

**Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit mit CFK-Lamellen verstärkter Bauteile in Anlehnung an DIN 1045-1**

**T 3091**

T 3091

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.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2005, ISBN 3-8167-6953-5

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

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

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

Dr.-Ing. Christoph Schmidhuber  
Herzog-Heinrich-Ring 3  
84307 Eggenfelden  
08721/120239

Forschungsvorhaben: ZP 52-5- 7.254 – 1172/05

## **Forschungsbericht**

01.08.2005

**Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit  
mit CFK-Lamellen verstärkter Bauteile  
in Anlehnung an DIN 1045-1**

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2. Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung</b>	<b>5</b>
2.1 Allgemeines	5
2.2 Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung	6
<b>3. Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung</b>	<b>8</b>
3.1 Allgemeines	8
3.2 Bestimmung des Druckstrebenwinkels $\theta$	8
<b>4. Zusammenfassende Darstellung</b>	<b>11</b>
<b>5. Literatur</b>	<b>13</b>

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden auf der Grundlage bereits durchgeführter wissenschaftlicher Untersuchungen Grenzwerte für die Querkrafttragfähigkeit mit CFK-Lamellen verstärkter Stahlbetonbauteile für den Anwendungsbereich der DIN 1045-1 formuliert.

## ABSTRACT

Based on results of investigations new limiting values for the shear resistance of R.C. beams strengthened with CFRP-strips are determined for the application of the design standard DIN 1045-1.

## RÉSUMÉ

On a déterminé des valeurs limites pour des éléments de construction en béton armé avec des lamelles CFK collées à l'effort tranchant pour le champ d'application de DIN 1045-1.

## 1. Einleitung

Für die Schubbemessung bzw. -nachweise bei mit CFK - Lamellen verstärkten Stahlbetonbauteilen gelten nach der "Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstofffaserverstärkten Kunststofflamellen (CFK-Lamellen)" [1] im Wesentlichen die gleichen Schubbereichsgrenzen wie in DIN 1045 (7.88) [2]. Eine Verstärkung im Schubbereich 3 darf dabei nicht angewendet werden. Für den Schubnachweis ist der Grundwert  $\tau_v$  der Schubspannung des verstärkten Bauteils im Gebrauchszustand für Vollplatten mit dem Grenzwert  $\tau_{11}(b)$  bzw. für Balken mit dem Grenzwert  $\tau_2$  zu vergleichen. Diese beiden Schubbereichsgrenzen  $\tau_{11}(b)$  und  $\tau_2$  sind dabei direkt aus Tabelle 13 der DIN 1045 (7.88) übernommen. Im rechnerischen Bruchzustand sind nach DIN 1045 (7.88) die Dehnungen des Betonstahls bei der Biegebemessung auf 5 ‰ begrenzt. Im Gegensatz dazu sind in den entsprechenden Zulassungsbescheiden maximal zulässige Dehnungen der CFK-Lamellen bis  $\varepsilon_l \leq 8,5 \text{ ‰}$  angegeben. Aus diesem Grund ist bei Verstärkungsmaßnahmen mit CFK-Lamellen im rechnerischen Bruchzustand mit größeren Dehnungen der einbetonierten Bewehrung und damit größeren Rissbreiten zu rechnen als im konventionellen Stahlbetonbau nach DIN 1045 (7.88).

Im Zuge der Umstellung der Betonbaunorm DIN 1045 (7.88) auf die „neue“ DIN 1045-1 [3] wird eine neue Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von CFK-Lamellen erarbeitet. Im Rahmen dieser Neuformulierung ist auch eine Anpassung des Querkraftkonzeptes in Anlehnung an DIN 1045-1 erforderlich.

Auf der Grundlage bereits durchgeführter umfangreicher wissenschaftlicher Untersuchungen [5][6] sollen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Grenzwerte für die Querkrafttragfähigkeit formuliert und für die Übernahme in die neue Bemessungsrichtlinie in Form von Bemessungsgleichungen aufbereitet werden.

