

**Festlegung von Anforderungen  
an die Klebschichtdicke bei  
Prüfkörpern für Verbundversuche  
mit oberflächlich aufgeklebten  
Stahllaschen und CFK-Lamellen**

**T 3157**

T 3157

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 978-3-8167-7534-8

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

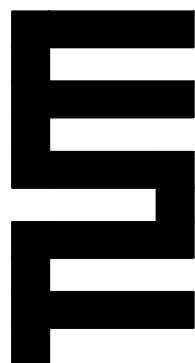
Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

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

## **Festlegung von Anforderungen an die Klebschichtdicke bei Prüfkörpern für Verbundversuche mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen**

Konrad Zilch  
Roland Niedermeier

Forschungsbericht  
Dezember 2006

gefördert durch das  
Deutsche Institut für Bautechnik  
ZP 52-5-19.50-1117/04

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)

## **Festlegung von Anforderungen an die Klebschichtdicke bei Prüfkörpern für Verbundversuche mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen**

In verschiedenen durchgeführten Versuchsreihen waren deutliche Unterschiede hinsichtlich der Verbundtragfähigkeit oberflächlich aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen festgestellt worden. Als möglicher Einflussparameter wurde die Dicke der Epoxydharzklebschicht untersucht. Dazu wurden Verbundversuche ausgewertet, die Klebschichtdicken von 1 mm und 5 mm aufwiesen. Die Auswertung ergab keine signifikanten Abweichungen in der Verbundtragfähigkeit für die beiden untersuchten Klebschichtdicken, jedoch zeigten die Versuche generell eine gegenüber früheren Versuchsreihen deutlich erhöhte aufnehmbare Verbundbruchenergie. Durch den Vergleich der Randbedingungen verschiedener Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass die Verbundtragfähigkeit mit zunehmender Aushärtungsdauer der Klebschicht abnimmt. Zu dieser Problematik wurden erste Tastversuche durchgeführt, die das zeitabhängige Verformungsverhalten des verwendeten Epoxydharzklebers ohne Beanspruchung durch äußere Lasten aufzeigen.

## **Determination of requirements to the thickness of the adhesive layer of bond test specimens with externally bonded steel plates and CFRP strips**

In different experimental series, which were carried out, clear differences concerning the load-carrying capacity of externally bonded steel plates and CFRP strips have been observed. As a possible influence coefficient the thickness of the adhesive layer was analysed. Bond tests with a thickness of the adhesive layer of 1 mm and 5 mm were evaluated computationally. The evaluation offered no significant divergences in the load-carrying capacity for the both examined thicknesses; however, the tests showed generally a higher bond fracture energy in comparison to former experimental series. By comparing the boundary conditions of different experimental series it could have been shown that the bond load-carrying capacity decreases with an increase of the curing time of the adhesive layer. A few tests concerning this problem and indicating the shrinkage of the epoxy resin used for the bond tests were carried out.

## **Détermination des exigences concernant l'épaisseur de la couche adhésive auprès de spécimens destinés pour des essais composites traitant des couvre-joints en acier, encollés en surface et des lamelles en fibres composites en carbone-plastique .**

On a pu constater lors de différentes séries d'essais expérimentaux des écarts importants en ce qui concerne la charge admissible des couvre-joints en acier, encollés superficiellement et des lamelles en fibres carbone-plastique. On a examiné l'épaisseur de la couche d'adhésion formée de résine époxy en tant que paramètre d'influence possible. Dans ce but-là, on a testé et calculé sur des échantillons composites avec une épaisseur de couche d'adhésif de 1 et de 5 mm. Cette analyse ne releva pas d'écarts significatifs concernant la charge admissible des épaisseurs des deux couches d'adhésifs examinées ; cependant ces essais montraient en général une énergie de rupture nettement plus élevée que lors des séries d'essais antérieurs. La comparaison des conditions à la limite dans les différentes séries d'essais a permis de démontrer que le pouvoir adhésif diminuait proportionnellement à la durée de durcissement de la couche d'adhésif. Pour l'étude de ce problème, on a conduit une première série d'essais. Ils démontrent que le comportement en déformation de l'adhésif de résine epoxy dépend du temps, compte non tenu de la contrainte due à des charges extérieures.



# 1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche experimentelle Studien zum Verbundtragverhalten oberflächlich aufgeklebter Stahllaschen, CFK-Lamellen und CFK-Gelege durchgeführt. Dabei wurden grundsätzlich identische Trag- und Versagensmechanismen beobachtet. Zwischen den einzelnen Versuchsreihen bestehen jedoch signifikante Unterschiede hinsichtlich der festgestellten Verbundtragfähigkeit. Diese wird im Wesentlichen von der Verbundbruchenergie bestimmt, die oberflächennahe Betonschichten bis zur vollständigen Ablösung der Klebarmierung aufnehmen können, sowie einem Reibungsanteil, der unter Umständen auch nach dem Verbundbruch aktiviert werden kann. Die auf den verschiedenen Versuchsreihen beruhenden Ansätze zur Bestimmung dieser bruchmechanischen Kenngröße weichen erheblich voneinander ab. Bei CFK-Lamellen unterscheiden sich die Vorfaktoren einzelner Ansätze zur Bestimmung der Verbundbruchenergie bis zum Faktor 4.

Die bislang erfassten Einflussgrößen und systematische Effekte in den einzelnen Versuchsreihen wie die Versuchskörperart oder die aus anderen Versuchsserien bekannten, zwischen einzelnen Versuchslaboratorien existenten Unterschiede können nur einen Teil dieser Abweichungen erklären. Es ist deshalb zu vermuten, dass die Verbundtragfähigkeit durch weitere, bislang nicht erfasste Einflussgrößen beeinflusst wird. Neuere Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass die Dicke der Epoxydharzklebschicht einen gewissen Einfluss auf die vom oberflächennahen Beton aufnehmbare Verbundbruchenergie hat.

In der Literatur wurde bislang die Auffassung vertreten, dass die Klebschichtdicke im baupraktisch relevanten Bereich von 0,5 bis 5 mm keinen signifikanten Einfluss auf die Kurzzeitfestigkeit unter quasistatischer Beanspruchung hat. Bei der Durchführung einiger Versuchsreihen im Rahmen experimenteller Forschungsvorhaben oder einschlägiger Zulassungsverfahren wurde dieser Einflussgröße deshalb keine Bedeutung beigemessen, so dass an den Versuchskörpern weder gezielte Klebschichtdicken eingestellt noch die sich zufällig ergebenden Klebschichtdicken gemessen und dokumentiert wurden.

Bereits im Rahmen früherer Untersuchungen am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München wurde gezeigt, dass die Annahme, die Klebschichtdicke hätte keinen Einfluss auf die aufnehmbare Verbundbruchkraft zumindest für große Verbundlängen nicht durch entsprechende experimentelle Untersuchungen belegt werden kann. Die Bestimmungsgleichungen der in den derzeit gültigen Zulassungsbescheiden [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11] enthaltenen Bemessungsansätze beruhen auf bruchmechanischen Ansätzen, die auf der Grundlage von experimentellen Untersuchungen kalibriert wurden. Diese Untersuchungen waren im Rahmen eines vom Deutschen Institut für Bautechnik finanzierten Forschungsvorhabens an der Technischen Universität München durchgeführt worden. Dabei wurde an den Verbundversuchskörpern die minimal zulässige Klebschichtdicke, ohne zusätzliches Vorhaltemaß, erstmals gezielt eingestellt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden zwischenzeitlich auch durch andere Versuchsreihen mit gleich großen Klebschichtdicken bestätigt. Weitere aktuelle Untersuchungen wiederum lassen die Vermutung zu, dass mit steigender Klebschichtdicke höhere aufnehmbare Verbundbruchenergien erreicht werden können. Da in diesen Untersuchungen aber auch andere tragfähigkeitserhöhende Effekte auftraten bzw. die Klebschichtdicken nicht exakt eingestellt wurden, kann der quantitative Zusammenhang zwischen Klebschichtdicke und aufnehmbarer Verbundbruchenergie auf der Grundlage der bislang durchgeführten Untersuchungen nicht angegeben werden.

Am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München wurden im Rahmen eines industriefinanzierten Forschungsvorhabens erstmals experimentelle Untersuchungen mit größeren, gezielt eingestellten Klebschichtdicken an Verbundversuchskörpern durchgeführt. Im Rahmen dieser industriefinanzierten Tastversuche war aber weder die quantitative Auswertung der Versuche noch die Beurteilung der Konsequenzen für die an Zulassungsversuche zu stellenden Anforderungen vorgesehen. Die Auswertung und Beurteilung erfolgten im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsvorhabens.



## 2 Grundlagen und Stand des Wissens

Der Einfluss der Klebschichtdicke auf die Verbundtragfähigkeit oberflächlich aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen war bislang nicht bekannt bzw. es wurde aufgrund der experimentellen Untersuchungen von Ranisch [16] davon ausgegangen, dass die Verbundtragfähigkeit nicht von der Klebschichtdicke abhängt. Durch die rein bruchmechanisch fundierte Beschreibung des Verbundverhaltens, die für die oberflächlich applizierte Klebarmierung erstmals durch Holzenkämpfer [16] und Täljsten [28] erfolgte, wurde diese auf einen einzigen Versuch gegründete These auch theoretisch bestätigt.

In [19] wurde bereits gezeigt, dass die von Ranisch angenommene Unabhängigkeit der Verbundtragfähigkeit nicht durch den in [20] zitierten Versuch mit einer Klebschichtdicke von 5 mm als experimentell belegt gelten kann. Die folgende Abb. 2.1 zeigt den für die Beschreibung des Verbundtragverhaltens etablierten bilinearen Verbundansatz. Die Verbundbruchenergie  $G_F$  entspricht der Fläche unter der Relativverschiebungs-Verbundspannungs-Beziehung. Die elastisch aufnehmbare Verbundenergie  $G_e$  entspricht der Fläche bis zum Erreichen der maximalen Verbundspannung  $\tau_{LI}$  bzw. der elastischen Grenzverschiebung  $s_{LI}$ .

$$G_F = \frac{\tau_{LI} \cdot s_{L0}}{2} \quad (2.1)$$

$$G_e = \frac{\tau_{LI} \cdot s_{LI}}{2} \quad (2.2)$$

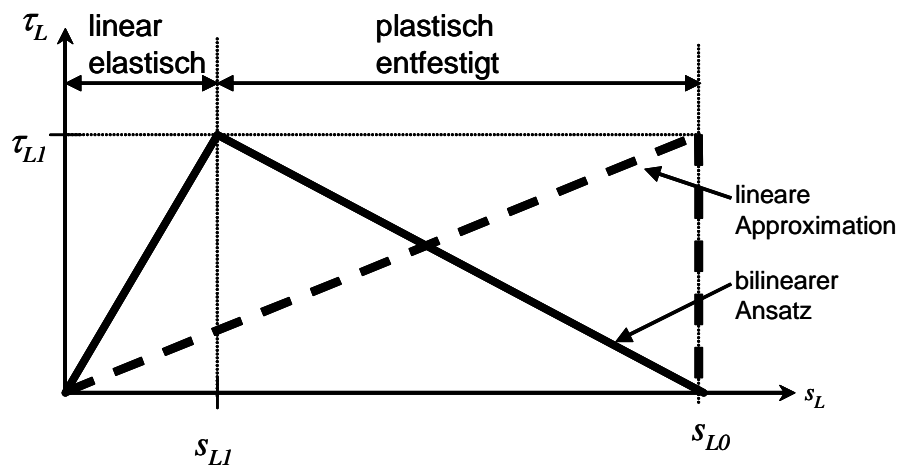
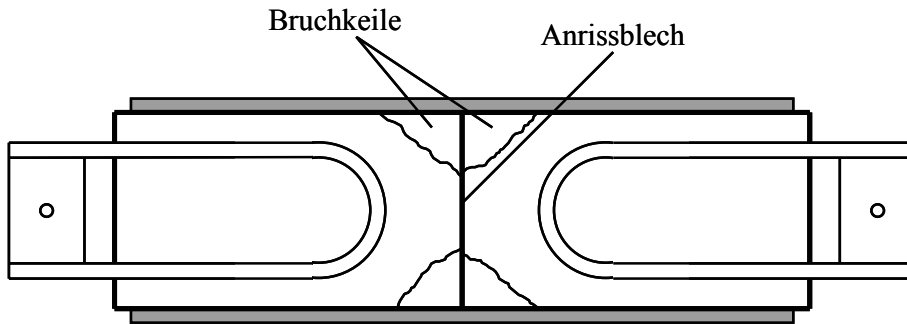


Abb. 2.1: Bilinearer Verbundansatz

Der von Rostasy, Ranisch und Alda durchgeführte Versuch wies nur eine kurze Verbundlänge auf, die unter Umständen durch die in Abb. 2.2 dargestellte Bruchkeilbildung infolge der nicht vorhandenen verbundfreien Vorlänge weiter verringert wurde.



**Abb. 2.2:** Bruchkeilbildung am Zug-Zug-Doppelaschenkörper ohne verbundfreie Vorlängen im Bereich des Anrissblechs

Verbundversuche mit kurzer Verbundlänge werden im Wesentlichen geprägt durch die vom Betonuntergrund aufnehmbare maximale Verbundspannung. Dies zeigt die folgende Bestimmungsgleichung für die am Einzelriss über Verbundspannungen verankerbare Zugspannung, die für die von Holzenkämpfer vorgeschlagene Approximation des bilinearen Verbundgesetzes durch einen linearen Ansatz nach Abb. 2.1 hergeleitet werden kann.

$$\text{aufn. } \sigma_L^a = \sqrt{\frac{2 \cdot G_F \cdot E_L}{t_L}} \cdot \tanh \sqrt{\frac{\tau_{LI}^2 \cdot l_V^2}{2 \cdot G_F \cdot E_L \cdot t_L}} \quad (2.3)$$

$$\lim_{l_V \rightarrow 0} \sqrt{\frac{2 \cdot G_F \cdot E_L}{t_L}} \tanh \sqrt{\frac{\tau_{LI}^2 \cdot l_V^2}{2 \cdot G_F \cdot E_L \cdot t_L}} = \frac{\tau_{LI}}{t_L} \quad (2.4)$$

$$\lim_{l_V \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{2 \cdot G_F \cdot E_L}{t_L}} \tanh \sqrt{\frac{\tau_{LI}^2 \cdot l_V^2}{2 \cdot G_F \cdot E_L \cdot t_L}} = \sqrt{\frac{2 \cdot G_F \cdot E_L}{t_L}} \quad (2.5)$$

Nur große Verbundlängen lassen eine Untersuchung der aufnehmbaren Verbundbruchenergie zu, die das Produkt aus Verbundspannung und zugehöriger Relativverschiebung darstellt.

Auf der Grundlage der Erkenntnisse von Ranisch formuliert Holzenkämpfer einen Ansatz zur Bestimmung des elastischen Grenzwertes der Relativverschiebung  $s_{LI}$ , der neben der Verzerrung der Klebschicht auch Schubverformungen der angrenzenden Betonschichten berücksichtigt. Dabei setzt Holzenkämpfer für den Schubmodul des Klebers einen theoretisch aus dem Elastizitätsmodul und einer angenommenen Querdehnzahl abgeleiteten Wert an. Ferner trifft er eine Annahme hinsichtlich der Höhe der schubverformungswirksamen Betoneinflusszone, die er mit 50 mm ansetzt. Der so von ihm ermittelte Grenzwert  $s_{LI}$  der Relativverschiebung beträgt für eine Klebschichtdicke von 0,5 mm bei einer Betonwürfeldruckfestigkeit von  $33 \text{ N/mm}^2$  ( $E_c \approx 30\,000 \text{ N/mm}^2$ ) 0,02 mm, wovon ca. 95 % aus Betonverformungen resultieren. Diesem Ansatz widersprechen die in zahlreichen Versuchen durchgeführten Messungen der Relativverschiebung der Klebarmierung gegen die Betonoberfläche mit Wegaufnehmern, die in unmittelbarer Nähe zur Klebarmierung angeordnet waren und einen größeren Anteil der Betonverformungen an den beobachteten Relativverschiebungen ausschließen.

Da das Verbundversagen der Klebearmierung auf die Ausbildung einer oberflächenparallelen Bruchebene zurückzuführen ist und nach Holzenkämpfer auch die Verformungen im Wesentlichen von den Betoneigenschaften abhängen, berücksichtigt sein bruchmechanischer Ansatz vor allem Betonfestigkeiten. Für den Nachweis der Verbundtragfähigkeit sind deshalb gemäß den derzeit gültigen Zulassungsbescheiden mit relativ hohem Aufwand die Betondruckfestigkeit und die Oberflächenzugfestigkeit nach DIN 1048-2 [12] bzw. 1048-4 [13] zu bestimmen.

Zusätzlich werden die Modellansätze zur Beschreibung des Verbundverhaltens mit systemabhängigen Koeffizienten versehen, die anhand einer Kalibrierung der Modelle an den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen festgelegt werden. Neben den am Bauteil ermittelten Betonfestigkeiten können so auch die auftretenden Verformungen berücksichtigt werden. Mit dem derzeit bekannten Wissensstand auf der Grundlage aktueller Untersuchungen von [18], [19], [21], [24] muss jedoch festgestellt werden, dass im Hinblick auf eine korrekte Einschätzung der Verbundtragfähigkeit eine rein bruchmechanische und damit punktuelle Beschreibung des Verbundverhaltens unter Ansatz der am Bauwerk ermittelten Betonfestigkeiten auch in Verbindung mit den derzeit berücksichtigten systemspezifischen Koeffizienten, nicht hinreichend ist, um die komplexen, räumlich wirkenden und von zahlreichen Einflussfaktoren abhängigen Tragmechanismen – insbesondere in der Entfestigungsphase nach der Überschreitung des Verbundspannungsmaximums zu beschreiben. Dies zeigt ein Vergleich der Ergebnisse verschiedener Versuchsreihen.

Von Ulaga [29] wurden bereits mehr Versuchsreihen und die daraus abgeleiteten Verbundansätze verglichen. Problematisch bei derartigen Vergleichen ist der Umstand, dass die im Zuge der Versuchsreihen unterschiedliche Parameter erfasst oder die gleichen Parameter auf unterschiedliche Weise ermittelt wurden. Im Folgenden werden deshalb nur Versuchsreihen betrachtet, die in der an der Technischen Universität München etablierten Weise ausgewertet werden können. Um die erstmalige bereichsweise Ablösung der Klebebewehrung (Beginn der vollständigen Verbundentkopplung) identifizieren zu können, muss im Versuch die Relativverschiebung  $s_L$  am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs in Abhängigkeit von der Laschenzugkraft  $F_L$  bzw. der Laschenlängsdehnung  $\varepsilon_L$  aufgezeichnet worden sein. Ferner müssen folgende Parameter bekannt sein:

$\beta_{OZ}$	Mittelwert der Oberflächenzugfestigkeit, bestimmt nach DIN 1048-2 mit Ringnut
$E_L$	Mittelwert des Elastizitätsmoduls der Laschen
$t_L$	Laschendicke
$b_L$	Laschenbreite
$l_V$	Verbundlänge

Wegen der großen Streuungen und der unscharfen Korrelation zwischen der Oberflächenzugfestigkeit und der Druckfestigkeit des Betons muss die Oberflächenzugfestigkeit am Prüfkörper auf den geprüften Seitenflächen ermittelt worden sein. Betrachtet werden ferner nur Versuchskörper, die mit einem der zugelassenen Epoxydharzkleber Sikadur 30 [5], [6] bzw. Concretin SK 41 [4], [9], [7], [11] hergestellt wurden. Diese weisen nach Herstellerangaben im ausgehärteten Zustand sehr ähnliche mechanische Eigenschaften auf.

An der Technischen Universität München (TUM) wurden Verbundversuche mit Stahllaschen und CFK-Lamellen durchgeführt. Der auf den Stahllaschenversuchen [19] beruhende Ansatz zur Bestimmung der Verbundtragfähigkeit fand Eingang in die aktuellen Zulassungsbescheide [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]. Die dem Ansatz zugrunde liegenden Versuche an Zug-Zug-Doppellaschenkörpern mit einer auf 1 mm eingestellten Klebschichtdicke  $t_g$  wurden neu

ausgewertet. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit wurde abweichend von früherer Auswertung bei der Festlegung der Bestimmungsgleichung (2.6) für die Verbundbruchenergie  $G_F$  nur eine Abhängigkeit von der Oberflächenzugfestigkeit, nicht aber von der mit dem Rückprallhammer bestimmten Druckfestigkeit oberflächennaher Betonschichten unterstellt.

$$\text{Stahllaschen (TUM [19], } t_g = 1 \text{ mm):} \quad G_F = 0,1393 \cdot \beta_{OZ} \quad (2.6)$$

Hinsichtlich der Verbundtragfähigkeit von oberflächlich aufgeklebten CFK-Lamellen werden zwei an der Technischen Universität München durchgeführte Versuchsreihen betrachtet. Die Zug-Zug-Doppellaschenkörper der ersten Serie [30] wurden mit einer Klebschichtdicke von 1 mm ausgeführt. Bei der zweiten Versuchsreihe [21], [23] handelt es sich um Untersuchungen, bei welchen die Klebschichtdicke nicht gezielt eingestellt wurde, sondern sich zufällig aus der Applikation entsprechend den Herstellerangaben ergab.

$$\text{CFK-Lamellen (TUM [30], } t_g = 1 \text{ mm):} \quad G_F = 0,1478 \cdot \beta_{OZ} \quad (2.7)$$

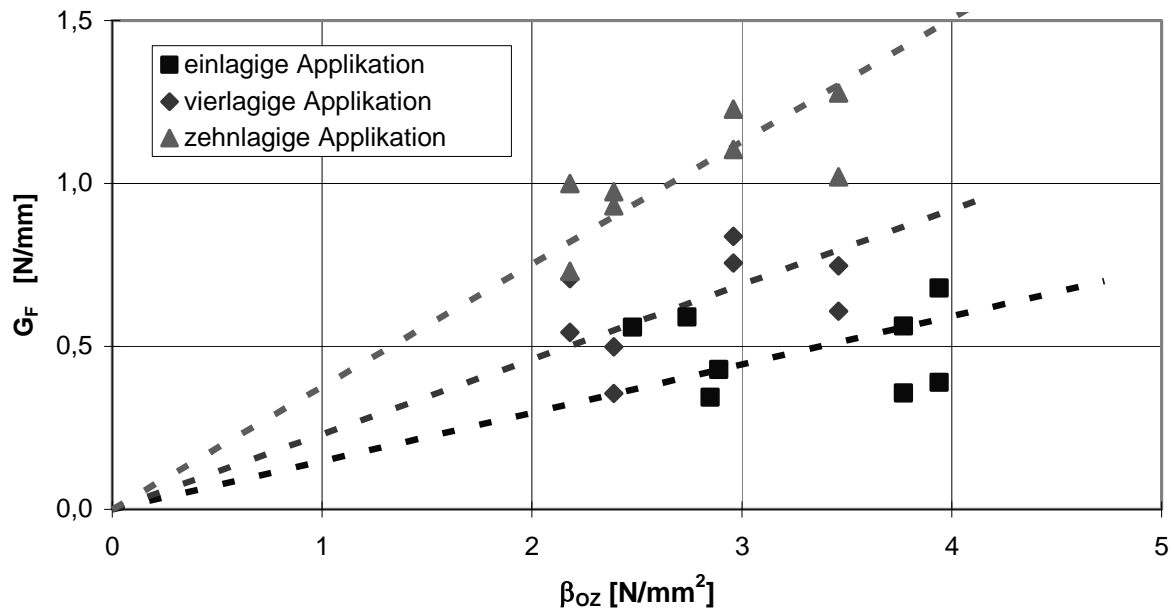
$$\begin{aligned} \text{CFK-Lamellen (TUM [21],[23], } t_g \text{ unbestimmt):} \\ G_F = 0,2067 \cdot \beta_{OZ} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Eine identische Auswertung [21] von Verbundversuchen an Zug-Druck-Doppellaschenkörpern mit CFK-Lamellen, die an der Technischen Universität Braunschweig (TUBS) [18] mit unplanmäßigen Klebschichtdicken durchgeführt wurden, führt unter Vernachlässigung geometrischer Einflussgrößen zu der nachstehenden Bestimmungsgleichung für die Verbundbruchenergie.

$$\begin{aligned} \text{CFK-Lamellen (TUBS [18], [21], } t_g \text{ unbestimmt):} \\ G_F = 0,3706 \cdot \beta_{OZ} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Generell ist in den bislang bekannten Versuchen festzustellen, dass CFK-Lamellen eine höhere Verbundtragfähigkeit aufweisen als Stahllaschen. Laut der von Holzenkämpfer [16] und Neubauer [18] in analoger Weise auf der Basis von Verbundversuchen an Zug-Druck-Doppellaschenkörpern abgeleiteten Ansätze unterscheiden sich die aufnehmbaren Verbundbruchenergien für die Verfahren mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen um den Faktor 2,2. Holzenkämpfer gibt die Klebschichtdicke für seine Verbundversuche mit 0,5 bis 1 mm an, wohingegen die Klebschichtdicke bei den Versuchen von Neubauer nicht bekannt ist. Die Auswertung von beiden Autoren erfolgte nicht auf der Basis der in den Verbundversuchen beobachteten Laschenzugkräfte bei einsetzender vollständiger Verbundentkopplung sondern unter Ansatz der erreichten Höchstlasten, die bei größeren Verbundlängen Effekte aus Reibung und lokalen Streuungen der Betonfestigkeiten enthalten können. Es ist ferner anzumerken, dass Versuche an Zug-Druck-Doppellaschenkörpern erfahrungsgemäß zu geringeren Verbundtragfähigkeiten führen als Versuche an Zug-Zug-Doppellaschenkörpern.

Die den CFK-Lamellen zugeordnete höhere Verbundbruchenergie kann unter Umständen auf die zwischen den Fasern wirkende Epoxydharzmatrix zurückzuführen sein, die für die üblichen Fasergehalte von ca. 70% zu einer gewissen Vergrößerung des Abstands zwischen der Bauteiloberfläche und dem Spannungsschwerpunkt des Lamellenquerschnitts führt. Den Effekt der mit größerem Harzanteil steigenden Verbundbruchenergie zeigen sehr deutlich auch die am Lehrstuhl für Massivbau durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Verbundtragfähigkeit von CFK-Gelegen, die mit einem dünnflüssigen Epoxidharzkleber auf die Bauteiloberfläche laminiert werden.

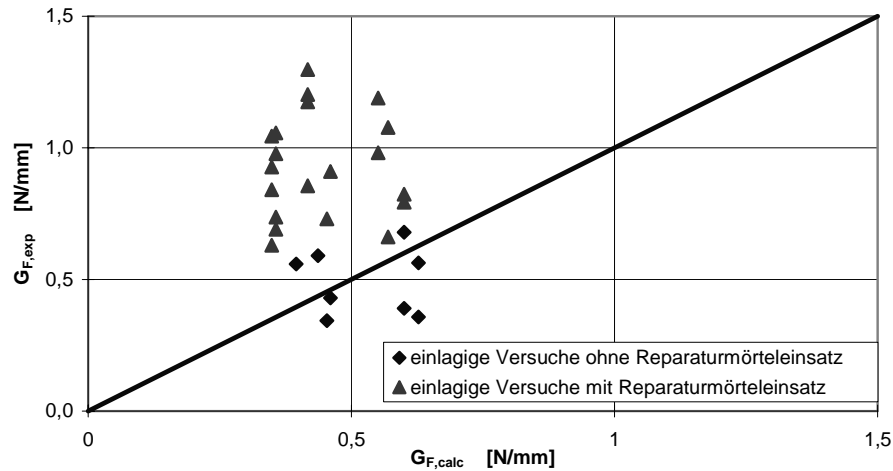


**Abb. 2.3** Einfluss der Lagenanzahl auf die Verbundbruchenergie bei der Applikation von CFK-Gelegen

Je applizierter Lage des unidirektionalen CFK-Geleges wird bei diesem Verfahren eine bestimmte Menge des dünnflüssigen Epoxydharzes aufgetragen, das die Gelege durchdringt und so die kraftschlüssige Verbindung zwischen den einzelnen Fasern und den Gelegen herstellt. Außerdem wird ein niedrigviskoser Primer eingesetzt, der in die oberflächennahen Betonschichten eindringt und durch die Verfestigung gegenüber den Verfahren mit oberflächlich applizierten Stahllaschen und CFK-Lamellen zu einer Erhöhung der aufnehmbaren maximalen Verbundspannung um den Faktor 2 bis 3 führt. Die in derartigen Verbindungen herrschenden komplexen Spannungs- und Verzerrungszustände wurden bislang nicht eingehend untersucht. Auf der Grundlage der experimentellen Untersuchung wurde jedoch die folgende Bestimmungsgleichung für die aufnehmbare Verbundbruchenergie  $G_F$  empirisch festgelegt, die den Einfluss der Lagenanzahl bzw. des Klebervolumens berücksichtigt. Dazu ist anzumerken, dass etwa vier bis fünf Lagen des CFK-Geleges dem Faserquerschnitt einer 1,2 bis 1,4 mm dicken CFK-Lamelle entsprechen.

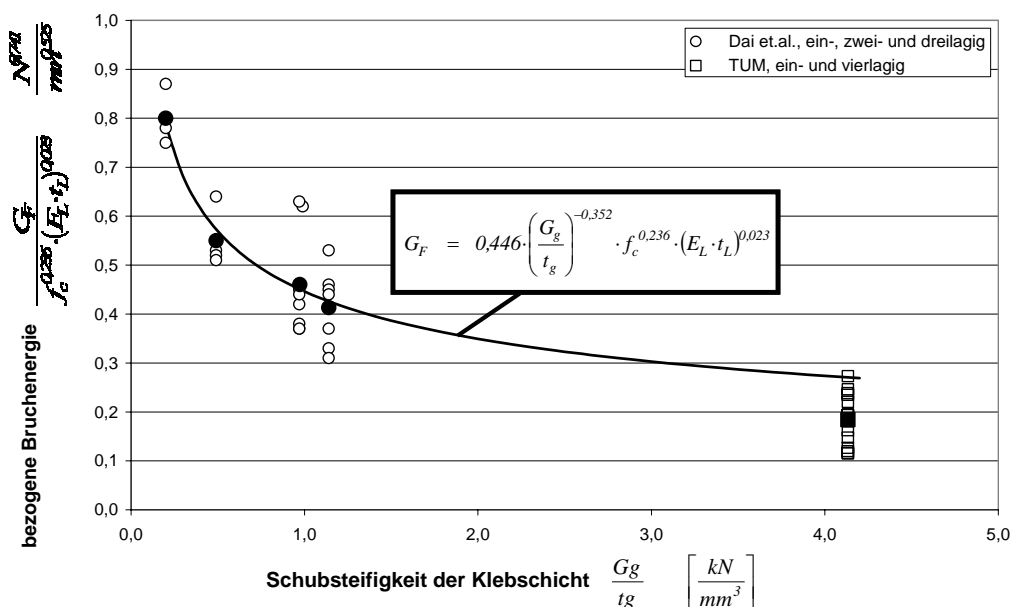
$$G_F = 0,1592 \cdot \sqrt[3]{n_L} \cdot \beta_{OZ} \quad (2.10)$$

In einigen der mit CFK-Gelegen durchgeführten Versuche wurde ein Reparaturmörtel eingesetzt, der zwischen der unebenen, geprimerten Betonoberfläche und der ersten Gelegelage angeordnet wird. Durch diesen Reparaturmörtel auf Epoxydharzbasis wird die Dicke der Harzschicht zwischen der Betonoberfläche vergrößert. Das folgende Bild zeigt den Einfluss einer zusätzlichen Reparaturmörtelschicht auf die aufnehmbare Verbundbruchenergie. Eine darüber hinausgehende quantitative Analyse ist nicht möglich, da die Dicke der Reparaturmörtelschicht weder gezielt eingestellt noch nach dem Versuch gemessen wurde.



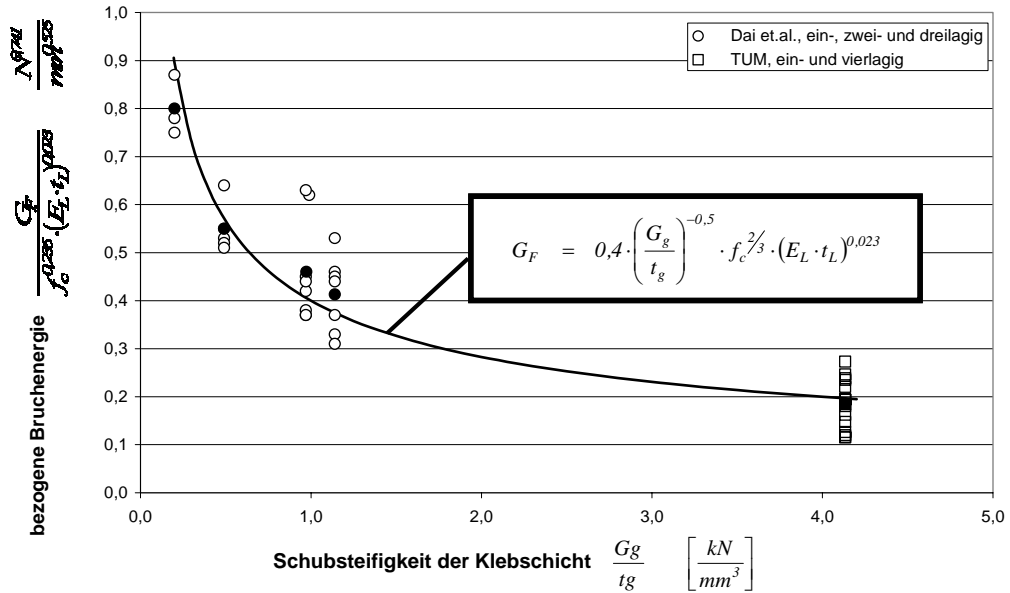
**Abb. 2.4** Einfluss der Lagenanzahl auf die Verbundbruchenergie bei der Applikation von CFK-Gelegen

Auch die Untersuchungen von Dai et al. [1] bestätigen diesen Effekt. In diesen Untersuchungen, die ebenfalls mit Gelegen durchgeführt wurden, wurde unter anderem die aufnehmbare Verbundbruchenergie in Abhängigkeit von der Schubsteifigkeit der Klebschicht  $G_g/t_g$  bestimmt. Dazu wurden drei verschiedene Epoxydharztypen und verschiedene Klebschichtdicken untersucht. Die folgende Abb. 2.5 zeigt den Einfluss der Schubsteifigkeit. In das Diagramm wurden auch die Ergebnisse von Verbundversuchen eingetragen, die am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München mit CFK-Gelegen durchgeführt wurden. Den Untersuchungen von Dai et al., die mit ein-, zwei und dreilagig verklebten Gelegen aus Kohlenstoff-, Aramid- und Glasfasern durchgeführt wurden, etwa entsprechend wurden dabei nur Versuche mit ein- und vierlagiger Anordnung der CFK-Gelege berücksichtigt. Die Schubsteifigkeit wurde analog dem Vorgehen von Dai et al. nur unter Ansatz der Primerschicht ermittelt. Der Schubmodul wurde aus dem Elastizitätsmodul, der an aktuellen Vergleichsproben mit  $2.682 \text{ N/mm}^2$  bestimmt worden war, unter Ansatz einer Querdehnzahl  $\nu$  in Höhe von 0,38 ermittelt.



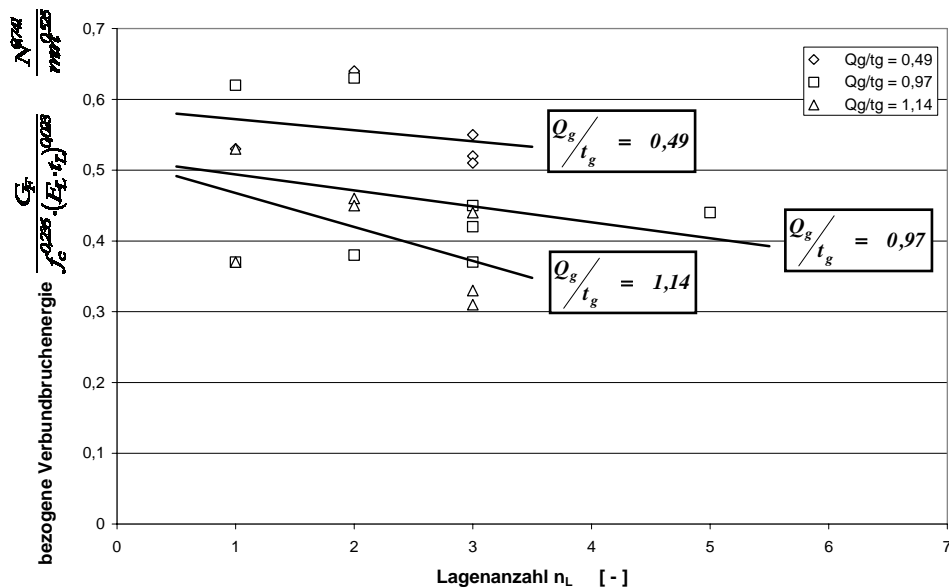
**Abb. 2.5** Einfluss der Schubsteifigkeit der Klebschicht zwischen Betonoberfläche und Faserquerschnitt auf die Verbundbruchenergie bei der Applikation von Fasergelegen – Ansatz von Dai et al.

Die Schubsteifigkeit der Primerschicht in den Versuchen an der Technischen Universität München liegt deutlich außerhalb des von Dai et al. untersuchten Bereichs. Die auf der Basis von Regressionsanalysen empirisch festgelegte im Diagramm angegebene Bestimmungsgleichung wurde deshalb an die erweiterte Datenbasis angepasst. Abb. 2.6 zeigt diese Anpassung.



**Abb. 2.6** Einfluss der Schubsteifigkeit der Klebschicht zwischen Betonoberfläche und Faserquerschnitt auf die Verbundbruchenergie bei der Applikation von Fasergelegen – modifizierter Ansatz von Dai et al.

Es bleibt anzumerken, dass, wie die folgende Abb. 2.7 zeigt, in den Versuchen von Dai et al. Mit CFK-Gelegen eine Erhöhung der aufnehmbaren Verbundbruchenergie mit steigender Anzahl der Lagen nicht beobachtet werden konnte. Auch in den Untersuchungen von Neubauer [18] mit zweilagig verklebten CFK-Lamellen wurde dieser Effekt nicht beobachtet.



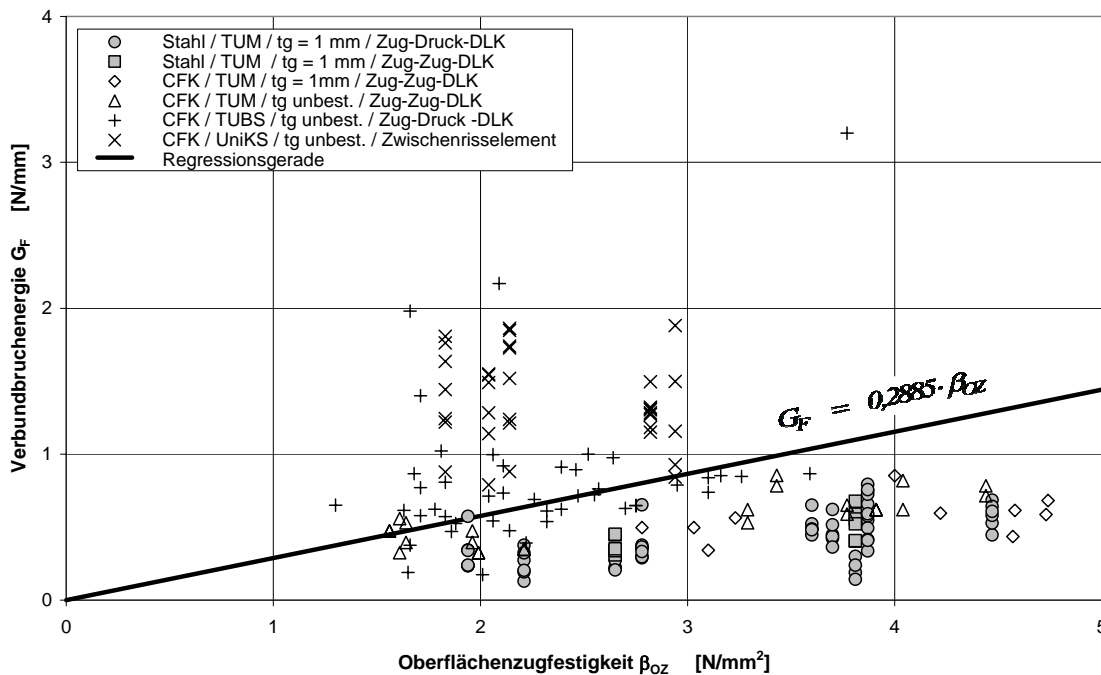
**Abb. 2.7** Einfluss der Lagenanzahl auf die Verbundbruchenergie in den Versuchen von Dai et al. mit oberflächlich applizierten Fasergelegen

An der Universität Kassel (UniKS) wurde erstmals im Rahmen einer durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Studie von Schilde und Seim [22], [24] das Verbundtragverhalten oberflächlich aufgeklebter CFK-Lamellen an so genannten Zwischenrisselementen untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen ergänzen frühere Arbeiten von Neubauer [18] und Niedermeier [19] zur Verbundtragfähigkeit oberflächlich aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen. Die in diesen Arbeiten enthaltenen Rechenmodelle wurden auf der Grundlage von Verbundversuchen an Zug-Druck- bzw. Zug-Zug-Doppellaschenkörpern formuliert, die die Randbedingungen am Einzelriss abbilden und deshalb auf die Verhältnisse von Verbundbereichen zwischen zwei benachbarten Biegerissen an querkraftbeanspruchten Trägern nur bedingt übertragbar sind. Die Versuche wurden auf Grundlage der in der Versuchsdokumentation [24] abgebildeten Zugkraftdiagramme ausgewertet. Die Verbundbruchenergie  $G_F$  wurde aus dem bis zum ersten Lastabfall erreichten Zugkraftzuwachs ermittelt. Diese Auswertung ist konservativ, da der Lastabfall nicht zwangsläufig mit der einsetzenden Verbundentkopplung gleichzusetzen ist, sondern auch aus der so genannten Bruchkeilbildung an den Rissufern resultieren kann, die wegen der fehlenden verbundfreien Vorlänge in den Versuchen an den Zwischenrisselementen häufig beobachtet wurde.

