundtragfähigkeit aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen benötigten Prüfkörper wurden bislang unter Verwendung der lokal verfügbaren Zuschläge hergestellt. So wurden für die Untersuchungen an der Technischen Universität München ausschließlich rundkörnige Zuschläge aus natürlichen, südbayerischen Vorkommen verwendet. Für die Untersuchungen an der Technischen Universität Braunschweig wurden zumindest teilweise mechanisch aufbereitete (gebrochene) Zuschläge verwendet.

Die einschlägigen Normen z.B. DIN EN 12620 [18] nehmen keine Unterscheidung zwischen natürlichen unbehandelten Körnungen und natürlichen, mechanisch aufbereiteten Körnungen vor. In der Praxis können deshalb sowohl Betone mit rundkörnigen wie auch gebrochenen Zuschlägen oder einer Kombination beider Zuschlagsformen auftreten. Wie bereits in den Abschnitten 3.1 und 3.5 erläutert, kann unter Umständen ein zusätzlicher Einfluss der Kornform nicht ausgeschlossen werden, der durch die Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit und der Druckfestigkeit nach DIN 1048-2 nicht erfasst wird. Neben der Ausrichtung der Zuschlagkörner kann im Hinblick auf die Verbundtragfähigkeit auch das Verhältnis von Volumen und Oberfläche von Bedeutung sein.

Für eine grundsätzliche Beurteilung dieser Problematik werden in der folgenden Abb. 3.16 Verbundversuche mit aufgeklebten CFK-Lamellen, die an den Technischen Universitäten München [28] und Braunschweig [23] durchgeführt wurden, verglichen. Die in beiden Versuchsreihen verwendeten CFK-Lamellen und Epoxydharzkleber wiesen vergleichbare Eigenschaften auf. Für beide Versuchsreihen wurden die experimentell und die rechnerisch auf der Grundlage der von Neubauer [23] angegebenen Bestimmungsgleichung für die aufnehmbare Verbundbruchkraft  $T_{max}$  ermittelte Verbundtragfähigkeit gegenübergestellt. Diese Bestimmungsgleichung geht von einem linearen Zusammenhang zwischen der Oberflächenzugfestigkeit  $\beta_{OZ}$  und der Verbundbruchenergie  $G_F$  aus. Die Ermittlung des Vorfaktors  $c_T$  erfolgte auf der Basis der in den Braunschweiger Versuchen auf die CFK-Lamellen bei einsetzender Verbundentkopplung wirkenden Zugkräfte  $F_e$ .

$$T_{max} = c_T \cdot b_L \cdot \sqrt{E_L \cdot \beta_{OZ} \cdot t_L} \quad (3.9)$$

mit  $b_L$  Breite der CFK-Lamelle  
 $E_L$  Elastizitätsmodul der CFK-Lamelle  
 $t_L$  Dicke der CFK-Lamelle



**Abb. 3.16:** Gegenüberstellung der Verbundtragfähigkeit in Versuchen mit rundkörnigen und gebrochenen Zuschlägen

Die analoge Auswertung beider Versuchsreihen zeigt für die an der Technischen Universität München durchgeführten Verbundversuche mit rundkörnigen Zuschlägen eine geringere Verbundtragfähigkeit. Da für beide Versuchsreihen aber nicht alle Angaben zu den relevanten Einflussgrößen, z.B. Druckfestigkeit im oberflächennahen Bereich, vorliegen, kann mit dieser Gegenüberstellung der Einfluss der Kornform nicht quantifiziert werden. Ein Einfluss kann andererseits aber auch nicht ausgeschlossen werden, so dass für die Durchführung von Verbundversuchen empfohlen wird, ausschließlich rundkörnige, mechanisch nicht aufbereitete

Zuschläge zu verwenden, um auf der sicheren Seite liegende Aussagen für den gesamten Anwendungsbereich zu ermöglichen.

#### 3.7 Zuschlagskörnung

Die Eigenschaften des Festbetons hängen unter anderem von den Ausgangsstoffen und der Zusammensetzung des Betons ab. Geht man von einem wesentlichen Einfluss der Betonzugfestigkeit auf die Verbundtragfähigkeit aus, so sind in Verbundversuchen zusätzliche Einflussgrößen, die durch die Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit nach DIN 1048-2 nicht erfasst werden ungünstig einzustellen, um gesicherte Aussagen für den gesamten Anwendungsbereich zu ermöglichen. Hinsichtlich der Zusammensetzung ist bekannt, dass Zuschlaggemische mit höherem Sandanteil bei gleichem Wasserzementwert, gleichem Zementgehalt sowie gleich guter Verdichtung und Nachbehandlung höhere Zugfestigkeiten liefern. Sandreiche Zuschlaggemische erfordern aber andererseits bei gleicher Konsistenz höhere Zementgehalte, die lokal durch das Schwinden der Zementsteinmatrix infolge der resultierenden Zwangsspannungen in Relation zur Druckfestigkeit zu einer verminderten Zugfestigkeit führen können. Diese lokale Verminderung der Zugfestigkeit kann vor allem bei sandreichen Zuschlagkörnungen mit großem Größtkorndurchmesser auftreten. Sie wird jedoch bei der Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit nicht zwangsläufig erfasst und kann zu einer verminderten Verbundtragfähigkeit führen. Für die Herstellung der Betonprüfkörper wird deshalb empfohlen, die sandreiche Zuschlagskörnungen mit großem Größtkorndurchmesser zu wählen. Wegen der im Laborbetrieb auftretenden Prüfkörperabmessungen wird in vielen Fällen ein Größtkorndurchmesser von 63 mm nicht praktikabel sein, so dass für die Prüfkörperherstellung die eine Zuschlagskörnung zwischen den Sieblinien ④ und ⑤ für ein Größtkorn von 32 mm gewählt werden sollte.

#### 3.8 Prüfkörperbreite/Laschenbreite

Hinsichtlich des Einflusses der Prüfkörper- und Laschenbreite können auf der Grundlage der aus der Literatur bekannten Untersuchungen die nachfolgenden Feststellungen getroffen werden, wobei angemerkt werden muss, dass gezielte Untersuchungen bislang nicht erfolgten.

Holzenkämpfer [20] führte in seine nachstehende Bestimmungsgleichung für die am Einzelriss aufnehmbare Verbundbruchkraft den Faktor  $k_b$  ein. Durch diesen Beiwert soll einerseits der Effekt berücksichtigt werden, dass mit steigender Probengröße die Festigkeit von Werkstoffen abnimmt. Zum anderen soll erfasst werden, dass es zu einer Erhöhung der Verbundtragfähigkeit, durch die Mitwirkung von seitlich an die Klebefläche angrenzenden Bauteilbereichen kommt. Der Faktor  $k_b$  wird deshalb als Produkt der Beiwerte  $k_{b1}$  und  $k_{b2}$  angegeben, die jeweils einen dieser Effekte berücksichtigen.

$$T_{k,max} = c_T \cdot b_L \cdot k_b \cdot k_c \cdot \sqrt{\beta_{OZ} \cdot E_L \cdot t_L} \quad (3.10)$$

mit  $c_T$  Kalibrierfaktor  
 $b_L$  Breite der CFK-Lamelle

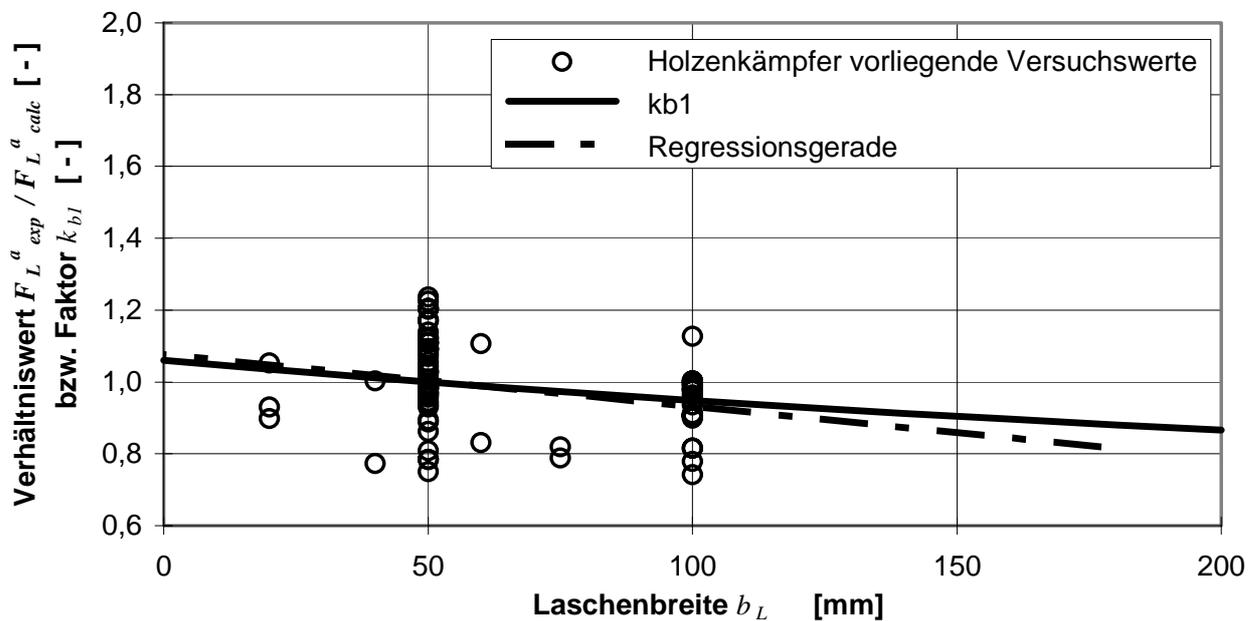
$$k = k_{b1} \cdot k_{b2} \quad (3.11)$$

$$k_{b1} = \sqrt{\frac{1.125}{1 + \frac{b_L}{400}}} \quad (3.12)$$

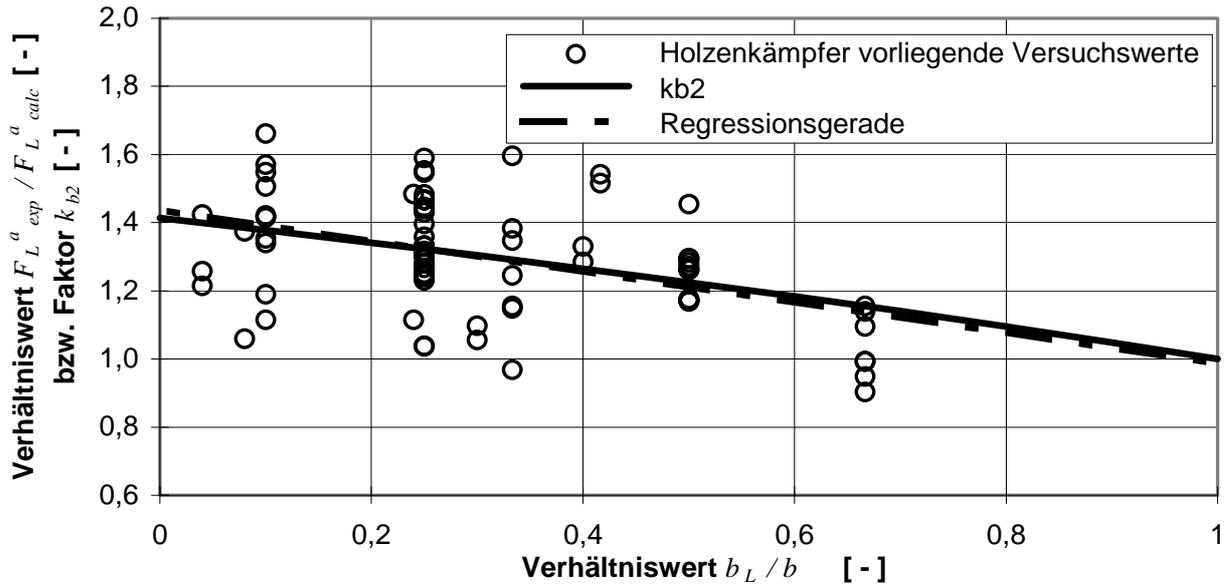
$$k_{b2} = \sqrt{2 - \frac{b_L}{b}} \quad (3.13)$$

$k_c$	Beiwert für den Einfluss der Betonierlage
$\beta_{OZ}$	Oberflächenzugfestigkeit
$E_L$	Elastizitätsmodul der CFK-Lamelle
$t_L$	Dicke der CFK-Lamelle

Eingangsgrößen für die Ermittlung des Faktors  $k_b$  sind die Laschenbreite  $b_L$  sowie das Verhältnis von Laschenbreite zu Bauteilbreite bzw. Laschenabstand  $b_L/b$ . Die folgenden Abbildungen zeigen Anpassung der Faktoren  $k_{b1}$  und  $k_{b2}$  an die experimentelle Datenbasis durch Holzenkämpfer. In Abb. 3.17 und Abb. 3.18 ist das Verhältnis von experimenteller zu rechnerischer Verbundbruchkraft  $F_{L,exp}^a/F_{L,calc}^a$  über die Eingangsparameter für die Bestimmung von  $k_{b1}$  bzw.  $k_{b2}$  aufgetragen. Die rechnerische Verbundbruchkraft wurde dabei mit Gleichung (3.10) ermittelt. Der jeweils betrachtete Beiwert wurde gleich 1.0 gesetzt. Die Abbildungen zeigen, dass die Einflüsse gut erfasst werden. Es muss allerdings angemerkt werden, dass Holzenkämpfer für die Ableitung von Gleichung (3.10) auf Verbundversuche aus der Literatur zurückgriff, für die wesentliche Parameter, z.B. die Oberflächenzugfestigkeit nicht bekannt waren und deshalb auf der Grundlage von Annahmen in die Modellkalibrierung eingingen.

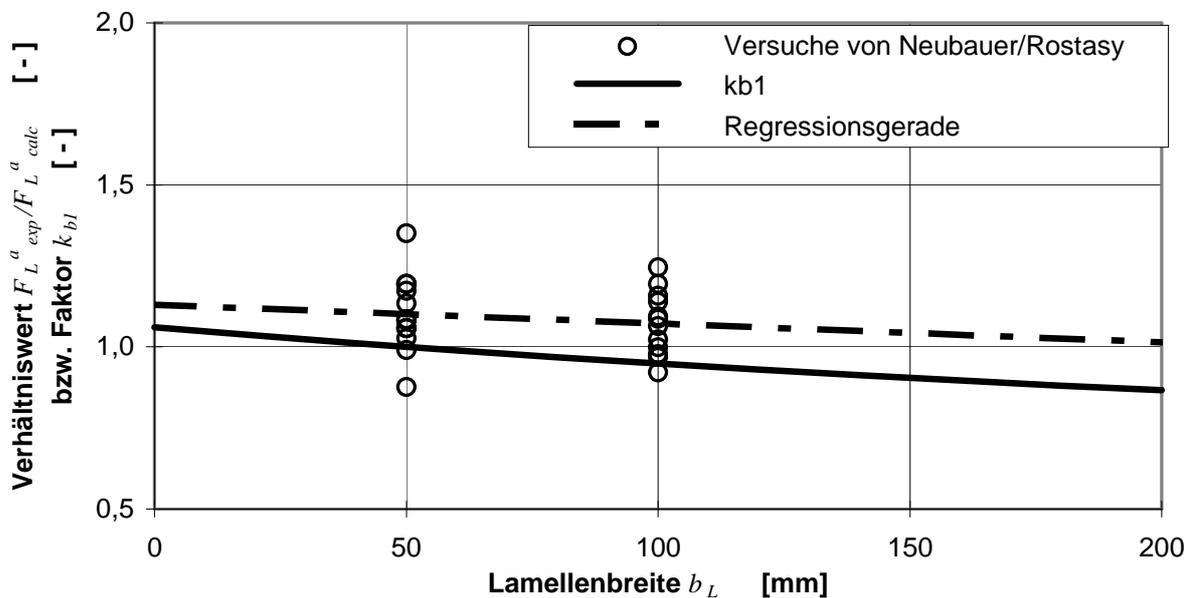


**Abb. 3.17:** Anpassung des Beiwertes  $k_{b1}$  zur Beschreibung des Einflusses der Laschenbreite  $b_L$  auf die Verbundbruchkraft [24]