Als wesentliche Grundlage für das Forschungsvorhaben dienen dabei die Erkenntnisse der bereits genannten wissenschaftlichen Studien [5][6], die am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München durchgeführt wurden. Im Rahmen dieser Studien werden neue Grenzwerte für die Schubtragfähigkeit bei der Verstärkung von Stahlbetonplatten und Stahlbetonbalken mit aufgeklebten CFK-Lamellen festgelegt. Die Ergebnisse beziehen sich dabei auf den Anwendungsbereich der „alten“ DIN 1045 mit globalen Sicherheitsfaktoren. Im Rahmen der Dissertation „Neumodellierung des Schubtragverhaltens mit CFK-Lamellen verstärkter Stahlbetonbauteile“ [6] wird exemplarisch aufgezeigt, dass eine Überführung dieser Ergebnisse auf den Anwendungsbereich der neuen Normengeneration mit Teilsicherheitskonzept möglich ist.

Aufbauend auf dieser Arbeit werden im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens im Wesentlichen zwei Punkte behandelt:

1. Für Stahlbetonbauteile ohne innere Querkraftbewehrung (i. A. Platten) wird der Bemessungswert der aufnehmbaren Schubspannung  $v_{Rd,ct}$  in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern (Betonfestigkeit  $f_{ck}$ , Rissabstand  $a_r$ , Lamellendehnung  $\alpha_l$ , Längsbewehrungsgrad  $\mu_l$ ) ermittelt.
2. Für Stahlbetonbauteile mit innerer Querkraftbewehrung (i. A. Balken) wird der für die Querkraftbemessung erforderliche Wert der Druckstrebenneigung  $\theta$  in Abhängigkeit der bereits genannten Parameter bestimmt.

Alle im Rahmen dieses Forschungsvorhabens angegebenen Grenzwerte für die Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit bzw. des Druckstrebenwinkels beziehen sich analog zu den Angaben in [6] auf Bauteilbereiche mit großen Lamellendehnungen ( $\alpha_l \geq 2,5 \text{ ‰}$ ). Für die Querkraftbemessung maßgebend sind dabei Trägerbereiche mit gleichzeitig großer Biege- und Querkraftbeanspruchung (i. A. Stützmomentbereiche).

In [6] wird festgestellt, dass die geringe vom Klebeverbund bis zur vollständigen Ablösung aufnehmbare Energie bei klebarmierten Bauteilen zu einer zusätzlichen Vergrößerung der Rissbreite führt, da es infolge von Ablösungen an den Rissufern nur über kurze Längen hinweg zu einer Mitwirkung des Betons (tension stiffening effect) kommt. Nach durchgeführten Parameterstudien bleibt festzustellen, dass etwa für Lamellendehnungen  $\alpha \geq 2,5 \text{ ‰}$  die Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen vernachlässigbar ist.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgen die Formulierungen im Sprachgebrauch der DIN 1045-1. Es werden keine Aussagen zur Querkrafttragfähigkeit von Leichtbeton (LC) bzw. hochfestem Beton ( $\geq C55/67$ ) getroffen.

## 2. Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung

### 2.1. Allgemeines

Für Bauteile ohne Querkraftbewehrung wird in [6] ein Modell hergeleitet, mit dem die Querkrafttragfähigkeit unter Berücksichtigung der Rissbildung bei klebarmierten Bauteilen für den Anwendungsbereich der DIN 1045 (7.88) bestimmt werden kann. Im Rahmen umfangreicher Parameterstudien werden für baupraktisch relevante Wertebereiche Diagramme erzeugt, mit deren Hilfe in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit  $\beta_w$ , vom Längsbewehrungsgrad  $\mu$  der Betonstahlbewehrung und vom Rissabstand  $a_r$  die Grenzwerte der aufnehmbaren Schubspannung  $\tau_{max}$  unter Gebrauchslast (charakteristische Last) bestimmt werden können.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden im Folgenden die Werte der Querkrafttragfähigkeit ohne innere Querkraftbewehrung  $V_{Rd,ct}$  in Diagrammform bzw. als Gleichung für den Anwendungsbereich der DIN 1045-1 hergeleitet. Die Ergebnisse beziehen sich dabei wie bereits oben beschrieben ausschließlich auf Bereiche mit großen Lamellendehnungen ab  $\varepsilon_L \geq 2,5$  ‰. Bei Anwendung der angegebenen Gleichungen auf Querkraftbereiche mit kleineren Lamellendehnungen erhält man weit auf der sicheren Seite liegende und damit unwirtschaftliche Bemessungsergebnisse.