CFK-Lamellen (UniKS [22], [24],  $t_g$  unbestimmt):

$$G_F = 0,6091 \cdot \beta_{OZ} \tag{2.11}$$

Die Klebschichtdicke wurde in den Versuchen an der Universität Kassel nicht gezielt eingestellt, jedoch gibt Schilde die Dicke des verwendeten Epoxydharzklebers mit etwa 2 mm an. Angemerkt werden muss zu den Versuchen ferner, dass die Klebschicht durch nicht entfernte Klebereste anscheinend in zahlreichen Fällen deutlich breiter war als die applizierten CFK-Lamellen und dadurch erheblich größere Ausbruchflächen erreicht wurden. Dies zeigen die Abbildungen zu den aufgetretenen Versagensfällen in der Versuchsdokumentation.



**Abb. 2.8** Ergebnisse der analogen Auswertung verschiedener Versuchsreihen mit oberflächlich aufgeklebten Stahllasche und CFK-Lamellen



Zusammenfassend kann mit Abb. 2.8 festgestellt werden, dass neben den bereits angeführten Abweichungen z.B. infolge der Prüfkörperart oder des Laschenmaterials sowie den zwischen verschiedenen Prüfstellen häufig auftretenden Abweichungen weitere systematische Einflüsse auf die Verbundbruchenergie  $G_F$  anzunehmen sind.

Die von Holzenkämpfer formulierte These, die Klebschichtdicke hätte keinen Einfluss auf die Verbundtragfähigkeit oberflächlich aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen, konnte bislang nicht experimentell bestätigt werden. Die in den Versuchen mit gezielt eingestellten, nach den einschlägigen Zulassungsbescheiden minimal zulässigen Klebschichtdicken erreichten Verbundbruchenergien liegen am unteren Rand des Spektrums.

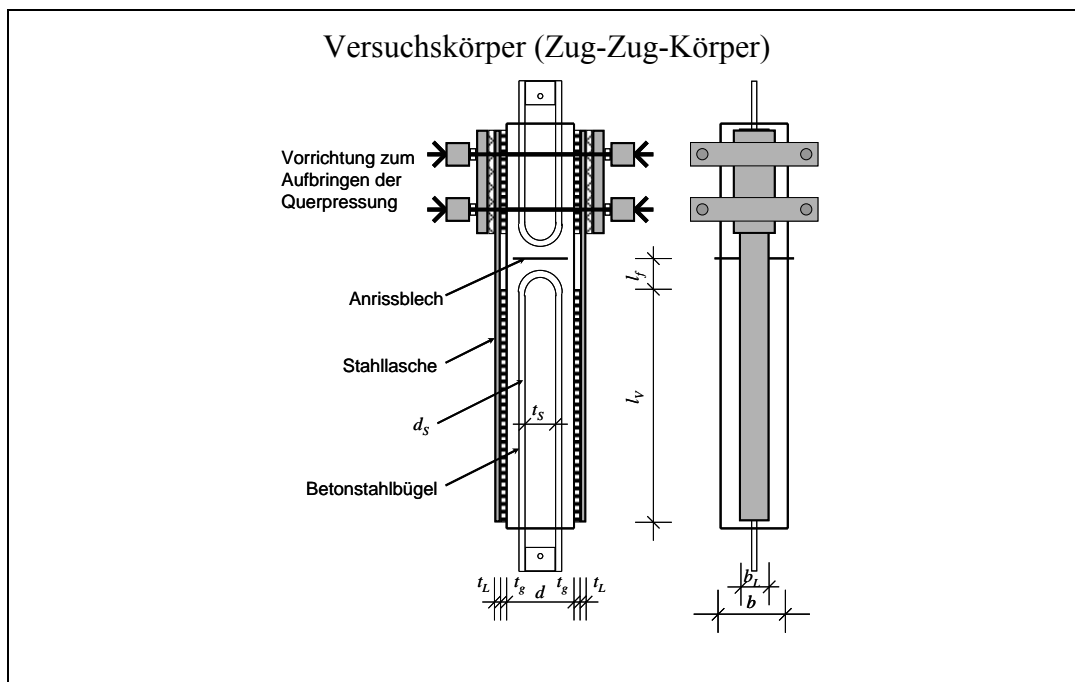
Da bislang nur für eine Klebschichtdicke, nämlich die minimal zulässige von 1 mm, gezielt die aufnehmbare Verbundbruchenergie ermittelt wurde und auch der Einfluss anderer systematischer Einflussgrößen quantitativ nicht bekannt ist, kann der Zusammenhang zwischen Klebschichtdicke und Verbundbruchenergie derzeit nicht beschrieben werden.

Es werden deshalb in den folgenden Abschnitten weitere Verbundversuche mit einer Klebschichtdicke von 5 mm beschrieben und ausgewertet, die finanziert aus Industriemitteln und Eigenmitteln des Lehrstuhls für Massivbau der Technischen Universität München durchgeführt wurden. Die Förderung durch das Deutsche Institut für Bautechnik ermöglichte die für die Auswertung erforderliche messtechnische Ausrüstung sowie die aufwendige rechnerische Ableitung der Kenngrößen des bilinearen Verbundansatzes aus den Messwerten. Für diese Art der Auswertung der Verbundversuche wurde am Lehrstuhl für Massivbau ein besonderes Verfahren entwickelt [19] und bereits mehrfach angewandt, das die Ermittlung der bestimmenden Parameter des bilinearen Verbundansatzes aus der experimentell ermittelten Last-Relativverschiebungskurve am lastseitigen Beginn des Verbundbereiches ermöglicht. Dieses vorteilhafte Verfahren kann durch weitere Anwendungen mittlerweile als etabliert angesehen werden.

### 3 Durchgeführte Versuche

#### 3.1 Versuchskörper

An einem verstärkten Biegeträger treten in der Zugzone gleichzeitig Zug- und Verbundspannungen auf. Diese Verhältnisse können am besten durch einen Biegebalken oder einen Zug-Zug-Doppelaschenkörper im Versuch abgebildet werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden deshalb Verbundversuche an Zug-Zug-Körpern durchgeführt. Variiert wurde die Dicke der Klebschicht. Die Nennwerte der Klebschichtdicke  $t_g$  betragen entsprechend der Anforderung der einschlägigen Zulassungsbescheide 1 mm bzw. davon deutlich abweichend 5 mm. Die Klebschichtdicke wurde durch während des Aushärtens außerhalb der Klebefuge angeordnete Abstandhalter eingestellt. Die Anordnung dieser Abstandhalter zeigt Abb. 3.2. Die tatsächliche Klebschichtdicke streut im Bereich der Klebefuge, da durch die Oberflächenvorbereitung durch Sandstrahlen eine unebene Oberfläche vorliegt. Da sich die Abstandhalter auf den erhabenen Punkten dieser Oberfläche absetzen, entspricht die Nenngröße  $t_g$  näherungsweise der im Bereich der Klebfuge minimal auftretenden Klebschichtdicke. Der Epoxydharzkleber wurde dachförmig unter Verwendung der in Abb. 3.3 dargestellten Lehre aufgetragen. Die Verklebung der Stahllaschen erfolgte unter Berücksichtigung des Technischen Merkblatts für den verwendeten Epoxydharzkleber Sikadur 30 [26].

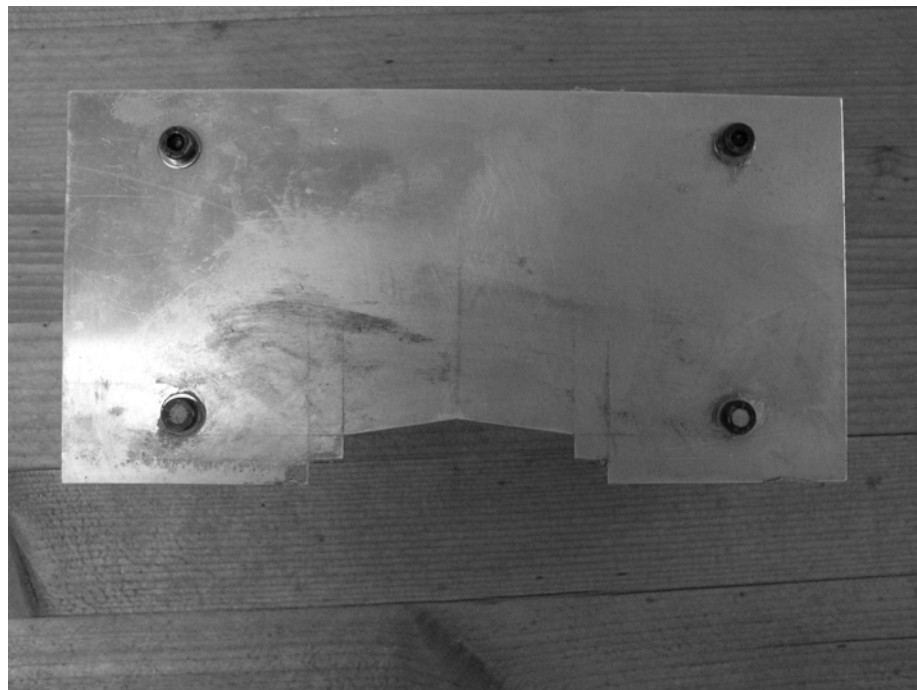


**Abb. 3.1:** Doppelaschenkörper zur Untersuchung des Verbundverhaltens aufgeklebter Stahllaschen

Alle Versuchskörper wiesen eine verbundfreie Vorlänge  $l_f$  auf, um die Ausbildung von Betonbruchkeilen (siehe Abb. 2.2) innerhalb der definierten Verbundlänge zu vermeiden. Das Auftreten derartiger Bruchkeile führt dazu, dass Relativverschiebungen am Beginn des Verbundbereiches nur mit großem messtechnischen Aufwand erfasst werden können. Die verbundfreie Vorlänge führt aber andererseits dazu, dass am Beginn des Verbundbereiches Verbundspannungen übertragen werden können. Am Rissufer hingegen muss die Verbundspannung in diesem Punkt gleich Null sein.

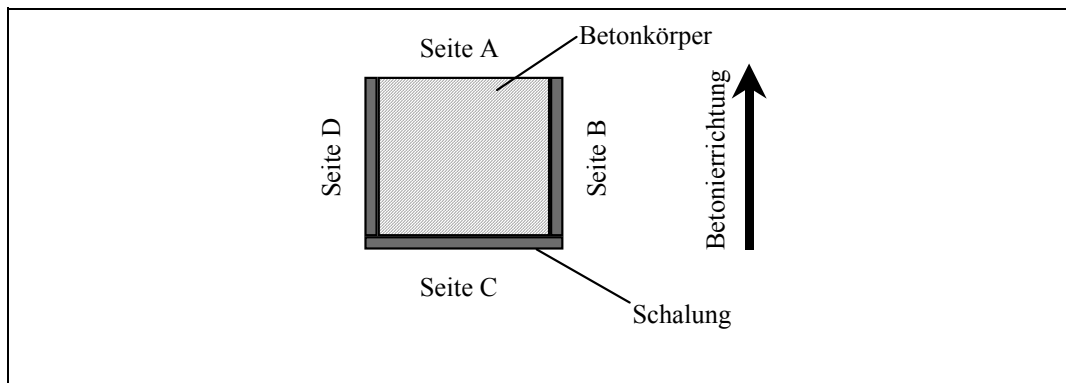


**Abb. 3.2:** Applikation der Stahllaschen mit Abstandhaltern zur Einstellung definierter Klebschichtdicken



**Abb. 3.3:** Lehre für den dachförmigen Auftrag des Epoxydharzklebers auf die Stahllaschen

Die planmäßigen Abmessungen der einzelnen Versuchskörper können Tabelle 3.1 entnommen werden. Bei den durchgeführten Versuchen waren die Stahllaschen auf den gegenüberliegenden Seitenflächen B und D gemäß Abb. 3.4 angeordnet, die bei der Herstellung der Betonkörper seitlich an der Schalung lagen.



**Abb. 3.4:** Lage der beklebten Seitenflächen beim Betonieren

**Tabelle 3.1:** Übersicht über die wesentlichen Abmessungen der Versuchskörper

Versuch	$t_g$ [mm]	Beton	$b$ [mm]	$d$ [mm]	$b_L$ [mm]	$t_L$ [mm]	$l_v$ [mm]	$l_f$ [mm]
1	1,0	B 45	200	300	50	5	880	100
2	5,0	B 45	200	300	50	5	880	100
3	1,0	B 45	200	300	25	5	880	100
4	5,0	B 45	200	300	25	5	880	100
5	5,0	B 45	200	300	25	5	880	100
6	5,0	B 45	200	300	25	5	880	100

## 3.2 Versuchsmaterial

### 3.2.1 Betonkörper

Die Betonkörper wurden im Fertigteilwerk der Laumer Bautechnik GmbH, Massing, hergestellt. Es wurden zwei Chargen a vier Körper produziert. Die planmäßigen Abmessungen der Körper betragen 200 mm x 300 mm x 1.500 mm.

Angestrebt wurde mit dem folgenden Betonrezept die Betonfestigkeitsklasse B 45. Die mittlere Betonfestigkeit  $f_{c,cube150}$  ermittelt am Würfel der Kantenlänge 150 mm betrug nach 28 Tagen 54,7 N/mm<sup>2</sup>.

Tabelle 3.2: Betonrezept

		kg/m <sup>3</sup>
Zuschlag	0/4	1.034
	4/8	281
	8/16	564
Zement CEM I 32,5 R		302
Wasser		187

Die Prismenfestigkeit des Zements  $N_P$  nach 28 Tagen betrug  $71 \text{ N/mm}^2$ , die Körnungsziffer  $k$  der Zuschläge 3,69 und der w/z-Wert 0,62.

Die Entwicklung der Würfeldruckfestigkeit kann aus Abb. 3.5 und der folgenden Tabelle ersehen werden.

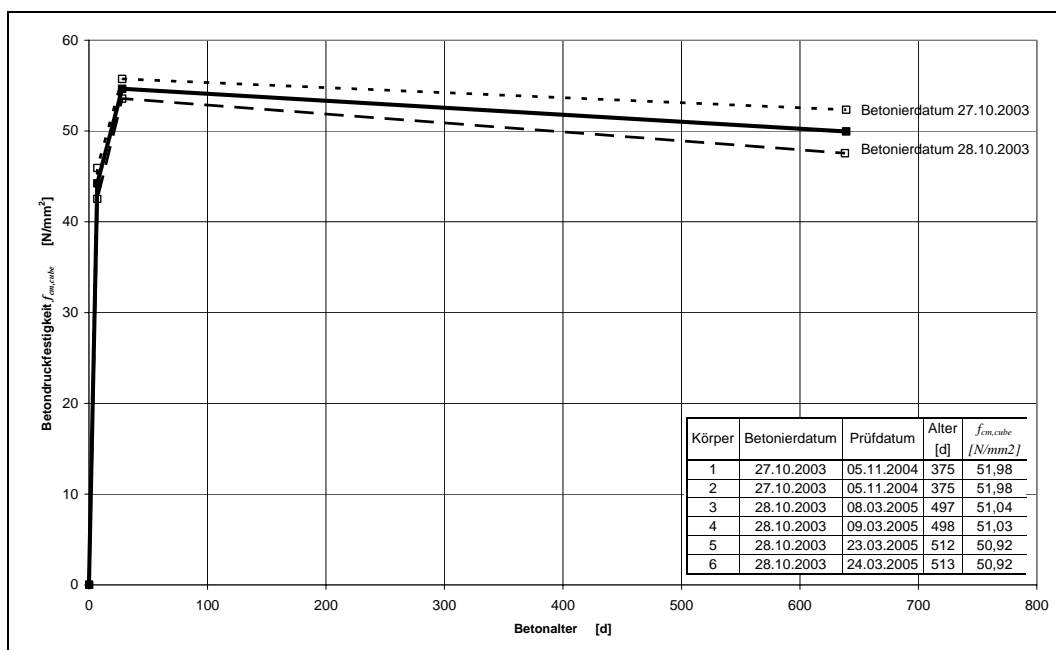
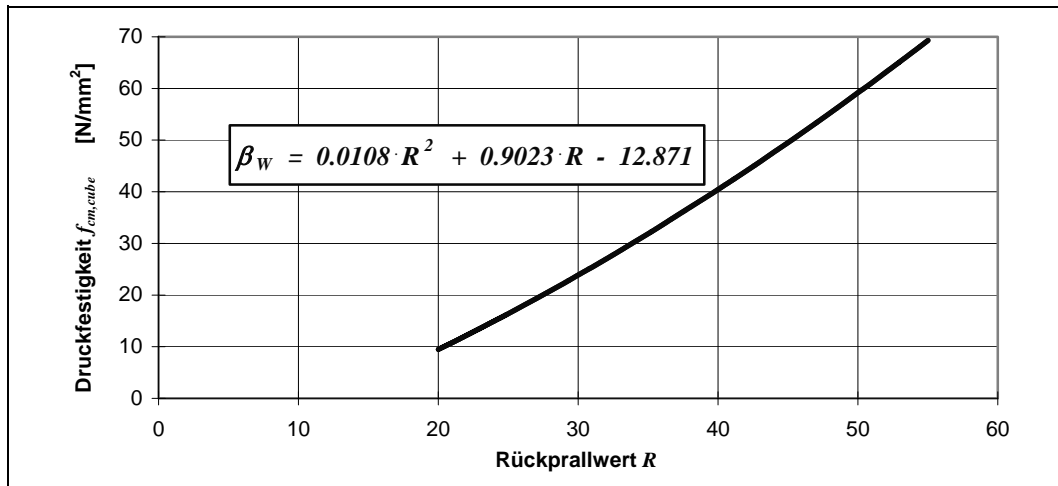


Abb. 3.5: Entwicklung der Würfeldruckfestigkeit

**Tabelle 3.3:** Entwicklung der Betonwürfeldruckfestigkeit

Würfel Nr.	Herstelldatum	Prüfdatum	Alter [d]	$f_{cm,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwerte	
					Alter [d]	$f_{cm,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	27.10.2003	03.11.2003	7	46,00	7	45,92
2				46,45		
3				45,32		
4		24.11.2003	24	56,60	28	55,73
5				54,10		
6				56,50		
7		27.07.2005	639	52,10	639	52,35
8				55,00		
9				51,80		
10				48,20		
11				49,40		
12				55,00		
13				54,30		
14				51,00		
15				52,60		
16				55,00		
17				52,70		
18				51,10		
19	28.10.2003	04.11.2003	7	43,89	7	42,53
20				41,90		
21				41,80		
22		25.11.2003	25	53,20	28	53,57
23				53,60		
24				53,90		
25		27.07.2005	638	49,60	638	47,55
26				49,00		
27				47,60		
28				46,60		
29				44,40		
30				48,10		

Die Druckfestigkeit der Betonkörper wurde auch zerstörungsfrei mit dem Rückprallhammer nach E. Schmidt gemäß DIN 1048 Teil 2 bestimmt. Dies erfolgte vor allem deshalb, da mit unterschiedlichen Festigkeiten an den Seitenflächen eines Prüfkörpers wegen der unterschiedlichen Lage hinsichtlich der Betonierichtung gerechnet werden muss und die an Vergleichskörpern ermittelte Druckfestigkeit nicht mit der Festigkeit oberflächennaher Bereiche gleichgesetzt werden kann. Mit dem Rückprallhammer ist eine Differenzierung hinsichtlich einzelner Seitenflächen möglich. Auf die Festlegung einer Bezugsgerade nach DIN 1048 Teil 4 [13] wird deshalb verzichtet. Stattdessen wurde die vom Gerätehersteller angegebene Umwertungskurve für ein Betonalter von 14 bis 56 Tagen, die in Abb. 3.6 dargestellt ist, benutzt, um die Würfeldruckfestigkeit aus den ermittelten Rückprallwerten zu ermitteln. Je Messung wurden zehn Rückprallwerte  $R$  ermittelt. Der größte und der geringste Wert wurden als Ausreißer eingestuft und in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.



**Abb. 3.6:** Umwertungskurve für Rückprallwerte und Würfeldruckfestigkeit

**Tabelle 3.4:** Betondruckfestigkeit zerstörungsfrei mit dem Rückprallhammer ermittelt an den Versuchskörpern 1 bis 6

Versuchskörper	1	2	3	4	5	6
betoniert am:	27.10.2003	27.10.2003	28.10.2003	28.10.2003	28.10.2003	28.10.2003
Seite B	49,9	44,6	47,1	44,6	44,9	49,2
Seite D	44,2	42,4				
Mittelwert je Betonierdatum	45,28		46,45			
Mittelwert gesamt	46,06					

Die Oberflächenzugfestigkeit wurde unmittelbar nach der Durchführung der Verbundversuche nach DIN 1048 Teil 2 [12] mit dem Verfahren mit vorgebohrter Ringnut ermittelt. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammengestellt.

**Tabelle 3.5:** Oberflächenzugfestigkeit ermittelt an den Versuchskörpern 1 bis 6

Körper Nr.	1		2		3		4		5		6	
Seite	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
Oberflächen- zugfestigkeit $\beta_{0z}$	2,790	3,110	3,690	2,140	2,219	2,643	1,631	3,142	2,762	2,610	2,403	2,327
	3,180	2,170	2,320	1,950	1,586	2,588	1,031	2,307	2,380	1,990	1,692	1,588
		2,810	2,110	2,550	2,677	1,700	2,210	2,422	2,251	2,070	2,973	2,204
			2,850	1,760	2,873	1,445	2,458	3,170	1,871	2,673	2,150	2,895
				1,860		2,643						
Mittelwert	2,99	2,70	2,74	2,05	2,34	2,09	1,83	2,76	2,32	2,34	2,30	2,25
Mittelwert gesamt	2,35											

#### 3.2.2 Stahllaschen

Obgleich die einschlägigen Zulassungsbescheide für die Verstärkung mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen ausschließlich den Einsatz von Stahl S 235 vorsehen, wurde für die Stahllaschen mit einem planmäßigen Querschnitt von 50x5 mm<sup>2</sup> Stahl S 460 NH mit der Werkstoffnummer 1.8953 gewählt, um ein Erreichen der Stahlstreckgrenze vor dem Verbundversagen auszuschließen. Die mechanischen Eigenschaften der Stahllaschen wurden an Flachproben ermittelt. Sie können der folgenden Tabelle entnommen werden.

**Tabelle 3.6:** Mechanische Eigenschaften der verwendeten Stahllaschen

Probe Nr.	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>eH</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	A <sub>gt</sub> [%]	A <sub>10</sub> [%]
1	204.200	558,48	631,34	13,52	30,1
2	208.000	543,05	615,45	12,77	28,6
3	207.300	532,53	604,19	10,39	27,3
4	203.900	543,22	614,56	13,09	30,6
5	207.300	522,20	595,22	11,53	23,0
6	206.000	525,02	594,54	8,63	23,0
Mittelwert	206.117	537,42	609,22	11,66	27,1
Variations- koeffizient	0,84 %	2,52 %	2,31 %	16,07 %	12,48 %

Wegen der in den Versuchen 1 und 2 beobachteten Querrissbildung innerhalb der Verbundlänge, die sich infolge der unerwartet hohen Verbundtragfähigkeit einstellte, wurde die Laschenbreite für die Versuche 3 bis 6 auf ca. 25 mm reduziert. Die Abmessungen der aufgeklebten Stahllaschen



können der folgenden Tabelle entnommen werden. Die Stahllaschen wurden unmittelbar vor dem Verkleben mit festem Strahlgut sandgestrahlt, gereinigt und mit Sika Colma Reiniger entfettet.

**Tabelle 3.7:** Abmessungen der aufgeklebten Stahllaschen

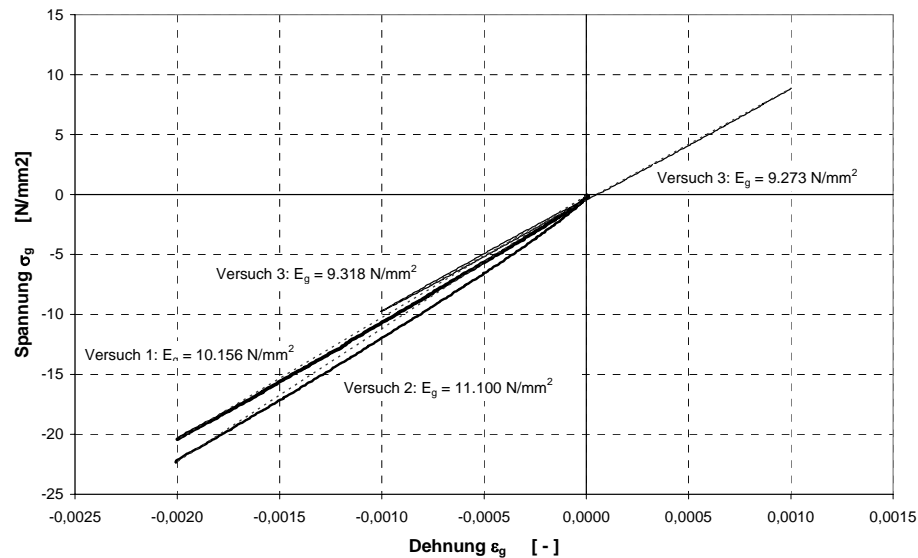
Versuch	1		2		3		4		5		6		
Seite	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	
t <sub>L</sub>	Soll	5,0											
	Ist	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01	5,01
b <sub>L</sub>	Soll	50,0				25,0							
	Ist	50,07	50,07	50,07	50,07	24,20	24,62	24,62	24,74	24,20	24,50	24,80	24,70

### 3.2.3 Epoxydharzkleber

Für die Applikation wurde der allgemein bauaufsichtlich zugelassene Zweikomponenten-Epoxydharzkleber Sikadur 30 verwendet. Die Anforderungen des Zulassungsbescheids hinsichtlich der Ausführung sowie das technische Merkblatt des Herstellers wurden für die Herstellung und Aufbringung des Klebers beachtet. Das Anmischen, die Aufbringung und die anschließende Aushärtung des Klebers erfolgten unter Laborbedingungen (20°C, 65 % rel. Luftfeuchte. Die Eigenschaften des Klebers wurden an Vergleichskörpern in Form von Prismen (40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>) ermittelt, die während der Verklebung der Stahllaschen hergestellt wurden. Abb. 3.7 zeigt die Arbeitslinien auf deren Grundlage der statische Elastizitätsmodul unter Druck- und Zugbeanspruchung ermittelt wurde. Die beiden Laschen eines Versuchskörpers wurden an zwei aufeinander folgenden Tagen verklebt und bis zur Prüfung bei Raumtemperatur gelagert. Die folgende Tabelle enthält auch Angaben zur Aushärtezeit, wobei eine Zuordnung der Versuchskörperseiten zu den Aushärtezeiten nicht mehr möglich ist.

**Tabelle 3.8:** Experimentell ermittelte Eigenschaften des Epoxydharzklebers

Versuch		1	2	3	4	5	6
Rohdichte kg/dm <sup>3</sup>		1,64		1,72		1,75	
Elastizitätsmodul	Druck	10.191					
	Zug	9.273					
Aushärtezeit		8 d / 7 d	8 d / 7 d	12 d / 11 d	12 d / 13 d	8 d / 10 d	9 d / 10 d



**Abb. 3.7:** Arbeitslinien des Epoxydharzklebers

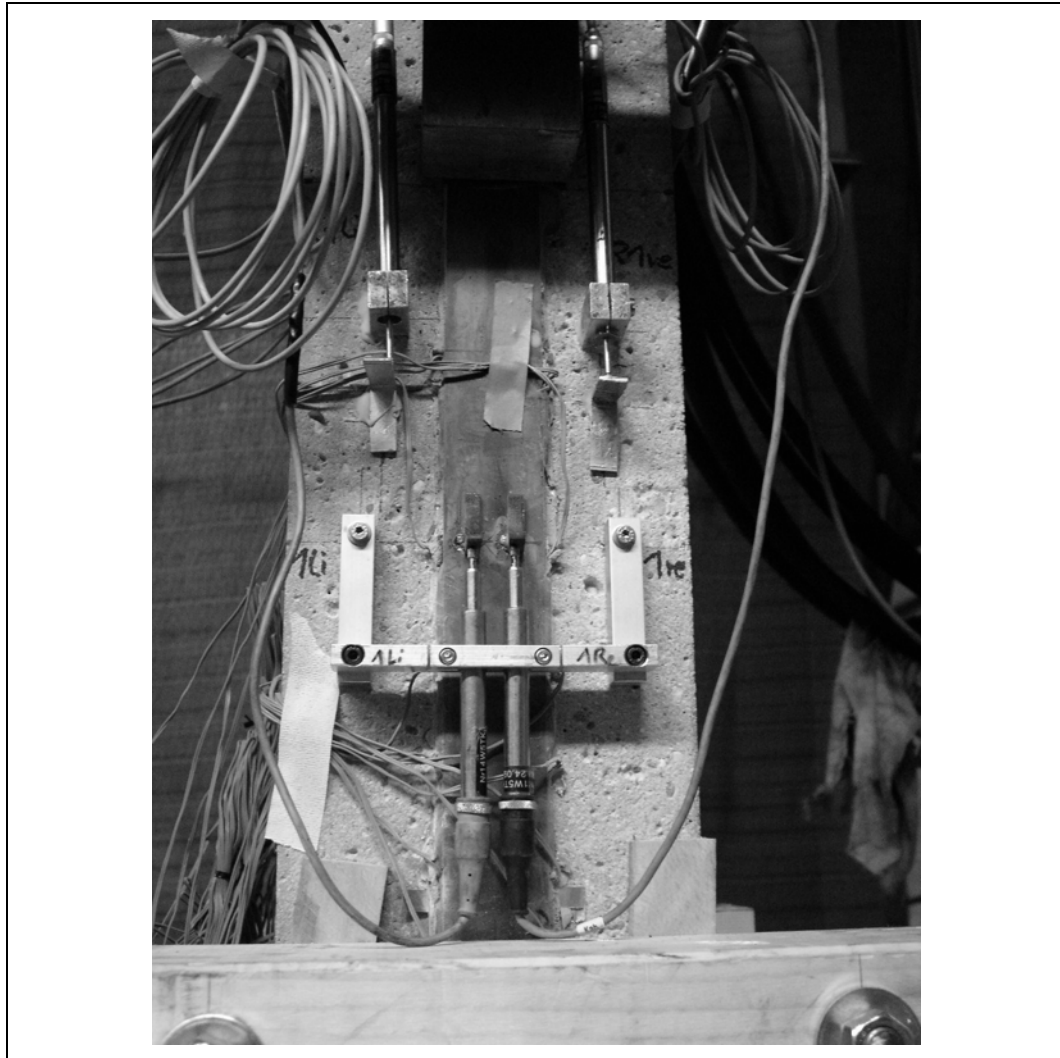
### 3.3 Messtechnische Ausrüstung der Versuchskörper

Die Relativverschiebung am Beginn des Verbundbereiches zwischen der Laschenoberfläche und der Oberfläche des Betonkörpers wurden an den Versuchskörpern 1 und 2 (Laschenbreite 50 mm) in jeweils zwei Messachsen je Lasche, an den Versuchskörpern 3 bis 6 (Laschenbreite 25 mm) in nur einer Messachse je Stahllasche aufgezeichnet. Die Messung dieser Verschiebung erfolgte über induktive Wegaufnehmer mit einem Messbereich von  $\pm 5$  mm. Diese Aufnehmer waren auf einer Trägerkonstruktion angebracht, die in zwei Lagerpunkten im Abstand  $l_b$  seitlich von der Stahllasche auf Höhe der lastseitigen Verbundbereichsgrenze mit Hilfe von je einer Schraube und einem Kunststoffdübel am Betonkörper befestigt war. Der Abstand  $l_b$  betrug an den Versuchskörpern 1 und 2 jeweils 40 mm und an den Körpern 3 bis 6 jeweils 47,5 mm. Die Spitzen der Induktionskerne der Wegaufnehmer ruhten auf etwa 10 mm breiten Metallwinkeln die durch je zwei Punktschweißungen an ihren Flanken mit den Stahllaschen verbunden waren. Abb. 3.8 zeigt die Anordnung der Wegaufnehmer am Beginn der Verbundlänge.

Die zugehörige Laschendehnung in den Messachsen wurde innerhalb der verbundfreien Länge durch auf den 5 mm breiten Seitenflächen der Stahllaschen applizierte Dehnmessstreifen erfasst, die eine Messgitterlänge von 6 mm und eine Breite von etwa 3 mm aufwiesen. Im Verbundbereich wurden zusätzliche Dehnmessstreifen an den Seitenflächen der Stahllaschen entsprechend Abb. 3.9 angebracht. Bei den Versuchskörpern 3 und 4 kam es infolge eines Herstellungsfehlers zu einer davon abweichenden Anordnung der Dehnmessstreifen entsprechend Abb. 3.9. Die 50 mm breiten Stahllaschen der Versuchskörper 1 und 2 waren mit Dehnmessstreifen auf beiden Seitenflächen der Stahllaschen, die 25 mm breiten Stahllaschen der Versuchskörper 3 bis 6 hingegen nur mit Dehnmessstreifen auf einer Seitenfläche versehen.

In allen Versuchen wurde zusätzlich die Rissbreite gemessen, die sich auf Höhe des Anrissbleches im verbundfreien Bereich einstellte. Die Erfassung dieser Größe erfolgte in vier Messachsen, die an den Versuchskörpern 1 und 2 in einem seitlichen Abstand von 25 mm, an den Versuchskörpern 3 bis 6 in einem seitlichen Abstand von 37,5 mm zu den Stahllaschen angeordnet waren. Die Trägerklötzchen für die Aufnehmer und Anschlagwinkel waren auf die Betonoberfläche aufgeklebt.

Die Längsachsen der induktiven Wegaufnehmer, die einen Messbereich von  $\pm 10$  mm aufwiesen, hatten einen Abstand zur Betonoberfläche von 20 mm.  
Die auf die Versuchskörper wirkenden Zugkräfte wurden mit der Kraftmessdose der Universalprüfmaschine erfasst.



**Abb. 3.8** Anordnung der Wegaufnehmer am Beginn der Verbundlänge zur Erfassung der Relativverschiebungen (Laschenbreite 50 mm)

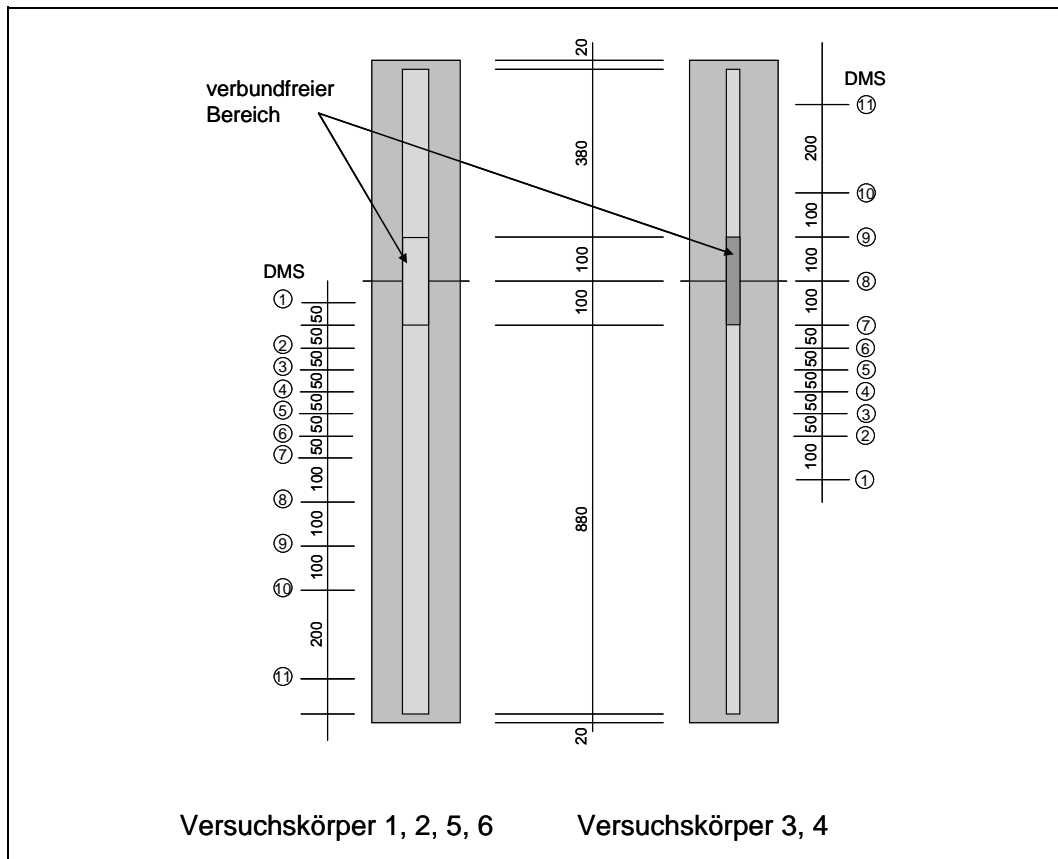


Abb. 3.9: Anordnung der Dehnmessstreifen

### 3.4 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden verformungsgesteuert, in Abhängigkeit vom Kolbenhub der Universalprüfmaschine gefahren. Diese Art der Steuerung entspricht wegen der großen verbundfreien Vorlängen und des linear elastischen Verhaltens der Stahllaschen 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 steht zunächst, insbesondere wenn die Seitenflächen B und D geprüft werden, nicht fest, auf welcher der beiden beklebten Körperseitenflächen zuerst Verbundversagen auftritt. Im weiteren Versuchsverlauf kann nach der Ausübung eines zusätzlichen Anpressdruckes auf die bereits bereichsweise abgelöste Stahllasche auch ein Verbundversagen der tragfähigeren, nicht angepressten Verbundfläche erreicht werden. Die vorgegebene Verformungsgeschwindigkeit für den Kolbenhub der Prüfmaschine lag in allen Verbundversuchen nach einer manuellen Aufbringung einer Anfangsbelastung  $F_0$  bei 0.005 bis 0.015 mm/s. Abb. 3.10 zeigt einen typischen Versuchsablauf (Versuch 6).

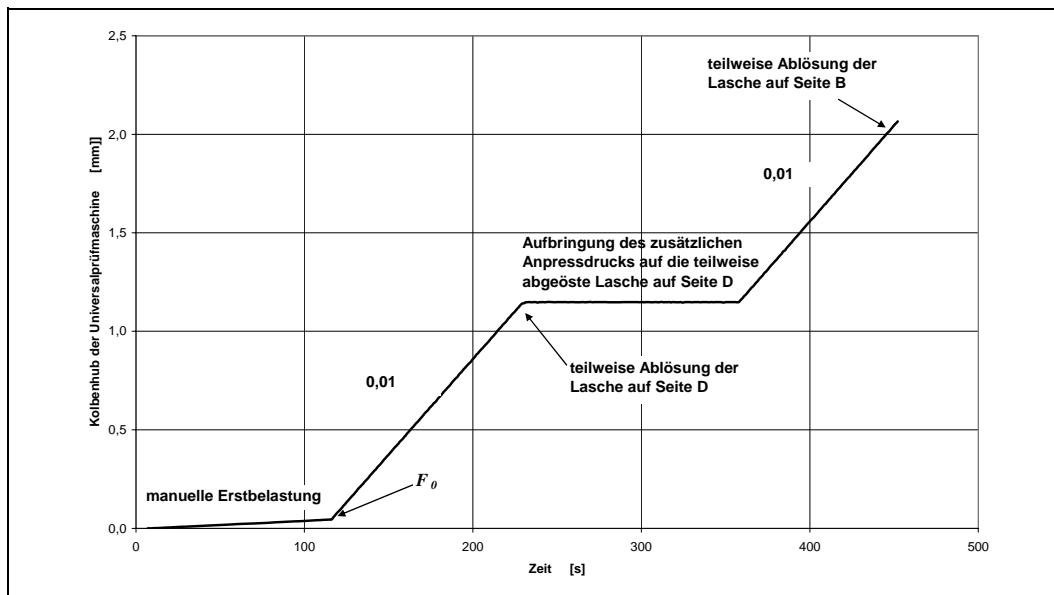


Abb. 3.10: Prinzipieller Versuchsablauf

### 3.5 Versuchsergebnisse

Alle Versuchskörper wurden bis zur zumindest bereichsweisen Ablösung der Stahllaschen belastet. Die sich bei der Ablösung der Laschen ausbildende oberflächenparallele Bruchebene lag in allen Versuchen ausschließlich im oberflächennahen Beton. Die Ausbruchtiefen betragen nur an wenigen Stellen mehr als 1 bis 2 mm. Die Bruchebene verlief teilweise durch die größeren Zuschlagkörner.

Als wesentliches Ergebnis der Verbundversuche sind die im Anhang dargestellten Relativverschiebungs-Zugkraft-Diagramme anzusehen. Diese bilden die Grundlage für die in den folgenden Abschnitten beschriebene rechnerische Auswertung. Ferner können dem Anhang die während der Versuche mit Dehnmessstreifen ermittelten Laschendehnungen in verschiedenen Querschnitten entnommen werden. Die angegebenen Dehnungen stellen für die Versuche 1 und 2 den Mittelwert der an beiden Seitenflächen der Laschen gemessenen Dehnungen dar. Für die Versuche 3 bis 6 entsprechen sie den Laschendehnungen an einer Seitenfläche. Aus diesen Dehnungsmessungen wurden für verschiedene Laststufen die Dehnungsverteilungen über die Verbundlänge bestimmt. Diese können ebenfalls dem Anhang entnommen werden.