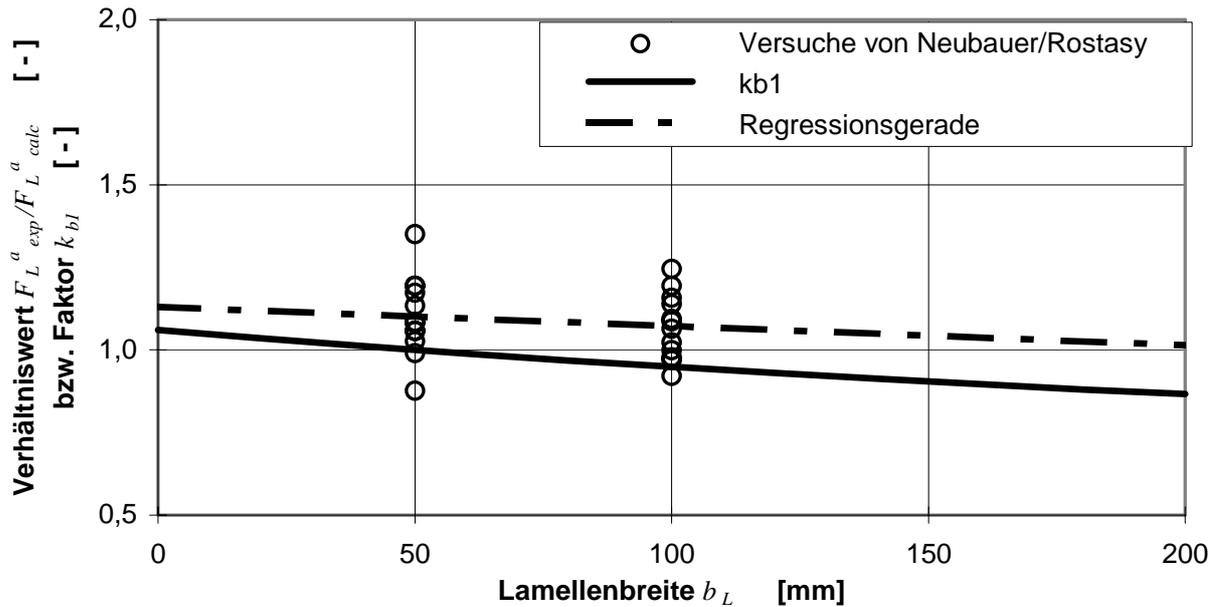


**Abb. 3.18:** Anpassung des Beiwertes  $k_{b1}$  zur Beschreibung des Einflusses des Verhältnisses  $b_L/b$  auf die Verbundbruchkraft [24]

Mit den von Neubauer [23] durchgeführten Verbundversuche mit aufgeklebten CFK-Lamellen kann eine Überprüfung der Beiwerte  $k_{b1}$  und  $k_{b2}$  erfolgen. Dazu werden nur Versuche einer Betongüte und einer Lamellendicke berücksichtigt, um Verzerrungen im Falle einer unkorrekten Erfassung dieser Einflussgrößen durch das Modell auszuschließen.



**Abb. 3.19:** Überprüfung der Eignung des Beiwertes  $k_{b1}$  zur Beschreibung des Einflusses der Lamellenbreite  $b_L$  auf die Verbundbruchkraft von CFK-Lamellen [24]



**Abb. 3.20:** Überprüfung der Eignung des Beiwertes  $k_{b2}$  zur Beschreibung des Einflusses des Verhältnisses  $b_L/b$  auf die Verbundbruchkraft von CFK-Lamellen [24]

Auch für diese Überprüfung wurde der Verhältnisswert von experimenteller zu rechnerischer Verbundbruchkraft für  $k_{b1} = 1$  bzw.  $k_{b2} = 1$  ermittelt und über der Laschenbreite  $b_L$  bzw. dem Wert  $b_L/b$  aufgetragen. Abb. 3.19 und Abb. 3.20 zeigen deutlich, dass die Faktoren  $k_{b1}$  und  $k_{b2}$  durch Verbundversuche mit CFK-Lamellen nicht bestätigt werden können und diese zumindest für CFK-Lamellen nicht geeignet sind, den Einfluss der Lamellen- und Bauteilbreite zu erfassen. Die nicht korrekten Faktoren  $k_{b1}$  und  $k_{b2}$  führen im Bereich baupraktischer Abmessungen zu einer Überschätzung der aufnehmbaren Verbundbruchkraft um bis zu 30 %.

Auch auf Grundlage der an der Technischen Universität München durchgeführten Verbundversuche [24] kann eine quantitative Erfassung des Einflusses der Laschenbreite  $b_L$  und der Betonkörperbreite  $b$  nicht erfolgen. Allerdings kann auch die zur Verfügung stehende Datenbasis nicht durch die in der Literatur dargestellten Versuche vergrößert werden, da die für eine Auswertung notwendigen Informationen, wie zum Beispiel die Relativverschiebungs-Längsdehnungskurve, nicht dokumentiert wurden. Dass eine Überprüfung des Einflusses dieser beiden Größen durch gezielte Versuche aber notwendig ist, zeigen die folgenden Bilder, in welchen – wie bei der vorhergehenden Überprüfung der Ansätze anhand der Versuche von Neubauer – ausschließlich Zug-Druck-Versuche betrachtet werden. Die Zielgrößen wurden in diesen Diagrammen um den Einfluss der Betonfestigkeiten korrigiert.

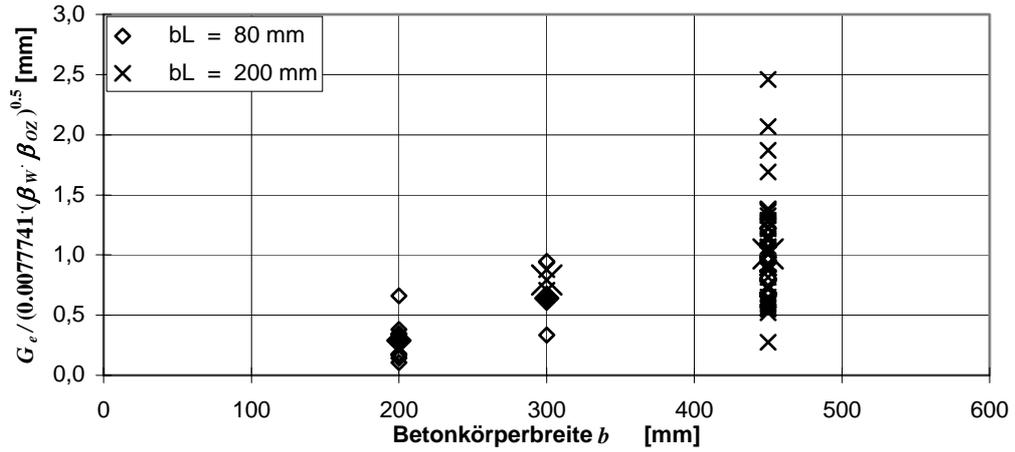


Abb. 3.21: Einfluss der Laschenbreite  $b_L$  und der Betonkörperbreite  $b$  auf die elastisch aufnehmbare Verbundenergie  $G_e$  [24]

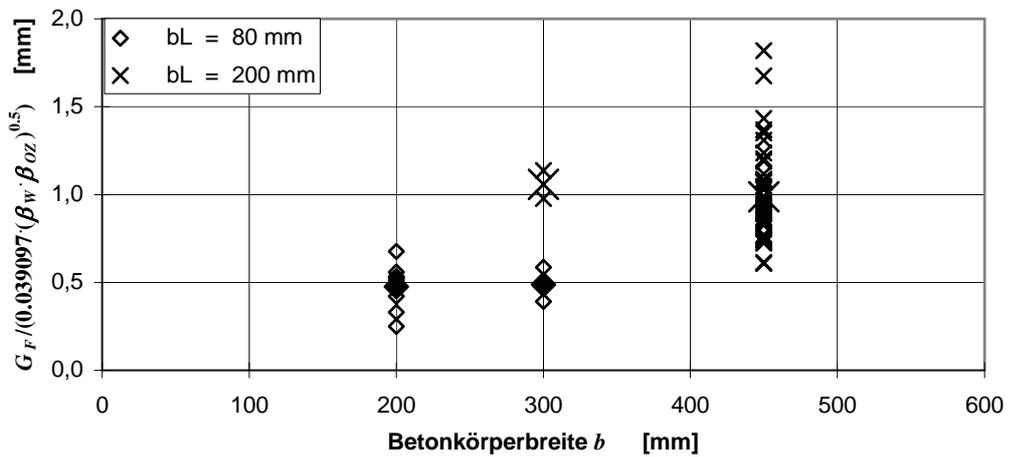


Abb. 3.22: Einfluss der Laschenbreite  $b_L$  und der Betonkörperbreite  $b$  auf die Verbundbruchenergie  $G_F$  [24]

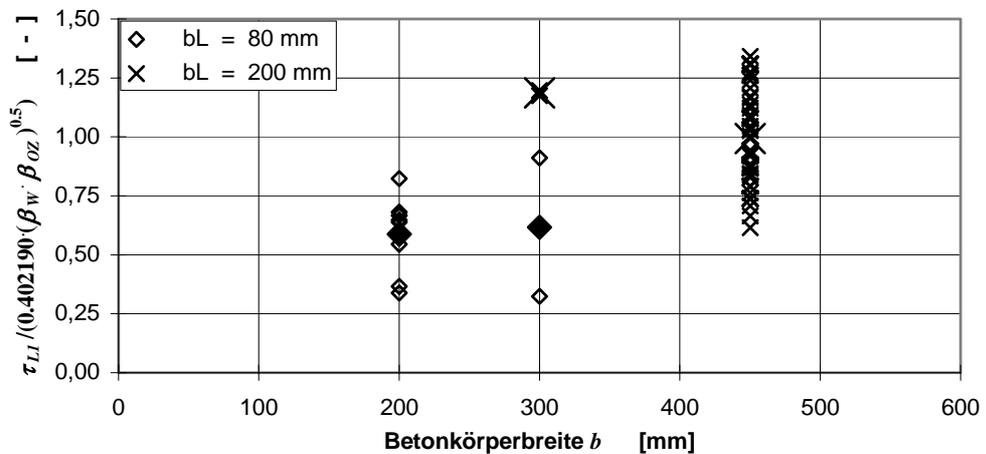


Abb. 3.23: Einfluss der Laschenbreite  $b_L$  und der Betonkörperbreite  $b$  auf die maximale Verbundspannung  $\tau_{Lv1}$  [24]

Für alle drei Zielgrößen kann ein deutlicher Einfluss der Laschenbreite  $b_L$  festgestellt werden. Die Betonkörperbreite  $b$  bzw. das Verhältnis  $b_L/b$  hingegen zeigen nur geringe Auswirkungen vor allem auf die Zielgrößen  $G_F$  und  $\tau_{L,I}$ . Für die Durchführung von Verbundversuchen kann auf der Grundlage des vorliegenden Kenntnisstandes empfohlen werden, möglichst geringe Laschenbreiten bzw. Lamellenbreiten einzusetzen. Hinsichtlich der Breite des Betonprüfkörpers sind keine besonderen Anforderungen zu stellen, so dass diese an die mess- und versuchstechnisch erforderlichen Randbedingungen angepasst werden können.

### 3.9 Laschendicke

Für die Diskussion des Einflusses der Laschendicke  $t_L$  werden die im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik an der Technischen Universität München durchgeführte Verbundversuche mit aufgeklebten Stahllaschen [36] betrachtet, auf deren Grundlage die in den aktuellen Zulassungen enthaltene Bestimmungsgleichung für die aufnehmbare Verbundbruchkraft am Einzerriss  $T_{k,max}$  abgeleitet wurde. Die folgenden Abbildungen zeigen die Lage der Regressionsgeraden für die in Zug-Druck-Versuchen geprüften planmäßigen Laschendicken von 5 mm, 10 mm und 20 mm. Neben der Laschendicke wurden in diesen Versuchen nur die Betonierlage und die Betonfestigkeit variiert. Die an Vergleichskörpern ermittelte Würfeldruckfestigkeit  $f_{c,cube\ 200\ mm}$  betrug  $38\ \text{N/mm}^2$  bzw.  $59\ \text{N/mm}^2$ .

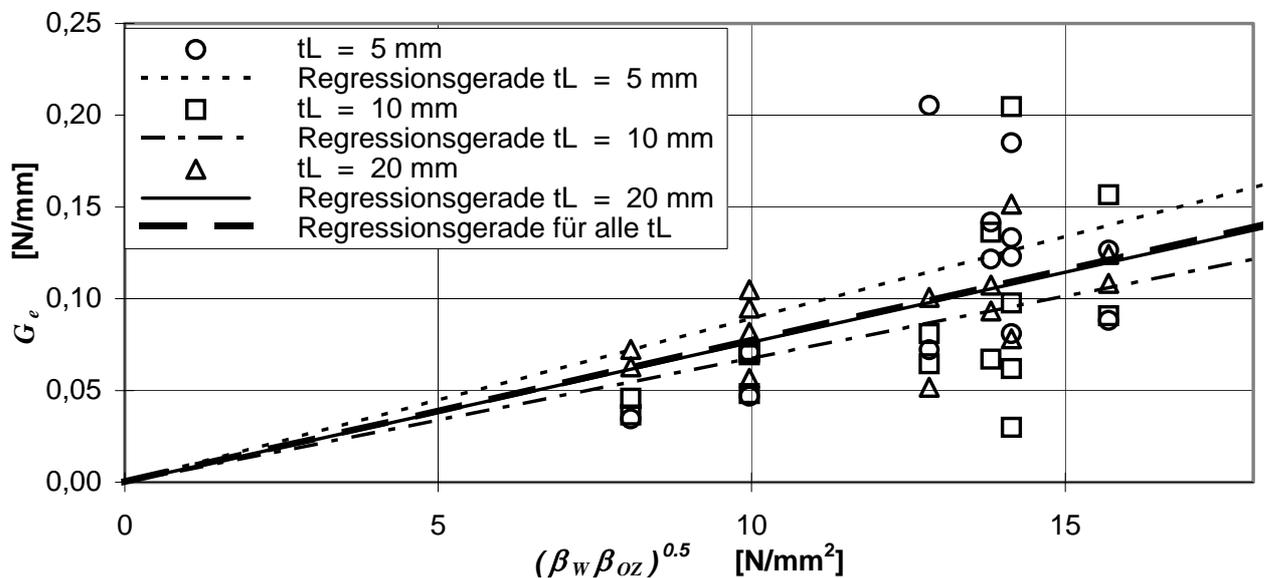


Abb. 3.24: Lage der Regressionsgeraden für die Zielgröße  $G_e$  [24]

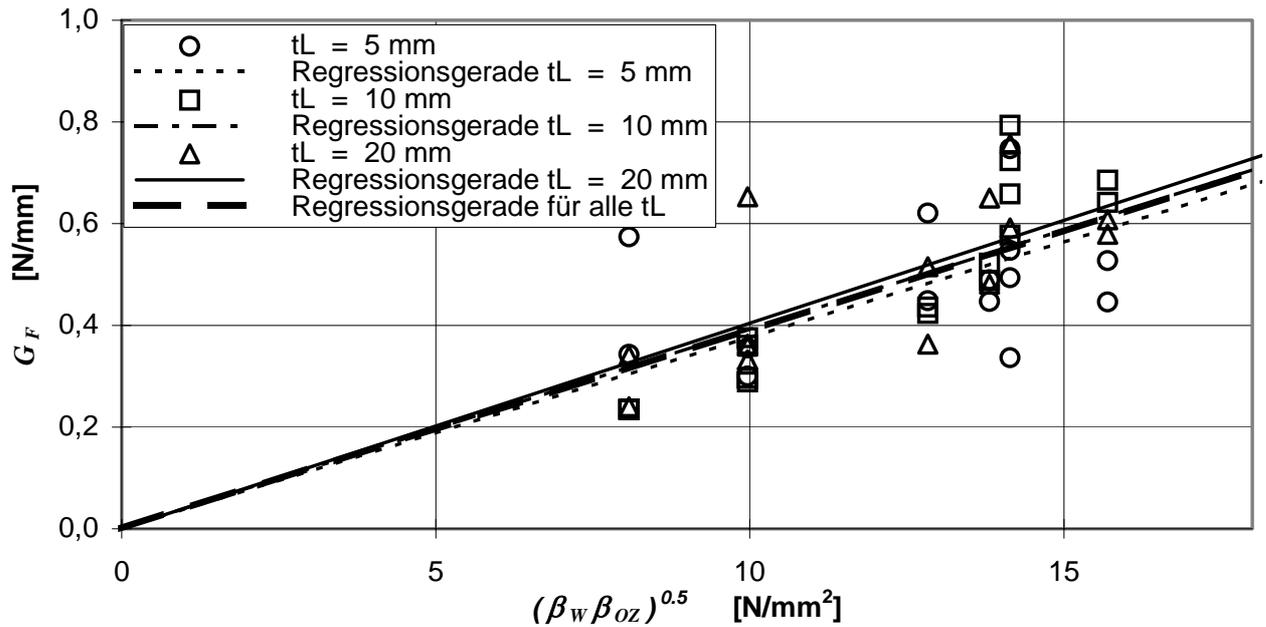


Abb. 3.25: Lage der Regressionsgeraden für die Zielgröße  $G_F$  [24]