Stahlbetonbiegeträger ohne Schubbewehrung weisen ein sprödes Querkrafttragverhalten auf. Ein Versagen auf Querkraft tritt in der Regel ohne Vorankündigung ein. Als globaler Sicherheitsbeiwert wird aus diesem Grund für die folgenden Betrachtungen  $\gamma_{Global} = 2,1$  angesetzt. Unter Annahme eines mittleren Sicherheitsbeiwertes für die Einwirkungen von  $\gamma_E = 1,4$  ergibt sich somit für die Materialseite ein Sicherheitsbeiwert von  $\gamma_C = 2,1/1,4 = 1,5$ . Dieser wird bei den im Folgenden hergeleiteten Bemessungsgleichungen bzw. -diagrammen berücksichtigt.

Der Anteil der Dübelwirkung der einbetonierten Biegelängsbewehrung an der gesamten aufnehmbaren Querkraft ist relativ gering (max. 10 bis 15 %). Bei großen Rissabständen  $a_r$  und damit einhergehenden großen Rissgleitungen geht der Traganteil der Dübelwirkung auf null zurück. Aus diesem Grund wird vereinfachend auf der sicheren Seite liegend für Bauteile ohne innere Querkraftbewehrung der Wert des Längsbewehrungsgrades  $\mu$  konstant mit  $\mu = 0,005$  angesetzt. Der Wert der Würfeldruckfestigkeit  $\beta_w$  bezieht sich in [6] auf Betonwürfel mit einer Kantenlänge  $a = 200$  mm (analog zur DIN 1045 (7.88)). Die Umrechnung auf die im Rahmen der neuen DIN 1045-1 bzw. DIN 1045-2 [4] gebräuchlichen Betonwürfel mit der Kantenlänge  $a = 150$  mm erfolgt mit  $\beta_{w,200} = 0,95 \cdot \beta_{w,150}$ .

Die in [6] hergeleiteten Beziehungen bzw. erzeugten Bemessungsdiagramme können uneingeschränkt für Lamellendehnungen  $\varepsilon_L = 8,5$  ‰ angewendet werden. Vordehnungen des Betonstahls bzw. vorhandene Risse während der Applikation der Lamellen sind in den Diagrammen nicht berücksichtigt. Bei der Mehrzahl der Verstärkungsmaßnahmen werden in der Baupraxis Feldbereiche verstärkt. Da für diesen Anwendungsfall der für die Querkraftbemessung maßgebende Randbereich meist ungerissen ist (Zustand I), braucht eine Vordehnung des Betonstahls rechnerisch nicht berücksichtigt zu werden. Für den Fall der Stützbereichverstärkung können die hergeleiteten Diagramme bzw. Bemessungsgleichungen auch unter Ansatz der Vordehnung des Betonstahls im Riss zum Zeitpunkt der Verklebung angewendet werden. Dafür ist ein modifizierter Rissabstand  $a_{r,mod}$  entsprechend Gleichung (2.1) zu ermitteln. Zusätzlich ist mit (2.1) auch die Möglichkeit gegeben, von  $\varepsilon_L = 8,5$  ‰ abweichende Lamellendehnungen anzusetzen.