In den Versuchen 1, 2 und 6 kam es zur Ausbildung von Querrissen an den Betonkörpern innerhalb des 880 mm langen Verbundbereichs, wodurch nicht in allen Messachsen Relativverschiebungs-Längsdehnungs-Diagramme für die rechnerische Auswertung zur Verfügung stehen, die das Verbundverhalten bis zur Verbundentkopplung, d.h. bis zur Überschreitung der Grenzverschiebung  $s_{L0}$  beschreiben. Jedoch ist in jedem Fall eine rechnerische Auswertung der Kurven für alle Messachsen möglich, die im Falle der Rissbildung nur einen Teil des in Abb. 2.1 dargestellten bilinearen Verbundansatzes repräsentieren. In früheren Studien am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München konnte bereits gezeigt werden, dass auch nicht vollständig bis zur Verbundentkopplung erfasste Relativverschiebungs-Längsdehnungskurven eine Ermittlung aller bestimmenden Parameter des bilinearen Verbundansatzes zulassen, wenn die Relativverschiebung  $s_{L1}$  am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs deutlich überschritten wurde.

### 3.6 Auswertung der Verbundversuche

#### 3.6.1 Prinzipielles Vorgehen

Auf der Grundlage zahlreicher Untersuchungen [16], [18], [19], [20], [21] kann für die Auswertung der Verbundversuche von einem grundsätzlich bekannten Verlauf des Verbundgesetzes in Form eines bilinearen Ansatzes nach Abb. 2.1 ausgegangen werden. Es müssen deshalb durch die Auswertung nur die bestimmenden Parameter dieses Ansatzes für die einzelnen Messachsen festgelegt werden. Dies sind die maximale Verbundspannung  $\tau_{LI}$ , die zugehörige elastische Grenzverformung  $s_{LI}$  sowie der Grenzwert der Relativverschiebung  $s_{LO}$ . 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 Differentialgleichung 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. Dieses am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München etablierte Verfahren wurde mittlerweile auch von anderen Wissenschaftlern für die Auswertung von Verbundversuchen angewendet. Wegen des hohen Rechenaufwandes erfolgt die Auswertung mittels EDV mit einem Fortran-Programm. Abb. 3.11 zeigt den prinzipiellen Ablauf der Auswertung.

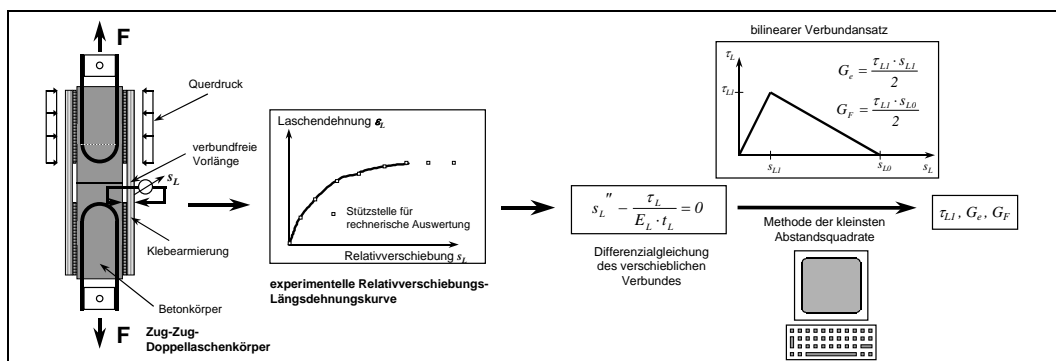


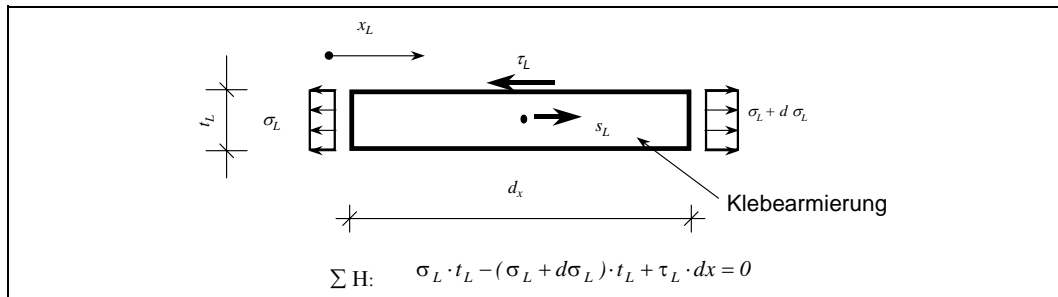
Abb. 3.11: Auswertung der Verbundversuche

#### 3.6.2 Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes

Im Folgenden wird die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes am differentiellen Element abgeleitet. Dabei werden Betonverformungen vernachlässigt. Dies ist für Betrachtungen zum Verbundverhalten vor allem für einbetonierte Bewehrungselemente ein allgemein übliches Vorgehen. Unabhängig vom tatsächlichen Verformungsverhalten werden dabei die auftretenden Relativverschiebungen komplett der Kleberschicht zugewiesen.

Für die Ableitung der Differentialgleichung wird ein differenzielles Element betrachtet. Aus  $\Sigma_H = 0$  folgt:

$$\tau_L = \frac{d\sigma_L}{dx} \cdot t_L \quad (3.1)$$



**Abb. 3.12:** Gleichgewicht am differenziellen Verbundelement

Der Zusammenhang zwischen Spannung und Verschiebung kann für linear elastisches Verformungsverhalten wie folgt angegeben werden:

$$s_L = \int \varepsilon_L \cdot dx + s_L(x=0) \quad (3.2)$$

$$\sigma_L = E_L \cdot \varepsilon_L = E_L \cdot s_L' \quad (3.3)$$

Damit kann die Beziehung zwischen Verbundspannung und Relativverschiebung formuliert werden:

$$\tau_L = \frac{d(E_L \cdot s_L') \cdot t_L}{dx} = E_L \cdot t_L \cdot s_L'' \quad (3.4)$$

bzw.

$$s_L'' - \frac{\tau_L}{E_L \cdot t_L} = 0 \quad (3.5)$$

mit  $\tau_L = f(s_L)$  (3.6)

Die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes unter Vernachlässigung der Betonverformungen lautet somit:

$$s_L'' + c \cdot f(s_L) = 0 \quad (3.7)$$

Diese Differentialgleichung kann nun für den bilinearen Verbundansatz bereichsweise gelöst werden. Die Bestimmungsgleichungen für die Verbundspannung  $\tau_L$  lauten in den einzelnen Bereichen des bilinearen Verbundansatzes (vgl. Abb. 2.1):

$$\tau_L = \frac{s_L}{s_{LI}} \cdot \tau_{LI} \quad (3.8)$$

$$\tau_L = \left( 1 - \frac{s_{LI} - s_L}{s_{LI} - s_{L0}} \right) \cdot \tau_{LI} \quad (3.9)$$

Im linear elastischen Bereich  $I$  liegt eine lineare homogene Differenzialgleichung vor:

$$s_{LI}'' - \omega^2 \cdot s_{LI} = 0 \quad (3.10)$$

mit 
$$\omega^2 = \frac{\tau_{LI}}{s_{LI} \cdot E_L \cdot t_L} \quad (3.11)$$

Mit dem charakteristischen Polynom

$$r^2 - \omega^2 = 0 \quad (3.12)$$

lautet die allgemeine Lösung:

$$s_{LI}(x) = A_I \cdot \sinh(\omega \cdot x) + B_I \cdot \cosh(\omega \cdot x) \quad (3.13)$$

Im plastisch entfestigten Verbundbereich  $II$  liegt eine inhomogene lineare Differenzialgleichung vor:

$$s_{LII}'' + \omega^2 \cdot \lambda^2 \cdot s_{LII} = \omega^2 \cdot \lambda^2 \cdot s_0 \quad (3.14)$$

mit 
$$\lambda^2 = \frac{s_{LI}}{s_{L0} - s_{LI}} \quad (3.15)$$

Die zugehörige homogene lineare Differenzialgleichung lautet:

$$s_{LII}'' + \omega^2 \cdot \lambda^2 \cdot s_{LII} = 0 \quad (3.16)$$

Das charakteristische Polynom

$$r^2 + \omega^2 \cdot \lambda^2 = 0 \quad (3.17)$$

führt zur allgemeinen Lösung dieser homogenen linearen Differenzialgleichung:

$$s_{LII}^*(x) = A_{II} \sin(\omega \cdot \lambda \cdot x) + B_{II} \cos(\omega \cdot \lambda \cdot x) \quad (3.18)$$



Eine spezielle Lösung der inhomogenen linearen Differenzialgleichung wird durch Variation der Konstanten ermittelt:

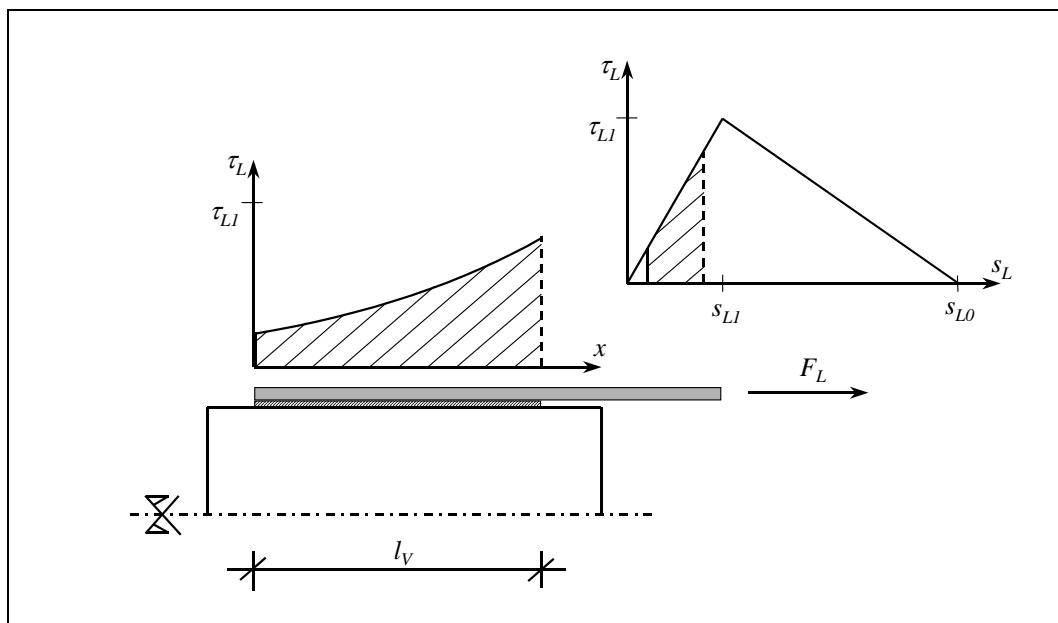
$$s_{LII}^0(x) = s_{L0} \quad (3.19)$$

Die Lösung der inhomogenen linearen Differenzialgleichung für den plastisch entfestigten Verbundbereich lautet also:

$$s_{LII}(x) = A_{II} \sin(\omega \cdot \lambda \cdot x) + B_{II} \cos(\omega \cdot \lambda \cdot x) + s_{L0} \quad (3.20)$$

### 3.6.3 Anpassung an die Randbedingungen der Verbundversuche

Die Rand- und Übergangsbedingungen für die Ermittlung der speziellen Lösung werden entsprechend den Verbundversuchen so gewählt, dass anschließend die Ermittlung der drei Kenngrößen  $G_e$ ,  $G_F$  und  $\tau_{LI}$  des bilinearen Verbundansatzes durch eine Anpassung an die experimentell ermittelten Relativverschiebungs - Dehnungskurven erfolgen kann. Dazu muss für eine bestimmte Kombination der Parameter die Zugkraft  $F_L$  bestimmt werden, die sich in Abhängigkeit von der Relativverschiebung  $s_L$  am lastseitigen Beginn des Verbundbereiches ( $x=l_v$ ) einstellt. Für den Fall rein elastischen Verhaltens im gesamten, beanspruchten Verbundbereich sind die Randbedingungen mit Abb. 3.13 wie folgt zu wählen:



**Abb. 3.13:** Randbedingungen am Doppelaschenkörper bei rein elastischem Verbundverhalten

$$s'_{LI}(x=0) = 0 \quad (3.21)$$

$$s_{LI}(x=l_v) = s_L \quad (3.22)$$

$$s'_{LI}(x=l_v) = \varepsilon_L \quad (3.23)$$

$$\varepsilon_L = \frac{F_L}{E_L \cdot b_L \cdot t_L} \quad (3.24)$$

Aus (3.21) und (3.22) folgt:

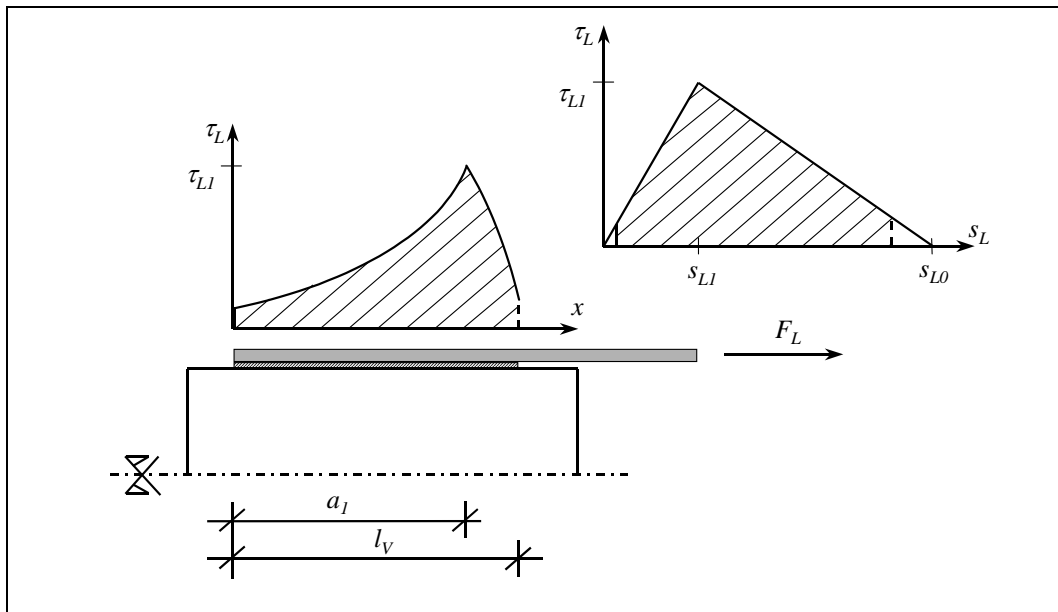
$$A_I = 0 \quad (3.25)$$

$$B_I = \frac{s_L}{\cosh(\omega \cdot l_V)} \quad (3.26)$$

Mit (3.23) und (3.24) kann der Zusammenhang zwischen der Relativverschiebung am lastseitigen Beginn des Verbundbereiches  $s_L$  und der Längsdehnung  $\varepsilon_L$  bzw. der Laschenzugkraft  $F_L$  ausgedrückt werden:

$$\varepsilon_L = s_L \cdot \omega \cdot \tanh(\omega \cdot l_V) \quad (3.27)$$

$$F_L = E_L \cdot t_L \cdot b_L \cdot s_L \cdot \omega \cdot \tanh(\omega \cdot l_V) \quad (3.28)$$



**Abb. 3.14:** Randbedingungen am Doppellaschenkörper nach Überschreitung der maximalen Verbundspannung

Wird die maximale Verbundspannung am lastseitigen Beginn des Verbundbereiches überschritten, so müssen mit dem linear elastischen und dem plastisch entfestigten Abschnitt zwei Bereiche berücksichtigt werden. Neben den Randbedingungen an den Grenzen des gesamten Verbundbereiches können Übergangsbedingungen formuliert werden. Die Rand- und Übergangsbedingungen lauten:

$$s_{LI}'(x=0) = 0 \quad (3.29)$$

$$s_{LI}(x=a_1) = s_{LI} \quad (3.30)$$

$$s_{LI}'(x=a_1) = s_{LII}'(x=a_1) \quad (3.31)$$

$$s_{LII}(x=a_1) = s_{LI} \quad (3.32)$$

$$s_{LII}(x = l_V) = s_L \quad (3.33)$$

$$s'_{LII}(x = l_V) = \varepsilon_L \quad (3.34)$$

$$\varepsilon_L = \frac{F_L}{E_L \cdot b_L \cdot t_L} \quad (3.35)$$

Aus (3.29) und (3.30) folgt:

$$A_I = 0 \quad (3.36)$$

$$B_I = \frac{s_{LI}}{\cosh(\omega \cdot a_I)} \quad (3.37)$$

Damit ist die spezielle Lösung der Differenzialgleichung für den linear elastischen Bereich in Abhängigkeit von  $a_I$  wie folgt darstellbar:

$$s_{LI}(x) = \frac{s_{LI}}{\cosh(\omega \cdot a_I)} \cdot \cosh(\omega \cdot x) \quad (3.38)$$

Aus (3.32) und (3.33) folgt:

$$A_{II} = \frac{(s_{L0} - s_{LI}) \cdot \cos(\omega \cdot \lambda \cdot l_V) - (s_{L0} - s_L) \cdot \cos(\omega \cdot \lambda \cdot a_I)}{\sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - a_I))} \quad (3.39)$$

$$B_{II} = -\frac{(s_{L0} - s_{LI}) \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot l_V) - (s_{L0} - s_L) \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot a_I)}{\sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - a_I))} \quad (3.40)$$

Die spezielle Lösung der Differenzialgleichung im plastisch entfestigten Bereich lautet somit:

$$s_{LII}(x) = \frac{(s_{L0} - s_{LI}) \cdot \cos(\omega \cdot \lambda \cdot l_V) - (s_{L0} - s_L) \cdot \cos(\omega \cdot \lambda \cdot a_I)}{\sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - a_I))} \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot x) - \frac{(s_{L0} - s_{LI}) \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot l_V) - (s_{L0} - s_L) \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot a_I)}{\sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - a_I))} \cdot \cos(\omega \cdot \lambda \cdot x) + s_{L0} \quad (3.41)$$

Diese Gleichung kann durch Ansatz der Additionstheoreme für die trigonometrischen Funktionen weiter vereinfacht werden:

$$s_{LII}(x) = s_{L0} - \frac{(s_{L0} - s_{LI}) \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - x)) + (s_{L0} - s_L) \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot (x - a_I))}{\sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - a_I))} \quad (3.42)$$

In den Gleichungen (3.38) und (3.42) ist noch die unbekannte Länge des elastischen Verbundbereiches  $a_I$  enthalten. Mit (3.31) kann eine Bestimmungsgleichung für  $a_I$  ermittelt werden, die allerdings iterativ zu lösen ist:

$$\tanh(\omega \cdot a_1) = \frac{\lambda}{s_{LI}} \cdot \left[ (s_{LO} - s_{LI}) \cdot \cot(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - a_1)) - \frac{s_{LO} - s_L}{\sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - a_1))} \right] \quad (3.43)$$

Mit bekanntem  $a_1$  kann nun mit (3.34) und (3.35) die Kraft  $F_L$ , bzw. die Dehnung  $\varepsilon_L$  im Punkt  $x = l_V$  bestimmt werden:

$$\varepsilon_L = \omega \cdot \lambda \cdot \frac{s_{LO} - s_{LI} - (s_{LO} - s_L) \cdot \cos(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - a_1))}{\sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - a_1))} \quad (3.44)$$

#### 3.6.4 Bestimmung der Parameter $s_{LI}$ , $s_{LO}$ und $\tau_{LI}$

Die rechnerische Auswertung erfolgt mit dem Ziel, die bestimmenden Parameter des bilinearen Verbundansatzes für jede Messachse zu ermitteln. Dazu wird zunächst auf der Basis der Dehnungsmessungen in der verbundfreien Vorlänge die gemessene Zugkraft anteilig auf die beiden Stahllaschen verteilt. Mit dem tatsächlichen Laschenquerschnitt wird unter Ansatz des Mittelwerts des Elastizitätsmoduls nach Tabelle 3.6 die Längsdehnung  $\varepsilon_L$  ermittelt und in Abhängigkeit von der Relativverschiebung aufgetragen. Für die Bestimmung der Parameter werden die in den Messachsen ermittelten Relativverschiebungs-Längsdehnungs-Kurven entweder bis zur einsetzenden Ablösung der Klebarmierung am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs oder bis zum schlagartigen Gesamtausfall der Klebarmierung ermittelten Laschendehnungen und die zugehörigen Relativverschiebungen betrachtet. Die Relativverschiebungen wurden am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs der Stahllaschen gemessen.

Hinsichtlich der Auswertung sind je nach Versuchsverlauf verschiedene experimentell ermittelte Ausgangskurven zu unterscheiden. In den meisten Messachsen wurde während des Versuches eine bis zur einsetzenden Laschenentkoppelung stetige Relativverschiebungs-Längsdehnungs-Kurve aufgezeichnet. In diesem Fall liegt der rechnerischen Auswertung die komplette, experimentell ermittelte Kurve zugrunde, die von der Verschiebung bei einsetzender Verbundentkoppelung bis zu einer Verschiebung von 0.5 mm durch fiktive Stützpunkte ergänzt wird.

Abb. 3.15 zeigt als Beispiel die Seite B des Versuchskörpers 6 ermittelte Relativverschiebungs-Zugkraft-Kurve sowie die Stützstellen für die rechnerische Anpassung der Parameter. In diesem Fall wurde am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs die Relativverschiebung  $s_{LO}$  und damit vollständige Verbundentkopplung erreicht. Dies zeigt sich in einem näherungsweise horizontalen Verlauf der Relativverschiebungs-Längsdehnungskurve. Zur Ausbildung des Querrisses kam es an diesem Körper erst nach einsetzender Verbundentkopplung auf beiden Seiten des Prüfkörpers.

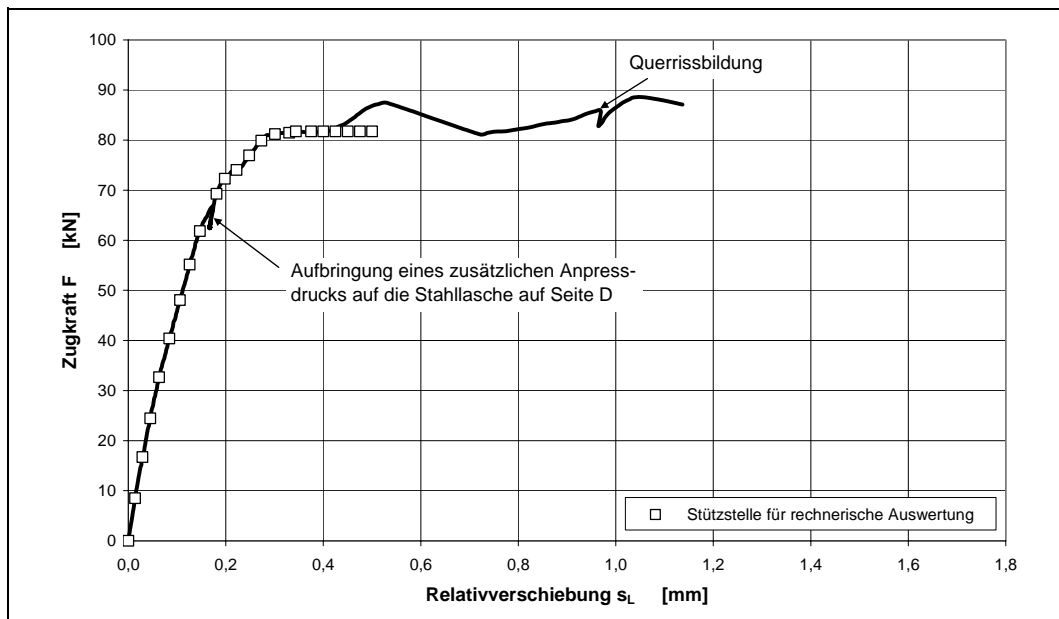


Abb. 3.15: Relativverschiebungs-Zugkraft-Diagramm für Seite B des Versuchskörpers 6

An Versuchskörper 2 hingegen kam es kurz nach der Querrissbildung, noch vor dem Erreichen der Grenzverschiebung  $s_{L0}$  zur Ablösung der Stahlflasche. Für die rechnerische Auswertung wurden in diesem Fall nur die bis zur Querrissbildung aufgezeichneten Messwerte berücksichtigt.

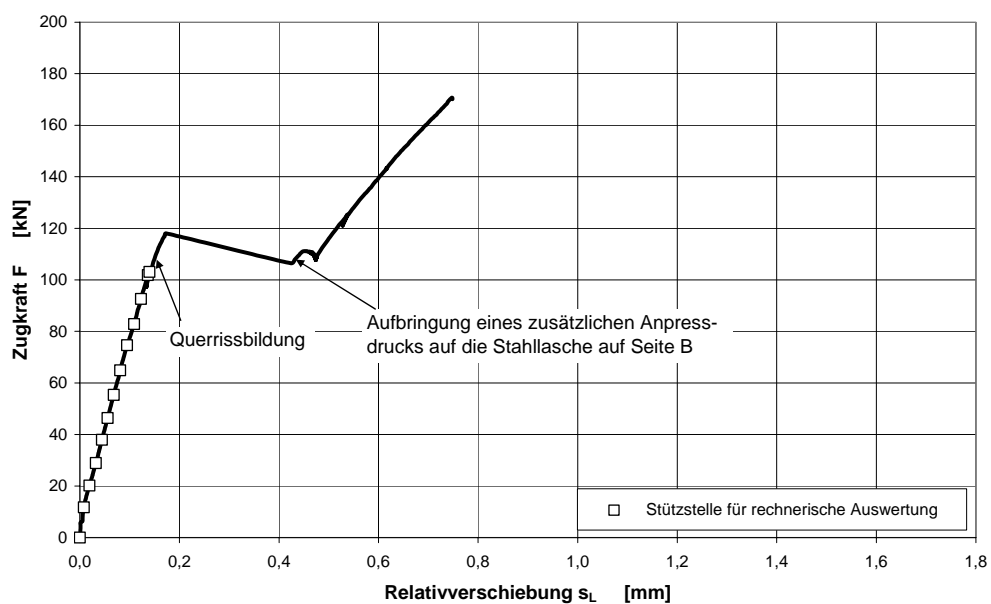
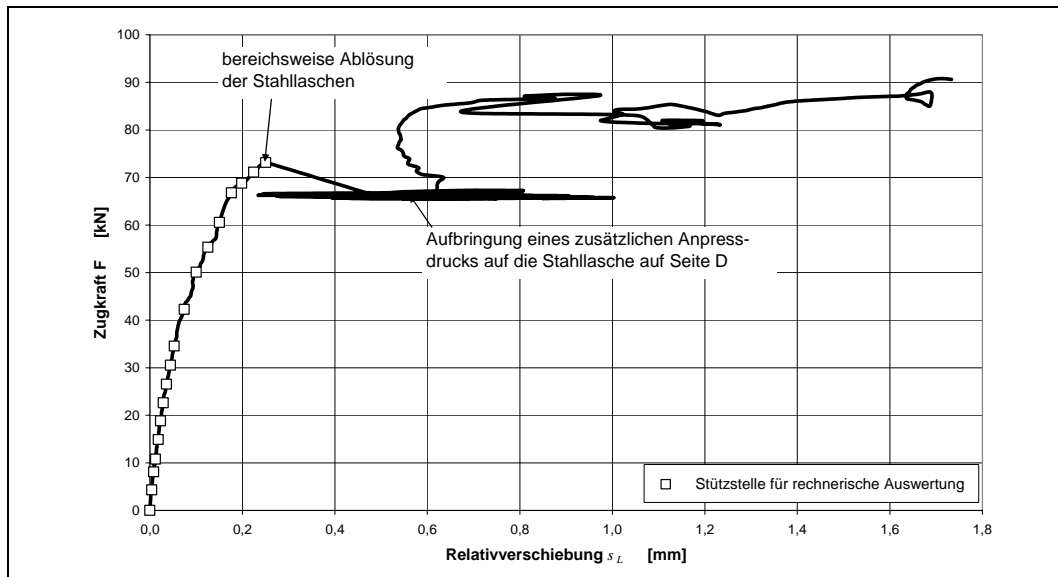


Abb. 3.16: Relativverschiebungs-Zugkraft-Diagramm für Seite B, Achse I des Versuchskörpers 2

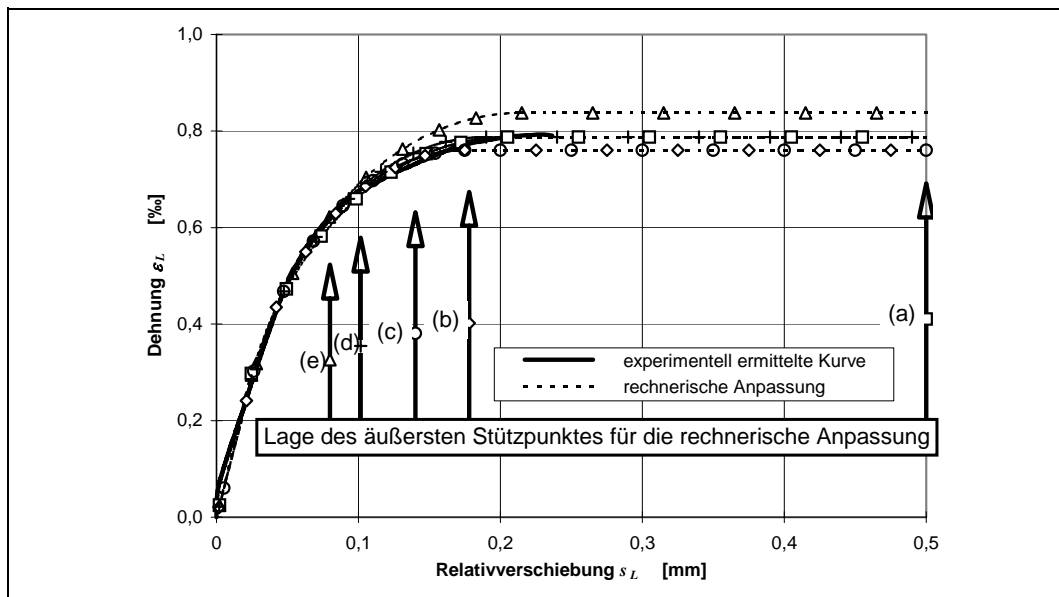
Bei Versuchskörper 5 kam es ohne eine induzierende Querrissbildung auf beiden Seiten zu einer schlagartigen bereichsweisen Ablösung der Stahlflaschen bevor die Grenzverschiebung  $s_{L0}$  dort erreicht wurde. Dieser Effekt wurde auch in früheren Untersuchungen beobachtet und äußert sich in einem unstetigen Verlauf der Relativverschiebungs-Längsdehnungs-Kurve. Die Ursache einer derartigen vorzeitigen Ablösung liegt vermutlich in der Steuerung des Versuchs. Da die Belastung nicht in Abhängigkeit von der Relativverschiebung am lastseitigen Beginn des Verbundbereichs

sondern in Abhängigkeit vom Kolbenhub der Prüfmaschine aufgebracht wurde, kann es aus Verträglichkeitsbedingungen zur schlagartigen Ablösung von Verbundbereichen kommen, wenn infolge der Streuungen der Betoneigenschaften Bereiche geringerer Tragfähigkeit und/oder Steifigkeit aktiviert werden und die Lamellendehnung in der verbundfreien Vorlänge sinkt. Für die Auswertung wurde nur der stetig verlaufende Teil der experimentellen Verschiebungs-Dehnungs-Kurven angesetzt.



**Abb. 3.17:** Relativverschiebungs-Zugkraft-Diagramm für Seite B des Versuchskörpers 5

Hinsichtlich der Auswertung von unvollständig, also nicht bis zum Erreichen der Grenzverschiebung  $s_{L0}$ , vorliegenden Kurven, besteht die folgende Problematik. Für die Ermittlung der in diesen Messachsen aufnehmbaren Verbundbruchenergie muss auf der Grundlage der vorliegenden Kurve extrapoliert werden, die Überprüfung der ermittelten rechnerischen Anpassung kann nur im experimentellen Bereich erfolgen. Die Qualität der Anpassung ist in diesem Fall von den gewählten Schrittweiten bei der Parametervariation, der Anzahl und Lage der Stützstellen sowie der Größe des experimentell abgedeckten Bereiches abhängig. Dass eine zufrieden stellende Anpassung auch für unvollständige Kurven erfolgen kann, konnte bereits in früheren Studien [19] gezeigt werden, auf die die folgende Abb. 3.18 zurückgeht.



**Abb. 3.18:** Rechnerische Anpassung nicht vollständig erfasster Relativverschiebungs-Längsdehnungs-Kurven

Die Eingangswerte und die Ergebnisse der rechnerischen Auswertung sind in der folgenden Tabelle 3.9 zusammengestellt. Abb. 3.19 zeigt beispielhaft die rechnerische Anpassung an die experimentell ermittelte Relativverschiebungs-Längsdehnungskurve. Abweichend von Abb. 3.15 ist auf der Ordinate die auf Grundlage der Dehnungsmessung in der verbundfreien Vorlänge anteilig aus der Gesamtzugkraft ermittelte Laschenzugkraft  $F_L$  aufgetragen. Den Vergleich der rechnerisch mit den in Tabelle 3.9 aufgeführten Parametern des bilinearen Verbundansatzes bestimmten Relativverschiebungs-Längsdehnungskurven mit den experimentell ermittelten Kurven zeigen die Abb. A 42 bis A 47 im Anhang.

**Tabelle 3.9:** Eingangswerte und Ergebnisse der rechnerischen Auswertung

Versuchs- körper	Seite	Achse	$\beta_{OZ}$	$\beta_W$	$G_g$	$t_g$	$E_L$	$t_L$	$b_L$	$l_V$	$b_C$	$s_{L0}$	$s_{L1}$	$t_{L1}$	$G_F$	$G_e$								
				Rückprall																				
1	B	I	3,0	2,35	46,06	3609	206117	5,01	50,07	880	200	0,33	0,040	6,00	0,990	0,120								
	B	II																						
	D	I	2,7									44,2	1	3,609						0,21	0,050	5,00	0,525	0,125
	D	II																						
2	B	I	2,7									0,40	0,100	6,00	1,200	0,300								
	B	II	2,1									0,40	0,070	6,50	1,300	0,228								
	D	I	2,3	47,1	5	0,722						0,25	0,060	5,50	0,688	0,165								
	D	II	2,3									0,33	0,040	4,50	0,743	0,090								
3	B		2,1									24,2		7,00	1,015	0,245								
	D			47,1	1	3,609						24,62		8,50	1,190	0,213								
4	B		1,8									24,62		5,00	0,950	0,100								
	D		2,8	44,6								24,74		3,25	0,715	0,049								
5	B		2,3									24,2		9,00	1,755	0,090								
	D			44,9	5	0,722						24,5		3,50	0,875	0,140								
6	B											24,8		5,00	0,825	0,225								
	D			49,2								24,7		8,50	1,233	0,213								

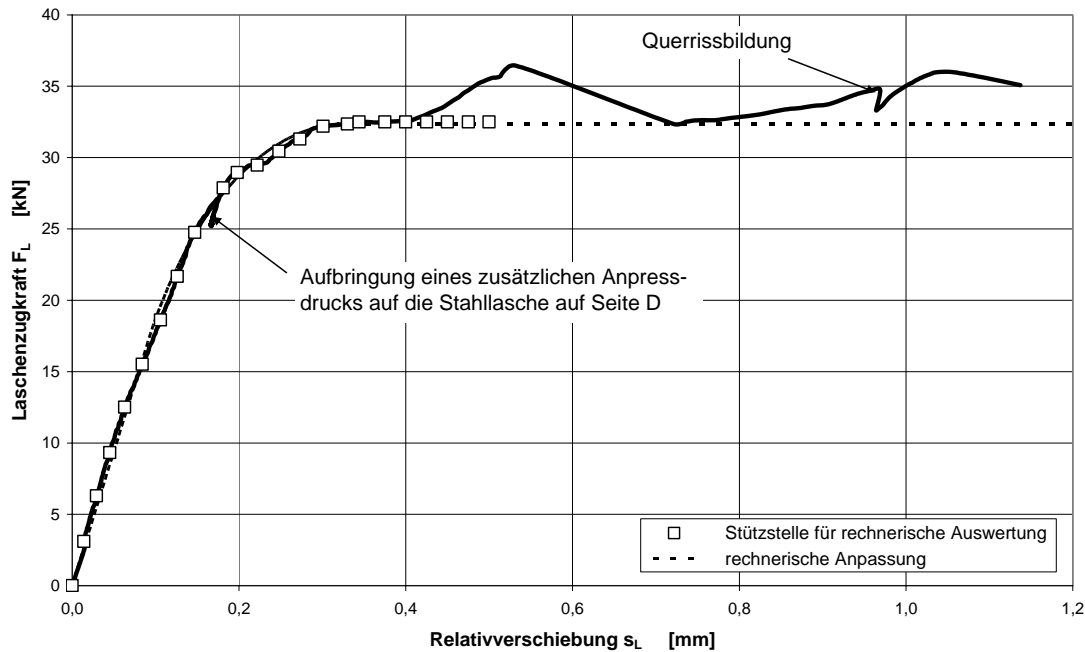


Abb. 3.19: Relativverschiebungs-Zugkraft-Diagramm für Seite B des Versuchskörpers 6

### 3.6.5 Überprüfung der lokalen Gültigkeit der abgeleiteten Verbundgesetze

Eine weitere Problematik bei dem hier gewählten Vorgehen liegt in der lokalen Erfassung der Verschiebung und Dehnung am Beginn des Verbundbereiches und der angenommenen Gültigkeit des so ermittelten Verbundgesetzes für den gesamten, durch Verbundspannungen beanspruchten Bereich. Diese Annahme wurde anhand der in den Verbundversuchen vorgenommenen Messung diskreter Laschenspannungen im Verbundbereich überprüft. Dazu wurden die an der Seitenfläche der Laschen gemessene Längsdehnung über dem Abstand vom lastseitigen Beginn des Verbundbereiches aufgetragen. Mit Hilfe der bereichsweise gültigen Lösungen der Differenzialgleichung des verschieblichen Verbundes kann mit den für die jeweilige Messachse ermittelten Parametern  $s_{L0}$ ,  $s_{L1}$  und  $\tau_{L1}$  die rechnerische Laschendehnung in den Punkten  $x = x_i$  ermittelt werden, in welchen die Dehnmessstreifen angeordnet waren. Der Ursprung der Laufkoordinate  $x$  liegt dabei am spannungslosen Laschenende.

Für Relativverschiebungen  $s_L \geq s_{L1}$  am lastseitigen Beginn der Verbundlänge ist die Länge des elastischen Verbundbereiches  $a_1$  mit Gleichung (3.43) zu bestimmen. Je nachdem, ob die betrachtete Stelle  $x$  im elastischen oder im plastisch entfestigten Verbundbereich liegt, kann die Laschendehnung mit (3.46) bzw. (3.47) ermittelt werden. Die Lage von  $x_i$  kann mit Gleichung (3.45), die sich durch Umformen der Gleichung (3.43) ergibt, überprüft werden. Für  $s_L \leq s_{L,grenz}$  liegt  $x_i$  im elastischen Verbundbereich.

$$s_{L,grenz} = s_{L0} + \left[ \tanh(\omega \cdot x_i) \cdot \frac{s_{L1}}{\lambda} - (s_{L0} - s_{L1}) \cdot \cot(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - x_i)) \right] \cdot \sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - x_i)) \quad (3.45)$$

für  $s_L \leq s_{L,grenz}$ :



$$\varepsilon_L = \frac{\omega \cdot s_L}{\cosh(\omega \cdot a_1)} \cdot \sinh(\omega \cdot x_i) \quad (3.46)$$

für  $s_L > s_{L,grenz}$ :

$$\varepsilon_L = \omega \cdot \lambda \cdot \frac{(s_{L0} - s_{L1}) \cdot \cos(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - x_i)) - (s_{L0} - s_L) \cos(\omega \cdot \lambda \cdot (x_i - a_1))}{\sin(\omega \cdot \lambda \cdot (l_V - a_1))} \quad (3.47)$$

Die folgende Abb. 3.20 zeigt eine Gegenüberstellung der experimentell und rechnerisch ermittelten Laschendehnung in den DMS-Messstellen auf Seite B des Versuchskörpers 1 für die Grenzlaststufe, die der rechnerischen Untersuchung zugrunde liegt. Neben der aus den gemessenen Dehnungen bestimmten Kurve ist eine zweite Kurve mit der Bezeichnung „gemessene, korrigierte Laschendehnung“ angegeben. Diese zeigt die mit dem Faktor  $k_F$  multiplizierten DMS-Messwerte. Der Faktor  $k_F$  beschreibt das Verhältnis der auf den Versuchskörper wirkenden Gesamtzugkraft  $F$  und der Summe der aus den Laschendehnungen  $\varepsilon_{LB}$  und  $\varepsilon_{LD}$  in der verbundfreien Vorlänge  $l_f$  unter Ansatz der tatsächlichen Laschensteifigkeiten errechneten Laschenzugkräfte  $F_{LB}$  und  $F_{LD}$ .

$$k_F = \frac{F}{F_{LB} + F_{LD}} \quad (3.48)$$

mit  $F_{LB} = \varepsilon_{LB} \cdot E_L \cdot t_L \cdot b_L \quad (3.49)$

$$F_{LD} = \varepsilon_{LD} \cdot E_L \cdot t_L \cdot b_L \quad (3.50)$$

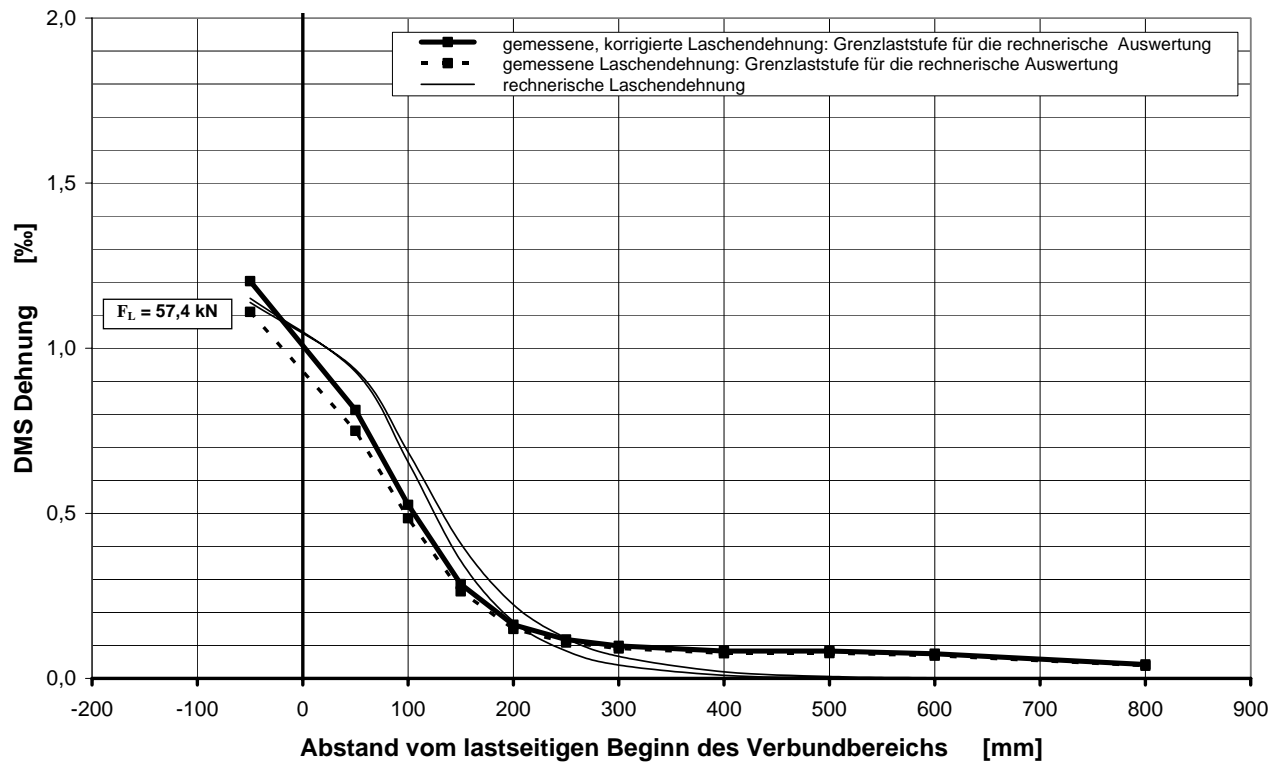
$\varepsilon_{LB}$  bzw.  $\varepsilon_{LD}$  auf den Seiten B bzw. D in der verbundfreien Vorlänge experimentell ermittelte Laschendehnung

$E_L$  Mittelwert des Elastizitätsmoduls der Stahllaschen nach Tabelle 3.6

$t_L, b_L$  Abmessungen der Stahllaschen nach Tabelle 3.7

Es ist eine gute Übereinstimmung der experimentellen und rechnerischen Dehnungen, insbesondere im linear elastischen Bereich zu erkennen. Die Überprüfung der lokalen Gültigkeit anhand weiterer Versuchsergebnisse kann den Abb. A 31 bis A 41 im Anhang entnommen werden.