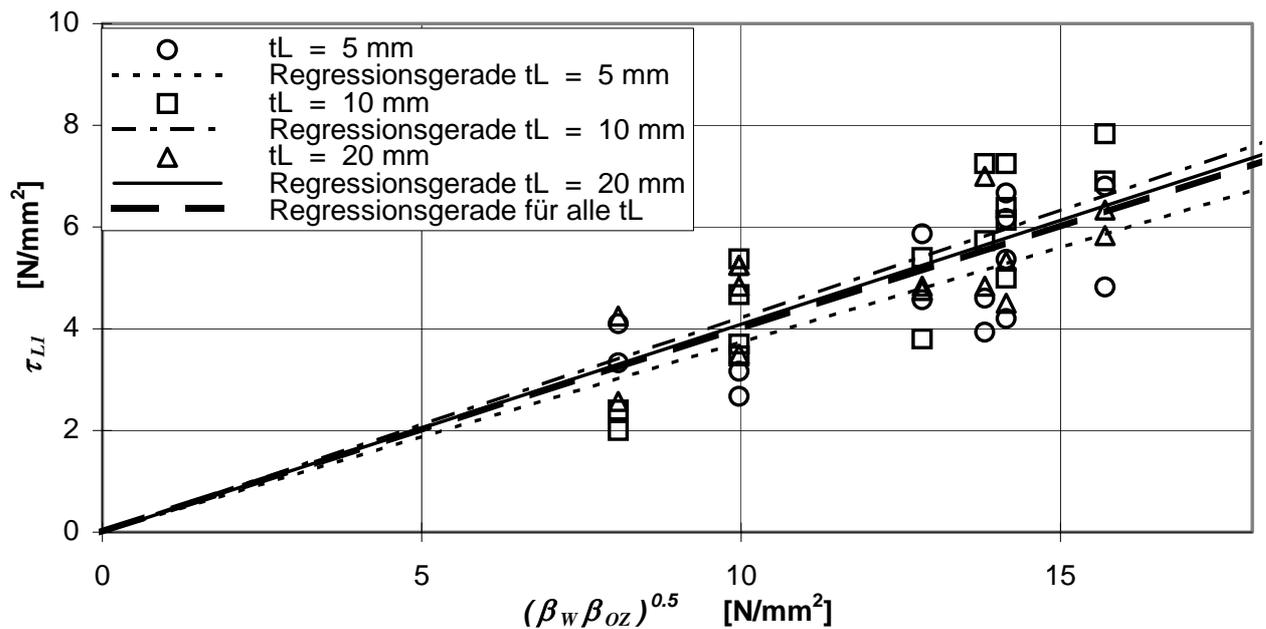


Abb. 3.26: Lage der Regressionsgeraden für die Zielgröße  $\tau_{LI}$  [24]

Ein systematischer Einfluss der Laschendicke ist nicht zu erkennen. Auch Neubauer hatte in seinen Versuchen mit aufgeklebten CFK-Lamellen keine Veränderung der Verbundtragfähigkeit wenn die Lamellen ein- oder zweilagig übereinander verklebt wurden.

Für die Durchführung von Verbundversuchen kann folglich eine minimale Laschen- bzw. Lamellendicke an der unteren Grenze des für die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

vorgesehenen Anwendungsbereichs gewählt werden, wodurch kleinere Abmessungen der Betonprüfkörper und geringere Prüfkraften erforderlich werden.

### 3.10 Prüfkörperform

Die aktuell gültigen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für aufgeklebte Stahllaschen und CFK-Lamellen sehen als Anwendungsbereich die Verstärkung der Biegezug- und Querkraftbewehrung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen vor. – obgleich dies bei der Festlegung des Anwendungsbereichs in den Zulassungsbescheiden nicht explizit zum Ausdruck kommt. In der Vergangenheit wurden die in der Biegedruckzone von Platten- und Balkenquerschnitten auftretende Verbundbeanspruchung bevorzugt durch Versuche an den in Abb. 3.27 dargestellten Zug-Zug- bzw. Zug-Druck-Doppellaschenkörpern abgebildet. Diese Versuche bilden den Endverankerungsbereich der Klebarmierung an dem zum Momentennullpunkt nächstgelegenen Biegeriss ab, der auch als äußerster Biegeriss bezeichnet wird.

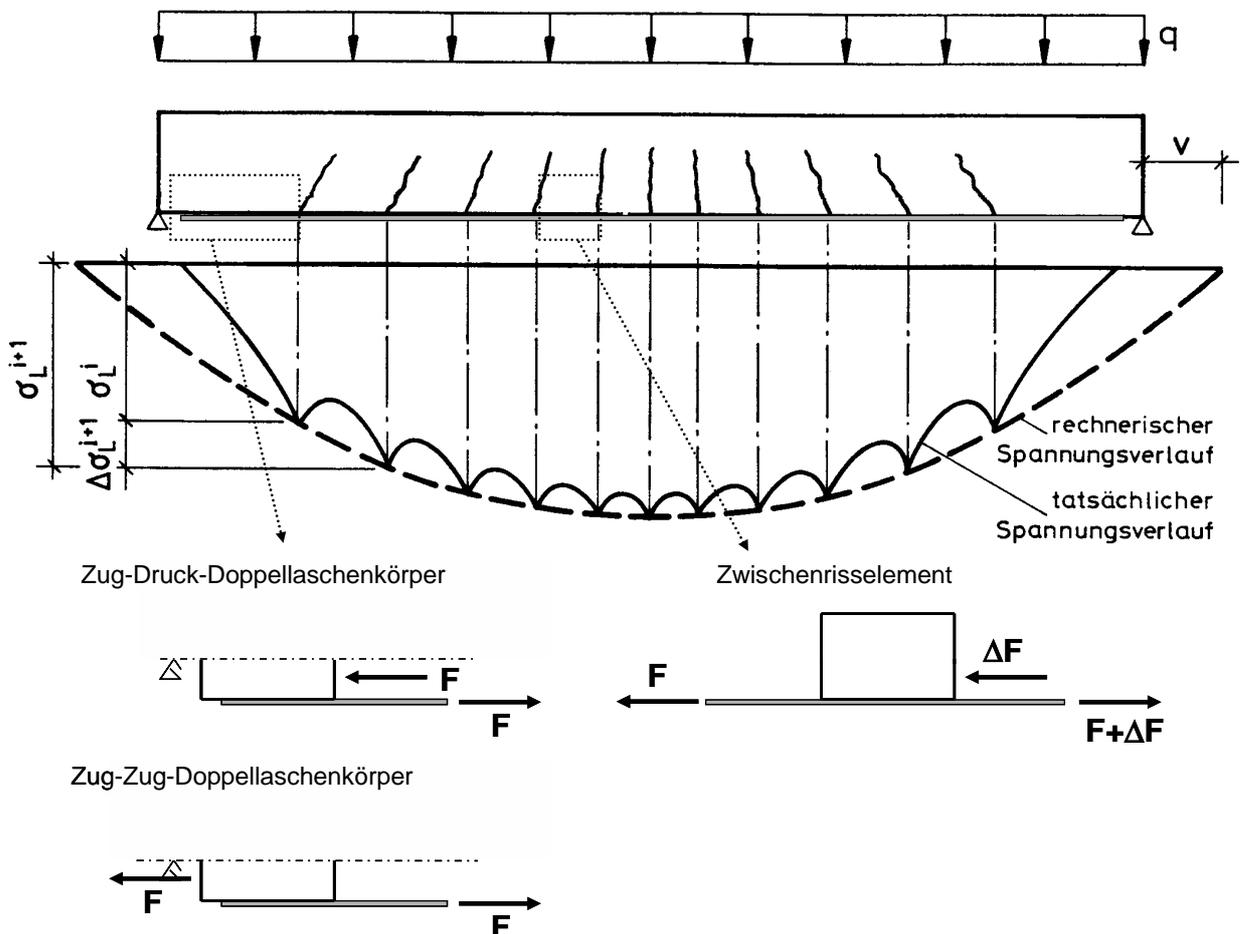
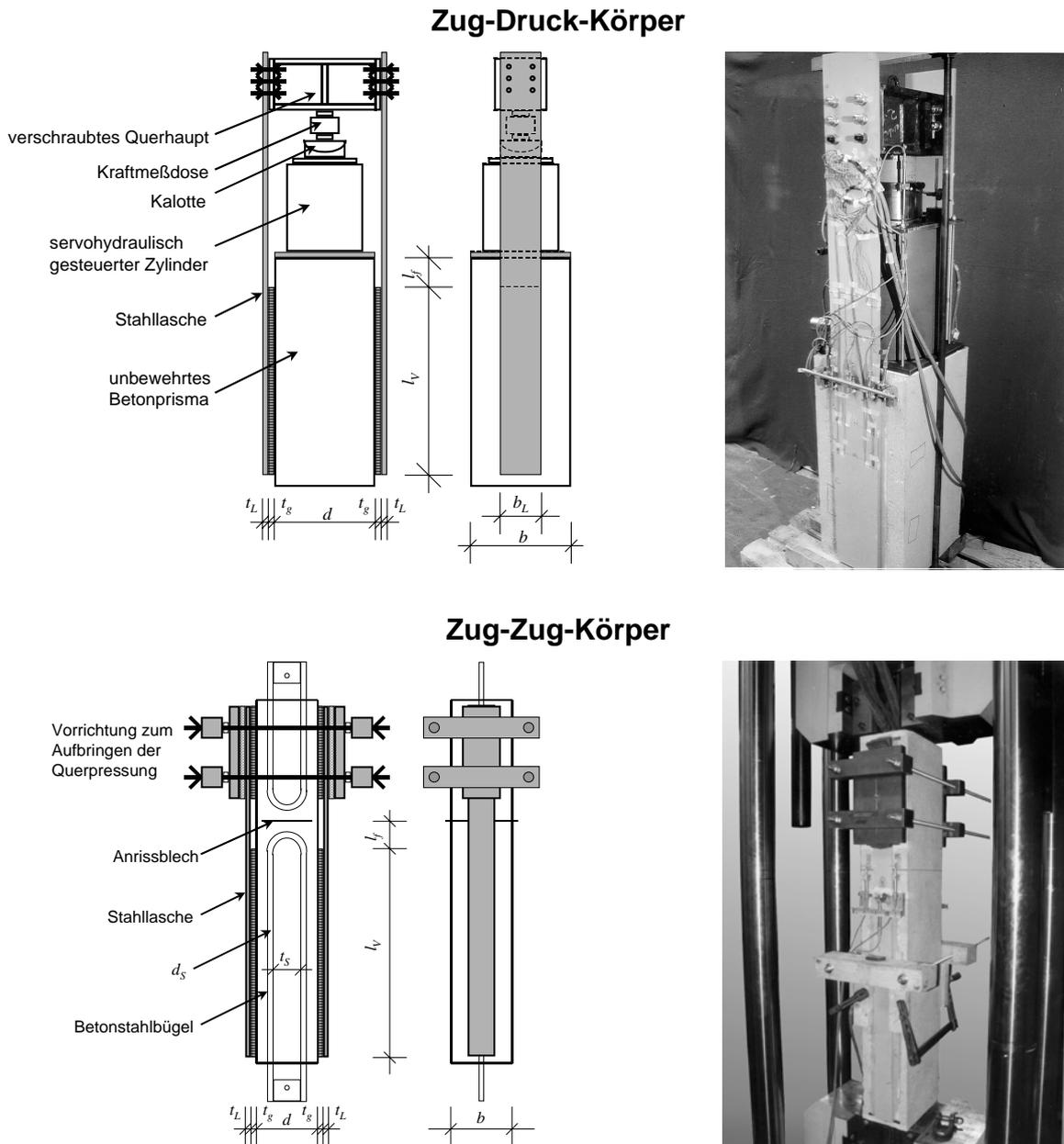


Abb. 3.27: Abbildung des Verbundverhaltens im Versuch

In Abb. 3.28 sind Prinzipskizzen und Bilder der an der Technischen Universität München verwendeten Zug-Druck- und Zug-Zug-Doppellaschenkörper für die Untersuchungen mit aufgeklebten Stahllaschen dargestellt. Für kleinere Laschenquerschnitte wurden Zug-Zug-

Doppellaschenkörper verwendet. Um aufwendige Lasteinleitungsvorrichtungen und große Prüfkörperquerschnitte zu vermeiden, wurden größere Laschenquerschnitte an Zug-Druck-Doppellaschenkörpern untersucht. Die verwendeten Zug-Zug-Doppellaschenkörper wiesen vier Klebeverbundflächen auf. Um die umfangreiche messtechnische Ausrüstung auf eine Hälfte des Prüfkörpers beschränken zu können, wurde auf zwei der vier Verbundflächen ein Anpressdruck senkrecht zur Klebefuge aufgebracht, um ein Verbundversagen dieser Bereiche vor dem Erreichen der Verbundtragfähigkeit der instrumentierten Körperhälfte zu vermeiden. Die mit dem Anpressdruck beaufschlagten Klebeflächen können deutlich kürzer ausgeführt werden, als die instrumentierten.



**Abb. 3.28:** Zug-Druck- und Zug-Zug-Doppellaschenkörper für die Untersuchung der Verbundverhaltens aufgeklebter Stahllaschen

Die folgenden Abbildungen zeigen einen Vergleich der Verbundversuche an Zug-Druck- und Zug-Zug-Doppellaschenkörpern mit aufgeklebten Stahllaschen [24]. Die beiden Versuchskörpertypen wiesen jeweils den gleichen Laschenquerschnitt und die gleiche Betonkörperbreite auf. Mit den jeweiligen Lagen der Regressionsgeraden kann ermittelt werden, um welchen Anteil die Zielgrößen bei den Zug-Zug-Körpern über den an Zug-Druck-Körpern ermittelten Zielgrößen liegen. Die elastisch aufnehmbare Verbundenergie ist bei Zug-Zug-Doppellaschenkörpern um etwa 60% größer als bei Zug-Druck-Doppellaschenkörpern, die aufnehmbare Bruchenergie um etwa 100% und die maximale Verbundspannung um etwa 50%.