$$a_{r,mod} = a_r \cdot \frac{\varepsilon_L}{0,0085} + \frac{w_{f=0}}{0,0085} \quad (2.1)$$

Der in Gleichung (2.1) angegebene erste Summand berücksichtigt eine von  $\varepsilon_L = 8,5$  ‰ abweichende Lamellendehnung. Mit dem zweiten Summand wird eine zum Zeitpunkt der

Verklebung bereits vorhandene Rissbreite  $w_{I=0}$  berücksichtigt. Die Ermittlung dieses Wertes kann entweder durch Messen der Rissbreite am Bauteil selbst oder mit üblichen Verfahren der Rissbreitenberechnung im Stahlbetonbau erfolgen.

Bei der Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit  $V_{Rd,ct}$  mithilfe von Abbildung 2.1 und Gleichung (2.5) ist bei einer Berücksichtigung der Vordehnung der Bewehrung bzw. bei einer von  $\epsilon_L = 8,5 \text{ ‰}$  abweichenden Lamellendehnung als Eingangswert anstelle des Wertes  $a_r$  der modifizierte Rissabstand  $a_{r,mod}$  anzusetzen.

Analog zu den Angaben in [6] wird für die Bestimmung des Rissabstands  $a_r$  auf die wissenschaftlichen Untersuchungen von *Niedermeier* verwiesen. In seiner Dissertation [7] leitet er ein Verfahren her, mit welchem der Rissabstand bei klebarmierten Bauteilen ermittelt werden kann.

## 2.2. Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung

Basierend auf den in Abschnitt 2.1 getroffenen Berechnungsannahmen wird im vorliegenden Forschungsvorhaben für Lamellendehnungen  $\epsilon_L \geq 2,5 \text{ ‰}$  die Querkrafttragfähigkeit als aufnehmbare Schubspannung analog zum Vorgehen in [6] bestimmt. Die Grenztragfähigkeit wird dabei durch den Bemessungswert der aufnehmbaren Schubspannung mit

$$v_{Rd,ct} = \frac{V_{Rd,ct}}{b_w \cdot z_m} \quad (2.2)$$

ausgedrückt. Der Bemessungswert des Bauteilwiderstands  $V_{Rd,ct}$  und somit die Grenztragfähigkeit ergibt sich zu:

$$V_{Rd,ct} = v_{Rd,ct} \cdot b_w \cdot z_m \quad (2.3)$$

Im Allgemeinen darf näherungsweise der mittlere innere Hebelarm mit  $z_m = 0,9 \cdot d$  ( $d$  = statische Nutzhöhe) angenommen werden. Mit  $b_w$  wird die kleinste Querschnittsbreite bezeichnet.

Zusätzlich sollte als oberer Grenzwert der Querkrafttragfähigkeit der sich in Anlehnung an Gleichung (70) der DIN 1045-1 ergebende Wert  $V_{Rd,ct}$  angesetzt werden. Damit folgt als Bemessungsgleichung:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,ct} = v_{Rd,ct} \cdot b_w \cdot z_m \leq V_{Rd,ct,DIN1045-1} = 0,1 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_L \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (2.4)$$

Der Bemessungswert  $v_{Rd,ct}$  ist in Abbildung 2.1 in Abhängigkeit vom Rissabstand  $a_r$  bzw.  $a_{r,mod}$  nach Gleichung (2.1) sowie von der Betonfestigkeitsklasse dargestellt. Alternativ dazu ist mit Gleichung (2.5) eine Formel zur Berechnung des Grenzwertes  $v_{Rd,ct}$  angegeben. Dabei wurden die in Abbildung 2.1 angegebenen Graphen als Polynom 4. Grades angenähert. Gleichung (2.5) ist gültig für Rissabstände  $a_r$  bzw.  $a_{r,mod} \leq 1,0$  m. Bei der Ermittlung des Wertes  $v_{Rd,ct}$  mithilfe von Abbildung 2.1 bzw. Gleichung (2.5) ist bei einer Berücksichtigung der Vordehnung der Bewehrung bzw. bei einer von  $\epsilon_L = 8,5 \text{ ‰}$  abweichenden Lamellendehnung als Eingangswert anstelle des Wertes  $a_r$  der modifizierte Rissabstand  $a_{r,mod}$  anzusetzen.