Insgesamt ist festzustellen, dass der gewählte bilineare Verbundansatz durch die diskrete Messung von Laschendehnungen im Verbundbereich bestätigt wird. Mit der gewählten Form der Auswertung, die bei bekannter Form des Verbundgesetzes nur die Relativverschiebung am Beginn des Verklebung und die Laschendehnung in der freien Länge berücksichtigt, ist eine Beschreibung des Verbundverhaltens im gesamten Verbundbereich möglich. Von einer lokalen Gültigkeit des ermittelten Verbundgesetzes an jeder Stelle des Verbundbereiches kann in guter Näherung ausgegangen werden.

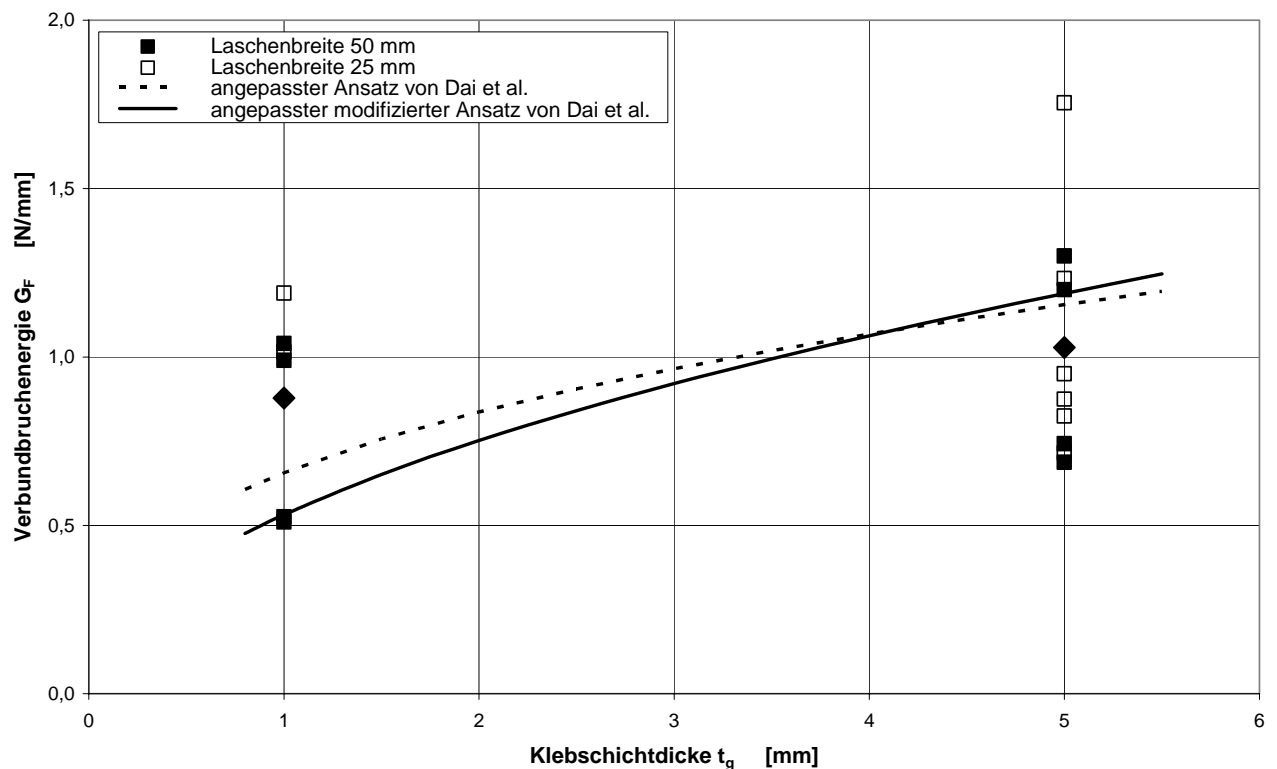


**Abb. 3.20** Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 1, Seite B

## 4 Interpretation der Versuchsergebnisse

### 4.1 Aktuelle Untersuchungen

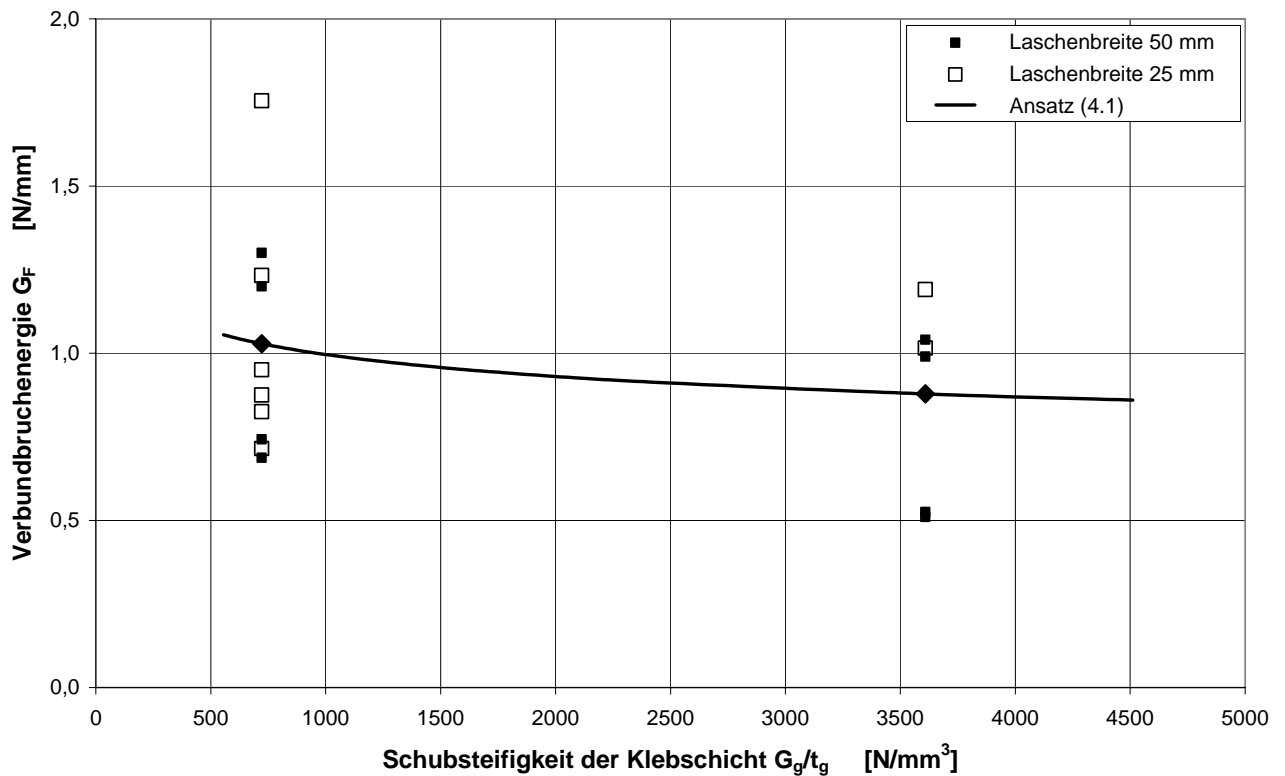
Wegen der bekannten, größeren Abweichungen der experimentell in verschiedenen Versuchsreihen ermittelten Verbundtragfähigkeit war für die hier beschriebenen Untersuchungen vorgesehen, neben einer größeren Klebschichtdicke von 5 mm auch Referenzversuche mit der Klebschichtdicke von 1 mm durchzuführen, obgleich bereits zahlreiche Verbundversuche mit dieser nach den einschlägigen Zulassungsbescheiden minimal zulässigen Klebschichtdicke vorlagen. Die folgende Abb. 4.1 zeigt den Vergleich der für die beiden Klebschichtdicken festgestellten Verbundbruchenergien  $G_F$ .



**Abb. 4.1** Einfluss der Klebschichtdicke auf die Verbundbruchenergie in den Verbundversuchen an Zug-Zug-Doppellaschenkörpern mit 5 mm dicken Stahllaschen

Ein systematischer Einfluss der Laschenbreite ist nicht erkennbar, so dass sich die Versuche hinsichtlich der weiteren Auswertung nur durch die Klebschichtdicke bzw. die daraus resultierende Schubsteifigkeit unterscheiden. In Abb. 4.1 sind auch der Ansatz von Dai et al. sowie der modifizierte Ansatz von Dai et al. nach Abs. 1 eingetragen. Dazu wurde jeweils der Exponent der Schubsteifigkeit in den Ansätzen beibehalten und der Linearfaktor so verändert, dass eine optimale Anpassung an die Mittelwerte der Versuchsreihen mit den beiden untersuchten Klebschichtdicken erfolgte. Der Schubmodul in Höhe von  $3.609 \text{ N/mm}^2$  wurde unter Ansatz einer Querdehnzahl  $\nu$  von 0,38 aus dem mittleren Elastizitätsmodul nach Abb. 3.7 ermittelt. Die durchgeführten Versuche mit Stahllaschen zeigen eine geringere Abhängigkeit der Verbundbruchenergie von der Schubsteifigkeit bzw. der Klebschichtdicke als durch die Ansätze von Dai et al. beschrieben. Abb. 4.2 zeigt die Abhängigkeit der Verbundbruchenergie von der Schubsteifigkeit der Klebschicht sowie den Verlauf des folgenden Ansatzes, der die Korrelation zwischen den beiden Größen beschreibt.

$$G_F = 1,9589 \cdot \left( \frac{G_g}{t_g} \right)^{-0,09792} \quad (4.1)$$

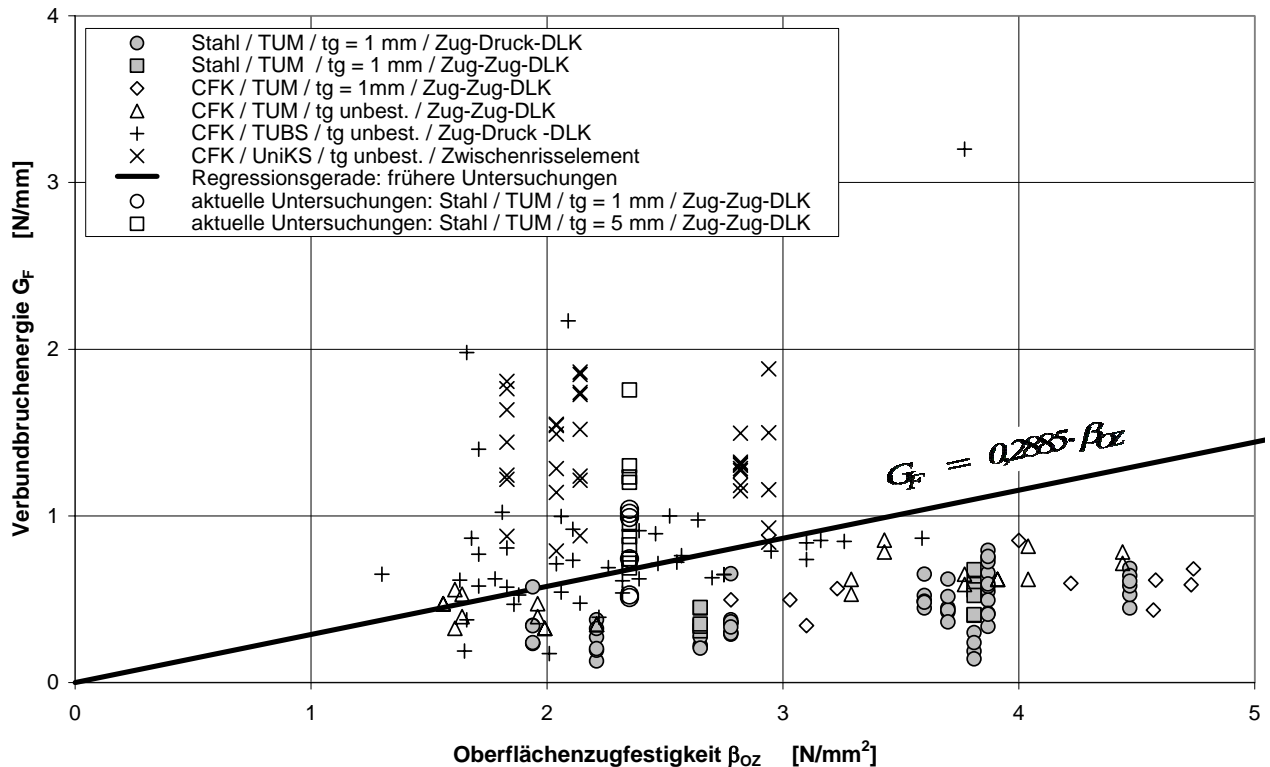


**Abb. 4.2** Einfluss der Schubsteifigkeit der Klebschicht auf die Verbundbruchenergie in den Verbundversuchen an Zug-Zug-Doppellaschenkörpern mit 5 mm dicken Stahllaschen

Für die hier beschriebenen Versuche kann also festgestellt werden, dass nur ein geringer Einfluss der Schubsteifigkeit bzw. der Klebschichtdicke auf die Verbundbruchenergie zu verzeichnen war. Somit können die aus früheren Untersuchungen bekannten Abweichungen zwischen den einzelnen Versuchsreihen durch die abweichenden Klebschichtdicken alleine nicht erklärt werden. Es sind andere, zusätzlich auftretende Einflüsse zu vermuten.

## 4.2 Vergleich mit anderen Untersuchungen

Die hier beschriebenen aktuellen Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Klebschichtdicke auf die Verbundbruchenergie zeichnen sich für die beiden untersuchten Klebschichtdicken durch eine ungewöhnlich hohe Verbundbruchenergie  $G_F$  aus. Dies zeigt der Vergleich dieser Versuche mit den in Abb. 2.8 dargestellten Ergebnissen früherer Untersuchungen. Die in den aktuellen Versuchen festgestellten Verbundbruchenergien liegen deutlich über der Regressionsgeraden im Bereich der Ergebnisse, die mit CFK-Lamellen erreicht worden waren.



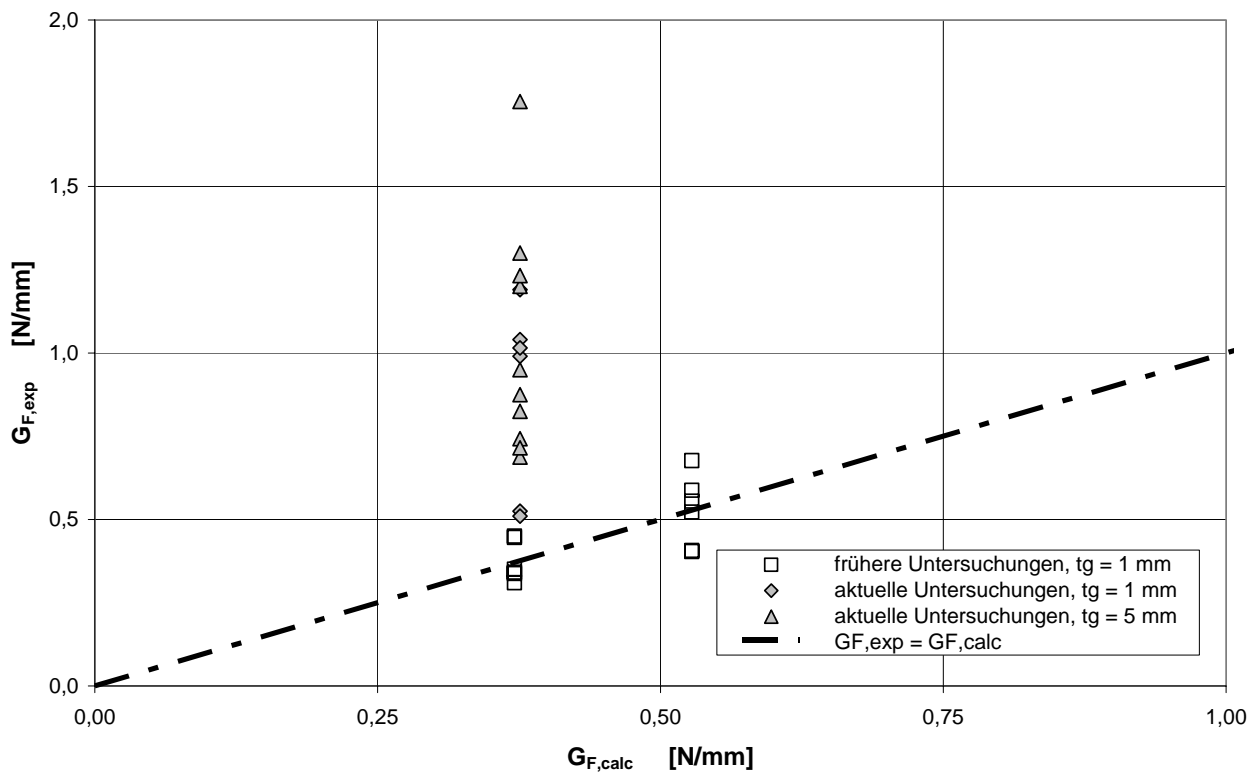
**Abb. 4.3** Vergleich der aktuellen Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Klebschichtdicke mit anderen Untersuchungen zur Verbundtragfähigkeit oberflächlich aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen

Die folgende Abb. 4.4 zeigt einen Vergleich der aktuellen Versuche mit früheren, ebenfalls an Technischen Universität München durchgeführten Verbundversuche an Zug-Zug-Doppellaschenkörpern mit oberflächlich aufgeklebten, 5 mm dicken Stahllaschen. Es handelt sich also um bestens vergleichbare Versuchsreihen. In umfangreichen Studien wurden an der Technischen Universität München Abhängigkeiten zwischen der Zug- und Druckfestigkeit oberflächennaher Betonschichten und der Verbundbruchenergie gemäß (4.2) festgestellt [19], [30]. Da sich die Betonfestigkeiten beider Versuchsreihen unterscheiden, werden die ermittelten Verbundbruchenergien auf der Grundlage dieses Ausdrucks normiert. Die Würfeldruckfestigkeit  $\beta_W$  wurde in beiden Versuchsreihen zerstörungsfrei mit dem Rückprallhammer nach E. Schmidt gemäß DIN 1048 Teil 2 [12] bestimmt.

$$G_F = c_F \cdot \sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}} \quad (4.2)$$

Der Faktor  $c_F$  wird auf der Grundlage der früheren Untersuchungen in einer Regressionsanalyse in Höhe von 0,03613 festgelegt. Für die aktuellen Untersuchungen wird ein beinahe doppelt so hoher Vorfaktor  $c_F$  von 0,06774 bei deutlich größeren Streuungen ermittelt.

Der Vergleich der aktuellen Untersuchungen mit früheren Versuchsreihen zeigt, dass neben den bereits bekannten Einflussgrößen weitere Parameter existieren müssen, die die Verbundbruchenergie nicht unerheblich beeinflussen.

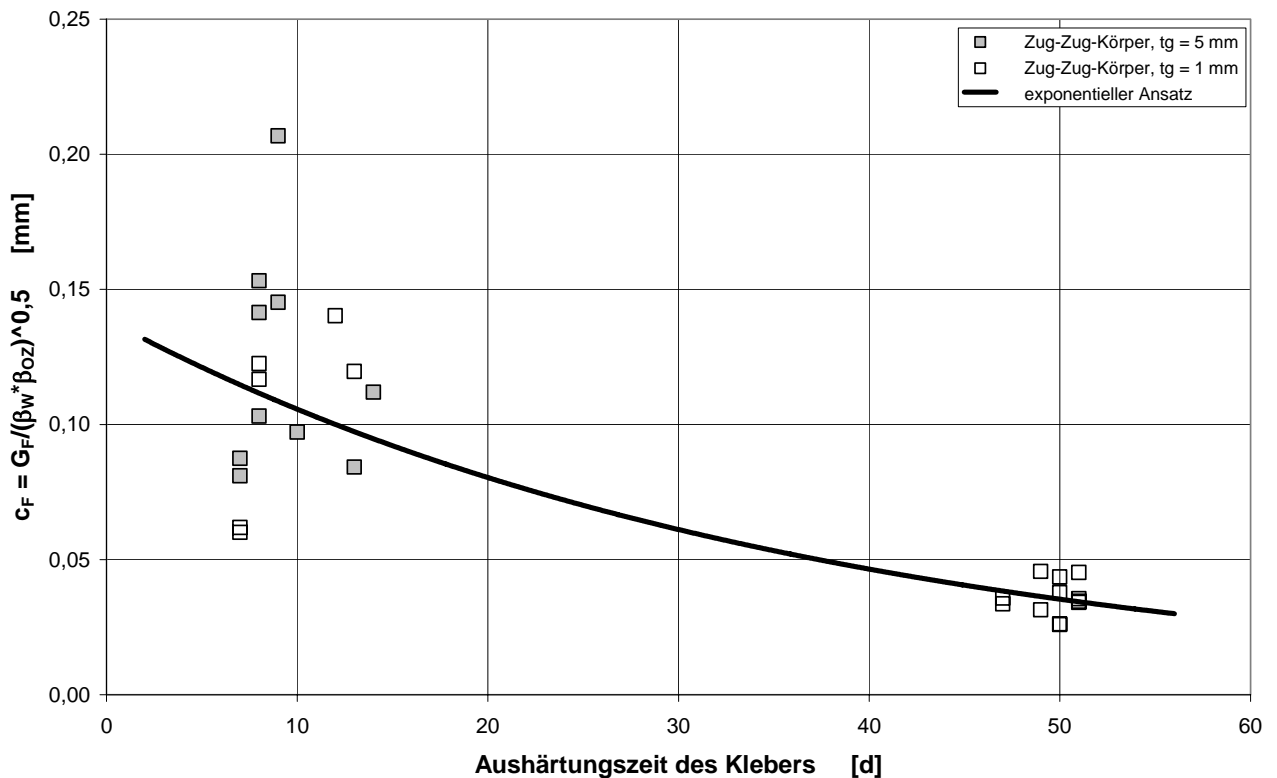


**Abb. 4.4** Vergleich der aktuellen Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Klebschichtdicke mit früheren Verbundversuchen an Zug-Zug-Doppelaschenkörpern mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen

Neben der Klebschicht wurde in den bislang durchgeführten Versuchsreihen auch der Aushärtungsdauer der Klebschicht vom Zeitpunkt der Laschenapplikation bis zur Durchführung des Verbundversuchs keine Bedeutung beigemessen. Dies wurde damit begründet, dass die bauaufsichtlich zugelassenen Epoxydharzkleber bereits nach wenigen Stunden Aushärtungszeit Zug- und Druckfestigkeiten erreichen, die deutlich über den Festigkeiten der oberflächennahen Betonschichten liegen und die Bruchebenen bei korrekter Ausführung stets im Betonuntergrund lagen oder zumindest von dort ausgingen. Für einige der an der Technischen Universität München durchgeführte Verbundversuche liegen jedoch Angaben über die Aushärtungsdauer der Klebschicht vor. Die in den Verbundversuchen beobachteten Verbundbruchenergien  $G_F$  wurden in den nachfolgenden Abbildungen in Abhängigkeit von der Aushärtungsdauer aufgetragen. Hinsichtlich der Vergleichbarkeit werden die abweichenden Betonfestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen durch eine Normierung der experimentellen Verbundbruchenergien berücksichtigt und der Vorfaktor  $c_F$ , der der bezogenen Verbundbruchenergie entspricht angegeben. Dabei wird für Betonwürfeldruckfestigkeit der mit dem Rückprallhammer nach E. Schmidt gemäß DIN 1048 Teil 2 [12] am Versuchskörper bestimmte Wert angesetzt.

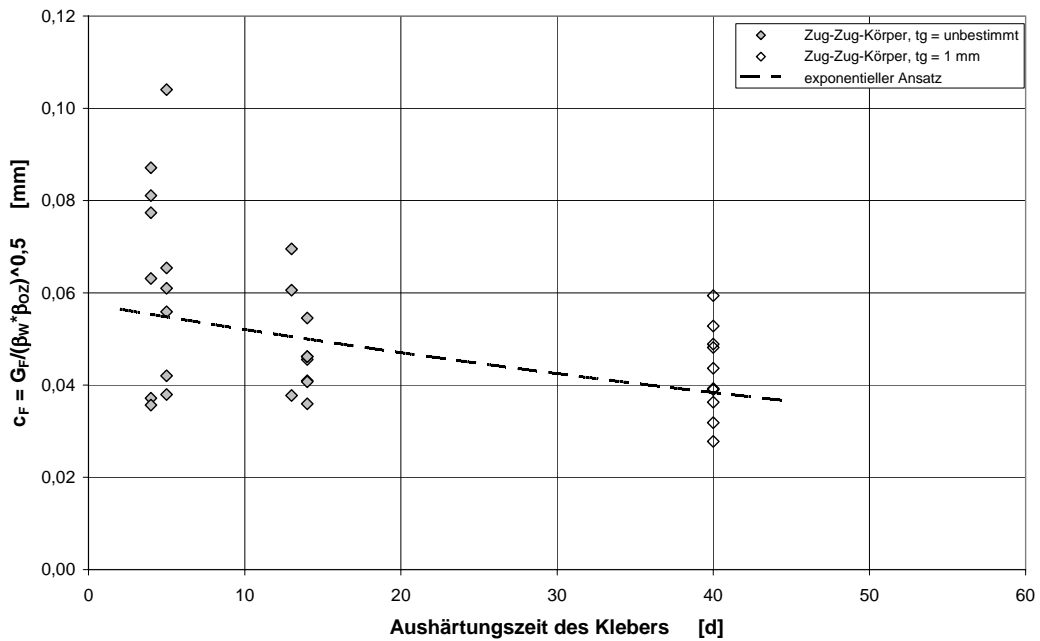
$$c_F = \frac{G_F}{\sqrt{\beta_W \cdot \beta_{OZ}}} \quad (4.3)$$

Zunächst werden unter Einbeziehung der aktuellen Untersuchungen Verbundversuche an Zug-Zug-Doppellaschenkörpern mit aufgeklebten Stahlaschen betrachtet, die an der Technischen Universität München durchgeführt wurden [19]. Für diese Versuche liegen alle für die folgende Darstellung relevanten Daten vor. Abb. 4.5 zeigt einen deutlichen Einfluss der Aushärtungszeit, der den oben beschriebenen Effekt der Klebschichtdicke deutlich überlagert.



**Abb. 4.5** Einfluss der Aushärtungsdauer der Klebschicht auf die Verbundbruchenergie in Versuchen an Zug-Zug-Doppellaschenkörpern mit oberflächlich aufgeklebten Stahlaschen

Auch die Versuche an Zug-Zug-Doppellaschenkörpern mit aufgeklebten CFK-Lamellen, die an der Technischen Universität München durchgeführt wurden, zeigt in Abb. 4.6 einen ähnlichen, wenn auch nicht so ausgeprägten Effekt der Aushärtungsdauer auf die Verbundbruchenergie. Allerdings ist zu diesen Untersuchungen anzumerken, dass die exakte Aushärtungsdauer der Verbundversuche an Zug-Zug-Doppellaschenkörpern mit einer definierten Klebschichtdicke von 1 mm nicht bekannt ist. Es steht nur fest, dass die Aushärtungsdauer mehr als 40 Tage betrug [27], [31].



**Abb. 4.6** Einfluss der Aushärtungsdauer der Klebschicht auf die Verbundbruchenergie in Versuchen an Zug-Zug-Doppelaschenkörpern mit oberflächlich aufgeklebten CFK-Lamellen

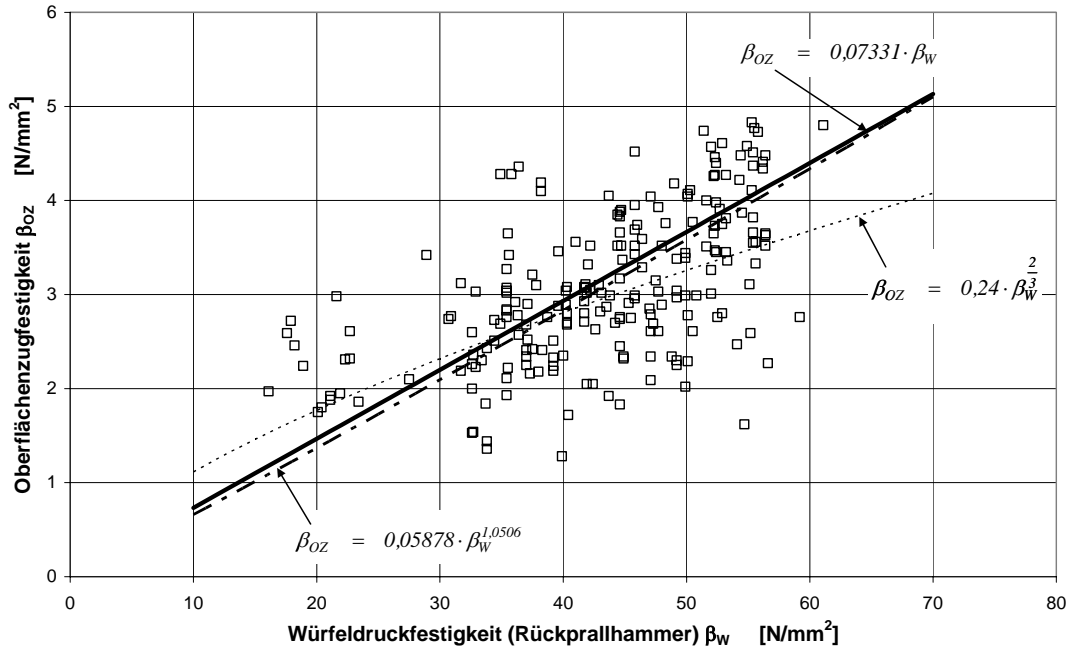
Auch die Druckfestigkeit der oberflächennahen Betonschichten wurde in den Verbundversuchen an Zug-Zug-Doppelaschenkörpern mit unbestimmter Klebschichtdicke [23] nicht mit dem Rückprallhammer nach E. Schmidt gemäß DIN 1048 Teil 2 [12] ermittelt. Diese wurde rechnerisch aus der an der Bauteiloberfläche ermittelten Oberflächenzugfestigkeit bestimmt. Dabei wurde nicht auf die folgende bekannte Relation von Heilmann [15], sondern auf spezielle Untersuchungsergebnisse zur Korrelation der Betonzug- und -druckfestigkeit an der Bauteiloberfläche zurückgegriffen.

$$\beta_Z = 0,24 \cdot \beta_W^{\frac{2}{3}} \quad (4.4)$$

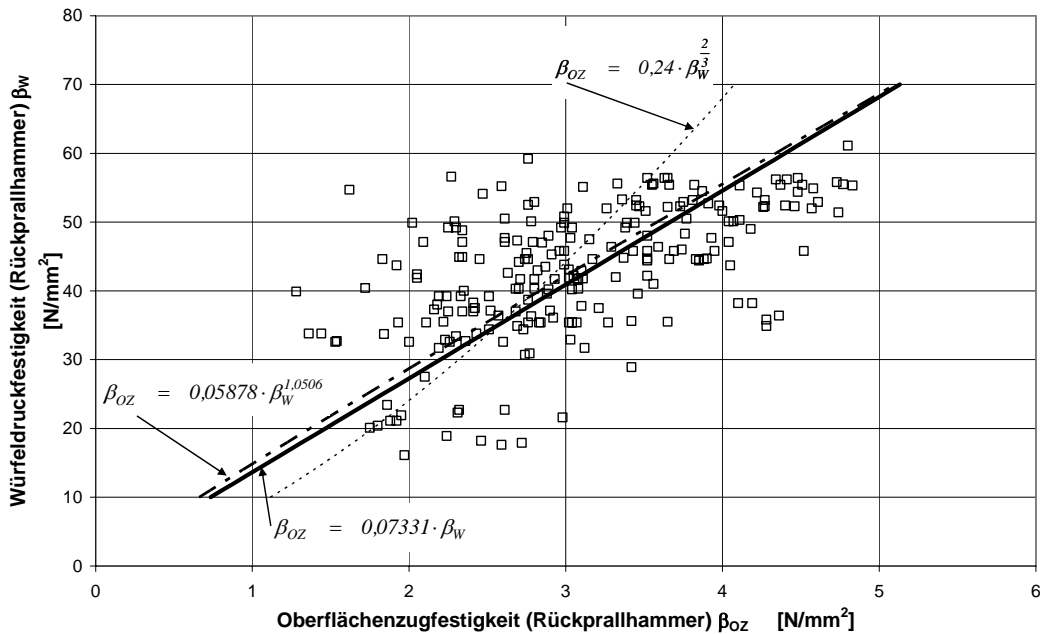
Wie die in Abb. 4.7 und Abb. 4.8 dargestellten Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen an der Technischen Universität München zeigen, ist der Ansatz von Heilmann nicht geeignet, den Zusammenhang zwischen beiden Größen zu beschreiben. Der folgende, auf Grundlage dieser Versuche abgeleitete Ansatz ist besser geeignet, den Zusammenhang zwischen der der Oberflächenzugfestigkeit und der Würfeldruckfestigkeit, geprüft mit dem Rückprallhammer nach E. Schmidt gemäß DIN 1048 Teil 2, und umgekehrt zu beschreiben. Er wurde deshalb für die rechnerische Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit der oberflächennahen Betonschichten verwendet.

$$\beta_W = 14,8422 \cdot \beta_{OZ}^{0,9518} \quad (4.5)$$





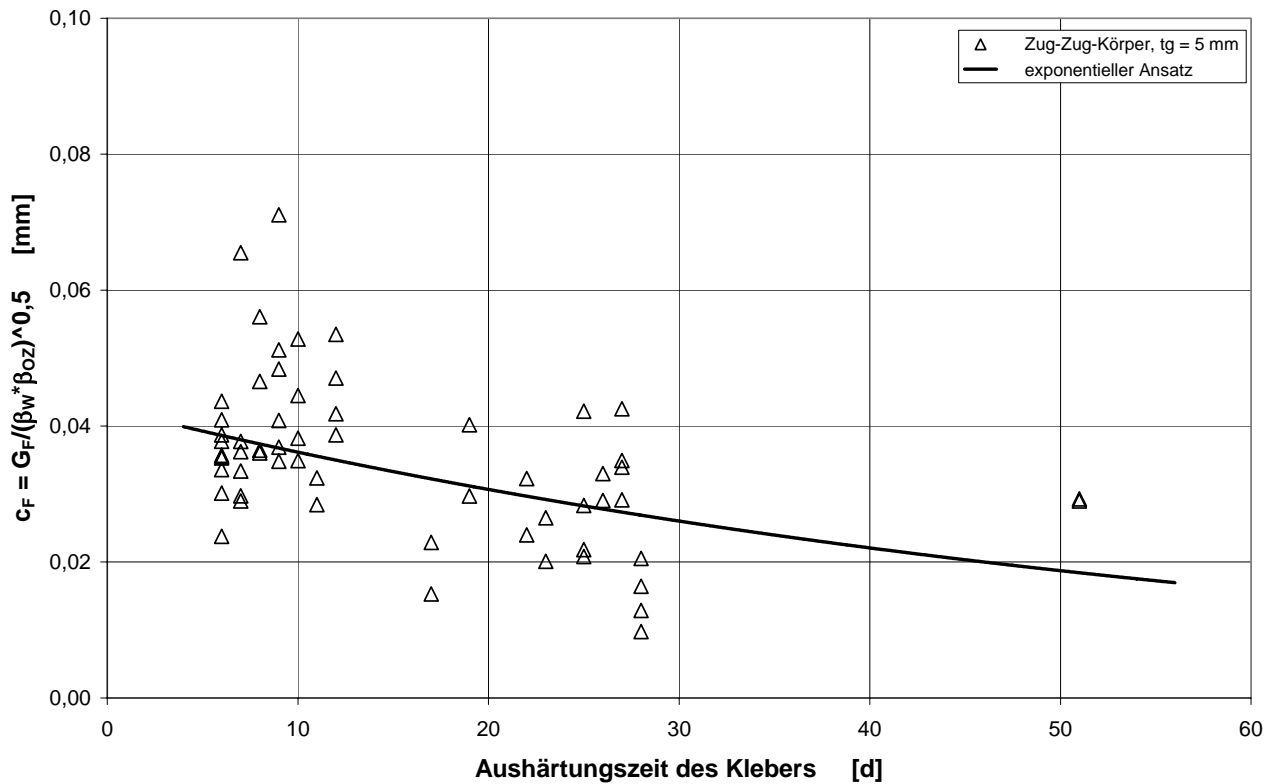
**Abb. 4.7** Zusammenhang zwischen der Oberflächenzugfestigkeit und der Würfeldruckfestigkeit, geprüft mit dem Rückprallhammer nach E. Schmidt gemäß DIN 1048 Teil 2



**Abb. 4.8** Zusammenhang zwischen der Würfeldruckfestigkeit, geprüft mit dem Rückprallhammer nach E. Schmidt gemäß DIN 1048 Teil 2, und der Oberflächenzugfestigkeit

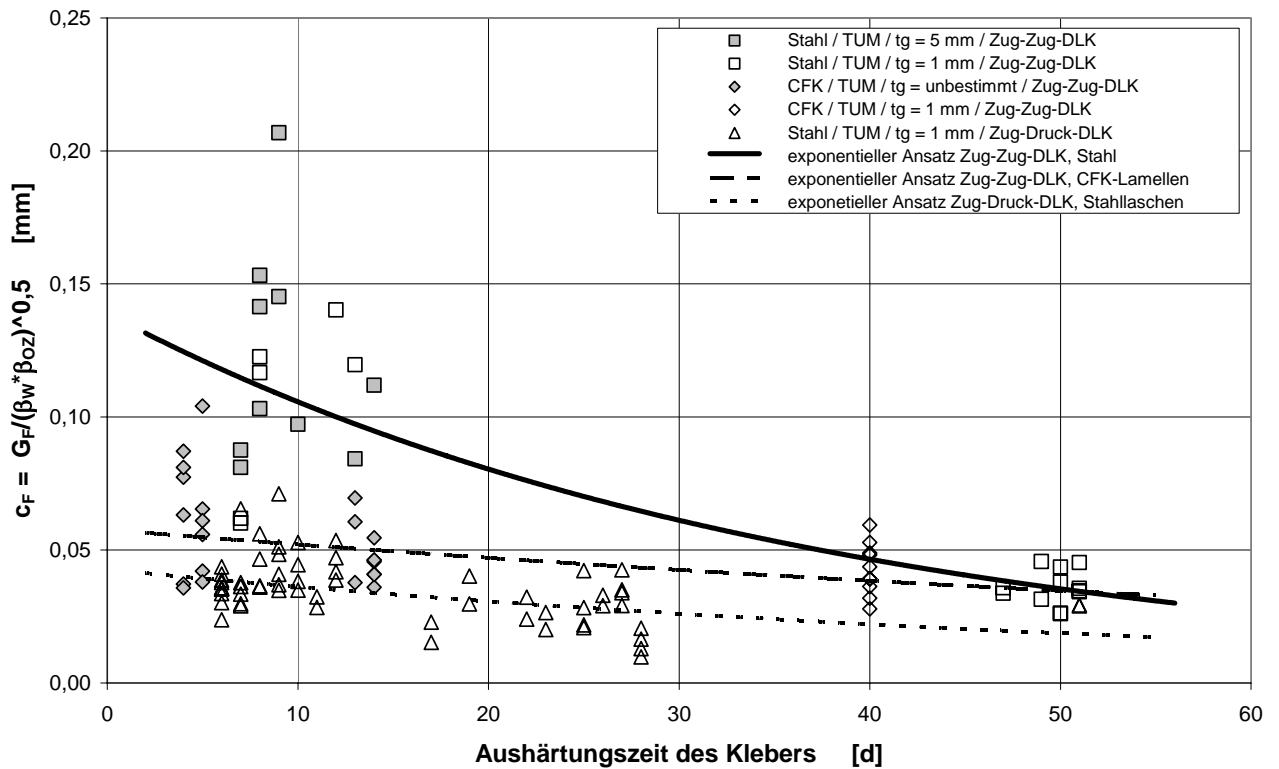
Auch Verbundversuche an Zug-Druck-Doppellaschenkörpern mit aufgeklebten Stahllaschen und definiert eingestellter Klebschichtdicke, die an der Technischen Universität München durchgeführt worden waren [19], können zur Beurteilung des Zusammenhangs zwischen Aushärtungsdauer und Verbundbruchenergie herangezogen werden. Auch für diese Versuche liegen alle für die folgende Darstellung relevanten Daten vor.