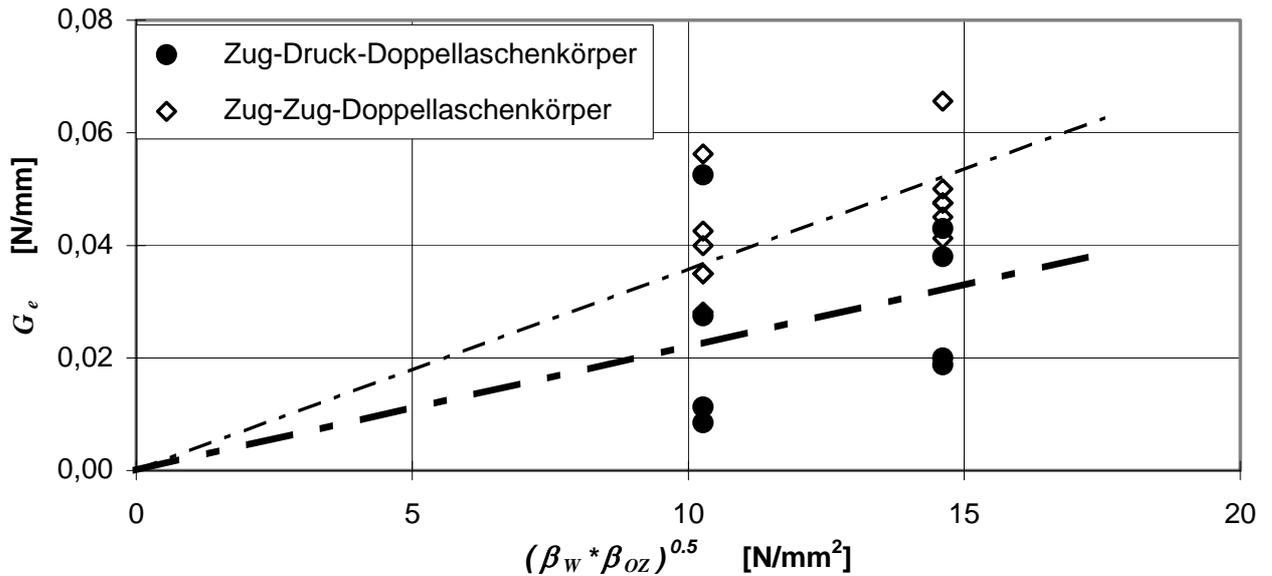


Abb. 3.29: Einfluss der Prüfkörperart auf die elastisch aufnehmbare Verbundenergie  $G_e$  [24]

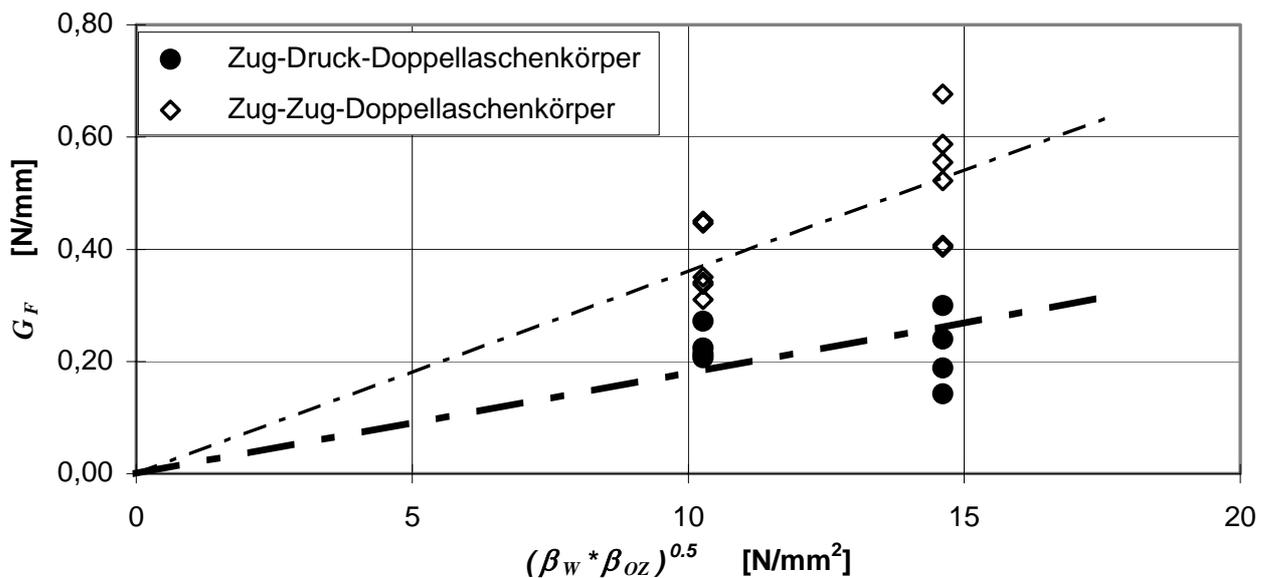


Abb. 3.30: Einfluss der Prüfkörperart auf die elastisch aufnehmbare Verbundenergie  $G_F$  [24]

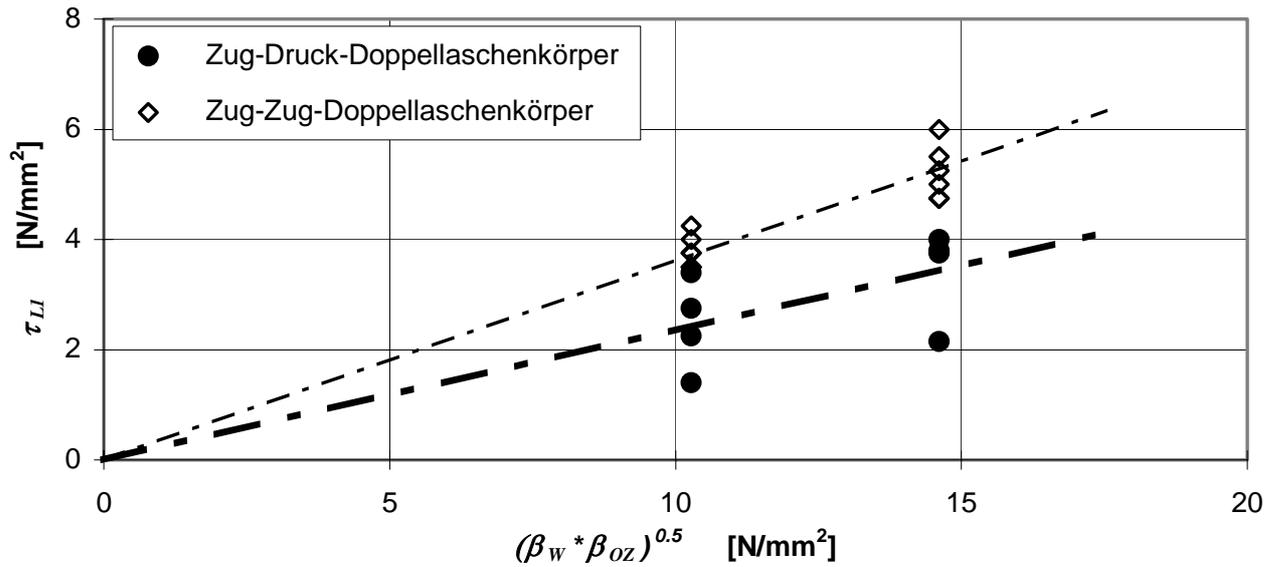


Abb. 3.31: Einfluss der Prüfkörperart auf die elastisch aufnehmbare Verbundenergie  $\tau_{LI}$  [24]

Die Abweichungen zwischen Zug-Zug- und Zug-Druck-Doppellaschenkörpern können vermutlich auf die unterschiedlichen Verformungen der Betonprismen zurückgeführt werden, die je nach Prüfkörperart einer Zug- oder Druckspannungsbeanspruchung ausgesetzt sind. Die in den aktuellen Zulassungsbescheiden enthaltenen Ansätze zur Verbundtragfähigkeit beruhen auf bruchmechanischen Überlegungen. Bei der Auswertung der Ergebnisse der Verbundversuche wurden Betonverformungen vernachlässigt, da diese sowohl messtechnisch als auch rechnerisch nur schwer zu bestimmen sind. Grundsätzliche Überlegungen zu dieser Problematik wurden von Holzenkämpfer [20] und Niedermeier [24] angestellt. Ein Modell zur quantitativen Bestimmung des Einflusses auftretender Betonverformungen liegt jedoch nicht vor, so dass für die Durchführung von Verbundversuchen nur festgestellt werden kann, dass mit Zug-Druck-Doppellaschenkörpern geringere, und damit konservativere Ansätze für die Verbundtragfähigkeit ermittelt werden, als mit Zug-Zug-Doppellaschenkörpern. Letztere wiederum liefern im Vergleich zu Biegeversuchen konservative Werte für die Verbundtragfähigkeit, da die Wirkung des selbstinduzierten Anpressdrucks, die in zahlreichen Untersuchungen beobachtet wurde, günstig auf die aufnehmbare Verbundbruchenergie wirkt. Die experimentelle Abbildung dieses Anpressdrucks infolge der Krümmung des Biegeträgers ist in den Verbundversuchen an Doppellaschenkörpern nicht möglich.

Die Verhältnisse in den querkraftbeanspruchten Bereichen außerhalb des Endverankerungsbereichs am äußersten Biegeriss wurden von Schilde [27] in Versuchen an Zwischenrisselementen [29] nach Abb. 3.27 abgebildet. Die Versuche von Schilde zeigen eine hohe Verbundtragfähigkeit, die deutlich außerhalb der bisher experimentell in Versuchen an Doppellaschenkörpern beobachteten Werte liegt. Diese Abweichung ist so signifikant, dass zusätzliche Einflussgrößen anzunehmen sind. Eine ausführliche Untersuchung dieser Abweichungen war bislang nicht möglich. Es kann jedoch mit der folgenden Abb. 3.32, die die Versuche von Schilde mit den Untersuchungen von Neubauer an Zug-Druck-Doppellaschenkörpern vergleicht, ein systematischer Einfluss des auf die CFK-Lamelle wirkenden Spannungsniveaus vermutet werden, das durch die Zugspannung am geringer beanspruchten Rissufer zum Ausdruck kommt. Die auf die CFK-Lamelle wirkende Zugspannung wirkt im entfestigten Verbundbereich und nach der Verbundentkopplung in der Art eines selbstinduzierten Anpressdrucks, der in Abhängigkeit vom Spannungsniveau der Verschiebung der CFK-Lamelle senkrecht zur Klebefläche entgegenwirkt.

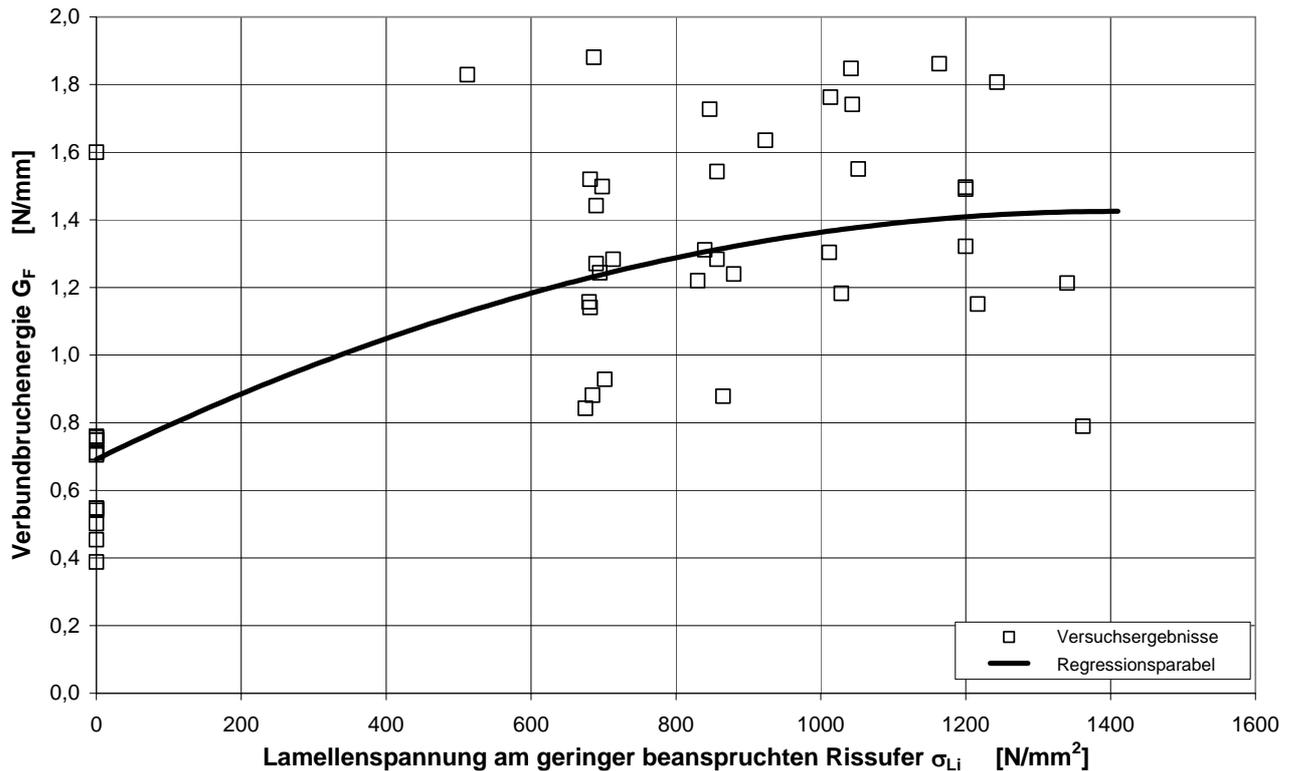


Abb. 3.32 Einfluss der Zugspannung am geringer beanspruchten Rissufer auf die Verbundbruchenergie

In Abb. 3.32 sind ausschließlich die Ergebnisse von Verbundversuchen dargestellt, die mit einem bestimmten CFK-Lamellen-Typ und dem zugehörigen Epoxydharzkleber durchgeführt wurden. Diese wurden unabhängig vom Einfluss der Oberflächenzugfestigkeit aufgetragen. Dies erfolgte, weil die in den Versuchen von Seim und Schilde erreichten Verbundbruchenergien nur in geringem Ausmaß eine Abhängigkeit von dieser Kenngröße zeigen. In die nachfolgend angegebene Bestimmungsgleichung für die Verbundbruchenergie hingegen wird zusätzlich auf der sicheren Seite liegend die in den Versuchen an Doppellaschenkörpern beobachtete Proportionalität zwischen Oberflächenzugfestigkeit und Zielgröße berücksichtigt, die vereinfachend für den oben beschriebenen linearen Zusammenhang zwischen der Oberflächenzugfestigkeit und der Druckfestigkeit oberflächennaher Betonschichten angesetzt werden kann.

Für die Beschreibung der Abhängigkeit der aufnehmbaren Verbundbruchenergie von der am geringer beanspruchten Rissufer angreifenden Zugspannung wird eine quadratische Parabel gewählt, deren Parameter aus Regressionsanalysen abgeleitet wurden. Die Parabelgleichung lautet:

$$G_F = 0,6918 \cdot \left( -5,333 \cdot 10^{-7} \cdot \sigma_{Li}^2 + 1,504 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{Li} + 1 \right) \quad (3.14)$$

Die Bestimmungsgleichung für die rechnerische Verbundbruchenergie unter Berücksichtigung des linearen Einflusses der Oberflächenzugfestigkeit lautet:

$$G_F = 0,3319 \cdot f_{cm} \cdot \left( -5,333 \cdot 10^{-7} \cdot \sigma_{Li}^2 + 1,504 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{Li} + 1 \right) \quad (3.15)$$

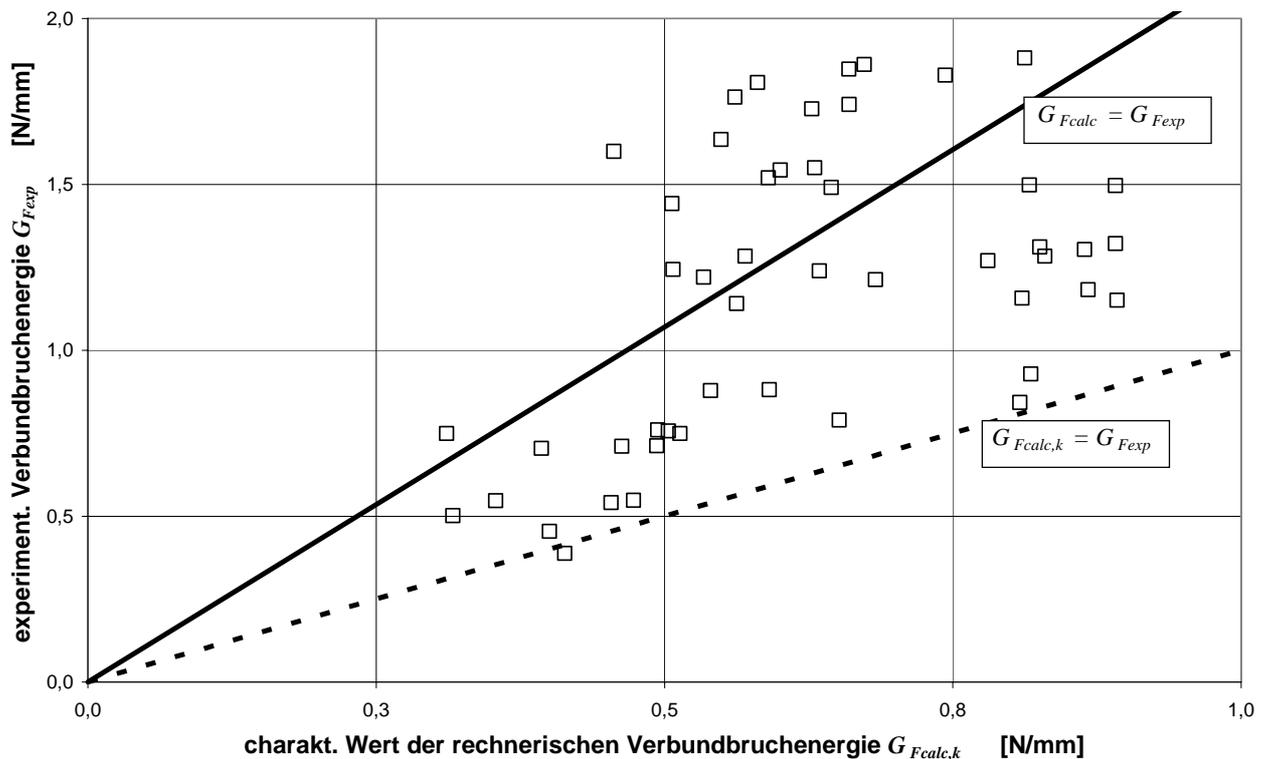
Die statistische Auswertung der in Abb. 3.32 dargestellten Versuche unter Verwendung eines Rechenmodells in Form der Bestimmungsgleichung erfolgt gemäß den vom Deutschen Institut für

Bautechnik herausgegebenen Grundlagen zu Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen und Zulassungsverfahren [13]. Dabei wird die Mittelwertkorrekturgröße bestimmt und ein Schätzwert der Streukorrekturgröße als 5%-Fraktile für eine Aussagewahrscheinlichkeit von 0,75 festgelegt. Es wird eine logarithmische Normalverteilung angenommen.