$$v_{Rd,ct} = f_{ck} \cdot (0,3129 \cdot a_r^4 - 0,8216 \cdot a_r^3 + 0,7847 \cdot a_r^2 - 0,3308 \cdot a_r + 0,0591) - 3,8925 \cdot a_r^4 + 9,0611 \cdot a_r^3 - 7,0426 \cdot a_r^2 + 1,9275 \cdot a_r - 0,0435 \quad (2.5)$$



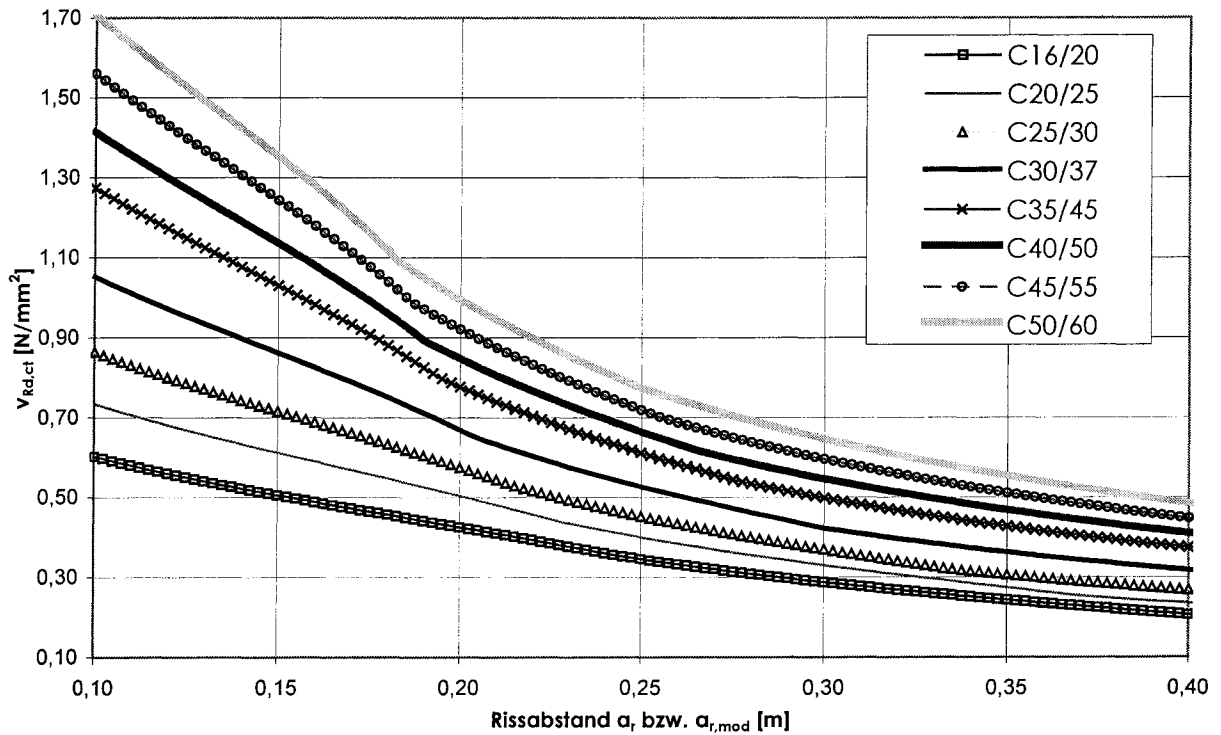


Abbildung 2.1: Bemessungswert  $v_{Rd,ct}$

Die sehr gute Übereinstimmung von Gleichung (2.5) mit der exakten Lösung in Abbildung 2.1 zeigt Abbildung 2.2 exemplarisch für die Festigkeitsklassen C16/20, C25/30, C35/45 sowie C45/55.