## 4 Interpretation der Versuchsergebnisse



**Abb. 4.9** Einfluss der Aushärtungsdauer der Klebschicht auf die Verbundbruchenergie in Versuchen an Zug-Druck-Doppellaschenkörpern mit oberflächlich aufgeklebten Stahllaschen

Abb. 4.10 zeigt nochmals die in den verschiedenen Versuchsreihen erkennbaren Abhängigkeiten der Verbundbruchenergie von der Aushärtungsdauer der Klebschicht in einem Diagramm. Ein Einfluss der Aushärtungsdauer ist deutlich erkennbar.



**Abb. 4.10** Einfluss der Aushärtungsdauer der Klebschicht auf die Verbundbruchenergie in verschiedenen Versuchsreihen

### 4.3 Zusätzliche Untersuchungen zum zeitabhängigen Verformungsverhalten des verwendeten Epoxydharzklebers

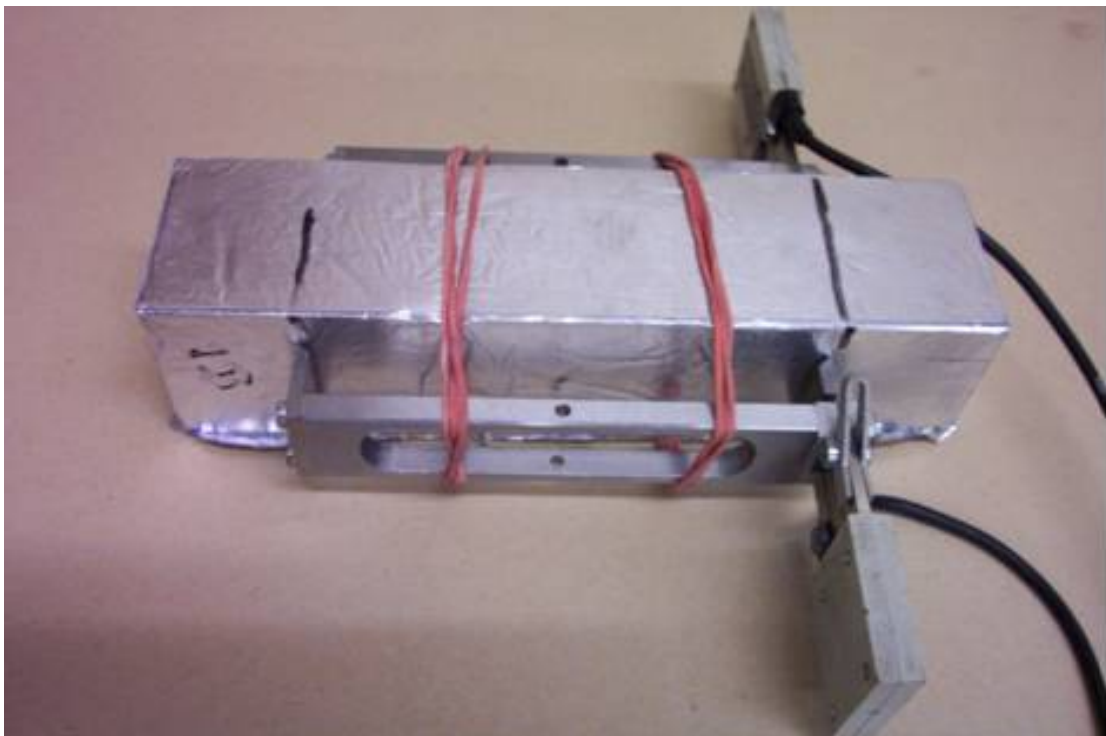
Das den derzeit bauaufsichtlich zugelassenen Klebern zugrunde liegende Epoxydharz auf Basis von Bisphenol A zeichnet sich durch ein ausgeprägtes zeitabhängiges Verformungsverhalten in Form von Schwind- und Kriechvorgängen aus. Trotz eines relativ hohen Füllgrades mit anorganischen Füllstoffen, geben die Hersteller ein Schwindmaß von 4 bis 4,5 % an.

Die Gesamtvolumenschwindung bei Epoxydharzen setzt sich üblicherweise aus der Reaktionsschwindung durch die Vernetzung und thermische Volumeneffekte infolge von Aufheizung und Abkühlung zusammen. Jedoch ist auch der Effekt der Lösungsmittelschwindung bekannt. Im Gegensatz zur Reaktionsschwindung in Verbindung mit den thermischen Effekten, die im Wesentlichen innerhalb kurzer Zeiträume nach Herstellung des der Klebermischung aus den beiden Komponenten abläuft, kann das Lösungsmittelschwinden je nach Diffusionswiderstand und Verhältnis von Klebervolumen zu freier Oberfläche über längere Zeiträume hinweg stattfinden. Die zugelassenen Epoxydharzkleber werden zwar als lösungsmittelfrei bezeichnet, jedoch kann den Sicherheitsdatenblättern der Epoxydharzkleber (z.B. [25]) entnommen werden, dass die Komponenten bis zu 2,5 % Lösungsmittelnaphtha oder Alkohol enthalten.

Bezüglich der zeitabhängigen Verformungen infolge einer Beanspruchung ist bekannt, dass auch die hoch verfüllten Epoxydharzkleber eine ausgeprägte Kriechneigung aufweisen. Kriechen und

Schwinden laufen unter Umständen zeitgleich ab und kompensieren sich gegenseitig zu einem gewissen Teil in ihrer Wirkung. Hinsichtlich der Kriechverformungen ist bekannt, dass diese mit frühzeitigem Belastungsbeginn, der Belastungshöhe und unter höheren Temperaturen deutlich zunehmen.

Hinsichtlich einer ersten Beurteilung der Problematik der Zeitabhängigkeit der Verbundtragfähigkeit wurden mit Eigenmitteln des Lehrstuhls für Massivbau der Technischen Universität München Tastversuche zum Schwindverhalten des für die Verbundversuche verwendeten Epoxydharzklebers Sikadur 30 durchgeführt. Wegen der besonderen Zielsetzung wurden diese nicht gemäß der einschlägigen Prüfnorm EN 12617-1 [14] durchgeführt. Zur Abschätzung des Anteils des unter Umständen verzögert ablaufenden Lösungsmittelschwindens am Gesamtschwind wurde vielmehr das zeitabhängige Verformungsverhalten 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. 4.11 zeigt einen derartigen Prüfkörper mit applizierten Dehnungsmessern.

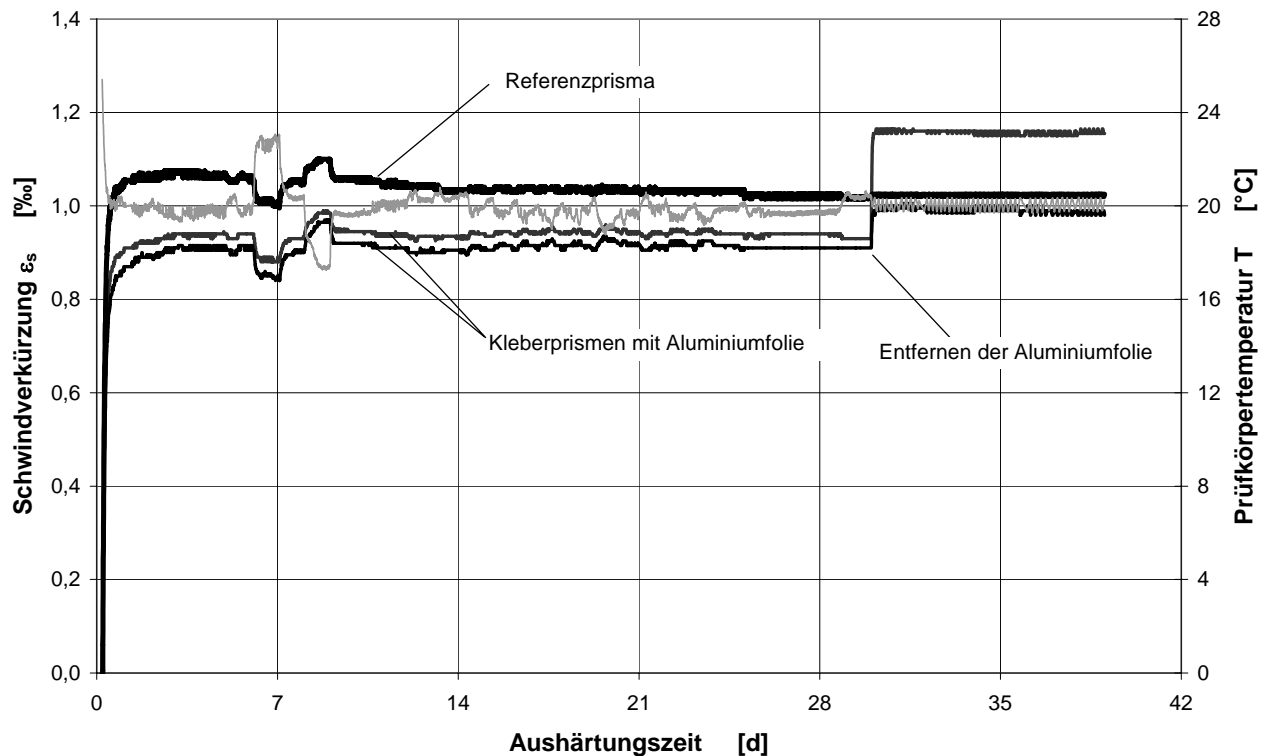


**Abb. 4.11** Epoxydharzkleberprisma mit Aluminiumfolie und applizierten Dehnungsmessern

Während der ersten 29 Tage des Untersuchungszeitraums blieben die beiden Prismen mit Aluminiumfolie in ihrem Schwindverhalten 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. 4.12 zeigt das Schwindverhalten der Prismen während der gesamten Versuchsdauer.

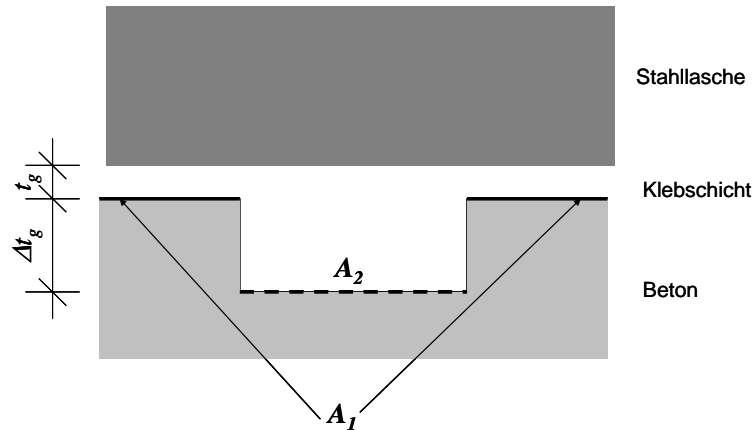


**Abb. 4.12** Ergebnisse der Schwindversuche

Hinsichtlich des Schwindverhaltens können folgende Ergebnisse festgehalten werden. Das in den Versuchen an Prismen beobachtete Schwindmaß liegt deutlich über der Herstellerangabe [26]. Ein nicht unerheblicher Teil (relativ mindestens 20 %) des Schwindens ab einsetzender Aushärtung ist auf Lösungsmittelschwinden zurückzuführen.

Die Bedeutung des Schwindens und insbesondere der Lösungsmittelschwindens, das aufgrund der speziellen Verhältnisse bei Klebschichten unter Stahlaschen und CFK-Lamellen unter Umständen zeitverzögert abläuft und somit nicht in gleichem Maß durch Kriechvorgänge kompensiert werden kann, wie das Reaktionsschwinden infolge der Vernetzung soll durch die folgenden Überlegungen beurteilt werden.

Durch das Sandstrahlen und andere ähnliche Verfahren entsteht eine raue Oberfläche, die lokale Unebenheiten aufweist. Abb. 4.13 zeigt idealisiert die lokalen Verhältnisse.



**Abb. 4.13** Idealisierte Verhältnisse im Bereich lokaler Unebenheiten der Betonoberfläche

Für linear elastisches Verhalten der Klebschicht kann die folgende Gleichung formuliert werden, die aus Verträglichkeitsgründen gelten muss, wenn näherungsweise angenommen wird, dass sich Beton und Stahllasche starr verhalten.

$$\left( \frac{F}{A_1 \cdot E_g} + \varepsilon_{gs} \right) \cdot t_g = \left( \frac{-F}{A_2 \cdot E_g} + \varepsilon_{gs} \right) \cdot (t_g + \Delta t_g) \quad (4.6)$$

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

Aufgelöst nach der lokal wirkenden Normalkraft erhält man folgenden Ausdruck:

$$F = \frac{\Delta t_g}{\frac{t_g}{A_1 \cdot E_g} + \frac{t_g + \Delta t_g}{A_2 \cdot E_g}} \cdot \varepsilon_{gs} \quad (4.7)$$

Mit einem Verhältnis der beanspruchten Teilflächen  $A_1/A_2 = 1$  ergeben sich für die baupraktisch plausible Klebschichtdicke  $t_g = 1$  mm und die lokale Unebenheit  $\Delta t_g = 3$  mm die folgenden lokal wirkenden Spannungen  $\sigma$ .

Für das experimentell beobachtete Gesamtschwindmaß  $\varepsilon_{gs} = 1,2 \text{ ‰}$ :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{A} = \frac{\Delta t_g}{2 \cdot t_g + \Delta t_g} \cdot \varepsilon_{gs} \cdot E_g = \frac{3}{2 \cdot 1 + 3} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10.000 = \\ &= 7,2 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}\quad (4.3)$$

Für das experimentell beobachtete Lösungsmittelschwinden  $\varepsilon_{gs} = \varepsilon_{gs,solv} = 0,25 \text{ ‰}$ :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{A} = \frac{\Delta t_g}{2 \cdot t_g + \Delta t_g} \cdot \varepsilon_{gs} \cdot E_g = \frac{3}{2 \cdot 1 + 3} \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 10.000 = \\ &= 1,5 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}\quad (4.4)$$

Die in diesem Beispiel lokal auftretenden, senkrecht zur Betonoberfläche wirkenden Spannungen bewegen sich somit in der Größenordnung der Betonoberflächenzugfestigkeit. Ein teil dieser derzeit nicht exakt quantifizierbaren Spannung wird sicher durch Kriechverformungen kompensiert. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass insbesondere das unter Umständen verzögert auftretende Lösungsmittelschwinden zu lokalen Schädigungen in den Grenzflächen zwischen Epoxydharzkleber und Betonoberfläche führt, wodurch die Verbundtragfähigkeit beeinträchtigt wird.

Für eine minimale Klebschichtdicke von 5 mm ergeben sich bei sonst unveränderten Parametern die folgenden lokalen Zugbeanspruchungen senkrecht zur Betonoberfläche:

Für das experimentell beobachtete Gesamtschwindmaß  $\varepsilon_{gs} = 1,2 \text{ ‰}$ :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{A} = \frac{\Delta t_g}{2 \cdot t_g + \Delta t_g} \cdot \varepsilon_{gs} \cdot E_g = \frac{3}{2 \cdot 5 + 3} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10.000 = \\ &= 2,8 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}\quad (4.8)$$

Für das experimentell beobachtete Lösungsmittelschwinden  $\varepsilon_{gs} = \varepsilon_{gs,solv} = 0,25 \text{ ‰}$ :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{A} = \frac{\Delta t_g}{2 \cdot t_g + \Delta t_g} \cdot \varepsilon_{gs} \cdot E_g = \frac{3}{2 \cdot 1 + 3} \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 10.000 = \\ &= 0,58 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}\quad (4.9)$$

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass größere Klebschichtdicken günstig auf die Verbundtragfähigkeit wirken, sollte das Schwindverhalten der Epoxydharzkleber – wie die hier beschriebenen Versuchsergebnisse vermuten lassen – von Bedeutung sein. Hierzu sind jedoch weitere gezielte Untersuchungen erforderlich.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen eines durch das Deutsche Institut für Bautechnik geförderten Forschungsvorhabens wurden die Ergebnisse von Verbundversuchen mit aufgeklebten Stahllaschen rechnerisch ausgewertet, die sich durch eine gezielte Einstellung der Klebschichtdicke auszeichneten. Frühere durchgeführte Versuchsreihen hatten deutliche Abweichungen gezeigt, die vermuten ließen, dass neben den bereits bekannten Parametern weitere Einflussgrößen, darunter die Dicke der Epoxydharzklebschicht, das Verbundtragverhalten oberflächlich aufgeklebter Stahllaschen und CFK-Lamellen beeinflussen.

Die rechnerische Auswertung der Verbundversuche ergab keinen signifikanten Unterschied der Verbundtragfähigkeit für die geprüften Klebschichtdicken von 1 mm und 5 mm. Jedoch wurden in den durchgeführten Versuchen für beide Klebschichtdicken außergewöhnlich hohe Verbundtragfähigkeiten erreicht, die deutlich über den Ergebnissen früherer Versuchsreihen liegen. Die zwischen den Ergebnissen früherer Versuchsreihen festgestellten Abweichungen können durch unterschiedlich dicke Klebschichten alleine nicht erklärt werden.

Durch den Vergleich der Randbedingungen verschiedener Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass die Verbundtragfähigkeit mit zunehmender Aushärtungsdauer der Klebschicht abnimmt. In zusätzlich durchgeführten Versuchen wurde deshalb das zeitabhängige Verformungsverhalten ohne Beanspruchung durch äußere Lasten untersucht. Neben einem hohen Gesamtschwindmaß wurde eine Schwindverformung infolge der Lösungsmittelausdunstung festgestellt, die im Falle der Klebschichten unter Stahllaschen und CFK-Lamellen unter Umständen zeitverzögert abläuft und zu einer Verminderung der Verbundtragfähigkeit führen kann. Zu dieser Problematik sollten weitere gezielte Untersuchungen erfolgen.



## 6 Literatur

- [1] *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
- [2] *Deutsches Institut für Bautechnik*: Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstofffaserverstärkten Kunststofflamellen (CFK-Lamellen) – Fassung September 1998
- [3] *Deutsches Institut für Bautechnik*: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-4: Schubfeste Klebeverbindung zwischen Stahlplatten und Stahlbetonbauteilen oder Spannbetonbauteilen vom 12.08.2004
- [4] *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
- [5] *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
- [6] *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
- [7] *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
- [8] *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
- [9] *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
- [10] *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
- [11] *Deutsches Institut für Bautechnik*: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-65: S&P CFK-Lamellen vom 29.07.2003
- [12] *Deutsches Institut für Normung*: DIN 1048-2: Prüfverfahren für Beton; Teil 2: Festbeton in Bauwerken und Bauteilen, Ausgabe Juni 1991; Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [13] *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

- [14] **Deutsches Institut für Normung:** DIN EN 12617-1 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung des linearen Schrumpfens von Polymeren und Oberflächenschutzsystemen (OS) Deutsche Fassung EN 12617-1:2003; Ausgabe November 2003; Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [15] **Heilmann, H.:** Beziehungen zwischen Zug- und Druckfestigkeiten des Betons; beton 2-69; S. 68 – 70; 1969
- [16] **Holzenkämpfer, P.:** Ingenieurmodelle des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile; Dissertation, TU Braunschweig; 1994
- [17] **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
- [18] **Neubauer, U.:** Verbundtragverhalten geklebter Lamellen aus Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoff zur Verstärkung von Betonbauteilen; Dissertation, TU Braunschweig; 2000
- [19] **Niedermeier, R.:** Zugkraftdeckung bei klebarmierten Bauteilen; Dissertation, Technische Universität München; 2001
- [20] **Ranisch, E.-H.:** Zur Tragfähigkeit von Verklebungen zwischen Baustahl und Beton – Geklebte Bewehrung; Dissertation, TU Braunschweig; 1982
- [21] **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)
- [22] **Schilde, K.:** Untersuchungen zum Verbund zwischen Beton und nachträglich aufgeklebten Kohlefaserlamellen am Zwischenrisselement; Dissertation, Universität Kassel 2005, Schriftenreihe Bauwerkserhaltung und Holzbau; Heft 1
- [23] **Schwindl, K.:** Zum Tragverhalten einer mechanischen Endverankerung für CFK-Klebebewehrung; Diplomarbeit, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 1999 (unveröffentlicht)
- [24] **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
- [25] **Sika Deutschland GmbH:** Sikadur 30 Kleber Normal Komp. A: Sicherheitsdatenblatt gemäss 91/155/EWG und ISO 11014-1, Druckdatum: 15.02.2006
- [26] **Sika Deutschland GmbH:** Sikadur-30 2-Komponenten-Klebemörtel: Technisches Merkblatt Ausgabe 05.06 TM Kennziffer 7210
- [27] **Swoboda, P.:** Vergleichende Untersuchungen zum Verbundverhalten von auf Betonoberflächen verklebten Stahllaschen und CFK-Lamellen; D Diplomarbeit, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 1999 (unveröffentlicht)
- [28] **Täljsten, B.:** Plate Bonding; Thesis, Lulea University of Technology, Sweden; 1994
- [29] **Ulaga, T.:** Betonbauteile mit Stab- und Lamellenbewehrung: Verbund- und Zuggliedmodellierung; Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2003
- [30] **Zehetmaier, G.:** Zusammenwirken einbetonierter Bewehrung mit Klebarmierung bei verstärkten Betonbauteilen; Dissertation, Technische Universität München, 2006
- [31] **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

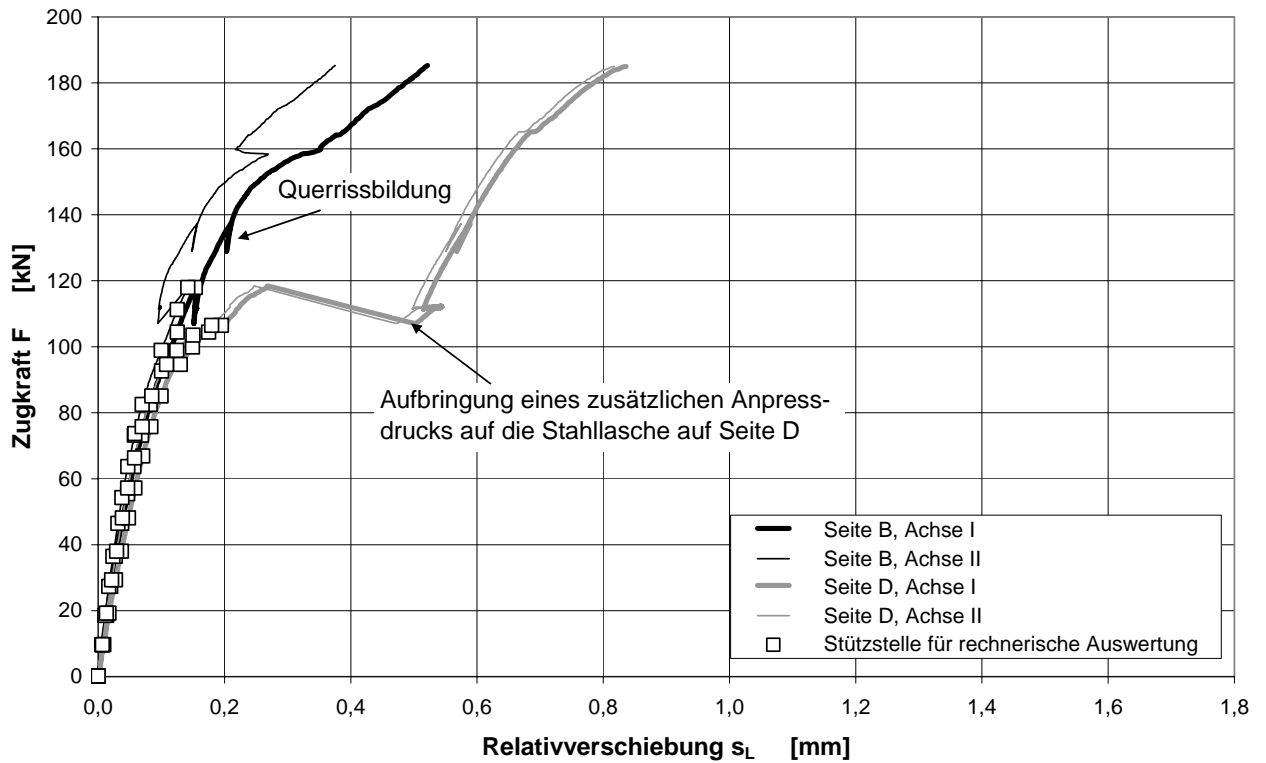


Abb. A 1: Relativverschiebungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 1

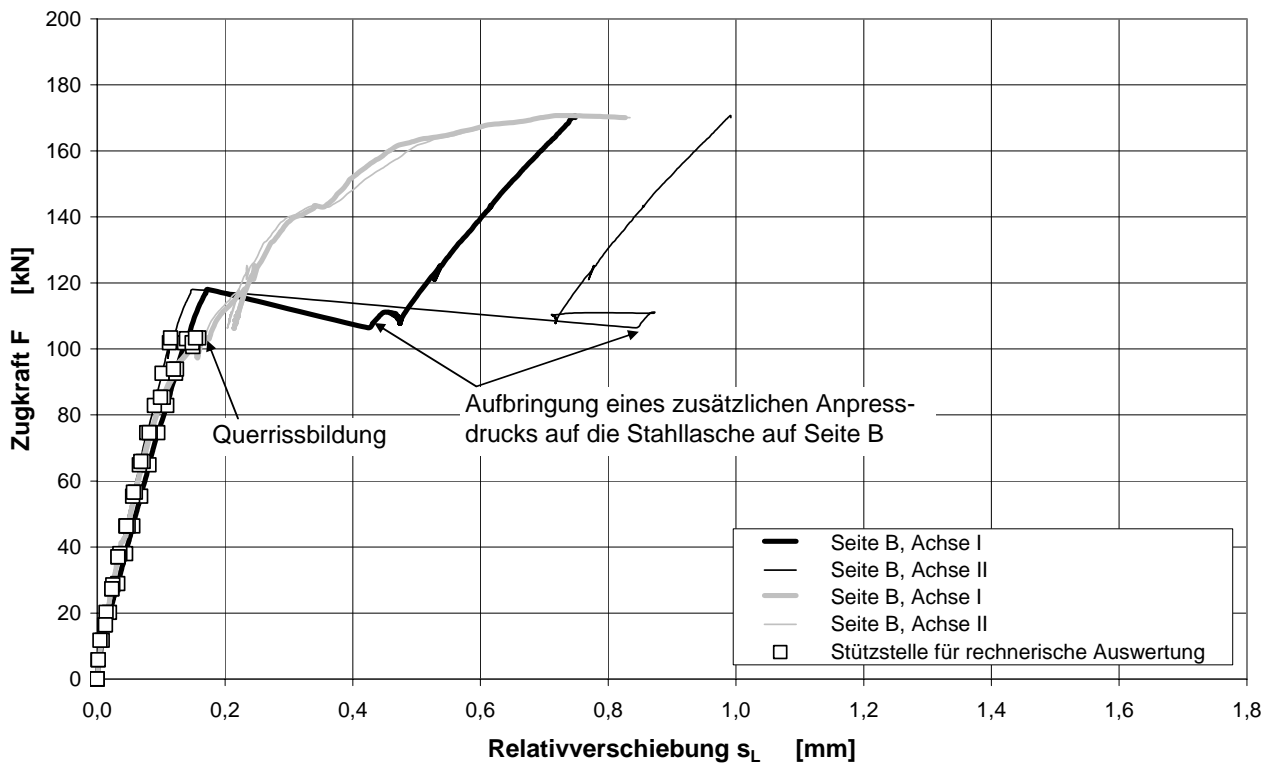


Abb. A 2: Relativverschiebungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 2

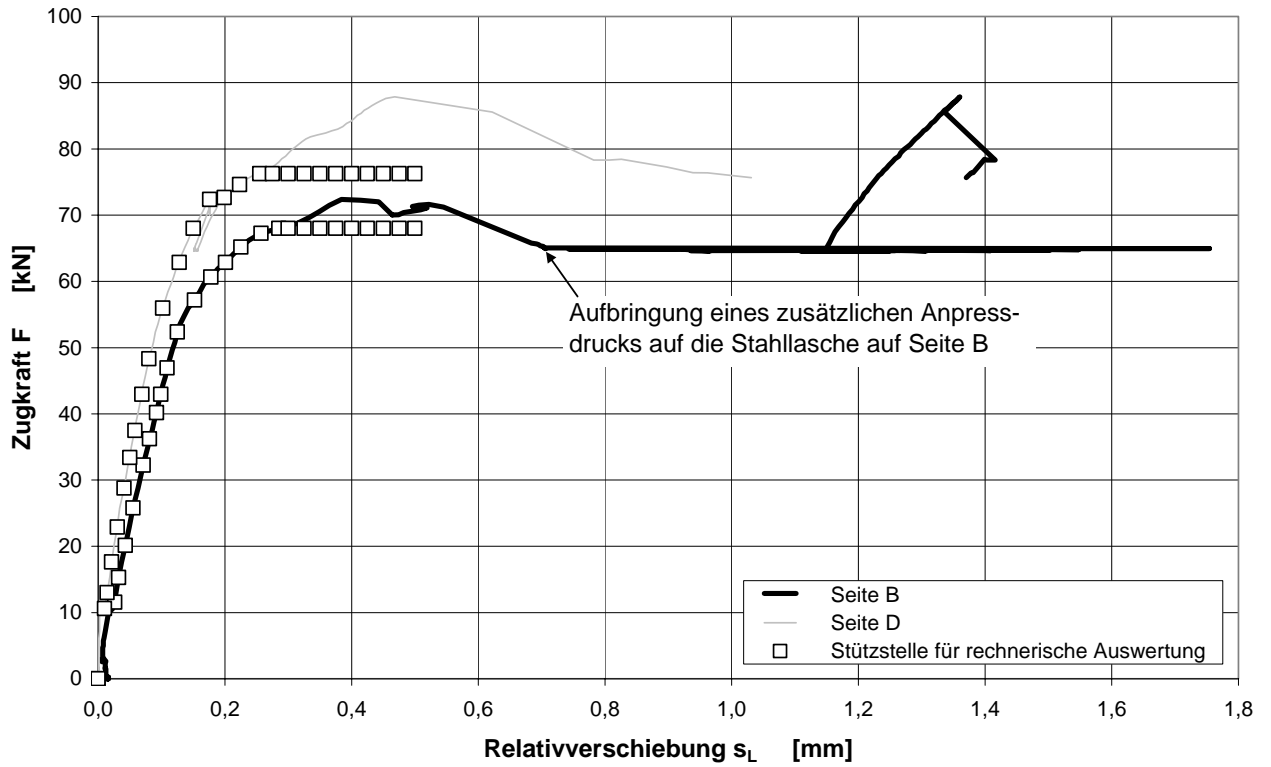


Abb. A 3: Relativverschiebungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 3

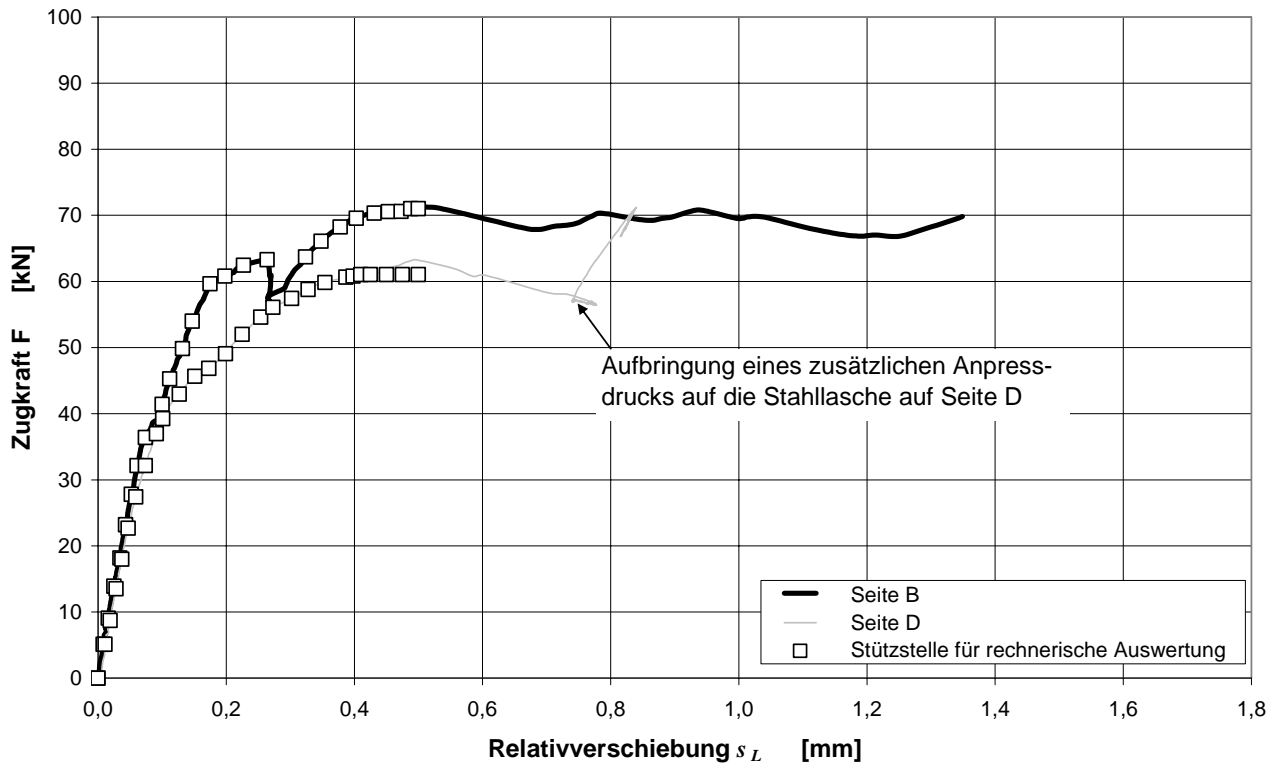


Abb. A 4: Relativverschiebungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 4

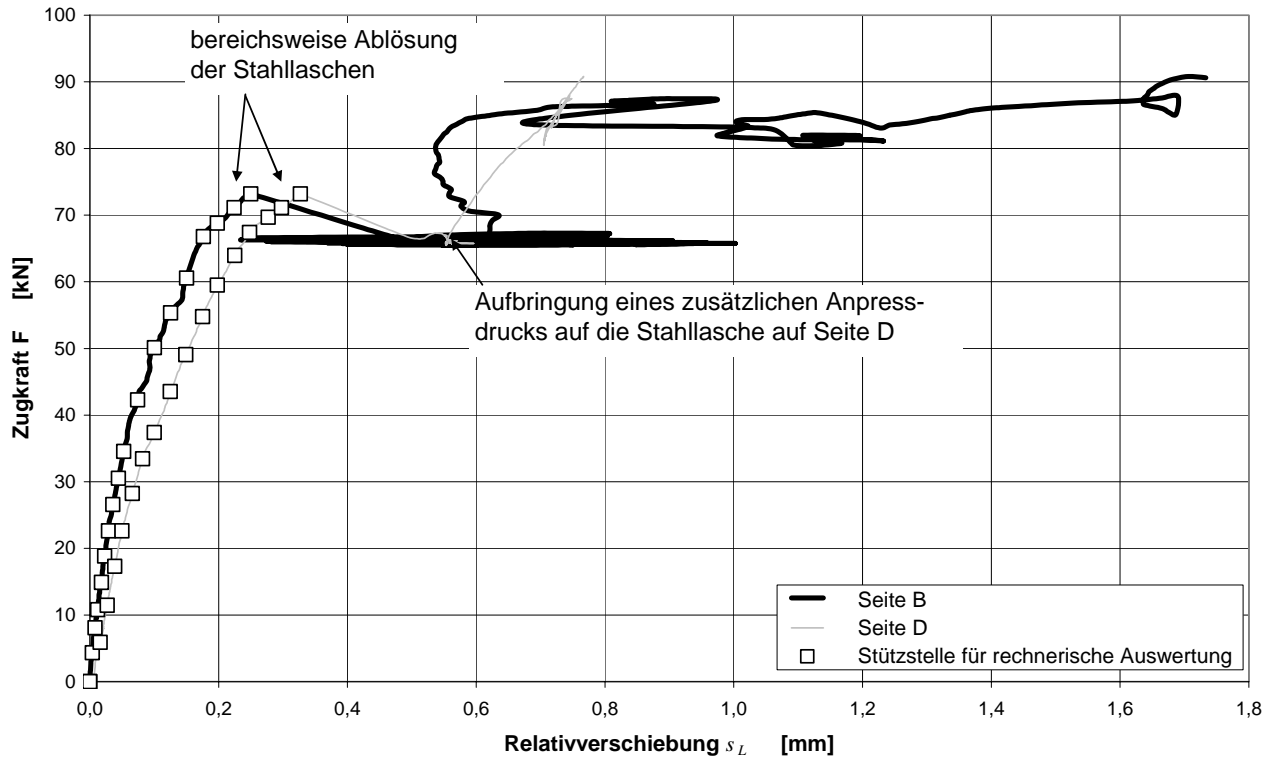


Abb. A 5: Relativverschiebungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 5

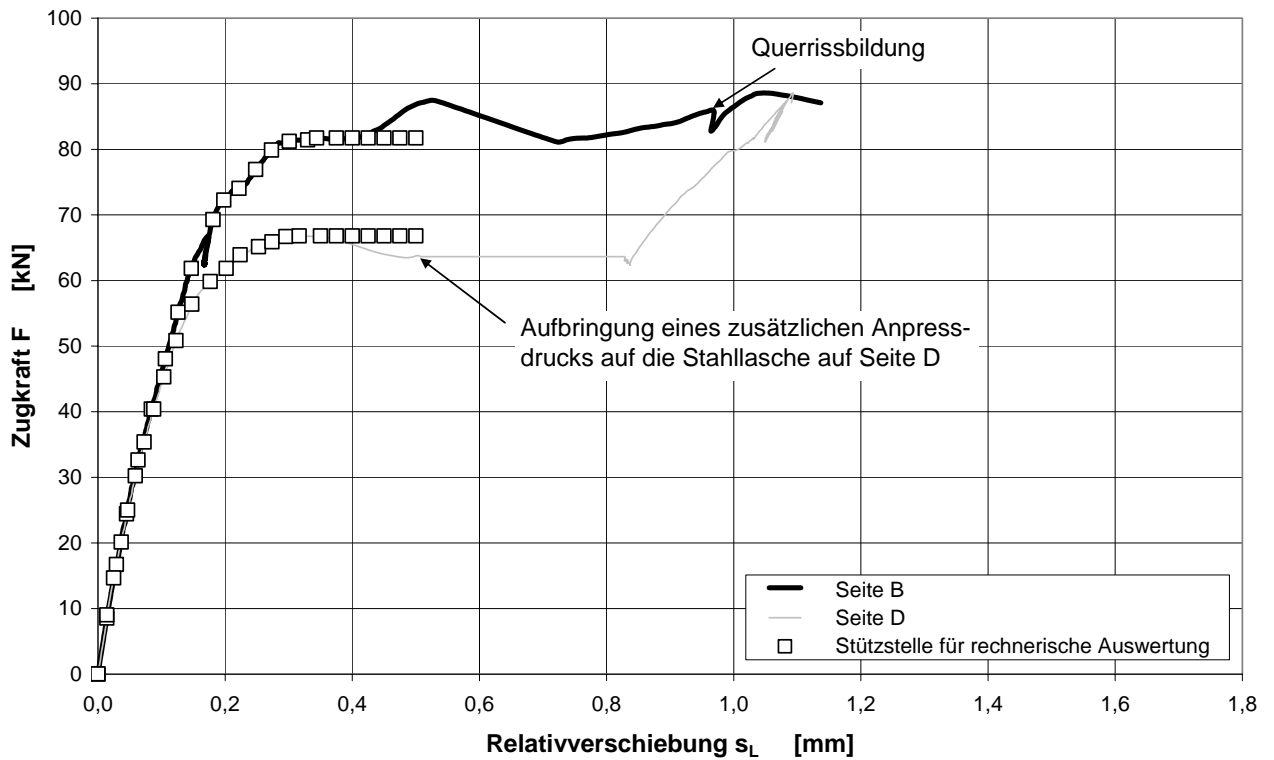


Abb. A 6: Relativverschiebungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 6