Die Bestimmungsgleichung für den charakteristischen Wert der Verbundbruchenergie lautet:

$$G_{F,k} = 0,1551 \cdot f_{cm} \cdot \left( -5,333 \cdot 10^{-7} \cdot \sigma_{Li}^2 + 1,504 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{Li} + 1 \right) \quad (3.16)$$

Abb. 3.33 zeigt eine Gegenüberstellung der rechnerisch und experimentell ermittelten Verbundbruchenergie.



**Abb. 3.33** Rechnerisch und experimentell ermittelte Verbundbruchenergie

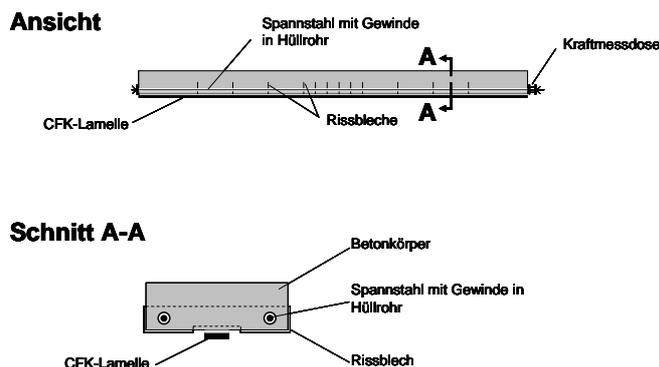
Eine experimentelle Bestätigung der aus den Versuchen von Schilde [27], [29] ermittelten Verbundtragfähigkeit aufgeklebter CFK-Lamellen durch entsprechende Bauteilversuche an biegebeanspruchten Stahlbetonbalken mit aufgeklebten CFK-Lamellen erfolgte bislang nicht. Es ist jedoch für den Bereich der Zwischenrisselemente davon auszugehen, dass an biegebeanspruchten Bauteilen noch höhere Verbundtragfähigkeiten erreicht werden können, da sich infolge der Verformung des Biegeträgers in Bereichen entsprechender Krümmung eine Art selbstinduzierter Anpressdruck auf die Klebefuge wirkt.

Ein Vergleich der in den Versuchen von Schilde ermittelten Verbundtragfähigkeiten zeigt, dass mit den Verbundversuchen an Zug-Zug- und Zug-Druck-Doppellaschenkörpern konservative Verbundansätze ermittelt werden, die für die querkraftbeanspruchten Bereiche zwischen benachbarten Biegerissen zwar auf der sicheren Seite liegen, unter Umständen jedoch zu einer sehr unwirtschaftlichen Ausbildung der Klebearmierung führen. Sofern eine Erweiterung der in den

einschlägigen Zulassungsbescheiden geforderten Nachweise zur Verbundtragfähigkeit erfolgen soll, die eine Beschreibung des Verbundverhaltens im querkraftbeanspruchten Zwischenrissbereich erforderlich macht, sollten die experimentellen Untersuchungen nicht an Doppellaschenkörpern erfolgen, die den Endverankerungsbereich abbilden, sondern in der von Schilde durchgeführten Weise an Zwischenrisselementen.

Noch exakter in der Abbildung der am verstärkten Biegeträger existierenden Verhältnisse sowohl im Endverankerungs- wie auch im Zwischenrissbereich sind Versuche an klebarmierten Stahlbetonplatten mit vorgegebenen Risslagen nach Abb. 3.34. Die im Betonquerschnitt angeordneten Spannglieder werden ohne Verbund ausgeführt. Sie dienen lediglich der Stabilisierung des Prüfkörpers und werden zur Versuchsdurchführung komplett entspannt. Für die gezielte Untersuchungen werden bei diesem Versuchskörper nur einzelne Verbundbereiche betrachtet, die nicht durch einen zusätzlichen Anpressdruck beaufschlagt werden. In mehreren Einzelversuchen können so neben den beiden Endverankerungsbereichen zahlreiche Zwischenrisselemente auf verschiedenen Zugspannungs- und Querkraftniveaus untersucht werden. Wegen des günstigen Verhältnisses der Stützweite zum Hebelarm der inneren Kräfte sind nur geringe Prüfkräfte erforderlich bzw. können mehrere Laschen bzw. Lamellen gleichzeitig geprüft werden.

## Prüfkörper



## Versuchsdurchführung

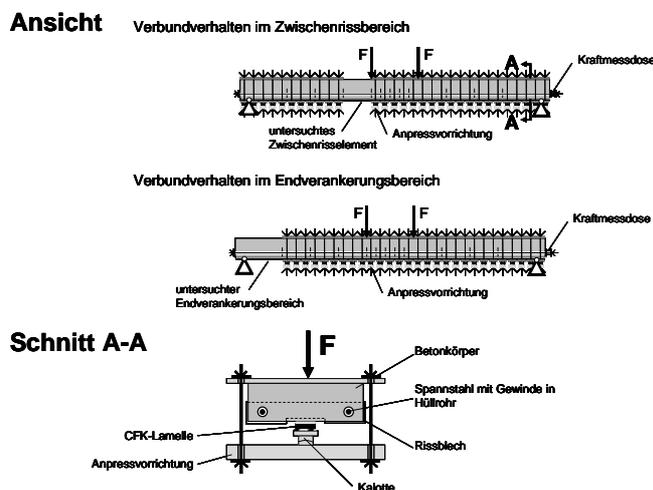


Abb. 3.34 Verbundversuche an klebarmierten Biegeträgern

Für künftige experimentelle Untersuchungen zum Verbundtragverhalten aufgeklebter Bewehrung kann somit festgestellt werden, dass diese in sinnvoller Weise an Biegeträgern erfolgen sollte. Dabei ist dem Parameter Bauteilhöhe, der die Krümmung beeinflusst, besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Eine konservative Abschätzung des Verbundverhaltens ist auch anhand von Versuchen an Zug-Zug- oder Zug-Druck-Doppellaschenkörpern und für den querkraftbeanspruchten Bereich zusätzlich an Zwischenrisselementen möglich.

### 3.11 Risszustand des Prüfkörpers

Untersuchungen des Verbundverhaltens aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen dienen nicht dem Zweck, das Zusammenwirken der Klebarmierung mit der einbetonierten Bewehrung zu untersuchen. Hierfür sind theoretische Studien oder experimentelle Untersuchungen an Dehnkörpern oder an Biegeträgern erforderlich, wie beispielsweise von Zehetmaier durchgeführt wurden [35]. Da Prüfkörper in der Form von Zug-Zug-Doppellaschenkörpern nach Abb. 3.28 im Hinblick auf die Einleitung der Zugkraft eine einbetonierte Bewehrung aufweisen müssen, ist die Ausbildung von Querschnittsrissen innerhalb der betrachteten Verbundlänge unbedingt zu vermeiden, da in den gerissenen Querschnitten Zugkraftumlagerungen zu einem Rückgang der Verbundbeanspruchung führen können, der quantitativ nicht oder nur mit hohem Aufwand ermittelt werden kann. Querrisse treten dann auf, wenn die vom Betonquerschnitt aufnehmbare Risschnittgröße geringer ist, als die einwirkende Zugkraft.

In den Verbundversuchen zur Abschätzung des Einflusses der Klebeschichtdicke kam es zur Ausbildung von Querrissen, weil, wie die folgende Abbildung zeigt, die auftretenden Verbundbruchkräfte erheblich über den in früheren Untersuchungen beobachteten aufnehmbaren Beanspruchungen lagen.

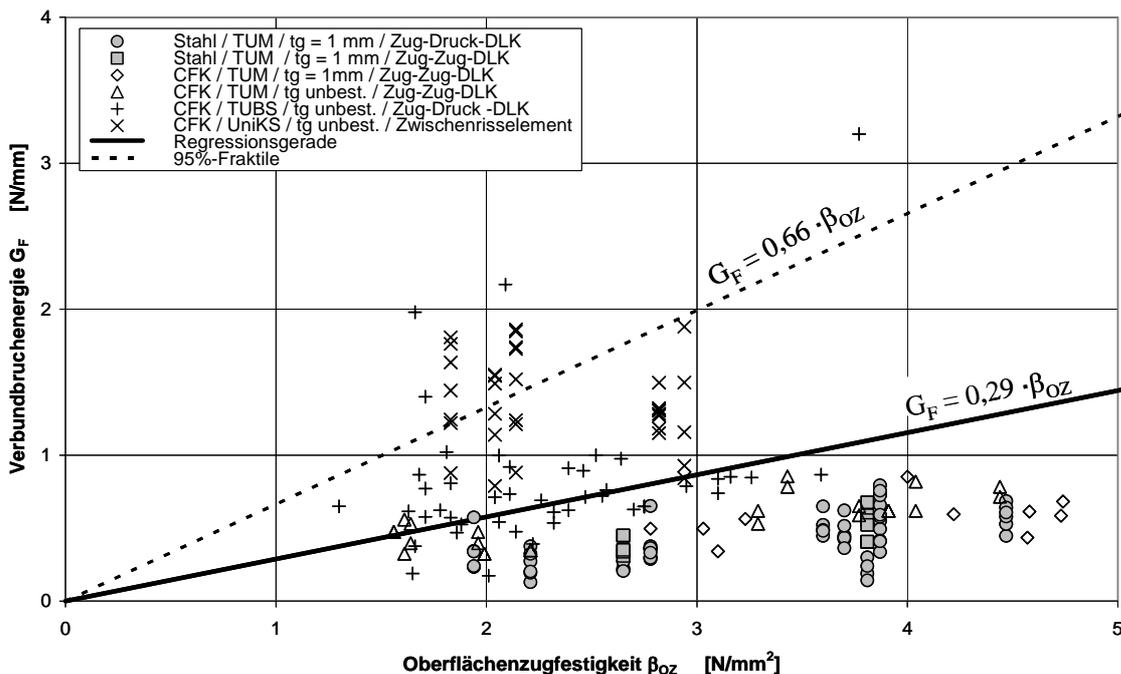


Abb. 3.35 Ergebnisse von Verbundversuchen mit aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen

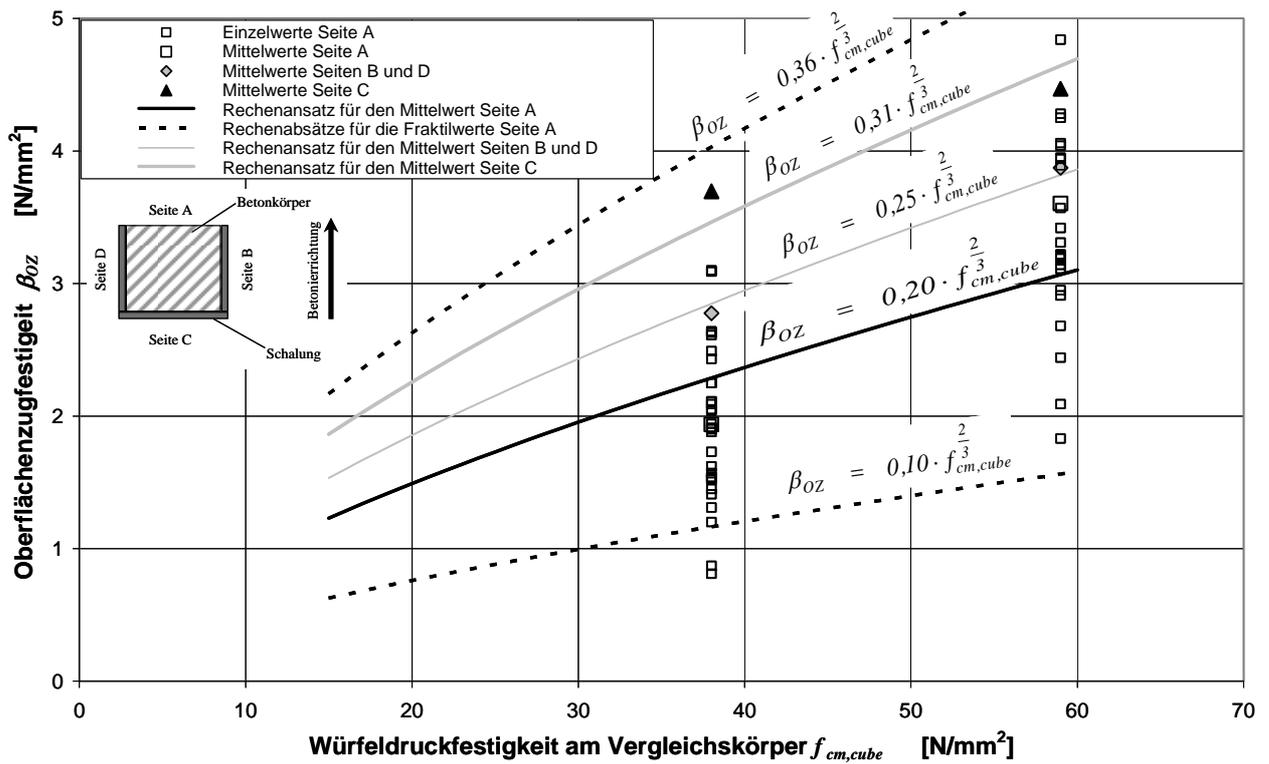


Abb. 3.36 Zusammenhang zwischen der Oberflächenzugfestigkeit und der Würfeldruckfestigkeit am Vergleichskörper [24]

Unter Berücksichtigung dieser Erfahrungen und der geringen Umlagerungsmöglichkeiten innerhalb eines zugbeanspruchten Querschnitts wird empfohlen den Mindestbetonquerschnitt  $A_c$  eines Zug-Zug-Doppelaschenkörpers in Abhängigkeit des Mittelwertes der vorgesehenen Betonwürfel-druckfestigkeit  $f_{cm,cube}$  mit dem folgenden Ausdruck zu ermitteln. Für die Herleitung dieses Ausdrucks wurde die in Abb. 3.35 angegebene 95 % Fraktile der Verbundbruchenergie, der Mittelwert der Oberflächenzugfestigkeit auf Seite C sowie der untere Fraktilwert der Oberflächenzugfestigkeit auf Seite A nach Abb. 3.36 berücksichtigt. Im ungünstigsten Fall bestimmt die auf Seite C erreichbare Verbundtragfähigkeit die auf den Doppelaschenkörper wirkende Zugkraft wohingegen die Rissbildung von Seite A ausgeht, in deren Bereich eine geringere Zugfestigkeit des Betons vorliegt.