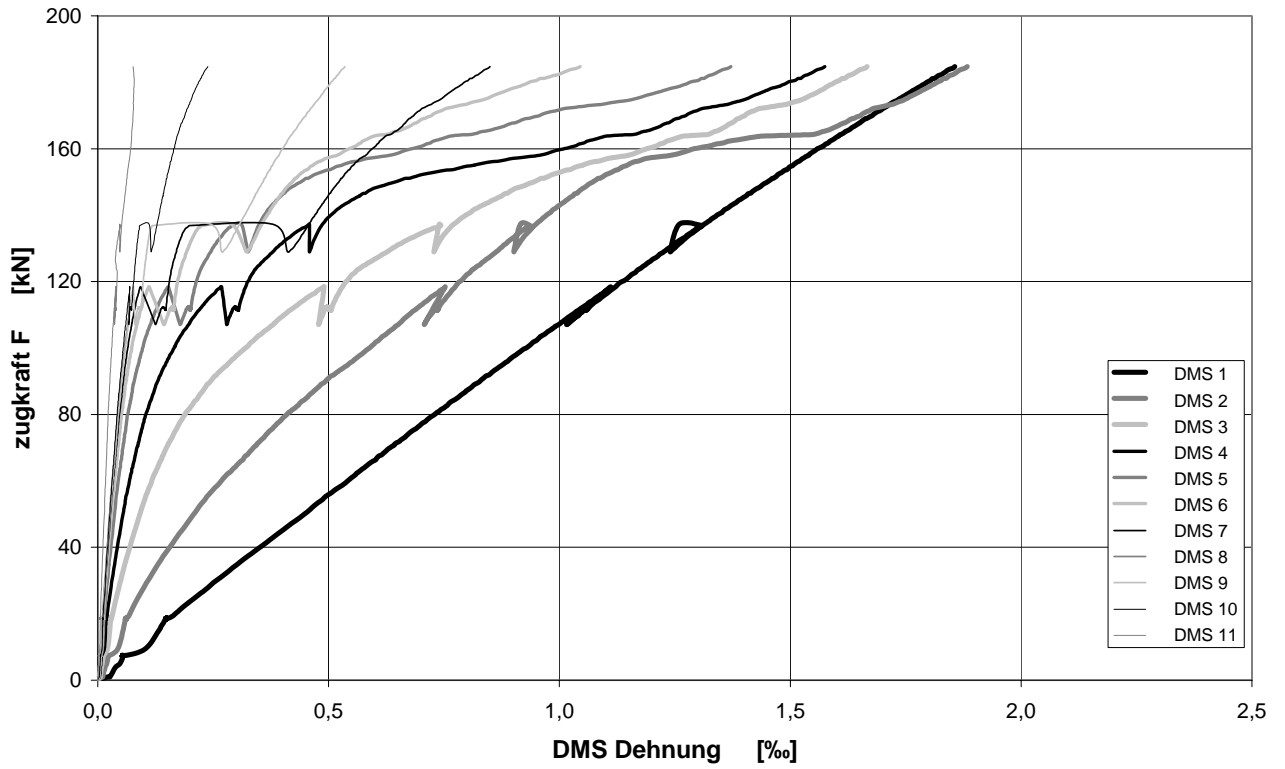


Abb. A 7: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 1; Seite B

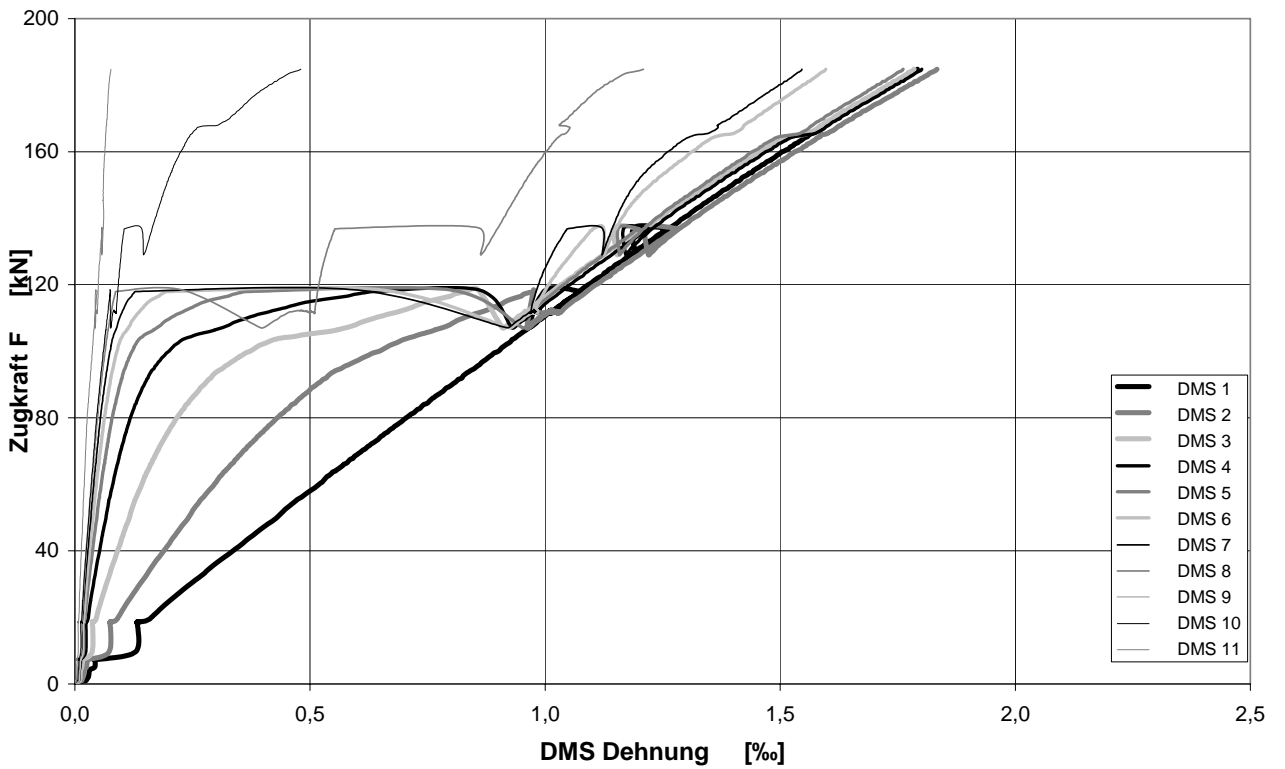


Abb. A 8: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 1, Seite D

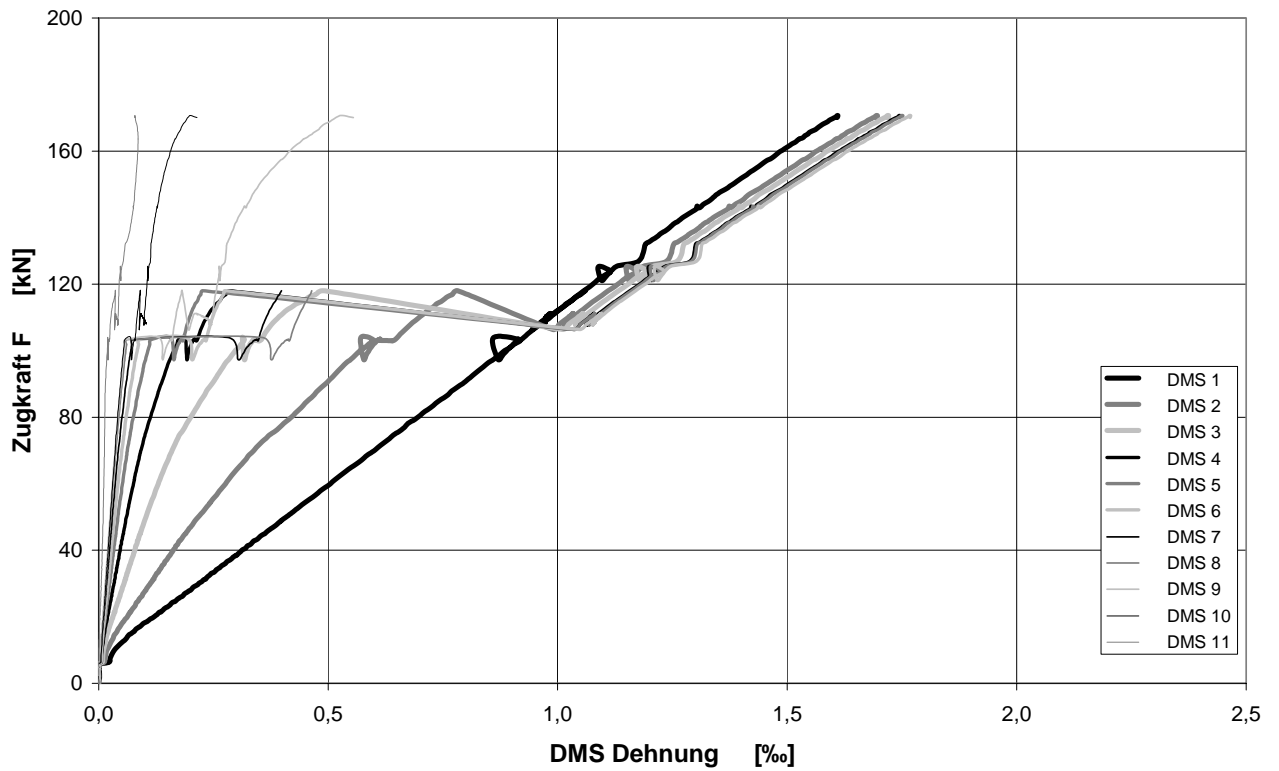


Abb. A 9: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 2, Seite B

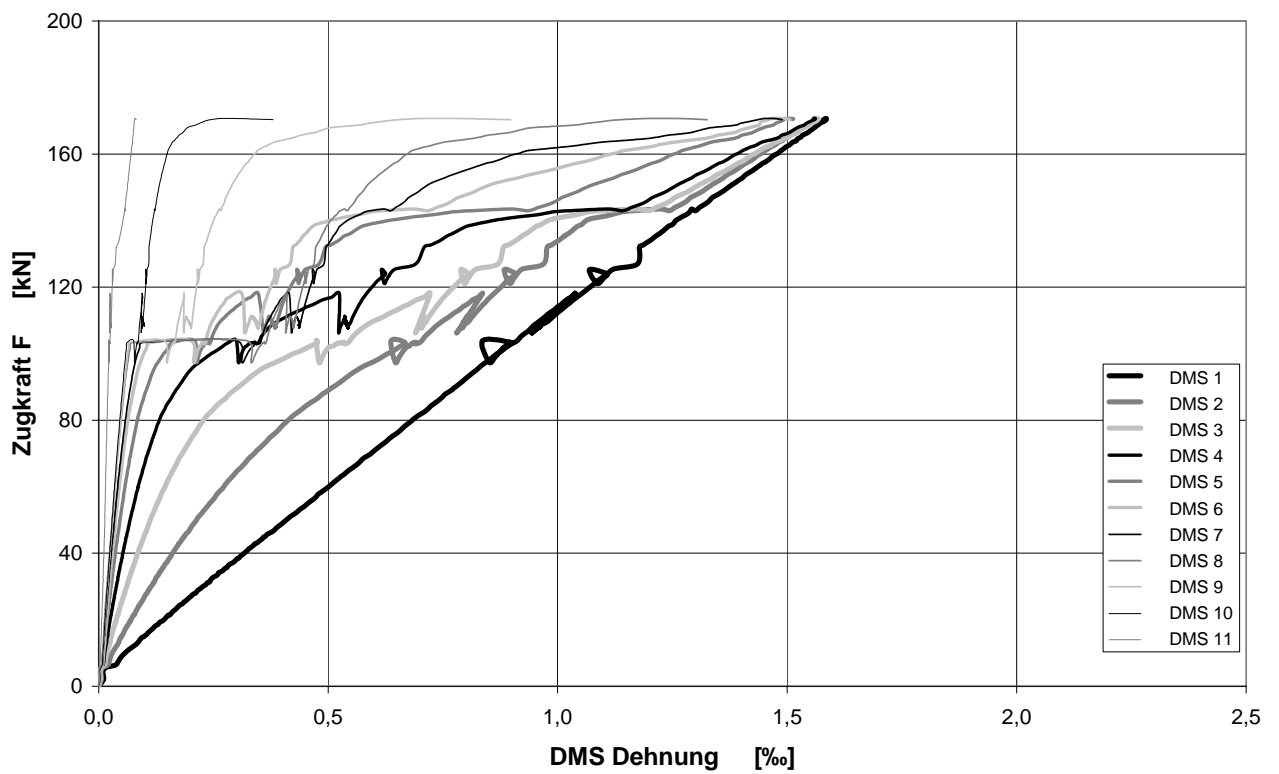


Abb. A 10: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 2, Seite D

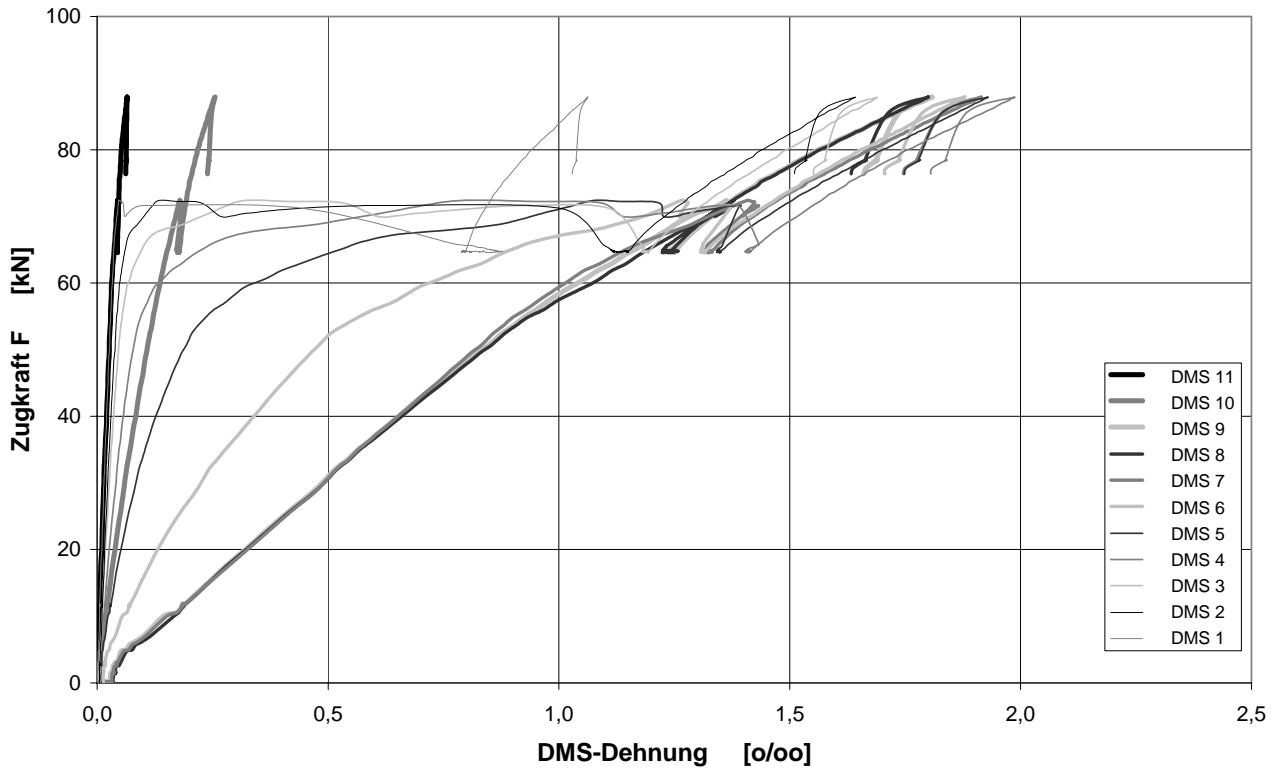


Abb. A 11: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 3, Seite B

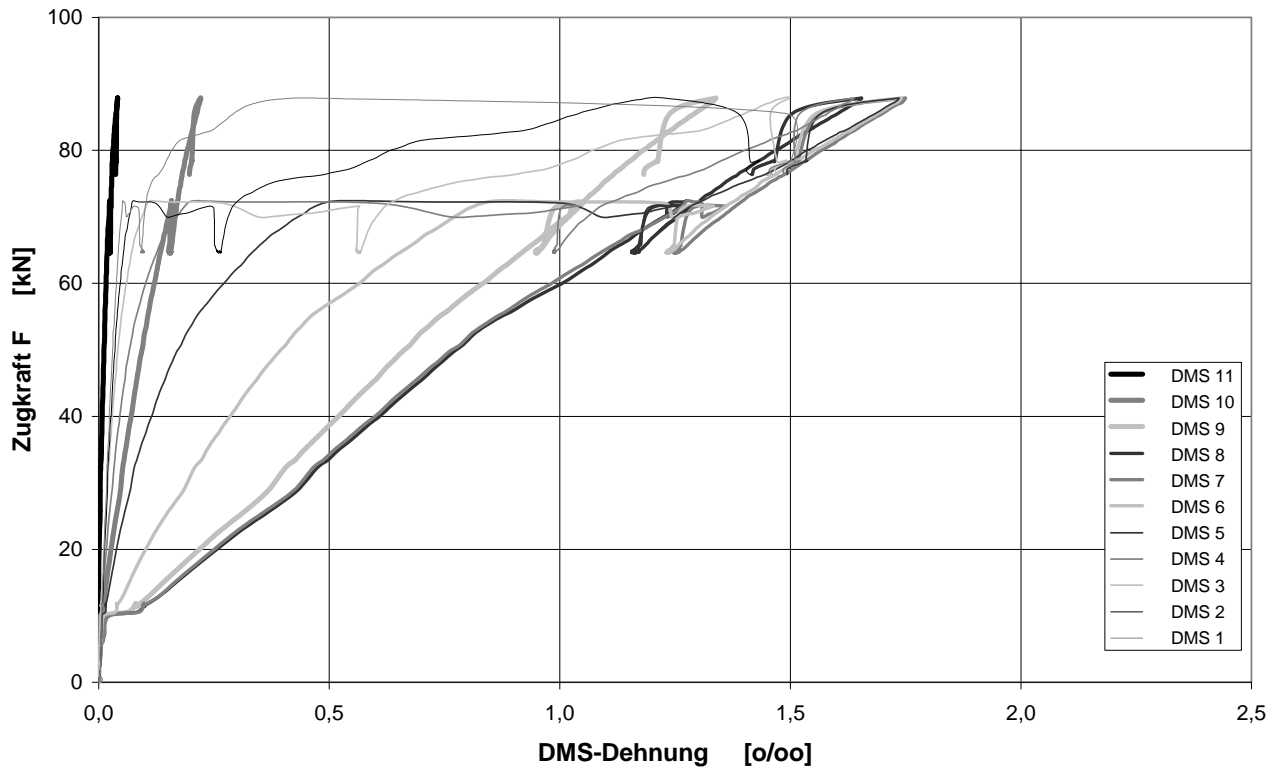


Abb. A 12: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 3, Seite D



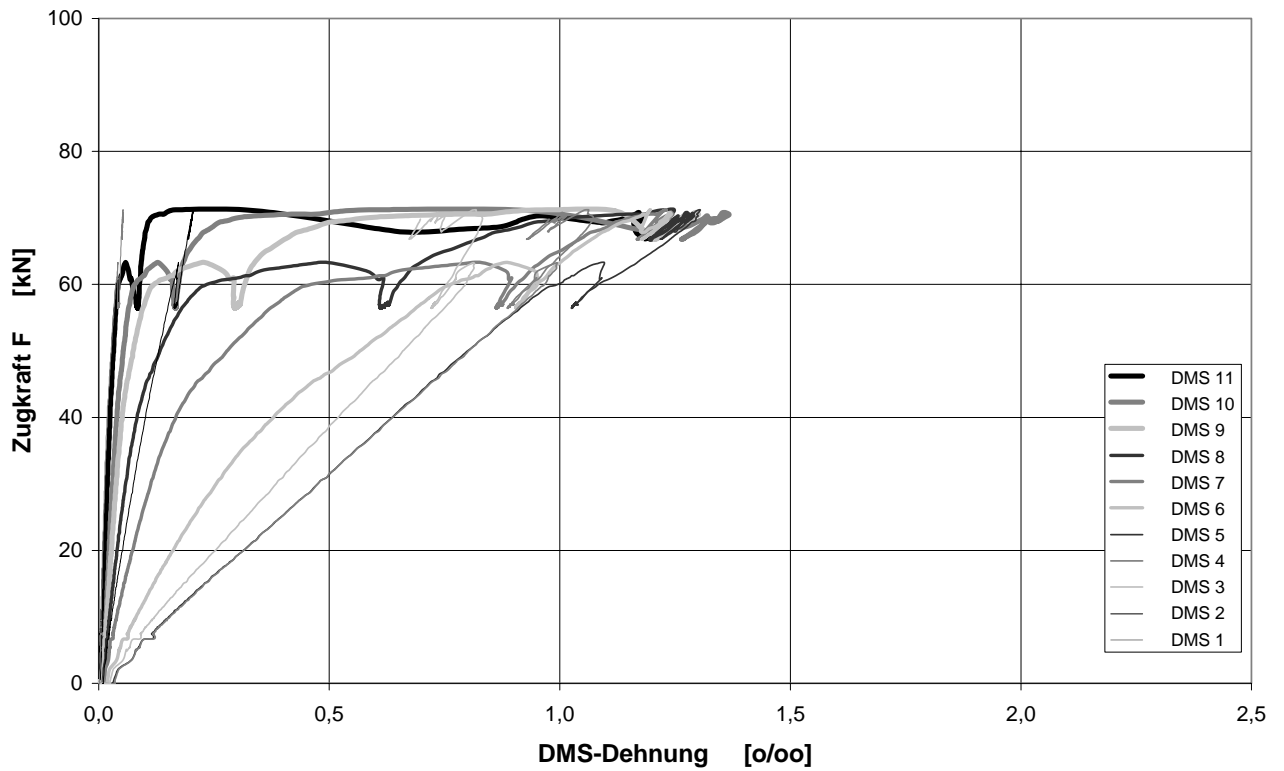


Abb. A 13: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 4, Seite B

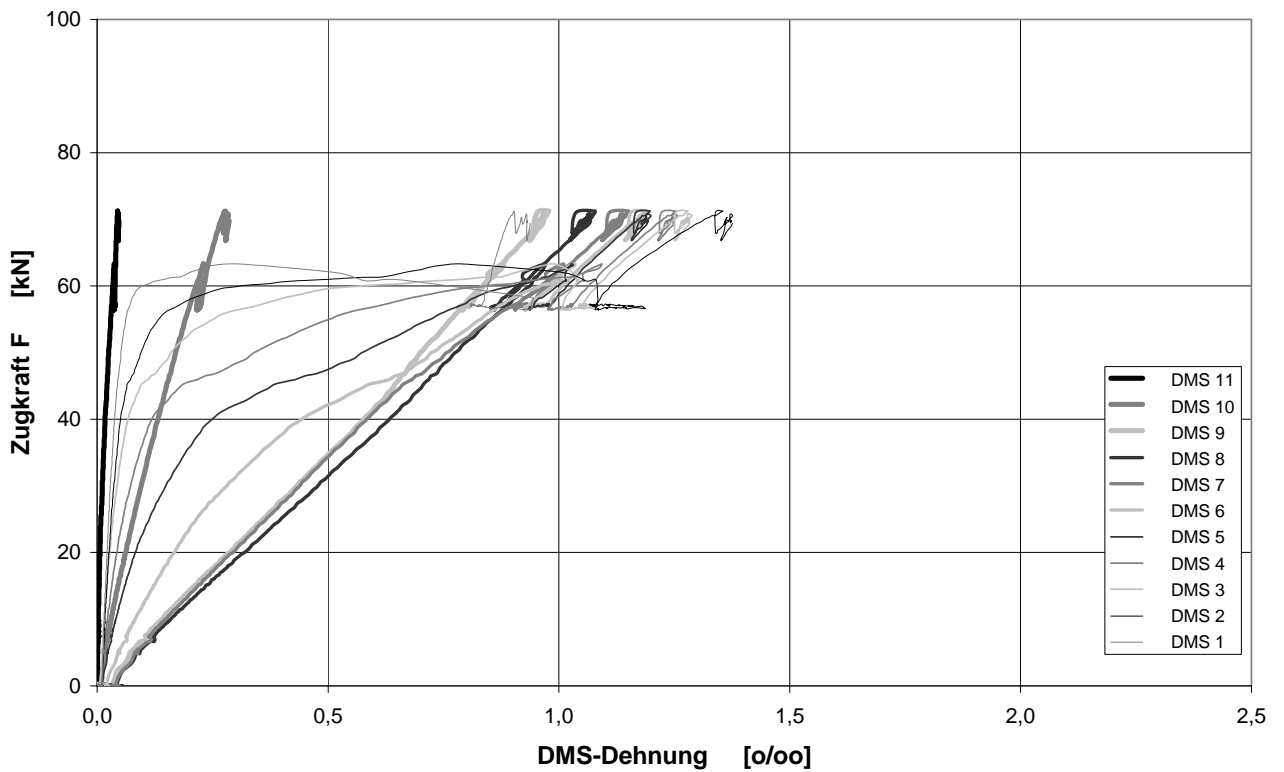


Abb. A 14: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 4, Seite D

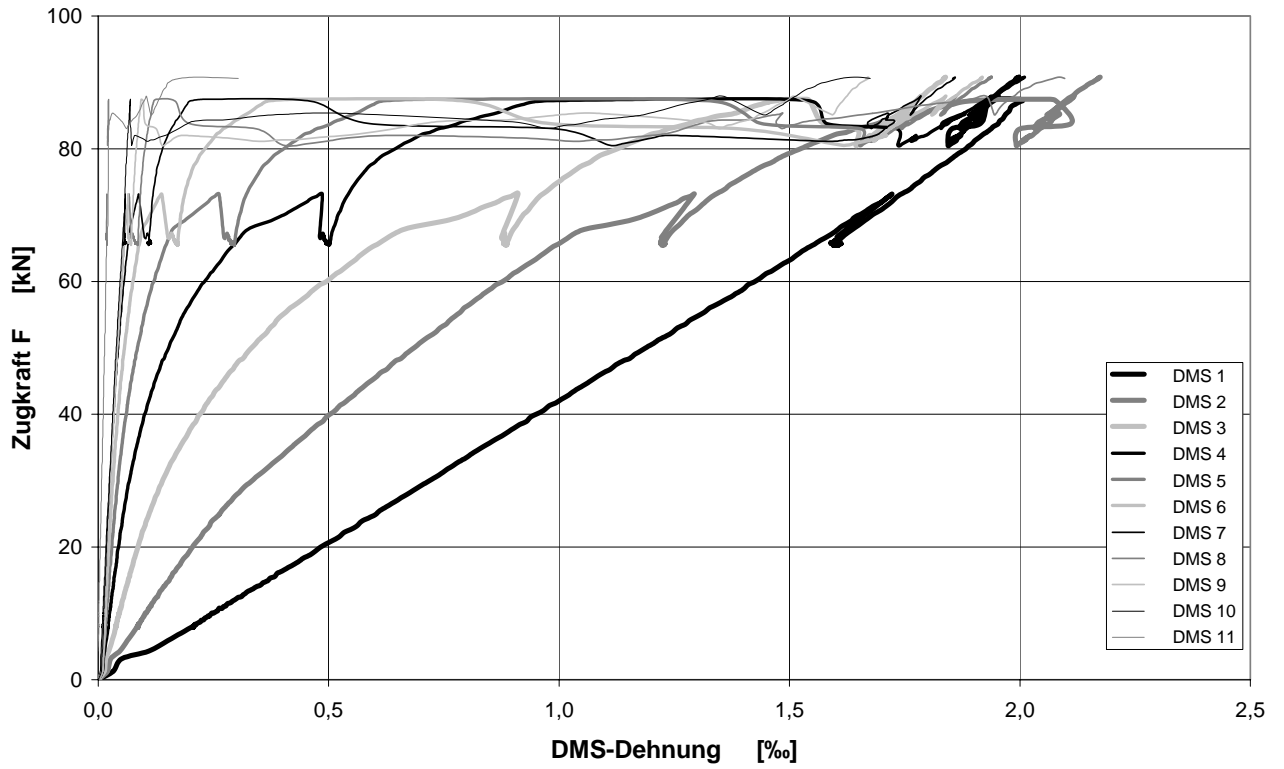


Abb. A 15: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 5, Seite B

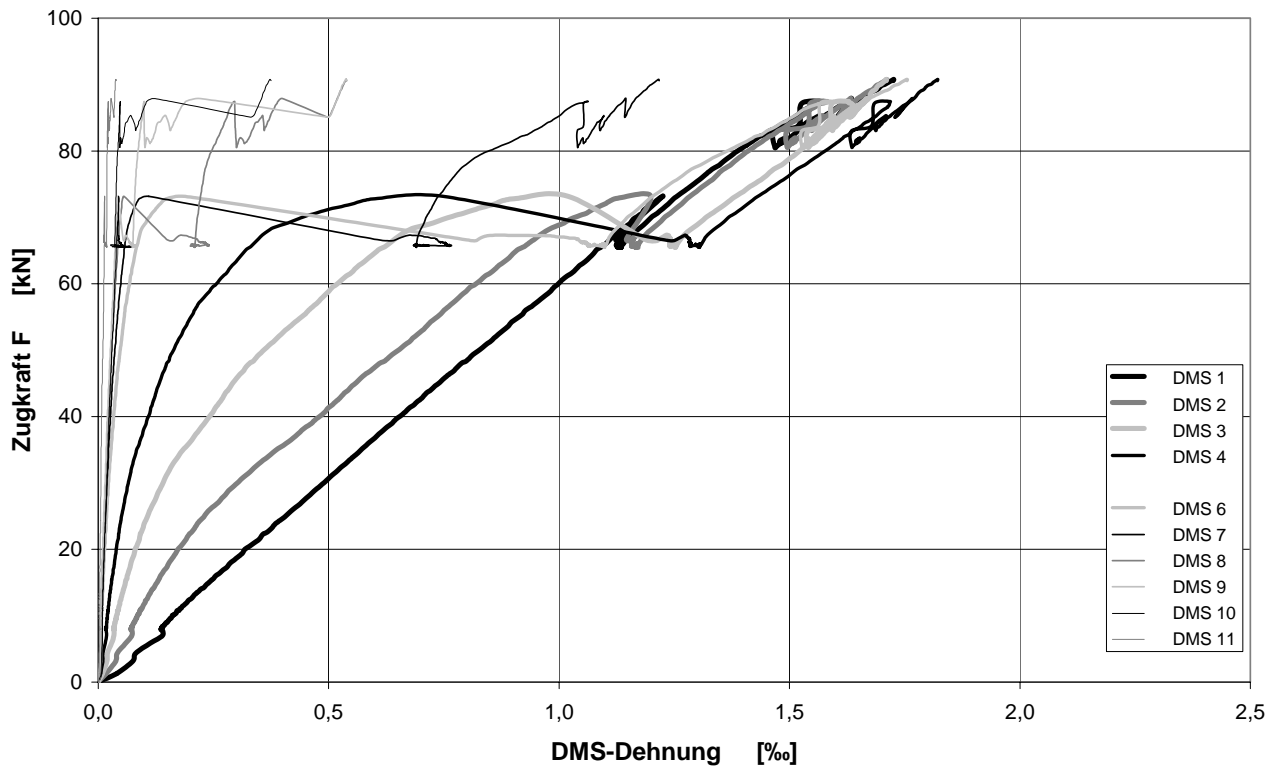


Abb. A 16: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 5, Seite D

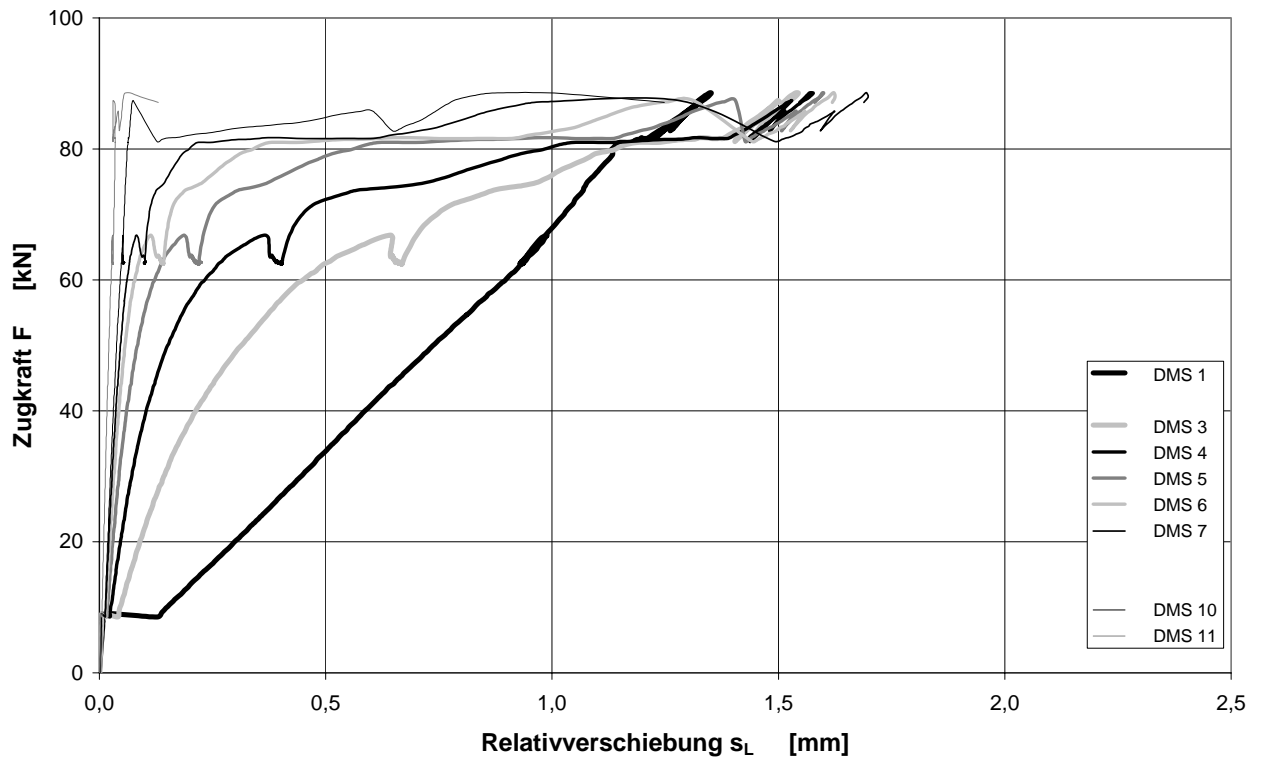


Abb. A 17: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 6, Seite B

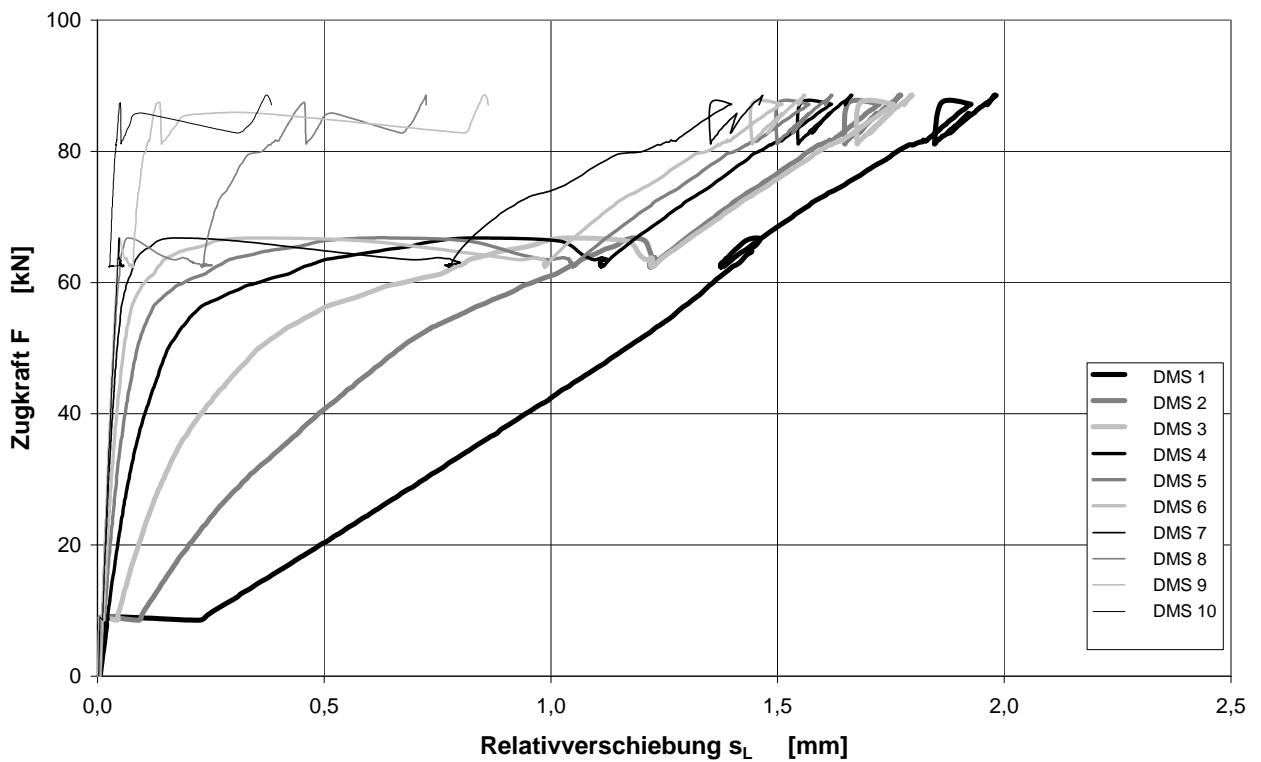


Abb. A 18: Längsdehnungs-Zugkraft-Diagramm: Versuch 6, Seite D

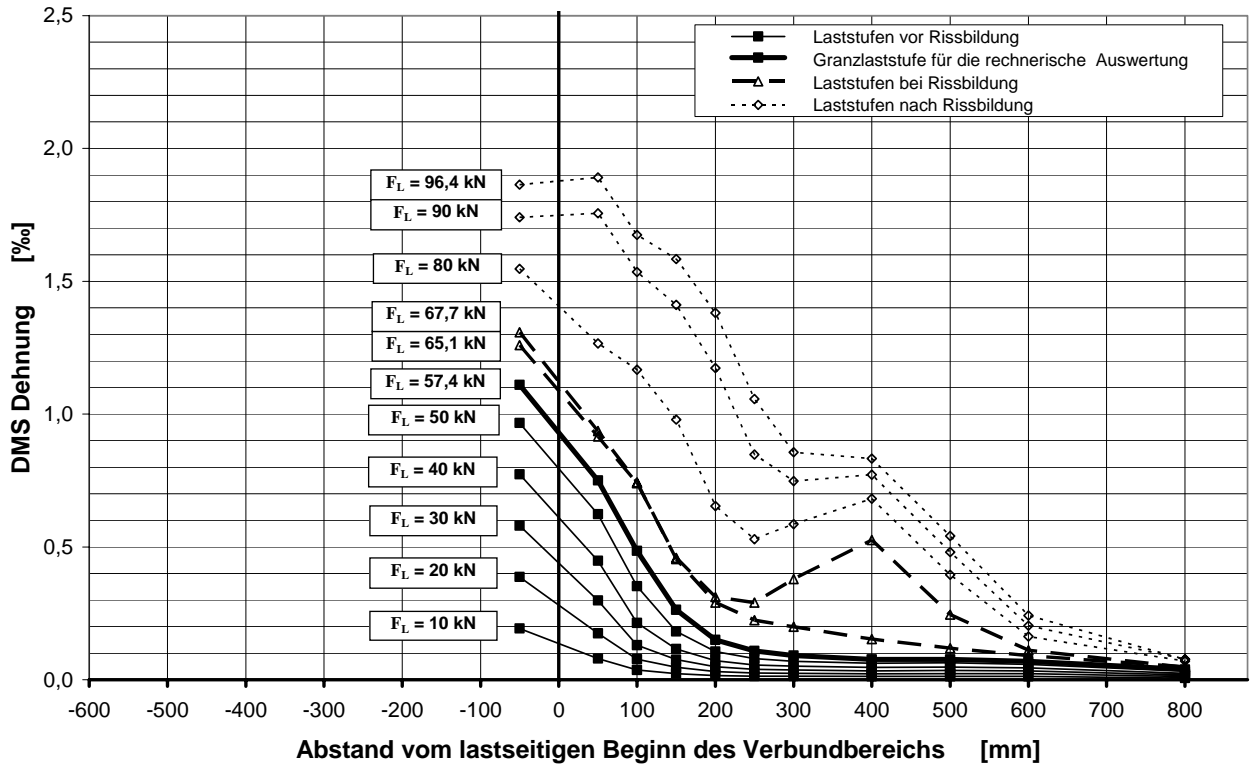


Abb. A 19: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 1, Seite B

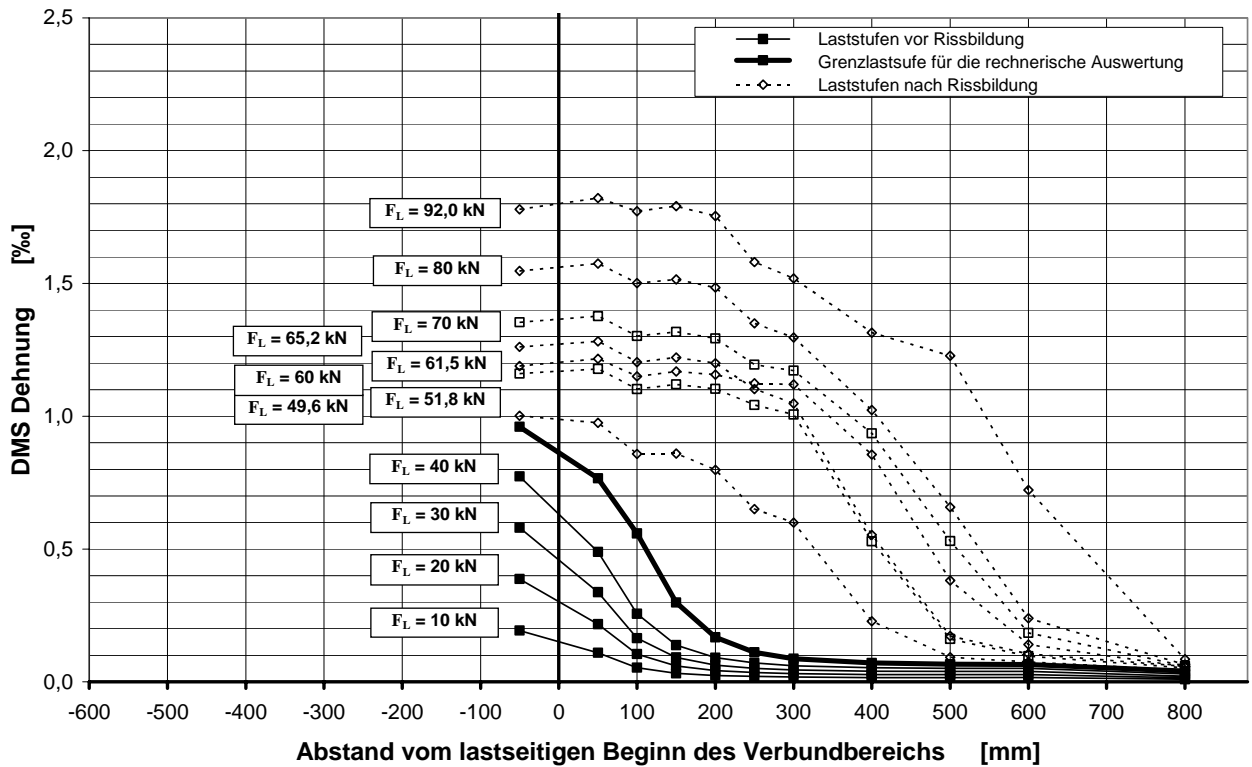


Abb. A 20: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 1, Seite D

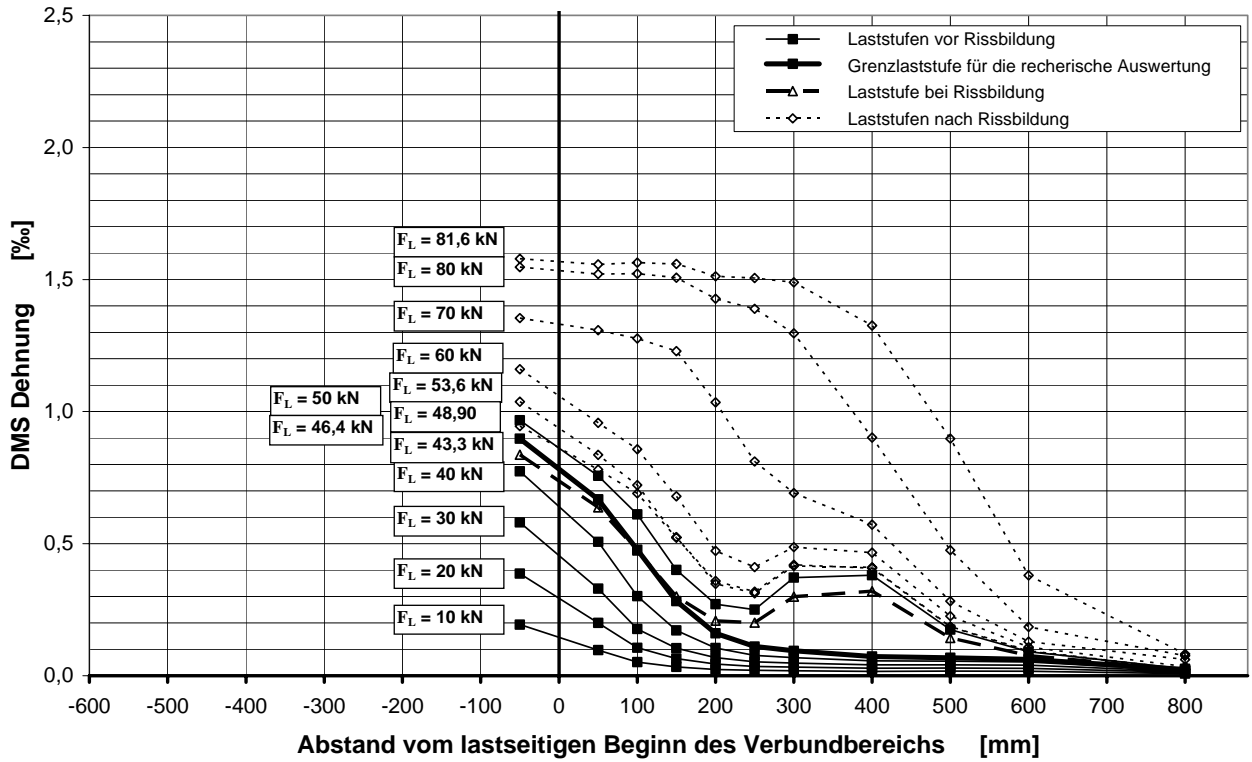


Abb. A 21: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 2, Seite B

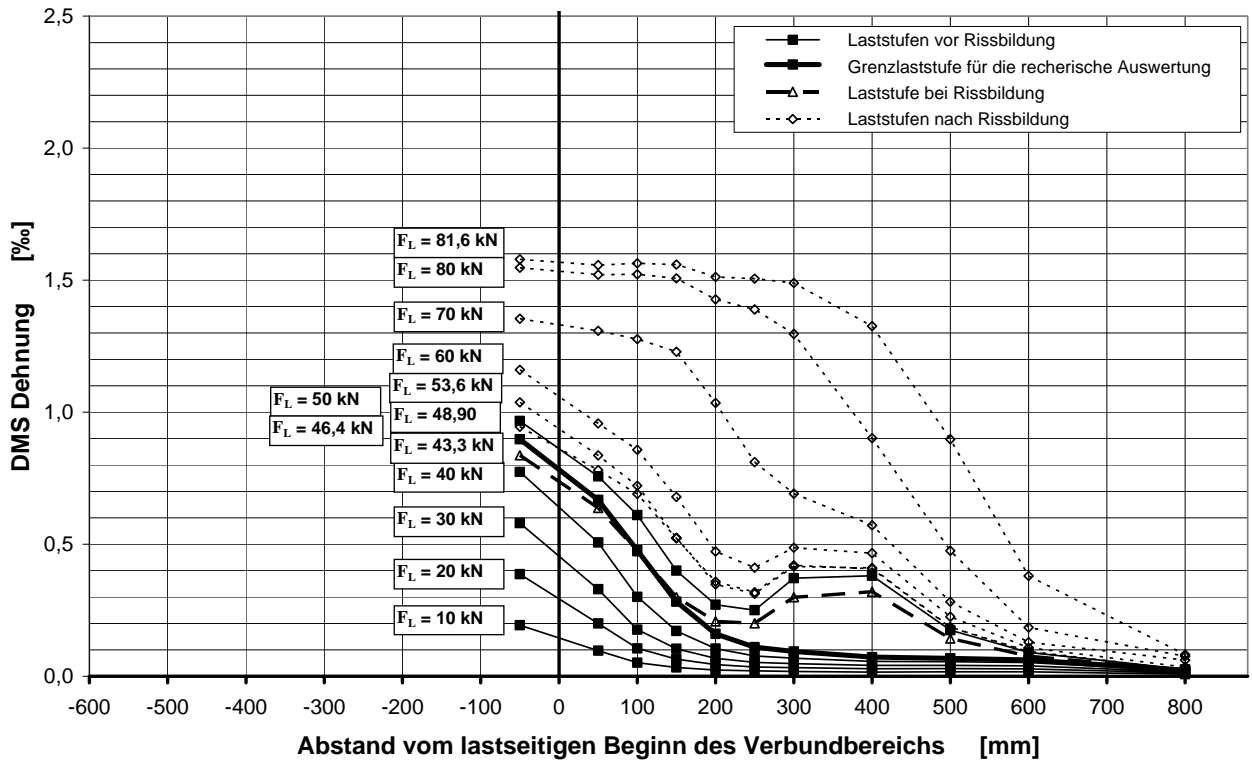


Abb. A 22: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 2, Seite D

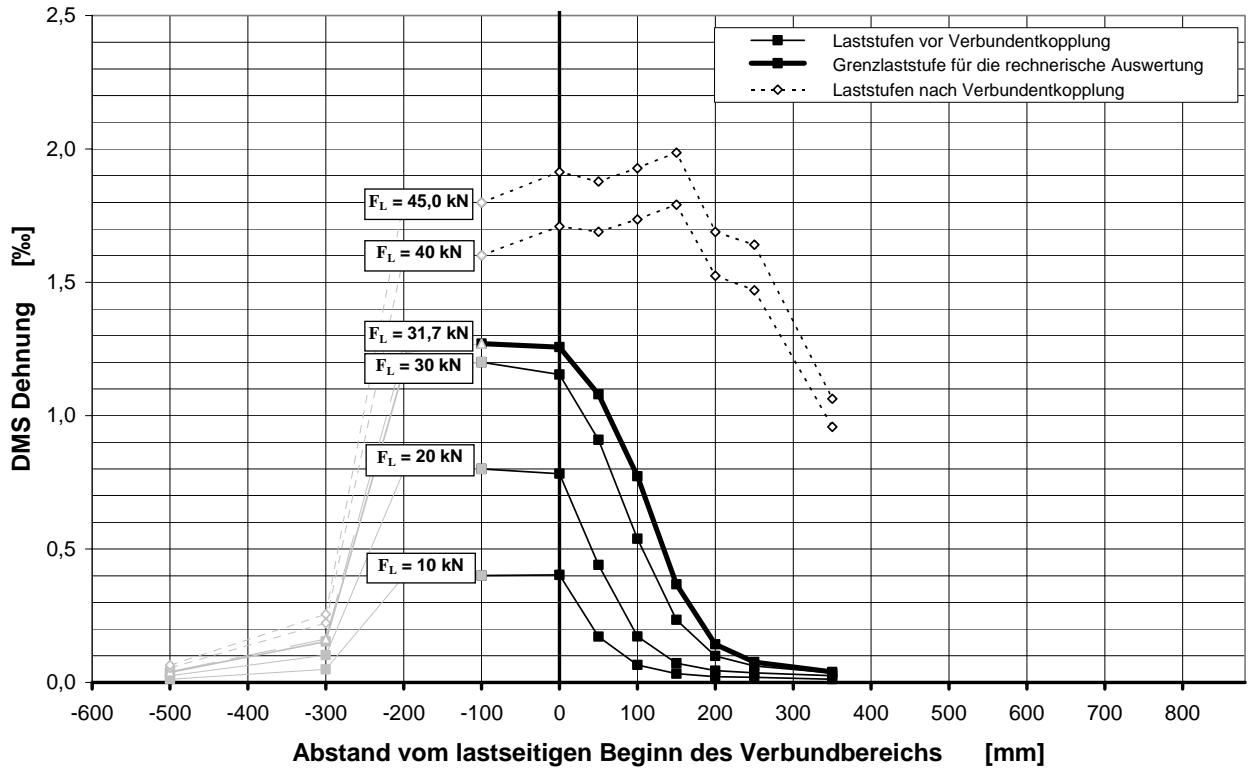


Abb. A 23: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 3, Seite B

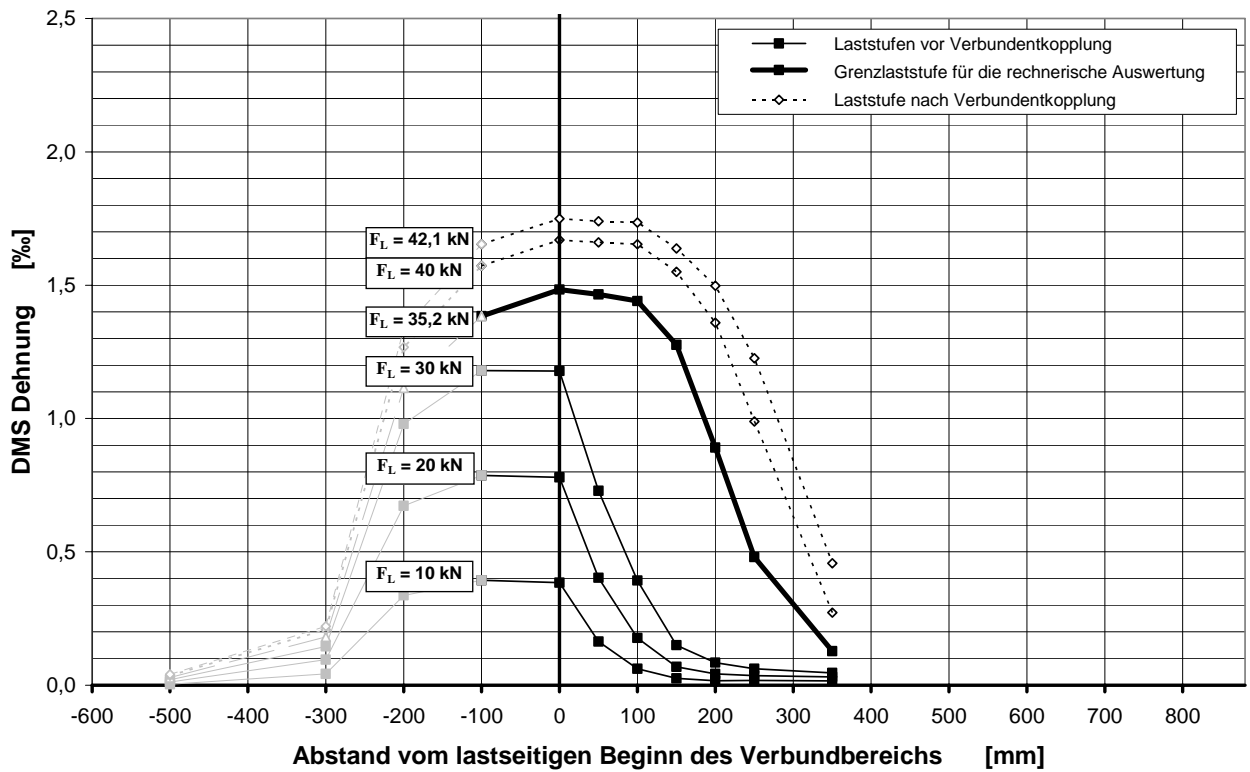


Abb. A 24: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 3, Seite D

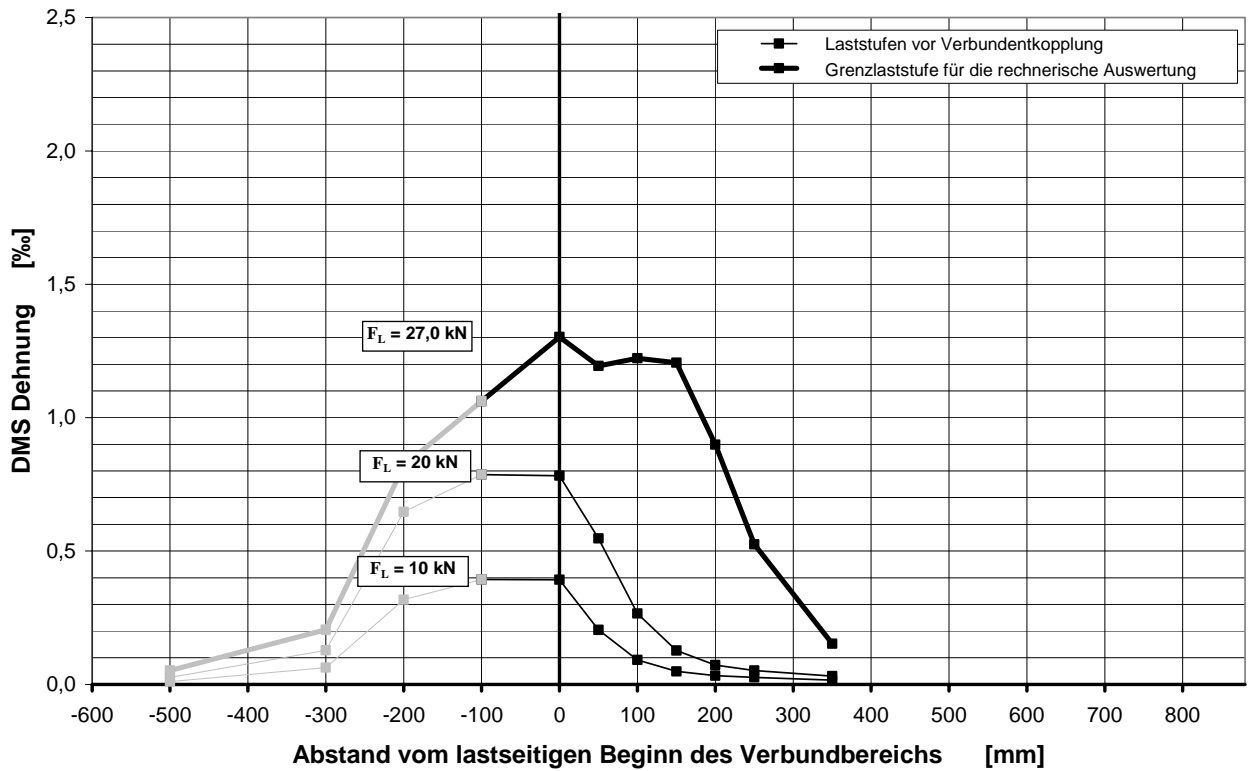


Abb. A 25: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 4, Seite B

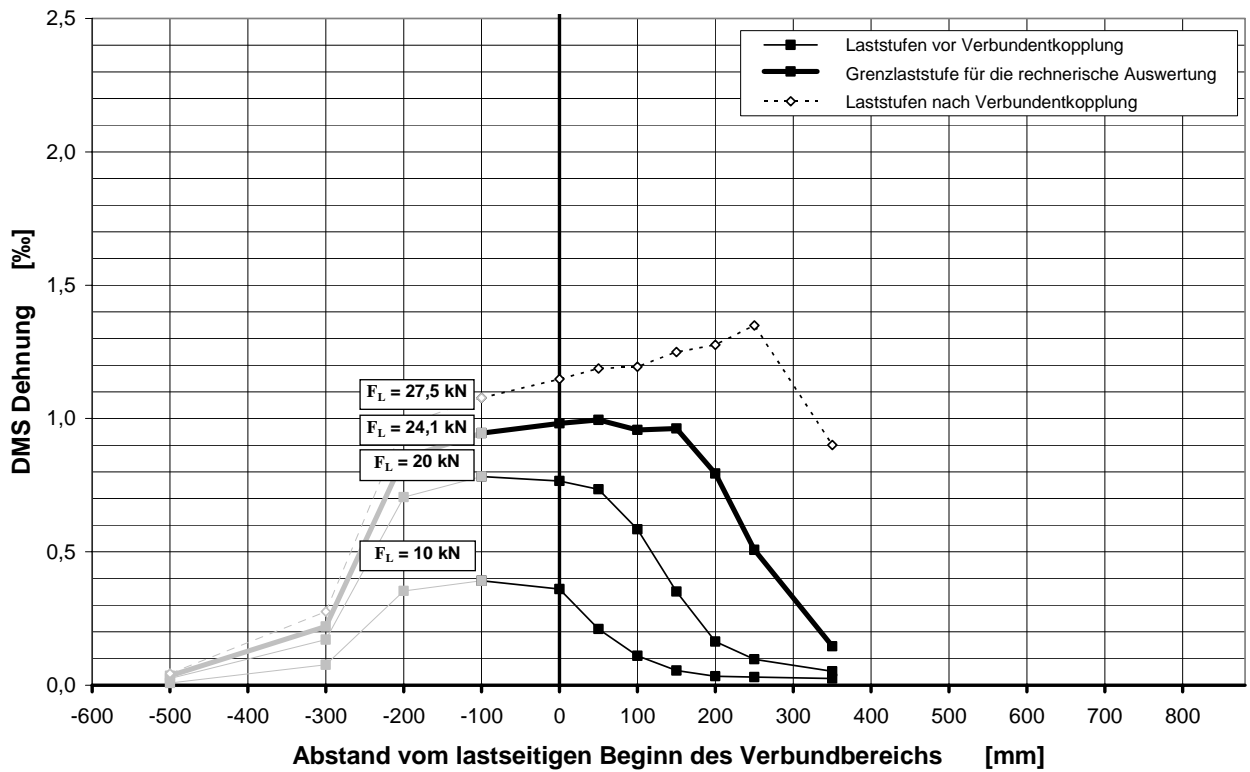


Abb. A 26: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 4, Seite D

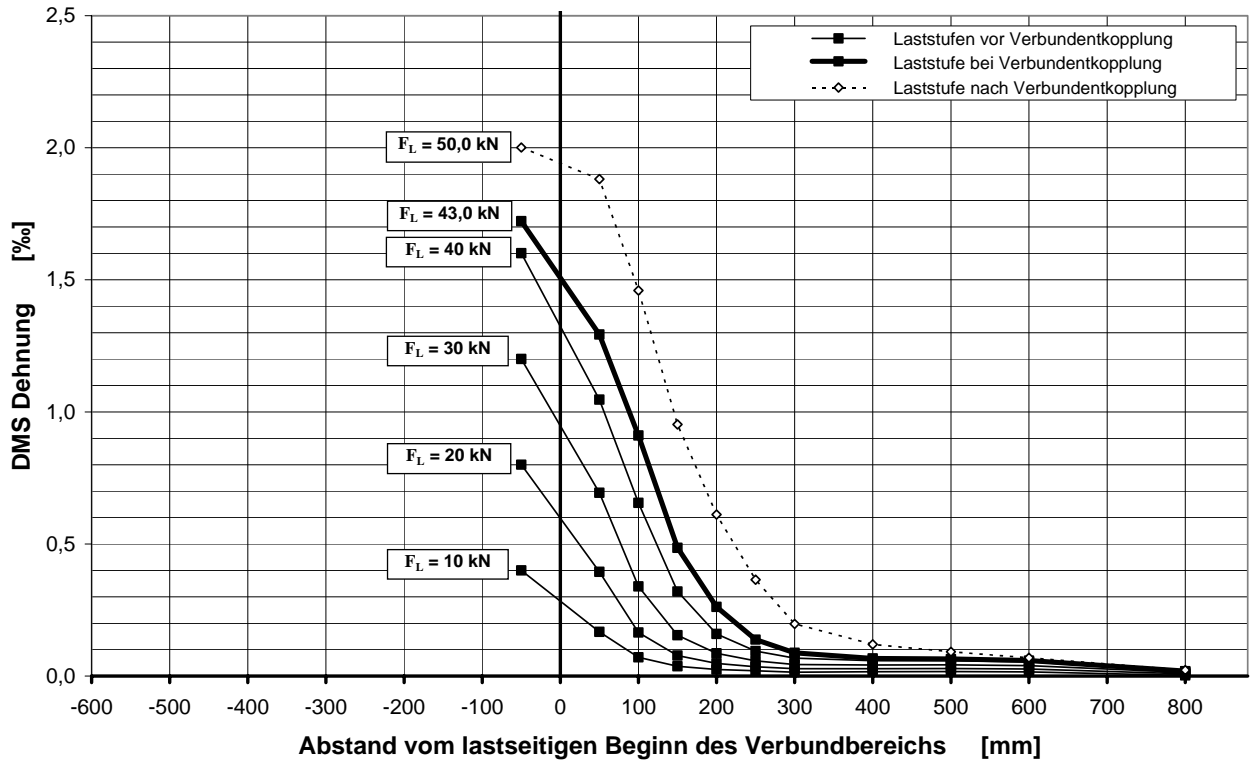


Abb. A 27: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 5, Seite B

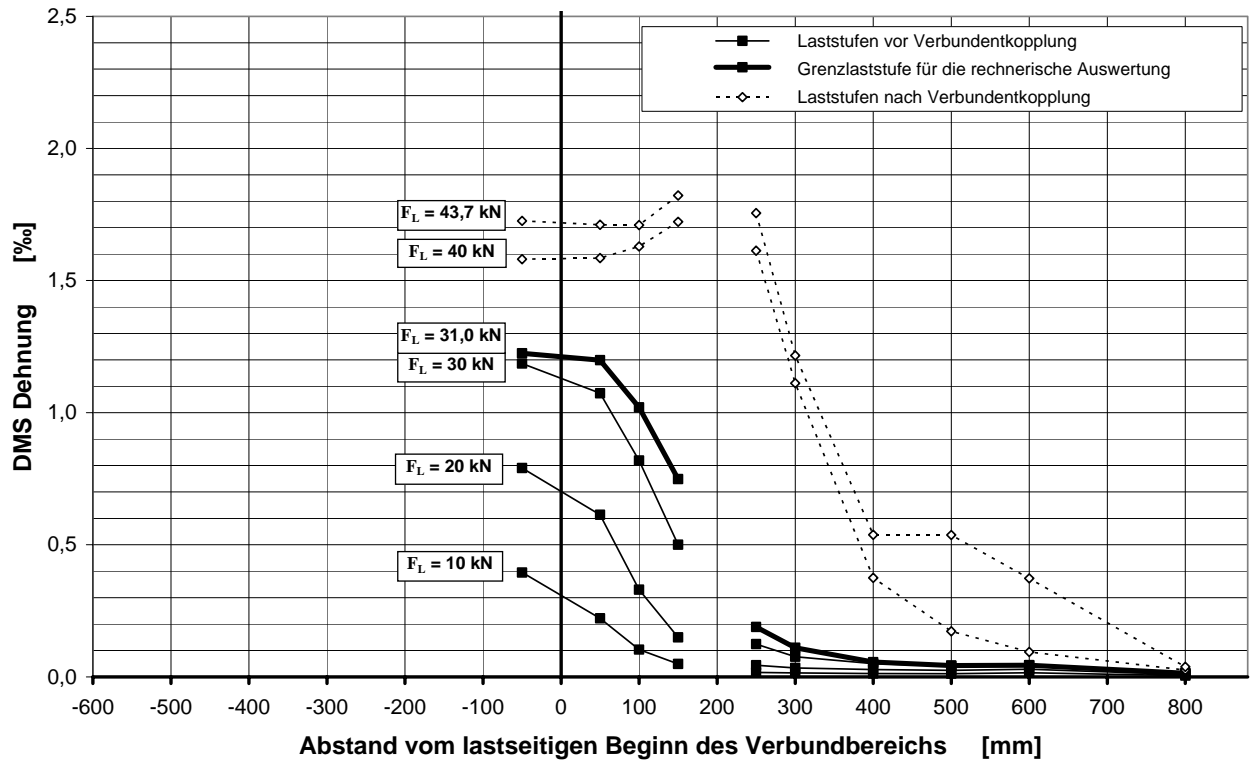


Abb. A 28: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 5, Seite D



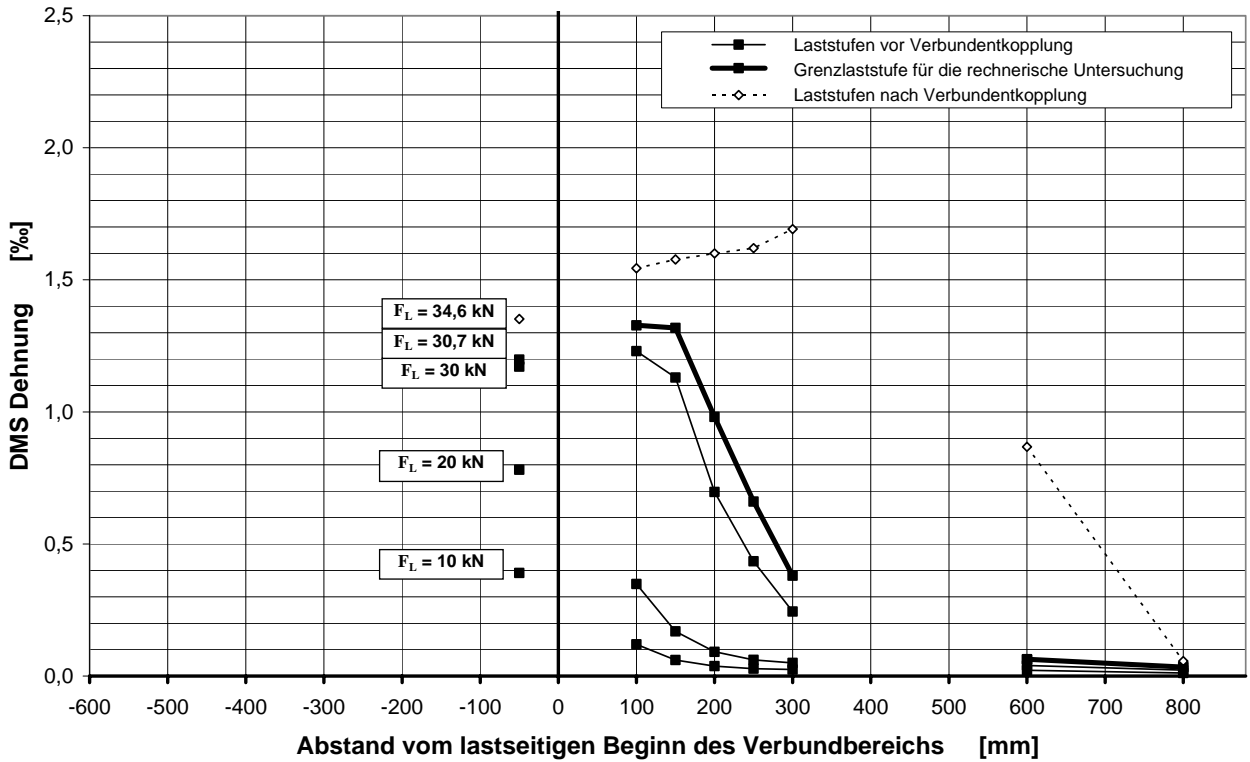


Abb. A 29: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 6, Seite B

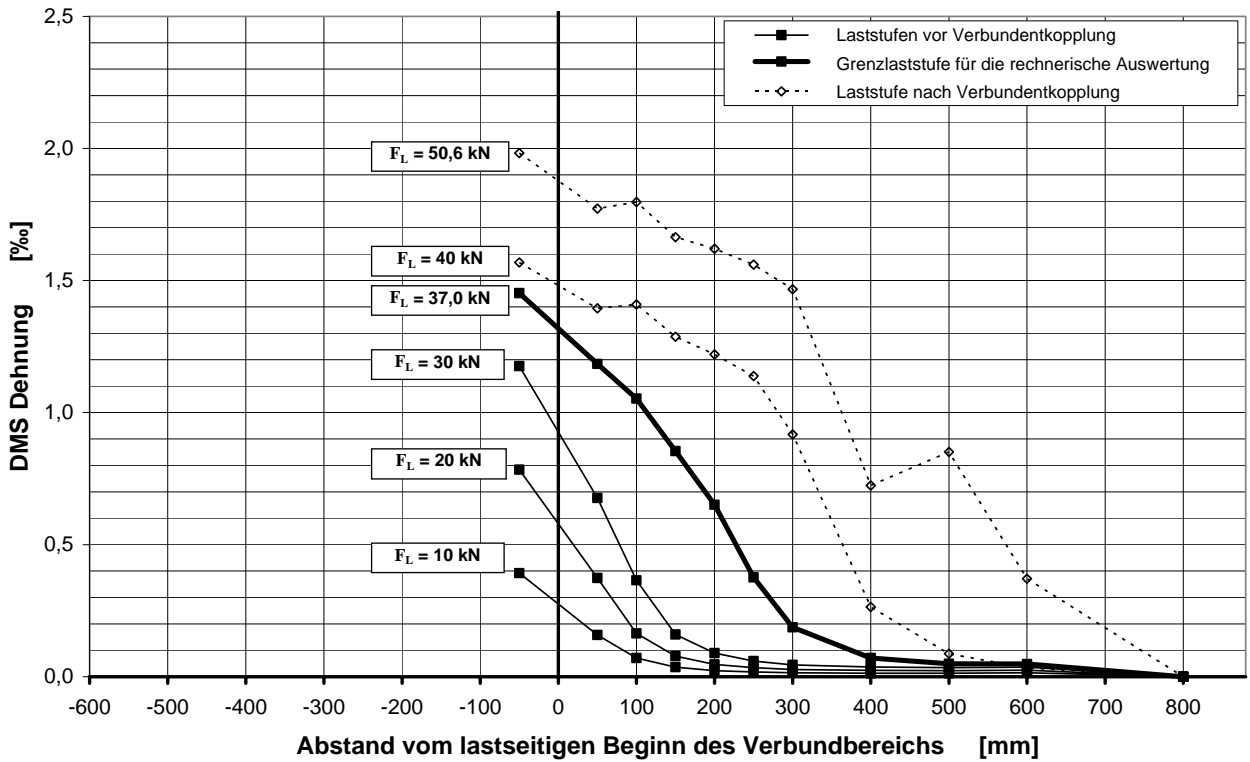
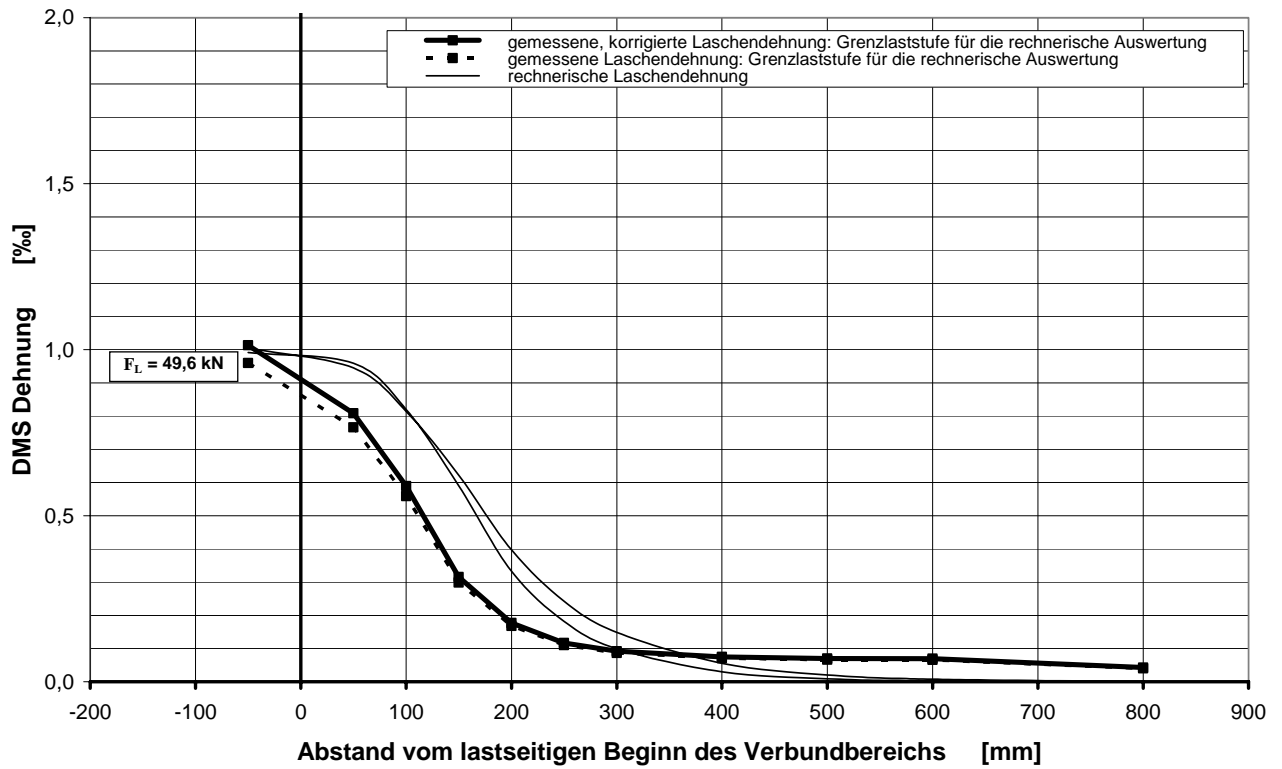
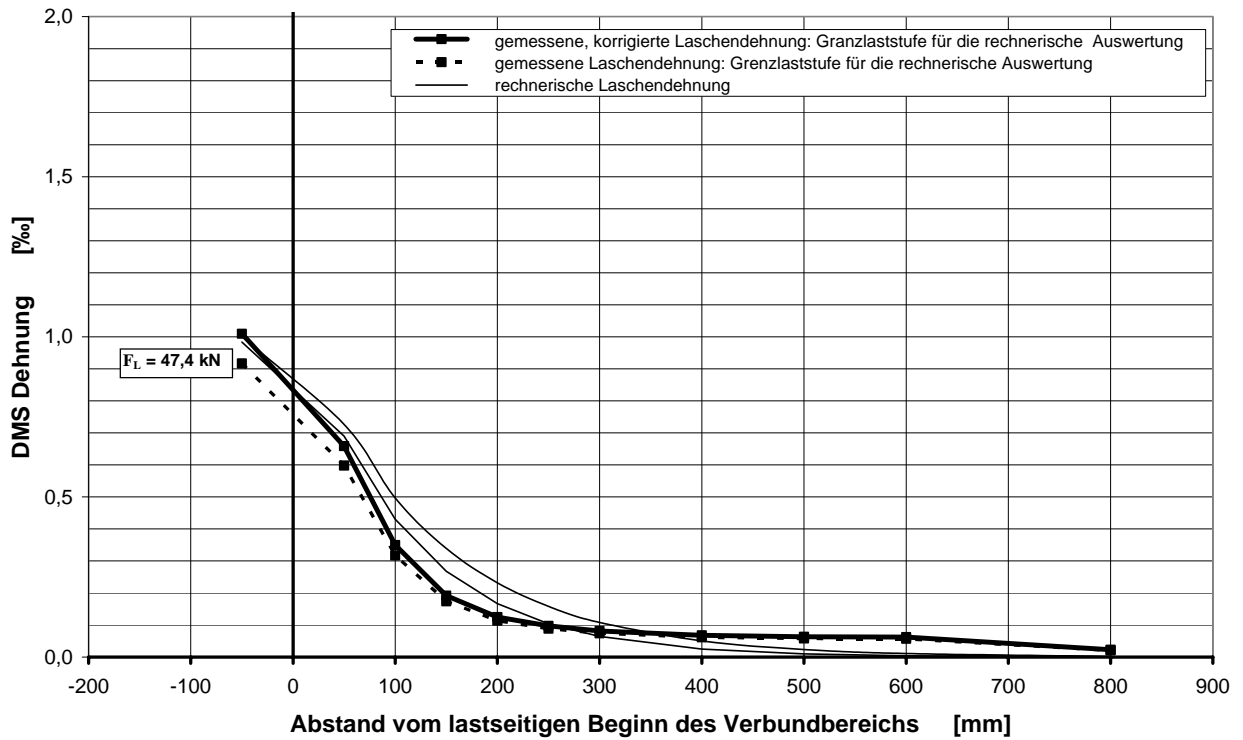


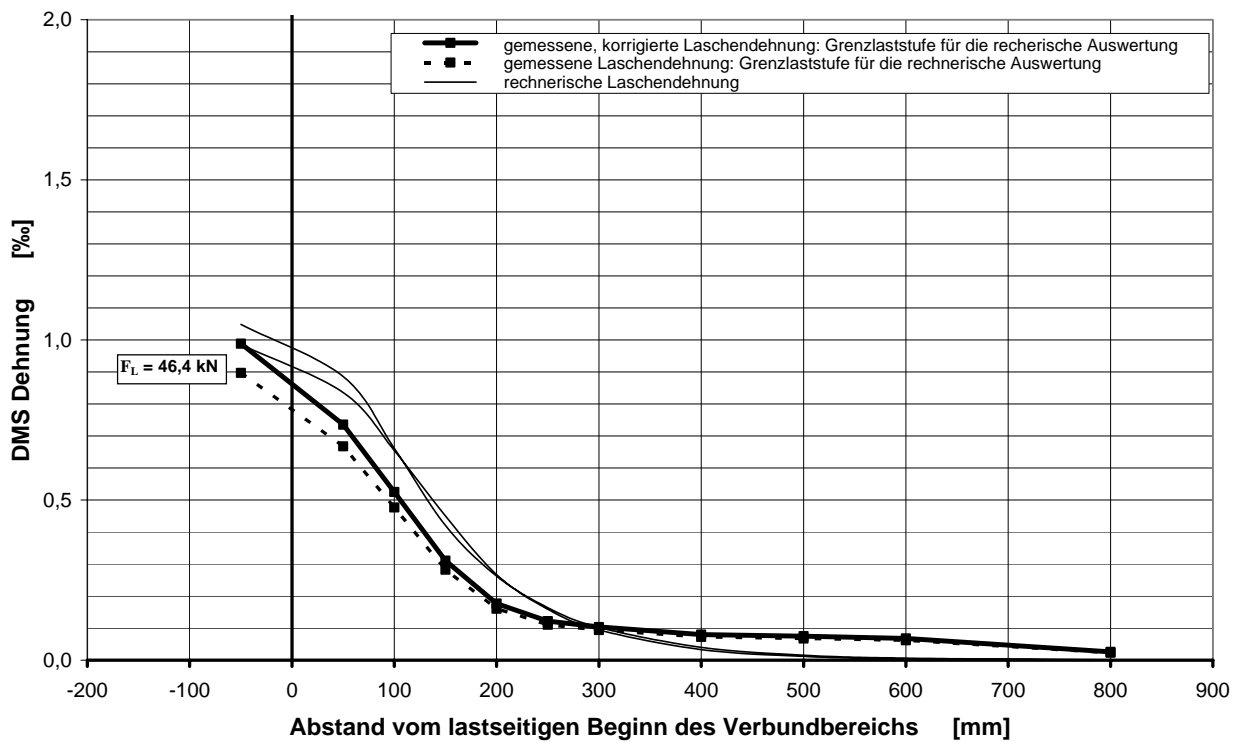
Abb. A 30: Längsdehnungsverteilung bei verschiedenen Laststufen: Versuch 6, Seite D