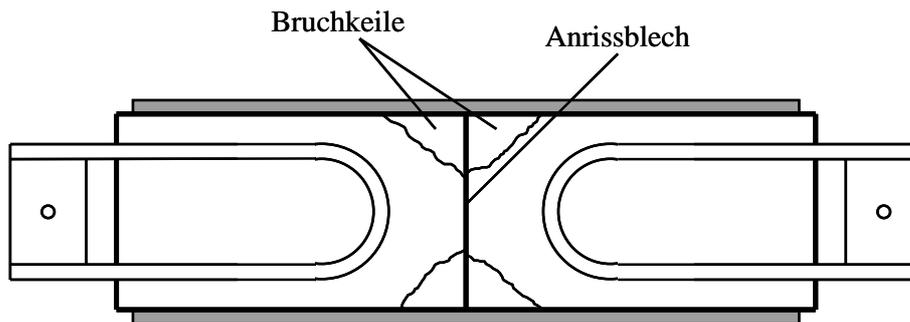
$$A_c = 13 \cdot \frac{b_L}{\sqrt[3]{f_{cm,cube}}} \cdot \sqrt{E_L \cdot t_L} \quad (3.17)$$

Für eine CFK-Lamelle mit einem Querschnitt  $b_L \cdot t_L$  von  $50 \cdot 1,2 = 60 \text{ mm}^2$  ergibt sich beispielsweise ein Mindestbetonquerschnitt  $A_c$  von  $105.000 \text{ mm}^2$ . Dies entspricht Querschnittsabmessungen von  $325 \cdot 325 \text{ mm}^2$ .

Vermieden werden sollte im Verbundversuch auch die Ausbildung der in Abb. 3.37 für einen Zug-Zug-Doppelaschenkörper dargestellten Bruchkeile, die eine gezielte Messwerterfassung am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs erschweren oder verhindern und unter Umständen zu einer Verkürzung der vorgegebenen Verbundlänge führen. In Bauteilversuchen wurde die Ausbildung dieser Bruchkeile im Endverankerungsbereich seltener beobachtet, als in Verbundversuchen. An

Zwischenrisselementen wurde sie jedoch sowohl in Bauteilversuchen als auch in den Verbundversuchen von Schilde beobachtet. Letztlich muss sie im Hinblick auf eine realistische Bemessung der Klebeverbundverankerung sicherlich berücksichtigt werden, wozu jedoch eine entsprechende Abminderung der ansetzbaren Verbundlänge zweckmäßiger erscheint, als die zufällige Erfassung ihrer Auswirkung in einzelnen Verbundversuchen.

In Verbundversuchen an Doppellaschenkörpern kann die Ausbildung der Bruchkeile durch eine verbundfreie Vorlänge  $l_f$  am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs verhindert werden (vgl. Abb. 3.28). Bewährt haben sich hierfür 100 mm.



**Abb. 3.37:** Bruchkeilbildung am Zug-Zug-Doppellaschenkörper ohne verbundfreie Vorlängen im Bereich des Anrissblechs

### 3.12 Eigenschaften der Klebschicht

Der Einfluss der Eigenschaften wurde im Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Festlegung von Anforderungen an die Klebschichtdicke bei Prüfkörpern für Verbundversuche mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen“ [37], das vom Deutschen Institut für Bautechnik gefördert wurde, bereits ausführlich dargestellt, so dass an dieser Stelle auf eine ausführliche Diskussion verzichtet werden kann. Im Wesentlichen wurden die folgenden Zusammenhänge festgestellt.

Die Klebschicht beeinflusst die Verbundtragfähigkeit vor allem durch ihre Schubsteifigkeit, die als Produkt aus dem Schubmodul des Epoxydharzklebers  $G_g$  und der Dicke der Klebschicht  $t_g$  resultiert. Geringere Schubsteifigkeiten führen zu höheren Verbundtragfähigkeiten. Dies zeigen Untersuchungen von Dai et al. [2] sowie Untersuchungen an der Technischen Universität München [37]. Abb. 3.38 zeigt die Abhängigkeit der Verbundbruchenergie  $G_F$  von der Schubsteifigkeit  $G_g \cdot t_g$  in den von Dai et al. betrachteten Versuchen unter Berücksichtigung zusätzlicher Ergebnisse von Versuchen mit CFK-Gelegen, die an der Technischen Universität München durchgeführt wurden. In diesem Diagramm ist die Variation der Schubsteifigkeit sowohl auf den Einsatz verschiedener Epoxydharzkleber, die sich durch ihren Schubmodul  $G_g$  unterscheiden, als auch abweichende Klebschichtdicken  $t_g$  zurückzuführen. Eine weniger ausgeprägte, doch vorhandene Abhängigkeit der Verbundbruchenergie  $G_F$  von der Schubsteifigkeit zeigen die in Abb. 3.39 dargestellten Ergebnisse von an der Technischen Universität München durchgeführten Verbundversuchen mit aufgeklebten Stahllaschen. In diesen Versuchen wurde nur die Dicke der Klebschicht  $t_g$  bei gleich bleibendem Schubmodul  $G_g$  des Epoxydharzklebers variiert.

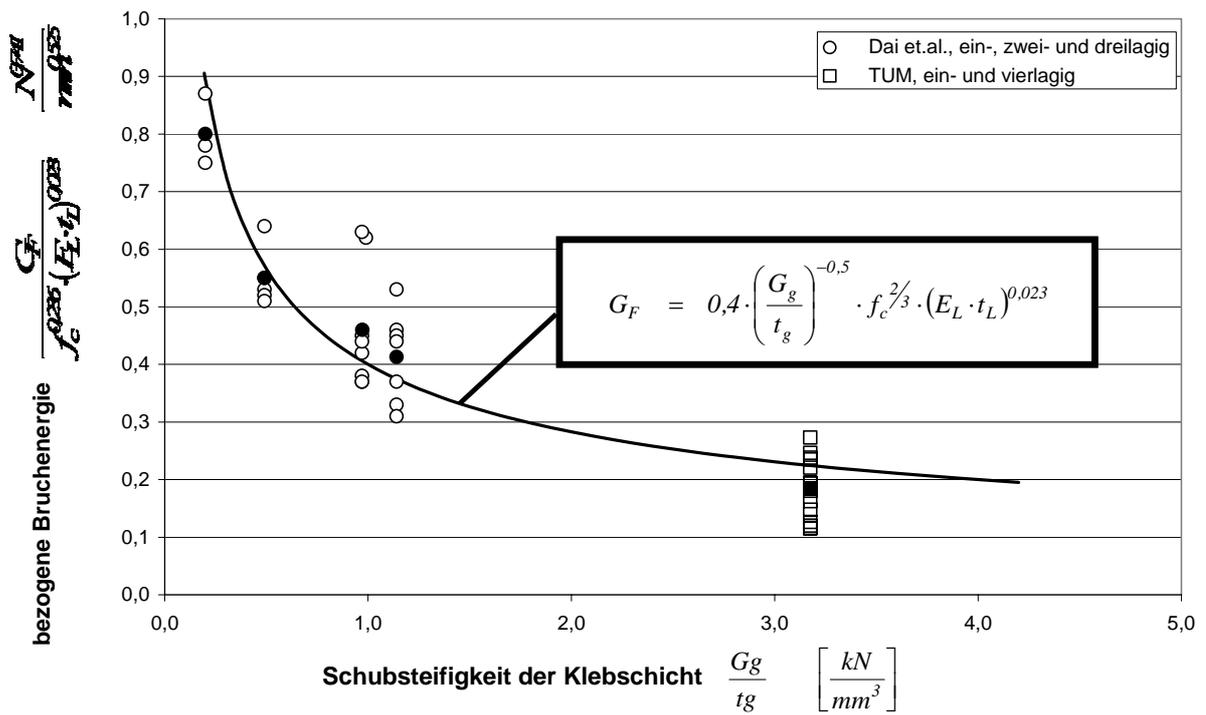


Abb. 3.38 Einfluss der Schubsteifigkeit der Klebschicht zwischen Betonoberfläche und Faserquerschnitt auf die Verbundbruchenergie bei der Applikation von Fasergelegen – angepasster modifizierter Ansatz von Dai et al. [2], [37]

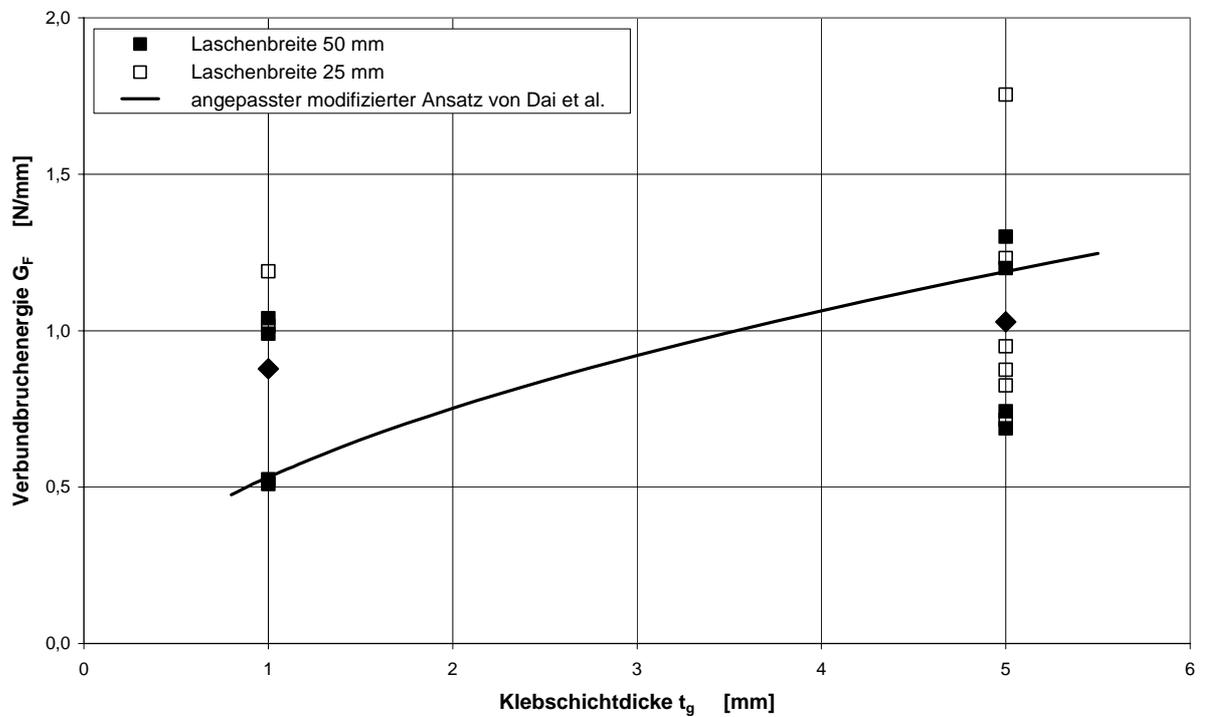
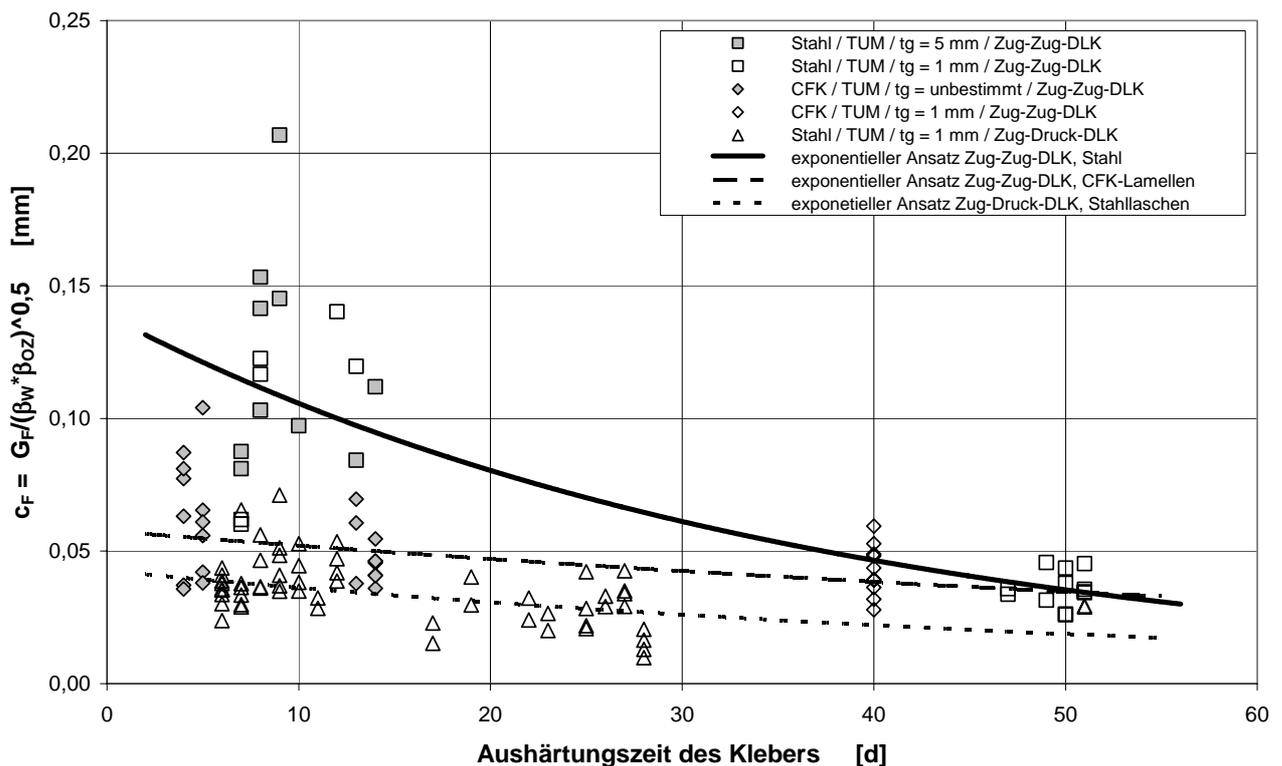


Abb. 3.39 Einfluss der Klebschichtdicke auf die Verbundbruchenergie in den Verbundversuchen an Zug-Zug-Doppellaschenkörpern mit 5 mm dicken Stahllaschen [2], [37]

Der Vergleich der im Rahmen des Forschungsvorhabens „Festlegung von Anforderungen an die Klebschichtdicke bei Prüfkörpern für Verbundversuche mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen“ ausgewerteten Versuche mit früheren Untersuchungen zeigte allerdings einen signifikanten Einfluss der Aushärtungsdauer der Klebschicht vom Zeitpunkt der Applikation der aufgeklebten Stahllaschen bis zur Durchführung der Verbundversuche. Prüfkörper mit einer kurzen Aushärtungszeit zeigen eine deutlich höhere Verbundtragfähigkeit als Prüfkörper mit einer langen Aushärtungszeit. Abb. 3.40 zeigt die in verschiedenen Versuchsreihen erkennbare Abhängigkeit der Verbundbruchenergie von der Aushärtungsdauer der Klebschicht. Die geringen Unterschiede hinsichtlich der Steifigkeit der einzelnen verwendeten Kleber wurden für diese Darstellung vernachlässigt.



**Abb. 3.40** Einfluss der Aushärtungsdauer der Klebschicht auf die Verbundbruchenergie in verschiedenen Versuchsreihen [37]

Nach derzeitigem Kenntnisstand kann eine mögliche Ursache dieser zeitabhängigen Abnahme der Verbundtragfähigkeit im zeitabhängigen Verformungsverhalten der bauaufsichtlich zugelassenen Epoxydharzkleber begründet sein. Dieses zeichnet sich unter Umständen durch einen verzögert ablaufenden Anteil der Schwindverformung aus, der ab einem gewissen Alter des Klebers nicht mehr durch Kriechverformungen kompensiert wird. Wegen der infolge der Oberflächenunebenheiten ungleichmäßigen Dicke der Klebschicht können sich infolge der Schwindvorgänge lokal Zwangsspannungen einstellen, die zu einer Schädigung des Betonuntergrundes und einer verminderten Verbundtragfähigkeit führen (vgl. Abs. 3.3). Hierzu sind aber weitere Untersuchungen erforderlich.

Im Hinblick auf die Durchführung von Verbundversuchen muss deshalb nach dem derzeitigen Kenntnisstand empfohlen werden, die Verbundversuche mit der minimalen zulässigen Klebschichtdicke durchzuführen. Nach den derzeit gültigen Zulassungen beträgt die minimal zulässige Klebschichtdicke

1 mm. Sowohl bei CFK-Lamellen als auch bei Stahllaschen stellt sich die Klebschicht zufällig in Abhängigkeit vom ausgeübten Anpressdruck ein. Da die Zulassungen keine besonderen Maßnahmen zur Sicherstellung oder Überprüfung dieser Klebschichtdicke fordern, sollte an Prüfkörpern die minimale Klebschichtdicke abzüglich eines Vorhaltemaßes eingestellt werden. Hinsichtlich der Aushärtungsdauer ist zu empfehlen, dass Verbundversuchskörper frühestens 28 Tage nach der Verklebung der CFK-Lamellen bzw. Stahllaschen geprüft werden sollten. Die Versuchskörper müssen unter noch festzulegenden, definierten Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Feuchtigkeit gelagert werden.