**Abb. A 31:** Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 1, Seite D



**Abb. A 32:** Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 2, Seite B



**Abb. A 33:** Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 2, Seite D

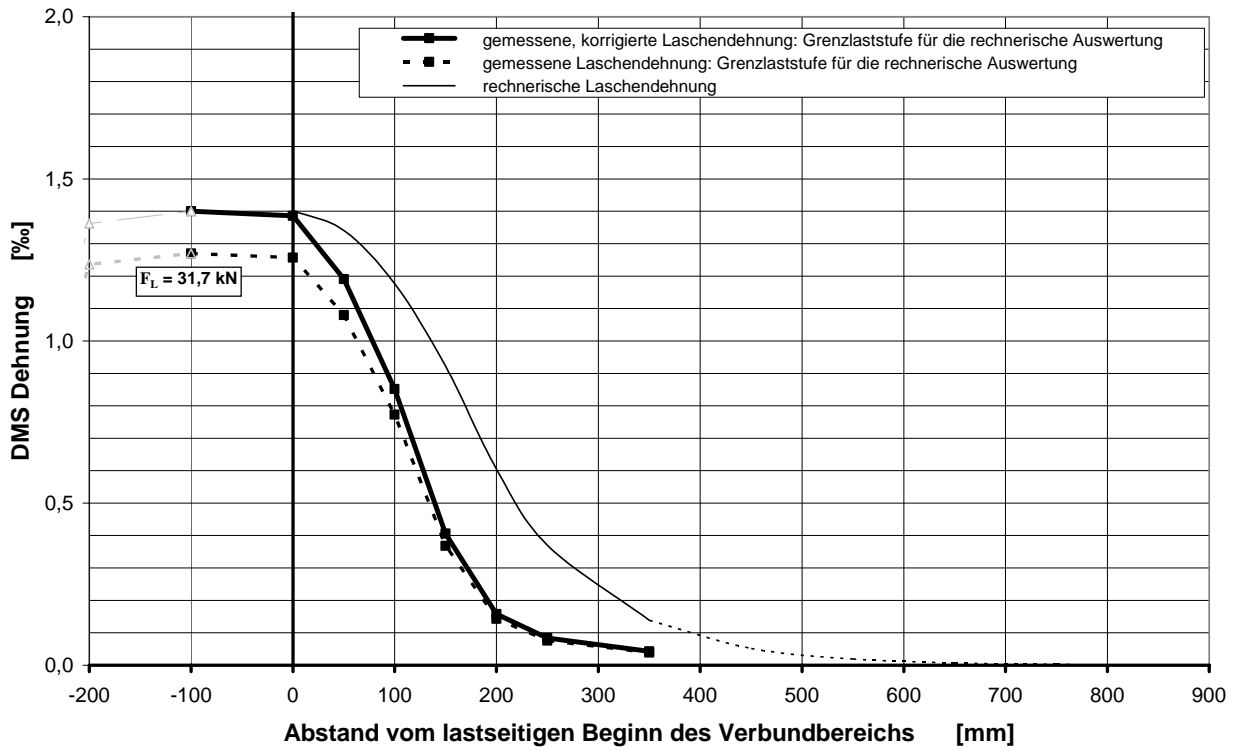


Abb. A 34: Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 3, Seite B

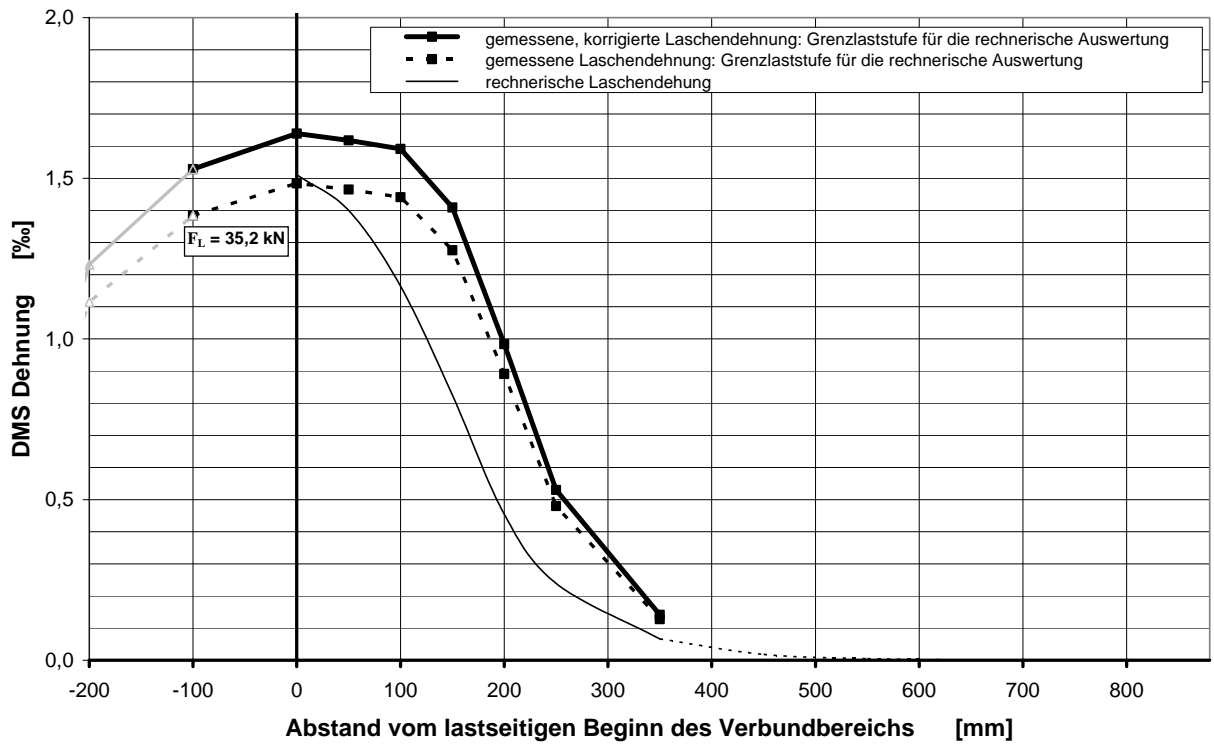


Abb. A 35: Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 3, Seite D

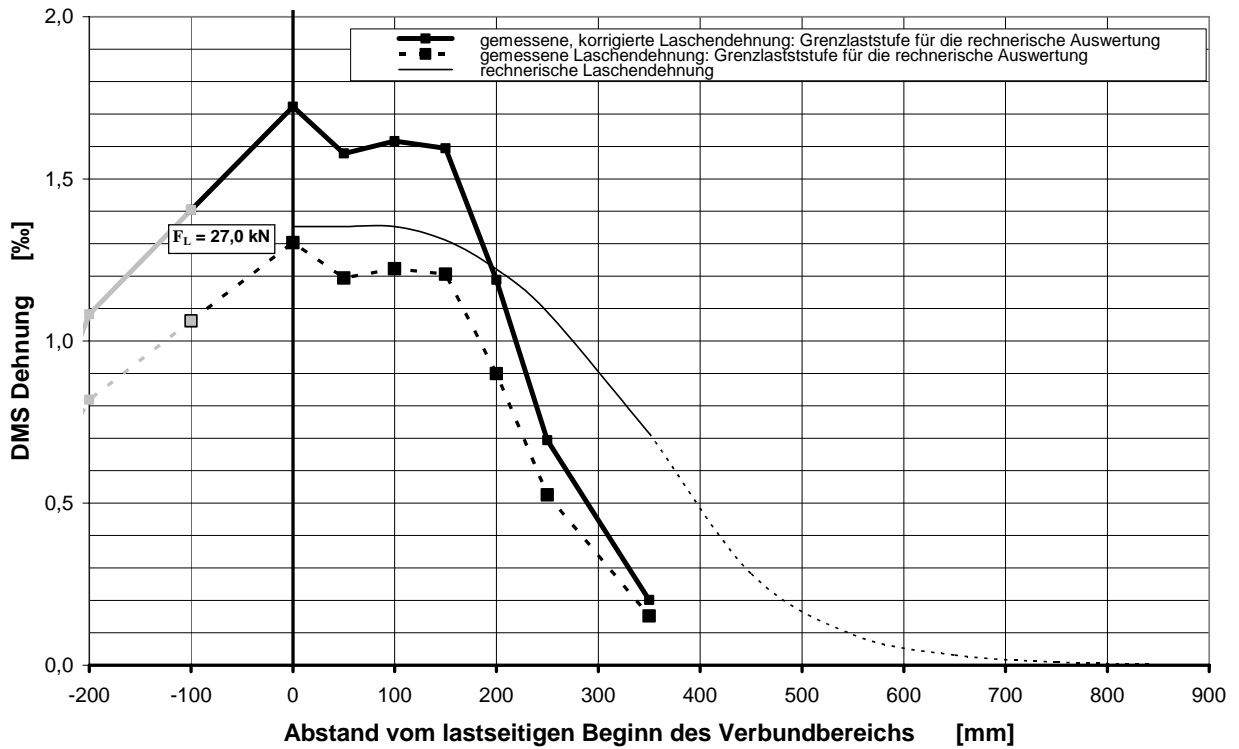


Abb. A 36: Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 4, Seite B

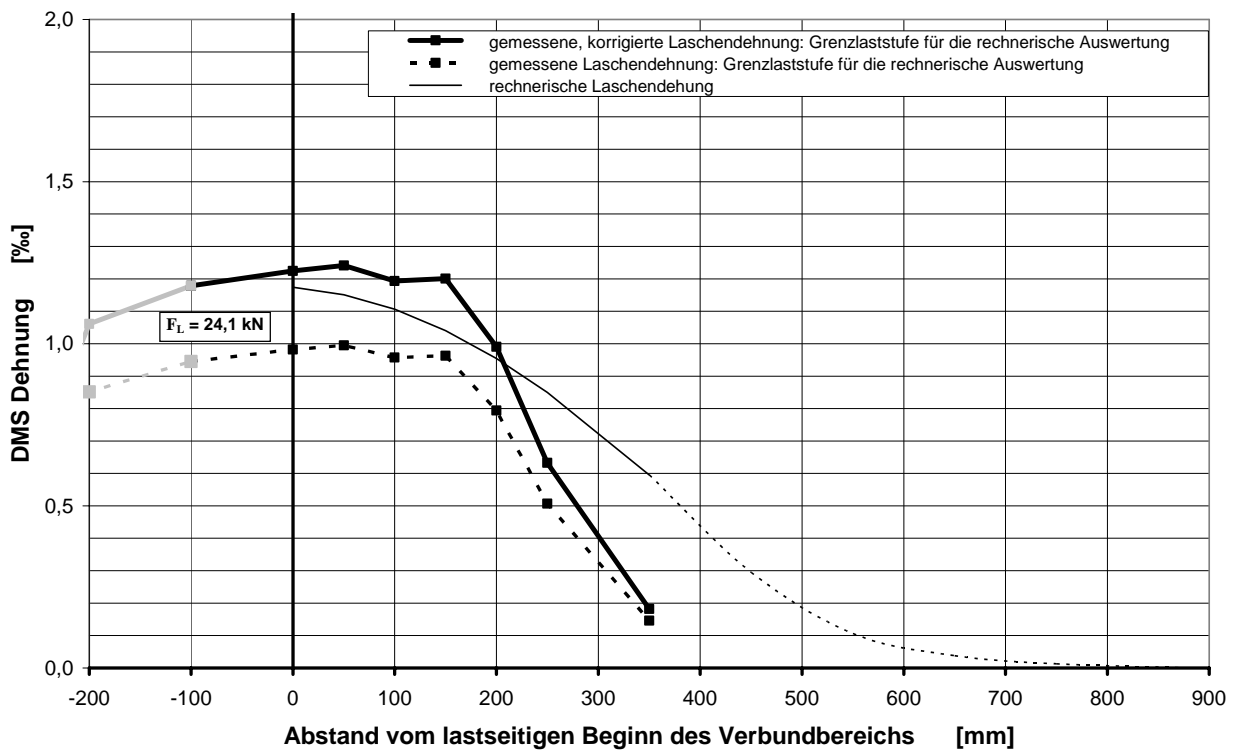
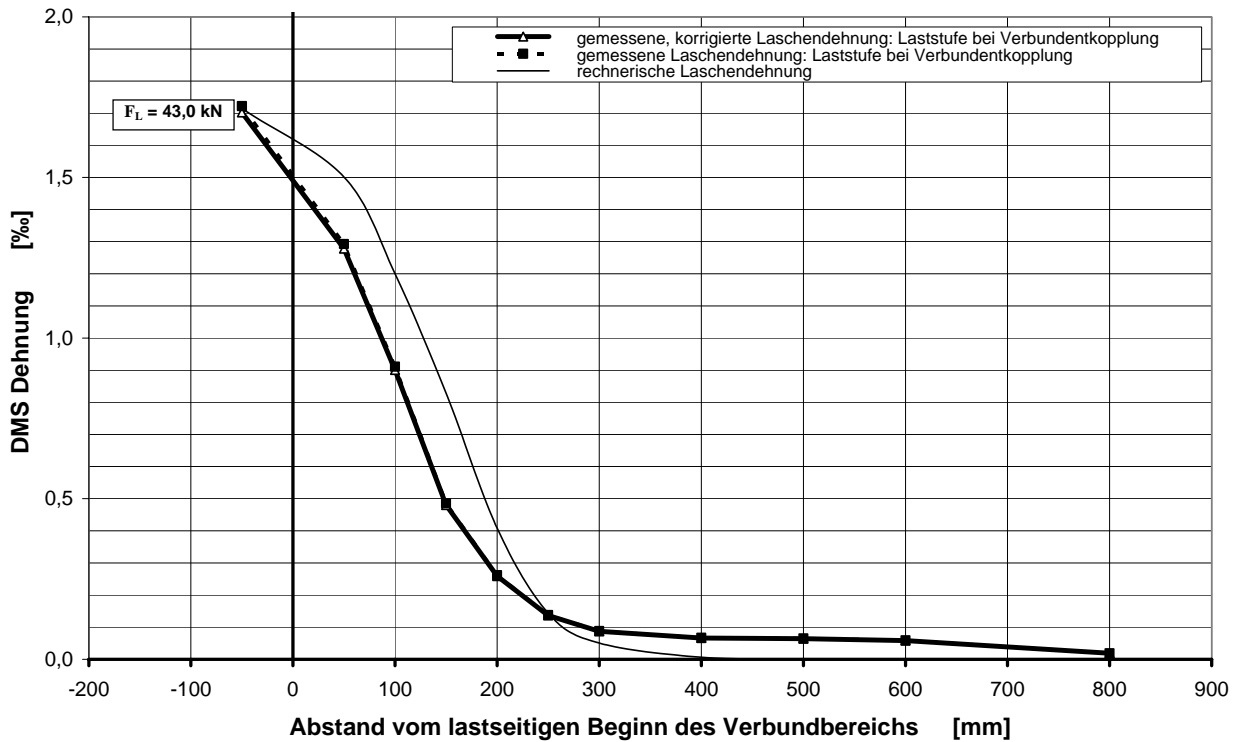
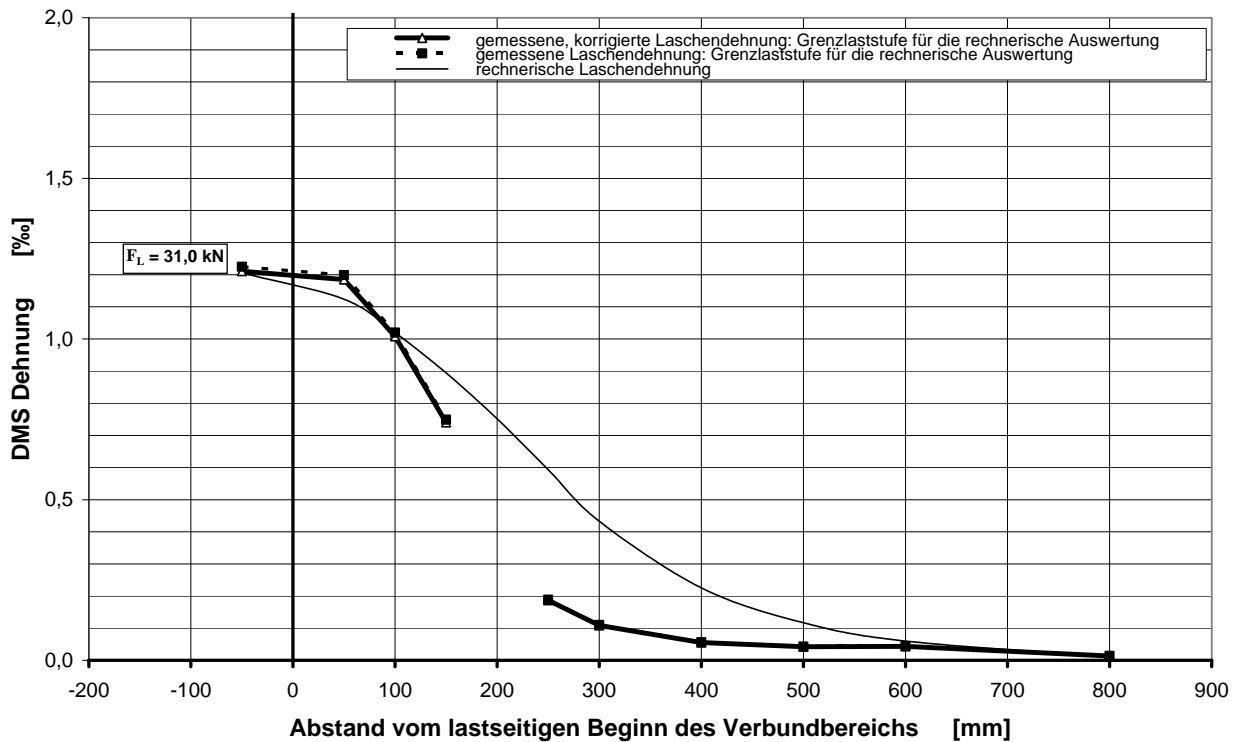


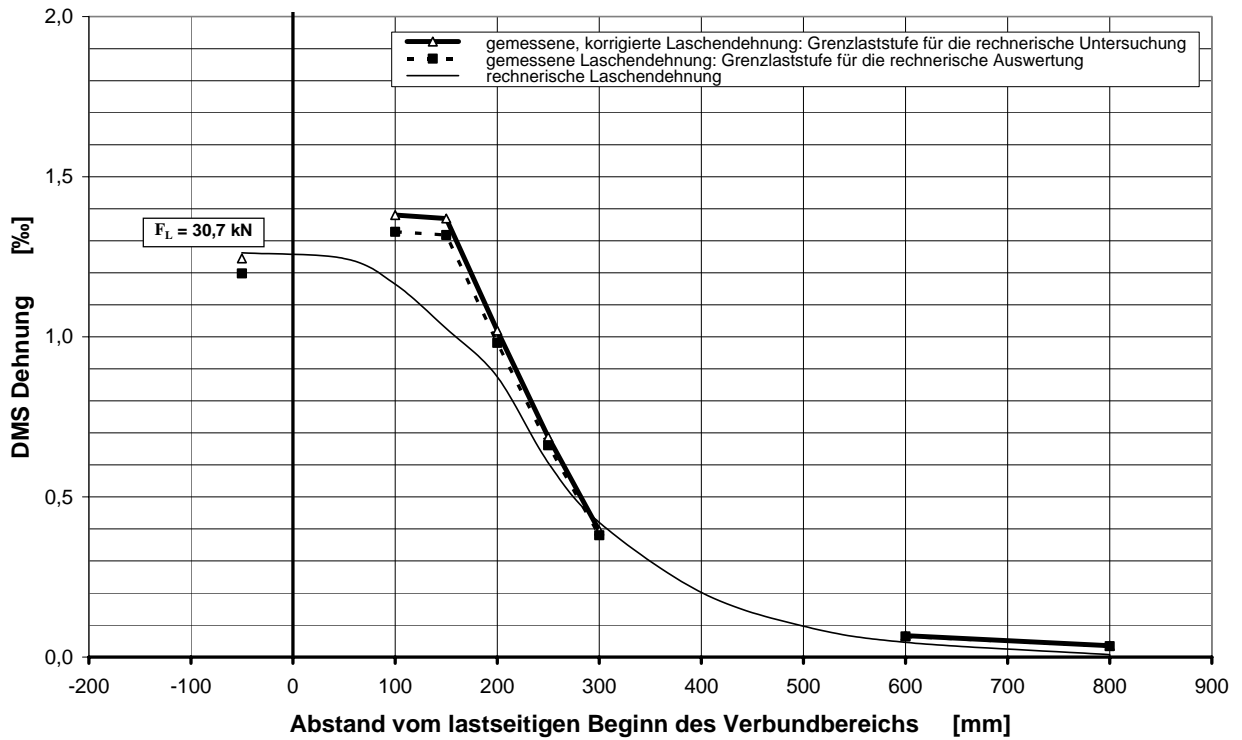
Abb. A 37: Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 4, Seite D



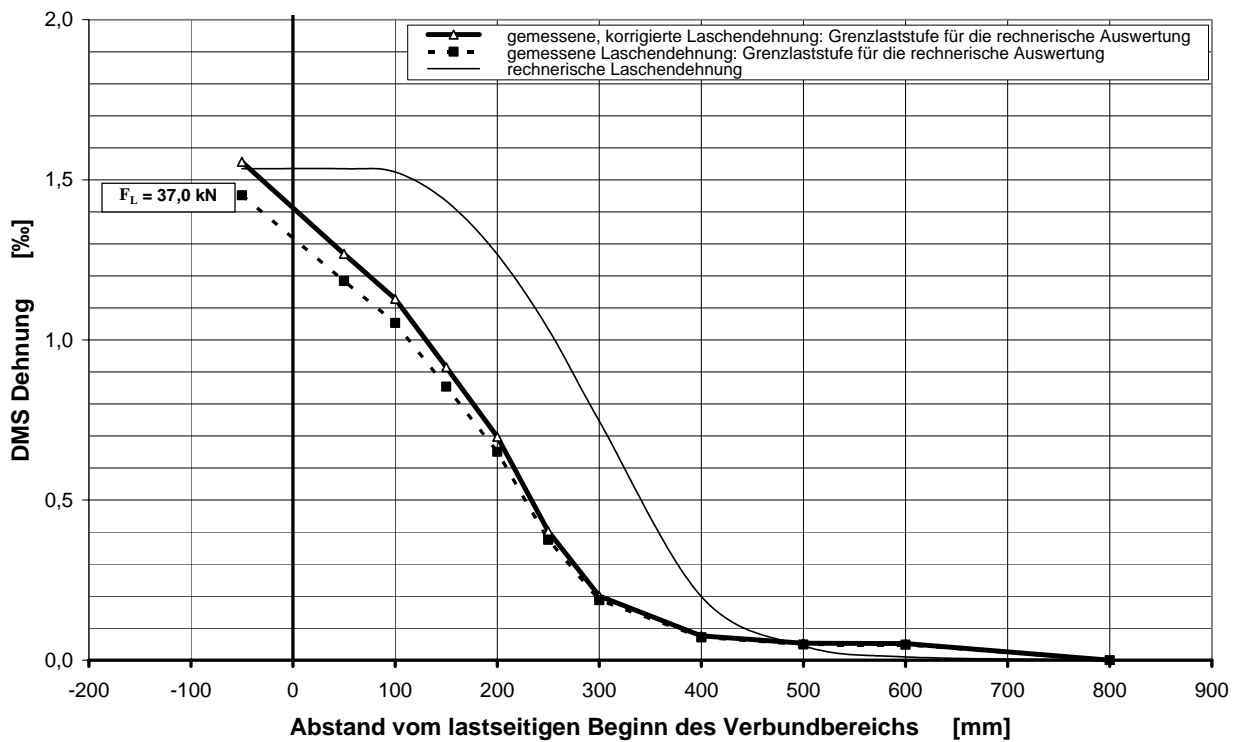
**Abb. A 38:** Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 5, Seite B



**Abb. A 39:** Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 5, Seite D



**Abb. A 40:** Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 6, Seite B



**Abb. A 41:** Vergleich der experimentellen und rechnerischen Dehnungsverteilung über die Verbundlänge: Versuch 6, Seite D

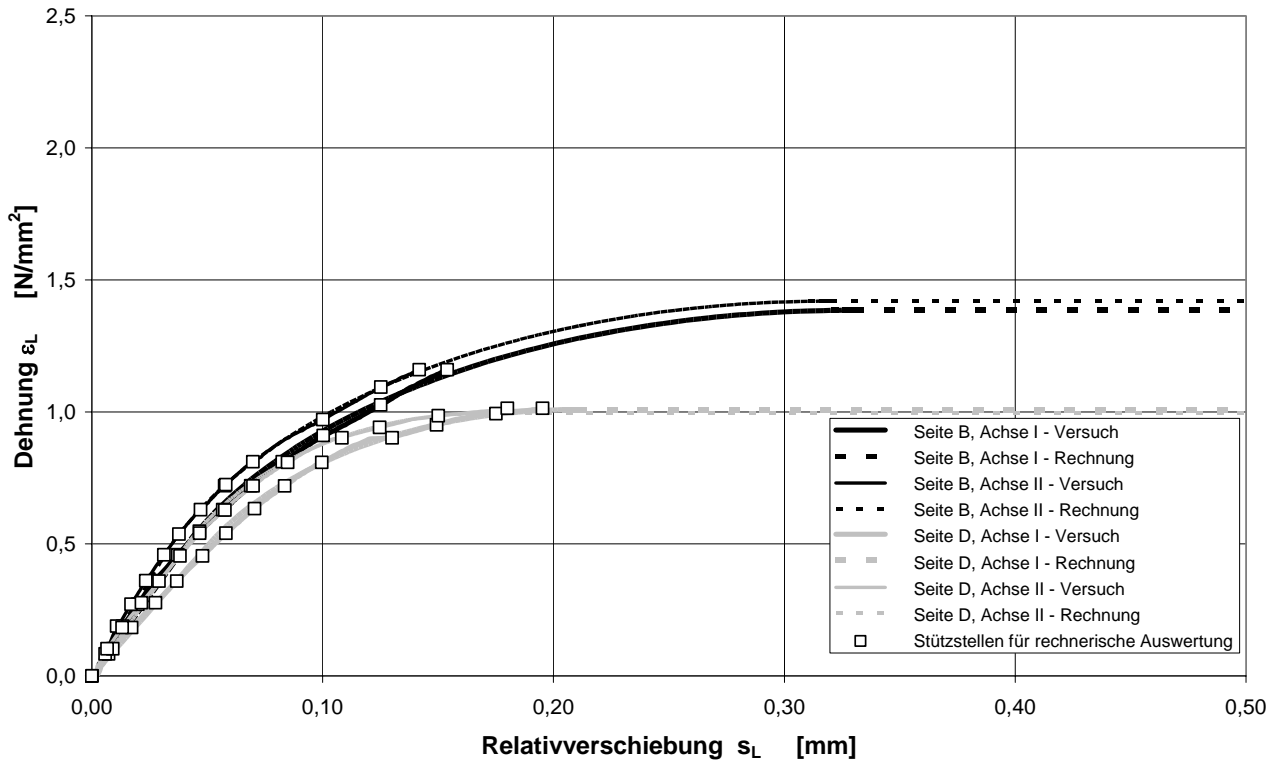


Abb. A 42: Rechnerische Anpassung Versuchskörper 1

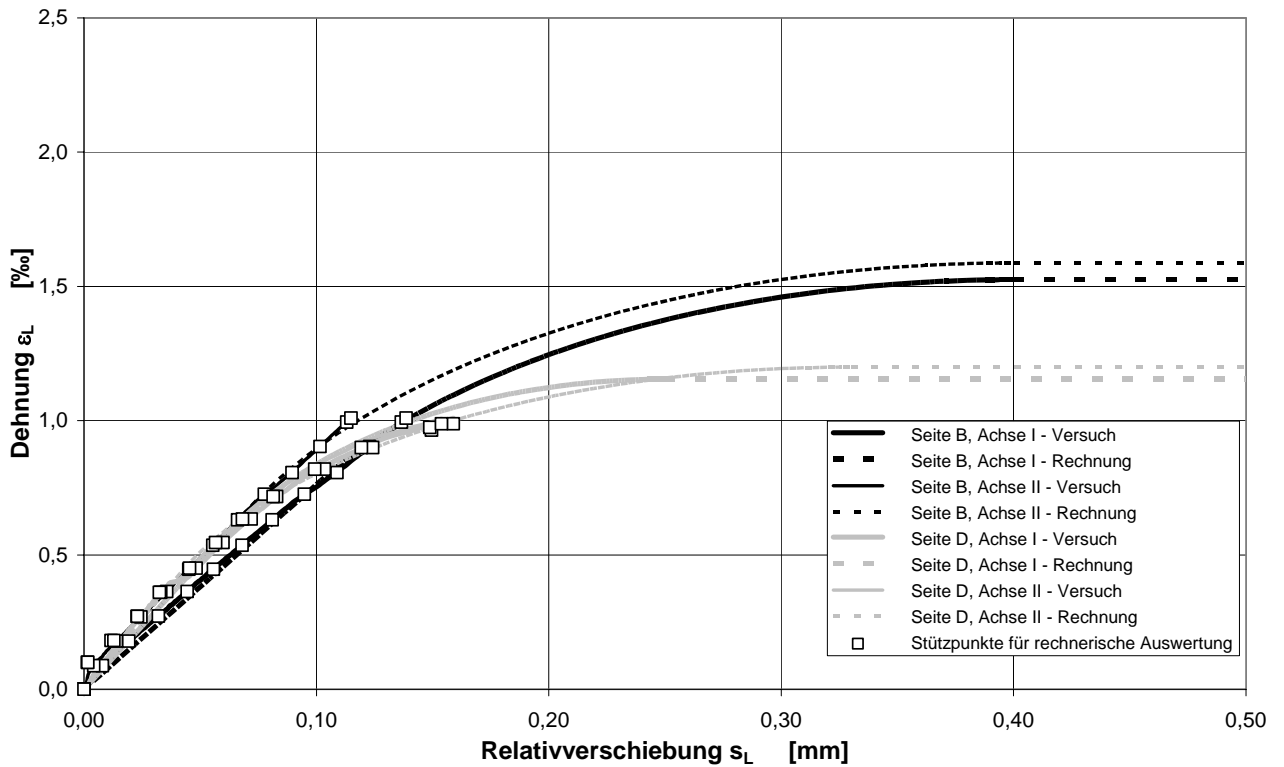


Abb. A 43: Rechnerische Anpassung Versuchskörper 2



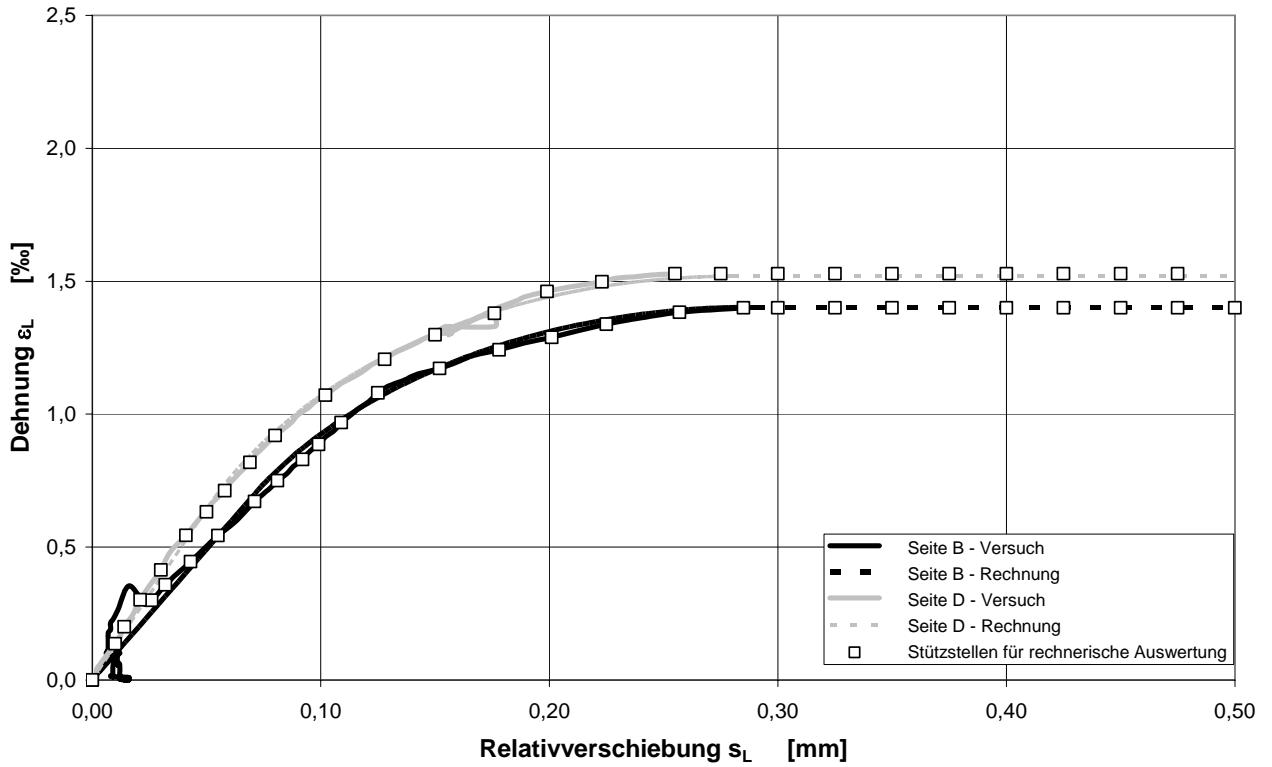


Abb. A 44: Rechnerische Anpassung Versuchskörper 3

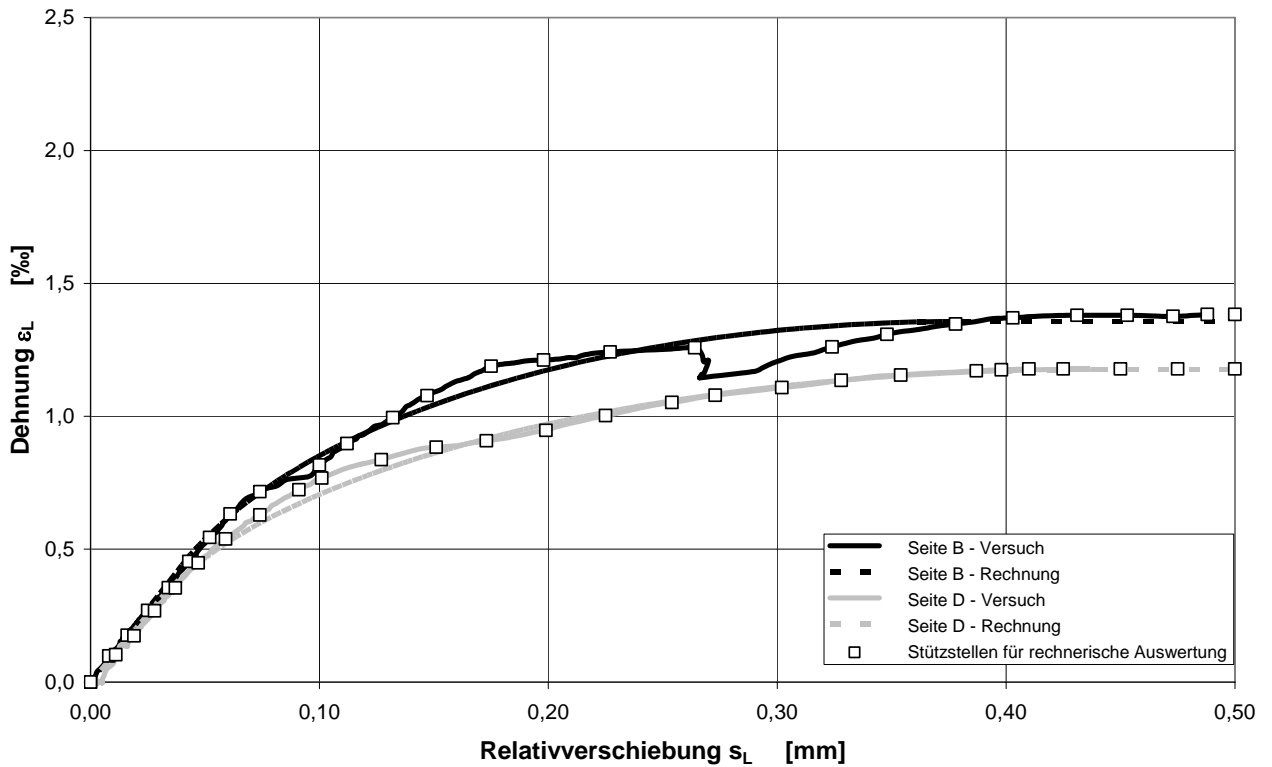


Abb. A 45: Rechnerische Anpassung Versuchskörper 4

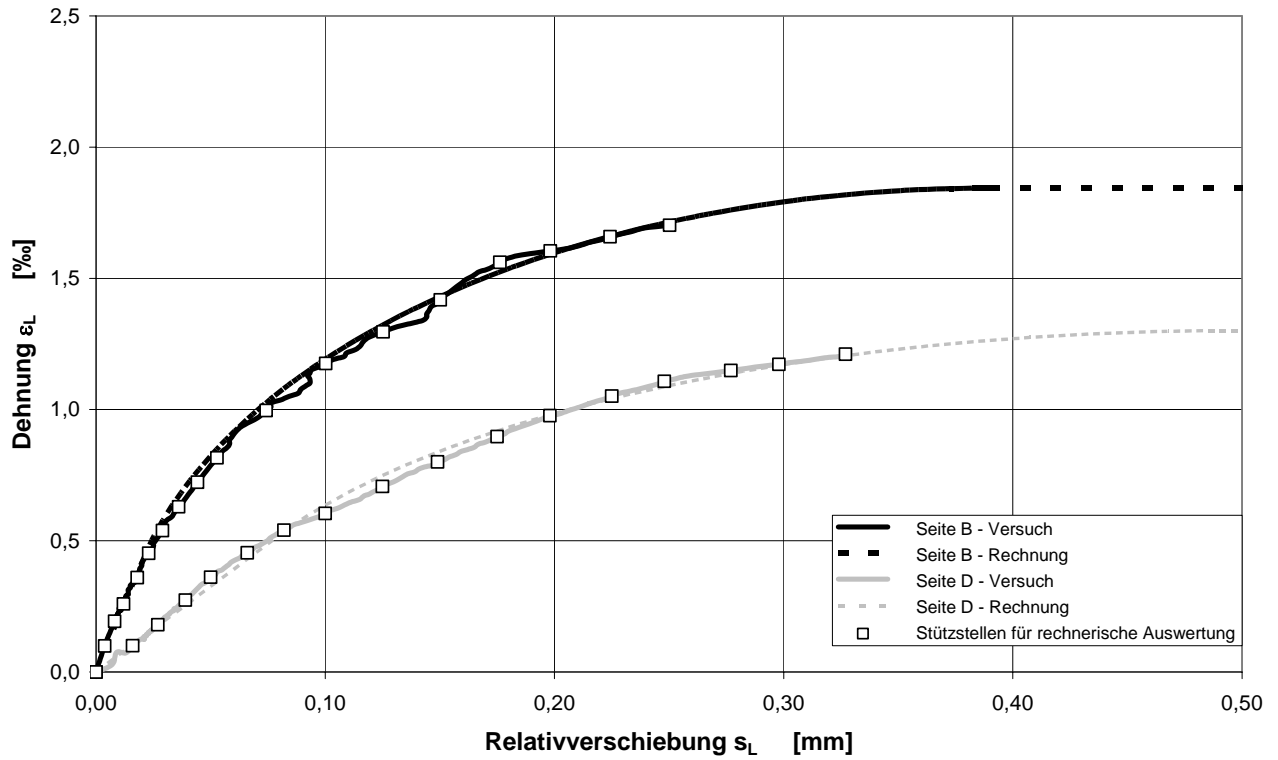


Abb. A 46: Rechnerische Anpassung Versuchskörper 5

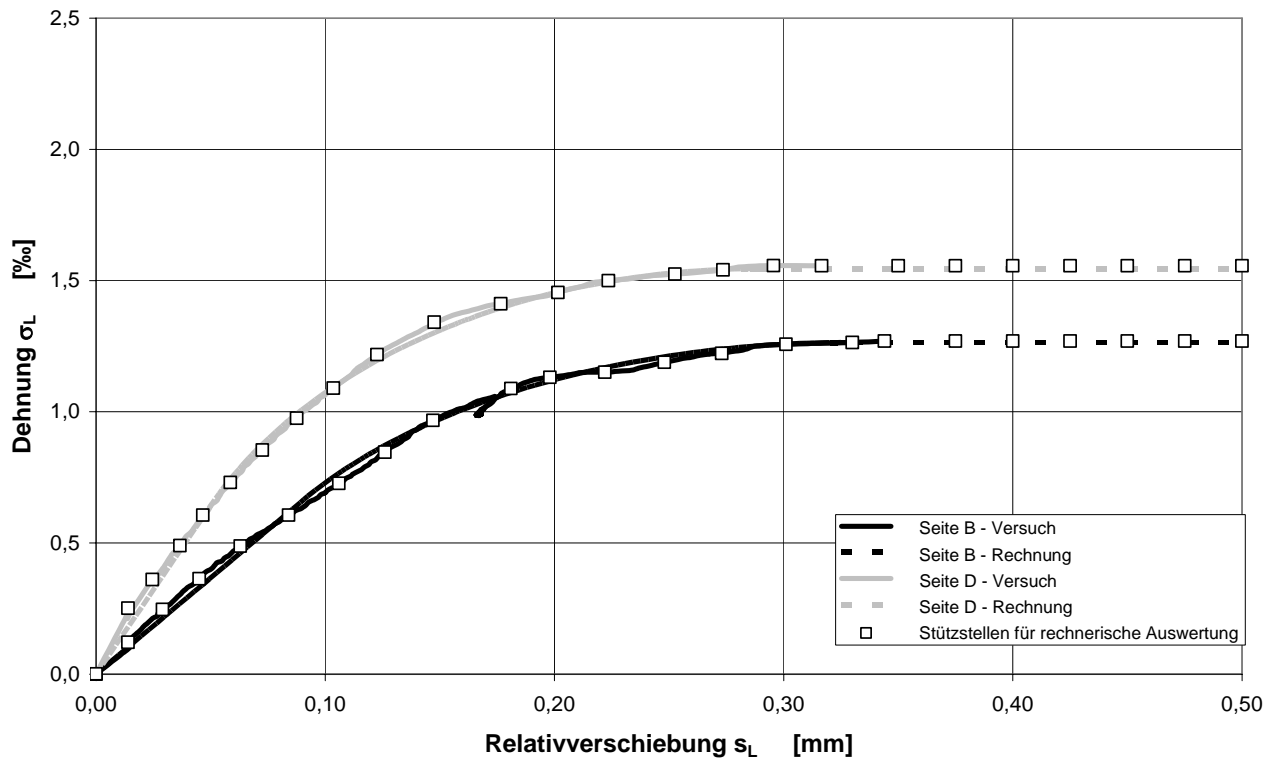


Abb. A 47: Rechnerische Anpassung Versuchskörper 6