### 3.13 Anordnung der Laschen

Das Ziel der Durchführung von Verbundversuchen sollte die Formulierung eines allgemein gültigen Verbundgesetzes sein. Dazu müssen für Stahllaschen und CFK-Lamellen, deren Verbundverhalten durch den etablierten bilinearen Ansatz nach Abb. 3.9 beschrieben werden kann, die bestimmenden Parameter dieses Ansatzes, der drei Freiheitsgrade aufweist, ermittelt werden. Für die Festlegung der Verbundbruchenergie  $G_F$  bzw. der Grenzverschiebung  $s_{L0}$  ist es erforderlich, die Verbundlänge der Laschen so auszulegen, dass das komplette Verbundgesetz bis zu vollständigen Ablösung der CFK-Lamellen durchlaufen wird. Infolge der Streuungen der Verbundtragfähigkeit löst sich bei bei Doppellaschenkörpern im Regelfall zunächst nur eine Lasche bereichsweise ab. Im Hinblick auf eine effektive Durchführung der Verbundversuche ist es sinnvoll, die auf die bereichsweise abgelöste einen Anpressdruck auszuüben um deren weitere Ablösung zu verhindern und anschließend die Zugkraft solange zu steigern, bis sich auch die zweite Lasche ablöst. Um den Anpressdruck auf die erste Lasche nach einsetzender Ablösung aufbringen zu können, muss deren Verbundlänge  $l_V$  so gewählt werden, dass sich größere Bereiche lösen können, ohne dass die der maximalen Verbundbruchkraft zugeordnete Verbundlänge  $l_t$  unterschritten wird. Hierzu kann aufgrund der vorliegenden experimentellen Erfahrung empfohlen werden, die Laschen nach einer verbundfreien Vorlänge mindestens mit der 1,5-fachen charakteristischen Verbundlänge  $l_{t,k}$  gemäß dem folgenden Ausdruck zu verkleben.

$$l_V \geq 1,5 \cdot l_{t,k} = 2,2 \cdot \sqrt{\frac{E_L \cdot t_L}{\sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}}}} \quad (3.18)$$

Gemäß den derzeit gültigen, einschlägigen Zulassungsbescheiden dürfen die verklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen innerhalb von 300 mm um 1 mm von einer ebene Fläche abweichen. Diese zulässigen Abweichungen rufen Zugspannungen senkrecht zur Klebefuge hervor, die zu einer Abminderung der Verbundtragfähigkeit führen können. Ausschlaggebend für die Höhe dieser Zugspannungen ist die Krümmung der Lasche, die Umlenkkkräfte hervorruft. Im Hinblick auf eine Erfassung dieses möglicherweise auftretenden tragfähigkeitsmindernden Effekts wäre es sinnvoll, die Laschen an den Prüfkörpern für die Verbundversuche mit einem entsprechenden gekrümmten Verlauf eventuell zuzüglich einem gewissen Vorhaltemaß anzuordnen. Dies dürfte sich in der Laborpraxis aber schwierig gestalten, so dass empfohlen wird, die Laschen in den Verbundversuchen weiterhin geradlinig anzuordnen. Durch grundsätzliche Untersuchungen mit größeren als den zulässigen Abweichungen vom ebenen Verlauf, die auf einfachere Weise hergestellt werden können, sollte die Wirkung einer zusätzlichen Zugspannung auf die

Verbundtragfähigkeit allgemein gültig untersucht werden. Mit Annahmen für den möglicherweise auftretenden Verlauf der Laschen im Bereich der zulässigen Unebenheiten können dann Abminderungsbeiwerte für die Verbundtragfähigkeit sowohl für den Endverankerungsbereich als auch für den Bereich der Zwischenrisselemente festgelegt werden. Derartige Untersuchungen wurden am Lehrstuhl für Massivbau bereits für CFK-Gelege durchgeführt. Sie sind aber nicht auf Stahllaschen und CFK-Lamellen übertragbar, da im Fall der CFK-Gelege ein niedrig viskoser Primer eingesetzt wird, der in das oberflächennahe Betongefüge eindringt und zu einer Verfestigung führt.

### 3.14 Elastizitätsmodul der CFK-Lamellen

Der Elastizitätsmodul der CFK-Lamellen wird in der Bestimmungsgleichung für die im Endverankerungsbereich aufnehmbare Verbundbruchkraft entsprechend der Lösung der Differenzialgleichung des verschieblichen Verbundes berücksichtigt. Der Einfluss des Elastizitätsmoduls auf die bestimmenden Parameter des bilinearen Verbundansatzes hingegen bleibt unberücksichtigt. Die Untersuchungen von Neubauer [23] mit verschiedenen CFK-Lamellen haben gezeigt, wie Abb. 3.41 verdeutlicht, dass die in Versuchen mit CFK-Lamellen, die einen hohen, etwa stahläquivalenten Elastizitätsmodul aufweisen, ermittelten Verbundtragfähigkeiten eher am unteren Rand des Spektrums liegen. Gezielte Untersuchungen hierzu liegen aber derzeit nicht vor. Bis zur Klärung sollten, sofern im Rahmen eines Zulassungsantrags verschiedene Lamellentypen für die bauaufsichtliche Zulassung vorgesehen sind, für die nur ein Modellansatz zur Bestimmung der Verbundtragfähigkeit in die Zulassung aufgenommen wird, die experimentellen Untersuchungen mit dem Lamellentyp durchgeführt werden, der den höchsten Elastizitätsmodul aufweist.

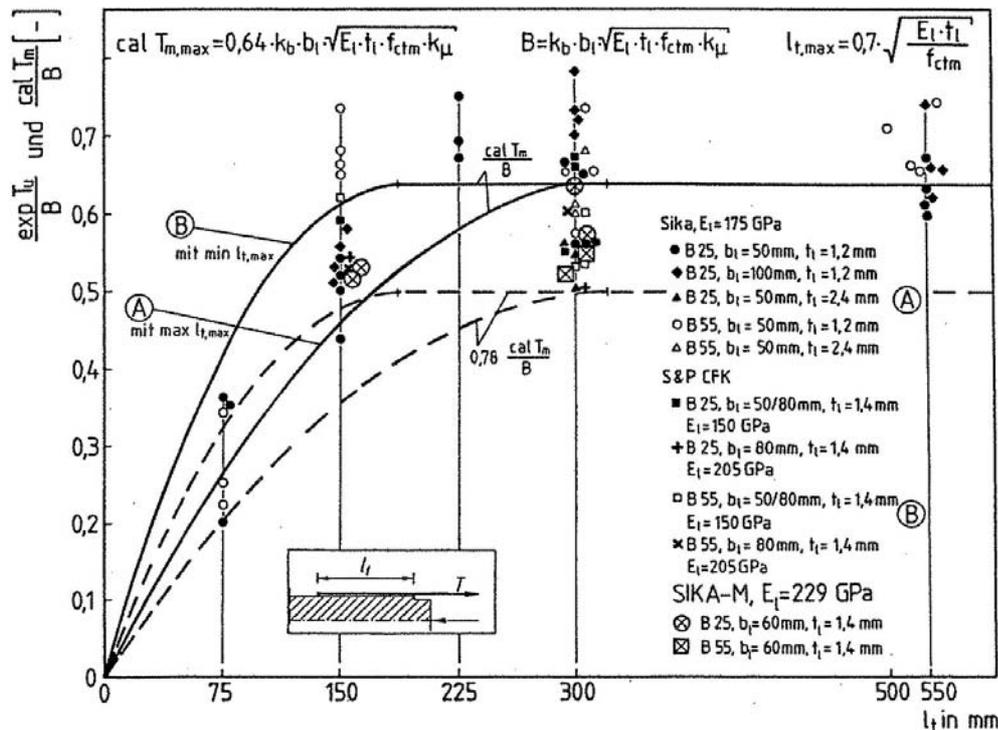


Abb. 3.41 Bezogene Verbundbruchkräfte in den Verbundversuchen von Neubauer in Abhängigkeit von der Verbundlänge, hier bezeichnet mit  $l_t$  (entnommen aus [23])

## 4 Durchführung und Auswertung der Verbundversuche

Die Versuche sollen grundsätzlich verformungsgesteuert durchgeführt werden. Als bevorzugte Regelgröße sollte die Relativverschiebung am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs ausgewählt werden. Jedoch ist es auch möglich, die Versuche in Abhängigkeit vom Kolbenhub der Universalprüfmaschine oder des verwendeten Prüfzylinders zu steuern. Diese Art der Steuerung entspricht wegen der verbundfreien Vorlängen und des linear elastischen Verhaltens der Stahllaschen bzw. der CFK-Lamellen bis zum Auftreten größerer Verbundentkoppelungen einer reinen Kraftsteuerung. Mit der Ablösung größerer Verbundbereiche stellt sich dann eine Kombination aus Kraft- und Verformungssteuerung ein.

In den Verbundversuchen an Doppellaschenkörpern steht zunächst, insbesondere wenn die in Bezug auf die Betonierrichtung vertikal ausgerichteten, geschalteten Seiten B und D geprüft werden, nicht fest, auf welcher der beiden beklebten Körperseitenflächen zuerst Verbundversagen auftritt. Nach einsetzender Ablösung einer Lasche kann nach der Ausübung eines zusätzlichen Anpressdruckes auf diese auch ein Versagen der anderen tragfähigeren Verbundfläche erreicht werden. Die vorgegebene Verformungsgeschwindigkeit muss so gewählt werden, dass eine ausreichende Anzahl von Messwerten erfasst werden kann.

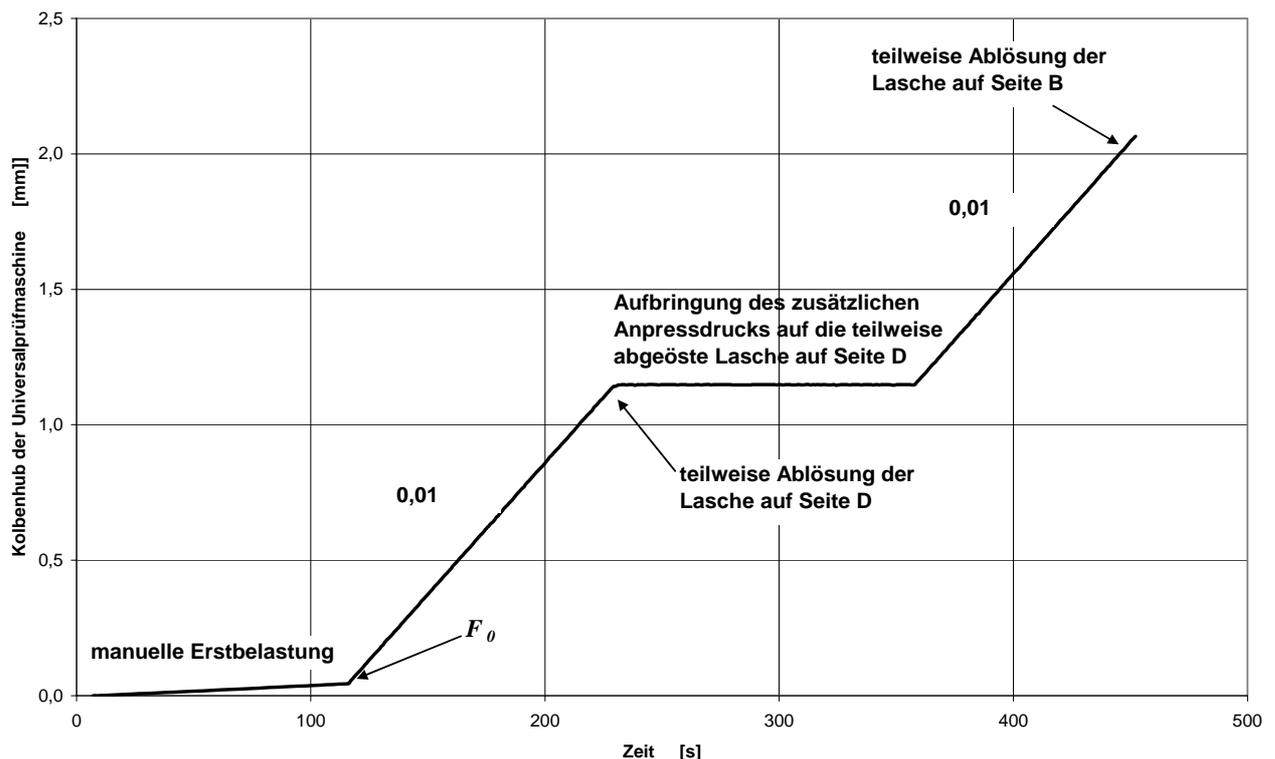
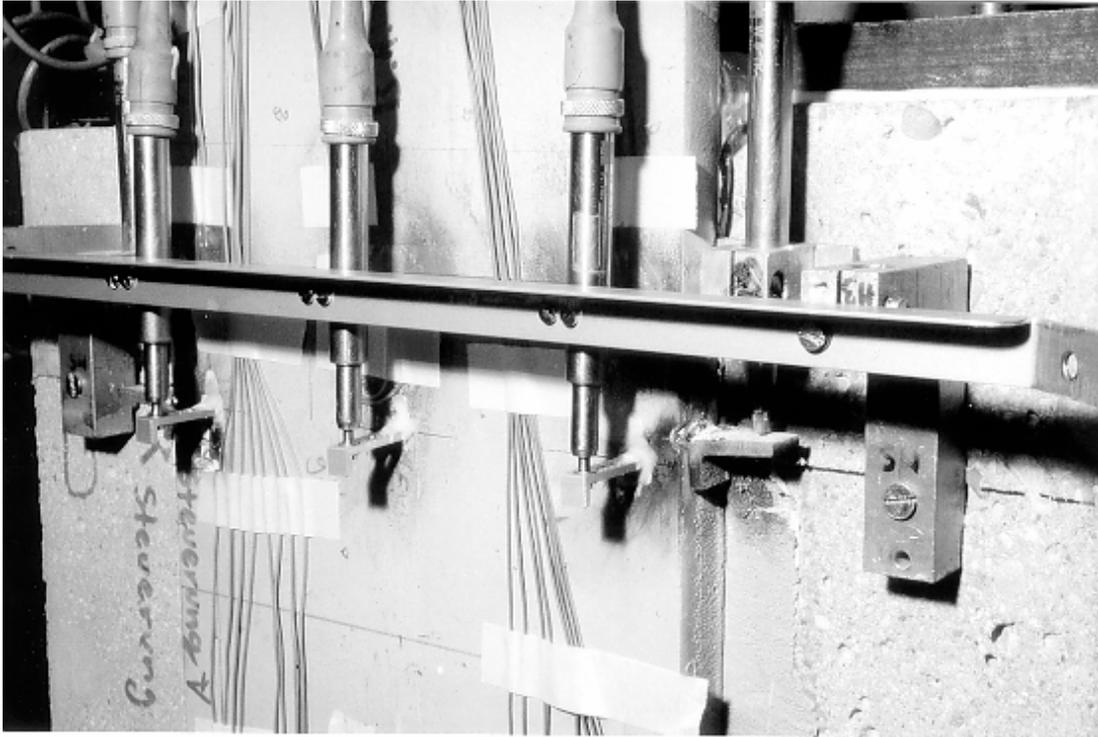


Abb. 4.1: Prinzipieller Ablauf eines Verbundversuchs

Hinsichtlich der messtechnischen Ausrüstung der Versuchskörper ist neben der Erfassung der auf den Prüfkörper wirkenden Zugkraft vor allem die Relativverschiebung der Laschen gegenüber der Betonoberfläche am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs von Bedeutung. Diese Größe dient vor allen der Identifizierung der einsetzenden Ablösung der Laschen und ist somit von zentraler Bedeutung für die Auswertung der Versuche. Abb. 4.2 zeigt die Anordnung der Wegaufnehmer zur Erfassung dieser Größe.



**Abb. 4.2:** Anordnung induktiver Wegaufnehmer am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs zur Erfassung der Relativverschiebungen in drei Messachsen

In zahlreichen Verbundversuchen wurden auf den Oberflächen der Stahllaschen und CFK-Lamellen Dehnmessstreifen angeordnet mit der Zielsetzung das Verbundgesetz aus den aufgezeichneten Dehnungsunterschieden zu ermitteln. Dieses Vorgehen führte wegen der lokal auftretenden großen Streuungen der Betoneigenschaften meist zu punktuellen Beschreibungen des Verbundtragverhaltens und somit nicht zu brauchbaren Resultaten. Die Auswertung auf der Basis der Relativverschiebungen am lastseitigen Beginn hingegen betrachtet das Verbundtragverhalten über größere Bereiche verschmiert. Auf der Grundlage der derzeit vorliegenden Erfahrungen erscheint eine Messung von Dehnungen mittels DMS nicht zweckmäßig.

Bislang wurden die Verbundversuche ausschließlich unter normalen Labortemperaturen (ca. 20° C) durchgeführt. Im Hinblick auf die bekannte Temperatur-Charakteristik der zugelassenen Epoxydharzkleber wäre es aber sicher wünschenswert, zumindest einen Teil der Verbundversuche am oberen Rand des zulässigen Temperaturbereichs, knapp unterhalb der Glasübergangstemperatur durchzuführen.

Hinsichtlich der Auswertung der Verbundversuche wurde am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München ein Verfahren entwickelt und ausführlich erläutert [24], das mittlerweile auch von anderen Forschern [2] angewandt wurde. Das Verfahren geht von einem bekannten Verlauf des Verbundgesetzes in Form des bilinearen Ansatzes nach Abb. 3.9 aus. Es müssen deshalb durch die Auswertung nur die bestimmenden Parameter dieses Ansatzes für die einzelnen Messachsen festgelegt werden. Dies sind die maximale Verbundspannung  $\tau_{L1}$ , die zugehörige elastische Grenzverformung  $s_{L1}$  sowie der Grenzwert der Relativverschiebung  $s_{L0}$ . Respektive können anstelle der Grenzwerte der Relativverschiebung auch die energetischen Kenngrößen  $G_e$  und  $G_F$  angesetzt werden. Dazu wird folgendes Vorgehen gewählt:

Zunächst wird die Differenzialgleichung des verschieblichen Verbundes für den bilinearen Verbundansatz unter Vernachlässigung der Betonverformungen allgemein gelöst. Dabei sind die

beiden Bereiche des linear elastischen und plastisch entfestigten Verbundverhaltens zu berücksichtigen. Die allgemeine Lösung wird an die in den Verbundversuchen vorliegenden Randbedingungen angepasst. Mit dieser speziellen Lösung kann anschließend der Verlauf der Relativverschiebungs-Längsdehnungskurve für verschiedene Kombinationen der Parameter des bilinearen Verbundansatzes bestimmt werden. Über die Methode der kleinsten Abstandsquadrate wird dann die Parameterkombination festgelegt, die in ausgewählten Stützpunkten die geringste Abweichung zu der experimentell ermittelten Relativverschiebungs-Längsdehnungskurve aufweist. Wegen des hohen Rechenaufwandes empfiehlt sich die Auswertung mittels EDV. Abb. 4.3 zeigt den prinzipiellen Ablauf der Auswertung.

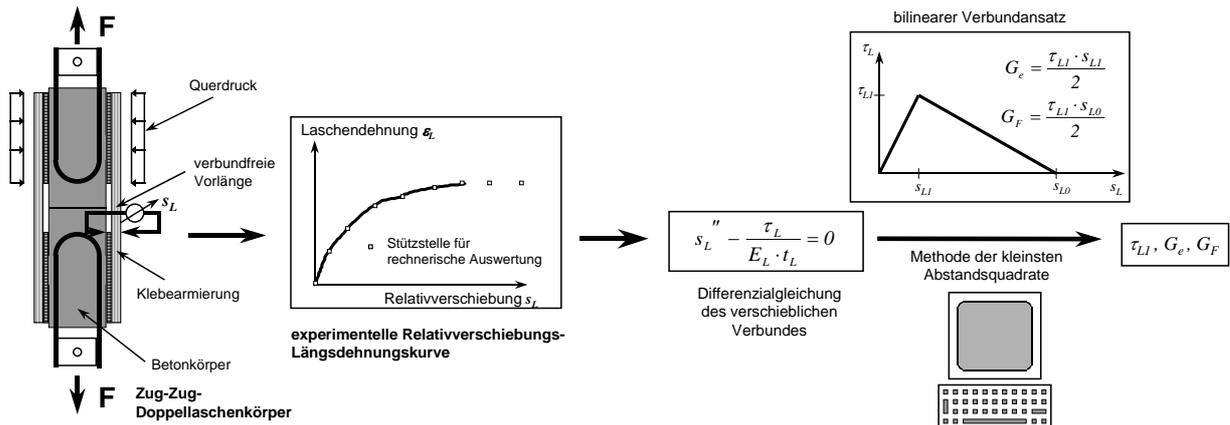


Abb. 4.3: Auswertung der Verbundversuche

Wesentlich ist, nur den Teil der am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs aufgezeichneten Relativverschiebungs-Längsdehnungskurve zu verwenden, der sich bis zur erstmaligen vollständigen Ablösung der Lasche einstellt. Abb. 4.4 zeigt diese Art der Auswertung für einen Verbundversuch mit aufgeklebten Stahllaschen. Nach der bereichsweisen Ablösung der Lasche stellen sich Reibungseffekte ein, außerdem werden angrenzende Betonbereiche mit einer höheren Verbundtragfähigkeit aktiviert. Durch die Berücksichtigung dieser Effekte wird der Stichprobencharakter im Hinblick auf das Verbundgesetz aufgehoben.

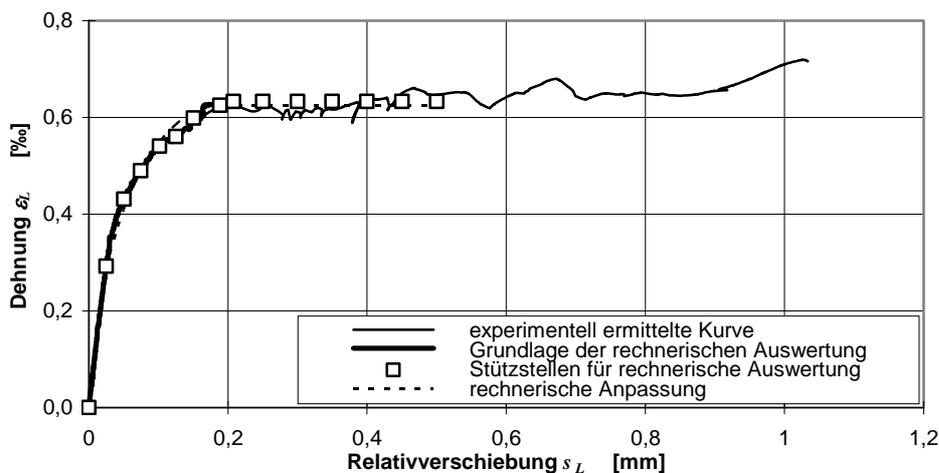


Abb. 4.4: Rechnerische Auswertung der Verbundversuche bis zur einsetzenden, bereichsweisen Ablösung einer Stahllasche

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen des durch das Deutsche Institut für Bautechnik geförderten Forschungsvorhabens „Formulierung von Prüfgrundsätzen bei Verbundversuchen mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen“ wurden auf der Grundlage der derzeit vorliegenden Erkenntnisse und Erfahrungen Empfehlungen für die experimentelle Untersuchung des Verbundverhaltens aufgeklebter Bewehrung ausgearbeitet. Dazu wurden die aus experimentellen Studien bekannten Einflussgrößen auf die Verbundtragfähigkeit zusammengestellt. Auf der Grundlage der Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und der Verbundtragfähigkeit wurden grundsätzliche Anforderungen an die Prüfkörper, die Versuchsdurchführung und die Auswertung für Verbundversuche mit oberflächlich applizierten Klebarmierungen in Form von Stahllaschen und CFK-Lamellen formuliert. Dabei wurden der möglicherweise beantragte Zulassungsumfang sowie die Anforderungen der bauaufsichtlichen Zulassungen hinsichtlich der Ausführung beachtet. Diese Empfehlungen können direkt in eine entsprechende DIBt-Richtlinie einfließen.

---

## 6 Literatur

- [1] **Budnik, J.; Dornauer, H.:** Sichere Grundlage für Beschichtungen - Untersuchungen zur Abreißfestigkeit von Betonen; Beton, 1993, Heft 12, S. 650 - 653
- [2] **Dai, J.; Ueda, T.; Sato, Y.:** Development of the Nonlinear Bond stress-Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-Concrete Interfaces with a Simple Method; ASCE Journal of Composites for Construction, January/February 2005, P. 52 - 62
- [3] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstofffaserverstärkten Kunststofflamellen (CFK-Lamellen) – Fassung September 1998
- [4] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-4: Schubfeste Klebeverbindung zwischen Stahlplatten und Stahlbetonbauteilen oder Spannbetonbauteilen vom 12.08.2004
- [5] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-20: Klebesystem „StoGB System 1“ für schubfeste Klebeverbindung zwischen Stahlplatten und Stahlbetonbauteilen oder Spannbetonbauteilen vom 04.11.2003
- [6] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-29: Verstärkung von Betonbauteilen durch schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen „Sika CarboDur“ vom 22.07.2002
- [7] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-30: Schubfeste Klebeverbindung zwischen Stahlplatten und Stahlbetonbauteilen oder Spannbetonbauteilen mit dem System Sikadur 30 vom 11.03.2005
- [8] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-54: Verstärkung von Betonbauteilen durch mit dem Baukleber „ispo Concretin SK 41“ schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen „ispo Concretin S&P CFK-Lamellen“ vom 12.06.2002
- [9] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-57: Verstärken von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen durch schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen Carboplus vom 30.05.2003 ergänzt durch den Bescheid vom 30.09.2004 über die Änderung und Ergänzung der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Nr. Z-36.12-57 vom 30. Mai 2003
- [10] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-62: Verstärkung von Betonbauteilen durch mit dem Baukleber „StoPox SK 41“ schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen „Sto S&P CFK Lamellen“ vom 15.12.2003
- [11] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-63: Verstärken von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen durch schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen MC-DUR vom 30.05.2003 ergänzt durch den Bescheid vom 30.09.2004 über die Änderung und Ergänzung der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Nr. Z-36.12-63 vom 30. Mai 2003
- [12] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-65: S&P CFK-Lamellen vom 29.07.2003
- [13] **Deutsches Institut für Bautechnik:** Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren - Fassung Mai 1986
- [14] **Deutsches Institut für Normung:** DIN 1048-2: Prüfverfahren für Beton; Teil 2: Festbeton in Bauwerken und Bauteilen, Ausgabe Juni 1991; Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [15] **Deutsches Institut für Normung:** DIN 1048-4: Prüfverfahren für Beton; Teil 4: Bestimmung der Druckfestigkeit von Festbeton in Bauwerken und Bauteilen; Anwendung

- von Bezugsgeraden und Auswertung mit besonderen Verfahren, Ausgabe Juni 1991; Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [16] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN 12390-5: Prüfung von Festbeton, Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern Deutsche Fassung EN 12390-5:2000, Ausgabe Februar 2001, in Verbindung mit: DIN EN 12390-5 Berichtigung 1: Prüfung von Festbeton Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-5:2000, Berichtigungen zu DIN EN 12390-5:2001-02; Deutsche Fassung EN 12390-5:2000/AC:2004 vom Mai 2006, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [17] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN 12390-6: Prüfung von Festbeton, Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern, Deutsche Fassung EN 12390-6:2000, Ausgabe Februar 2001, in Verbindung mit: DIN EN 12390-6 Berichtigung 1: Prüfung von Festbeton, Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-6:2000, Berichtigungen zu DIN EN 12390-6:2001-02; Deutsche Fassung EN 12390-6:2000/AC:2004 vom Mai 2006, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [18] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN 12620:Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002, Ausgabe April 2003 in Verbindung mit DIN EN 12620 Berichtigung 1: Berichtigungen zu DIN EN 12620:2003-04, vom Dezember 2004, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [19] **Heilmann, H.:** Beziehungen zwischen Zug- und Druckfestigkeiten des Betons; beton 2-69; S. 68 – 70; 1969
- [20] **Holzenkämpfer, P.:** Ingenieurmodelle des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile; Dissertation, TU Braunschweig; 1994
- [21] **Krenchel, H.; Bickley, J. A.:** Concrete Pullout Test Methods: Historical Background and Scientific Level Today; Vortrag auf der 1984 Convention, American Concrete Institute, Phoenix, Arizona, 4. - 9. März 1984
- [22] **MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG:** MC-DUR 1280 (Komponente B): Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG EG-Richtlinie 2001/58/EG Druckdatum: 28.03.2006
- [23] **Neubauer, U.:** Verbundtragverhalten geklebter Lamellen aus Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoff zur Verstärkung von Betonbauteilen; Dissertation, TU Braunschweig; 2000
- [24] **Niedermeier, R.:** Zugkraftdeckung bei klebarmierten Bauteilen; Dissertation, Technische Universität München; 2001
- [25] **Ranisch, E.-H.:** Zur Tragfähigkeit von Verklebungen zwischen Baustahl und Beton – Geklebte Bewehrung; Dissertation, TU Braunschweig; 1982
- [26] **Rechenmacher, U.:** Vergleichende Betrachtung von Bemessungsansätzen für geklebte Bewehrung aus CFK-Lamellen und Überprüfung der Zugkraftdeckung bei verstärkten Biegebauteilen; Diplomarbeit, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München; 2002 (unveröffentlicht)
- [27] **Schilde, K.:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Beton und nachträglich aufgeklebten Kohlefaserlamellen am Zwischenrisselement; Dissertation, Universität Kassel 2005, Schriftenreihe Bauwerkserhaltung und Holzbau; Heft 1
- [28] **Schwindl, K.:** Zum Tragverhalten einer mechanischen Endverankerung für CFK-Klebebewehrung; Diplomarbeit, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 1999 (unveröffentlicht)
- [29] **Seim, W.; Schilde, K.:** Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Verbund zwischen Betonbauteilen und nachträglich aufgeklebten hochfesten Kohlefaserlamellen; Anlagenband zu den DFG-Forschungsvorhaben SE 741/3-1 und SE 741/3-2; Universität Kassel, Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau, 2005

- 
- [30] **Sika Deutschland GmbH:** Sikadur 30 Kleber Normal Komp. A: Sicherheitsdatenblatt gemäss 91/155/EWG und ISO 11014-1, Druckdatum: 15.02.2006
- [31] **Sika Deutschland GmbH:** Sikadur-30 2-Komponenten-Klebemörtel: Technisches Merkblatt Ausgabe 05.06 TM Kennziffer 7210
- [32] **Swoboda, P.:** Vergleichende Untersuchungen zum Verbundverhalten von auf Betonoberflächen verklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen; Diplomarbeit, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 1999 (unveröffentlicht)
- [33] **Täljsten, B.:** Plate Bonding; Thesis, Lulea University of Technology, Sweden; 1994
- [34] **Ulaga, T.:** Betonbauteile mit Stab- und Lamellenbewehrung: Verbund- und Zuggliedmodellierung; Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2003
- [35] **Zehetmaier, G.:** Zusammenwirken einbetonierter Bewehrung mit Klebarmierung bei verstärkten Betonbauteilen; Dissertation, Technische Universität München, 2006
- [36] **Zilch, K.; Niedermeier, R.:** Ermittlung der charakteristischen Verbundbruchkraft für auf Betonbauteile aufgeklebte Stahllaschen; Forschungsbericht zum DIBt-Vorhaben IV 12-5-19.27-889/98, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 1999
- [37] **Zilch, K.; Niedermeier, R.:** Festlegung von Anforderungen an die Klebschichtdicke bei Prüfkörpern für Verbundversuche mit oberflächig aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen; Forschungsbericht zum DIBt-Vorhaben ZP 52-5-19.50-1117/04, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2006
- [38] **Zilch, K.; Zehetmaier, G.; Niedermeier, R.:** Zusammenwirken von einbetonierter Bewehrung mit Klebarmierung bei verstärkten Betonbauteilen; Forschungsbericht zum DFG-Vorhaben ZI 134/9-1, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2002