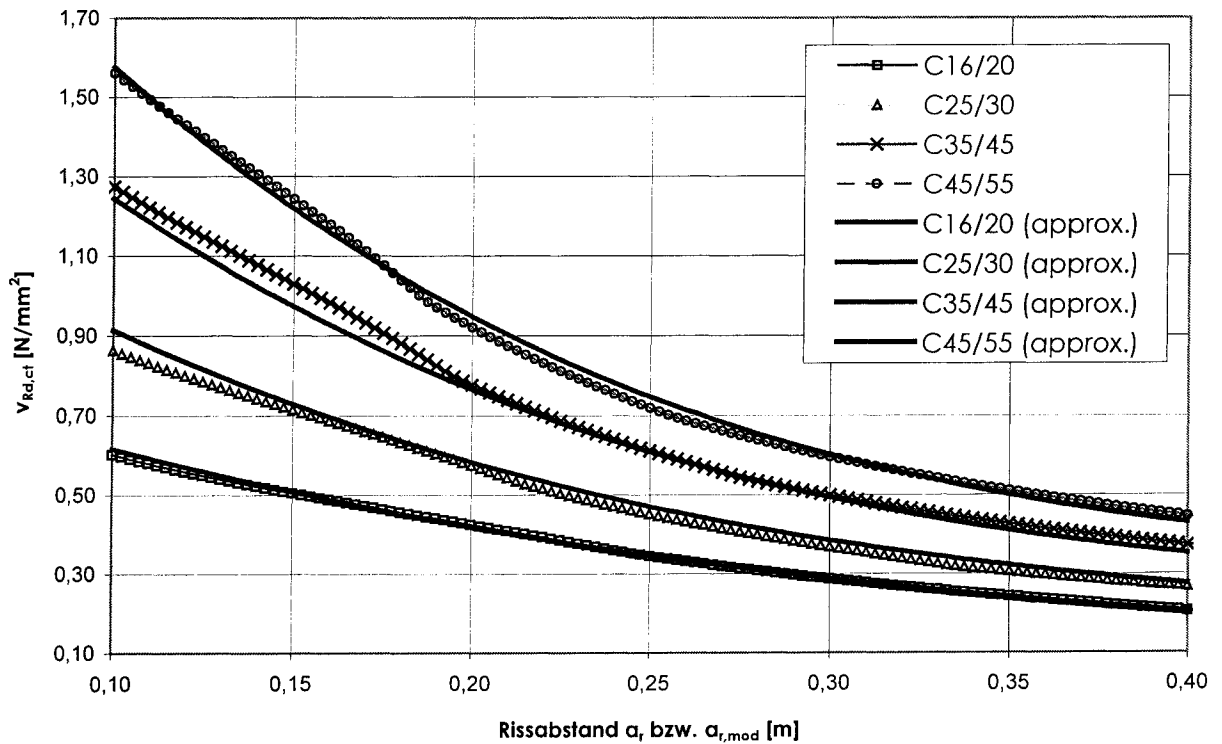


Abbildung 2.2: Bemessungswert  $v_{Rd,ct}$  nach Gleichung (2.5)

### 3. Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung

#### 3.1. Allgemeines

Nach den bisherigen Regelungen der Richtlinie für das Verstärken von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen durch schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen [1] ist eine verminderte Schubdeckung im Sinne der DIN 1045 (7.88) zulässig. Als oberer Grenzwert der Schubspannungen ist der Wert  $\tau_2$  entsprechend DIN 1045 (7.88) festgelegt. In [6] wird überprüft, ob der Ansatz der verminderten Schubdeckung unter Berücksichtigung großer Rissbreiten bei klebarmierten Bauteilen gerechtfertigt ist. Dabei wird festgestellt, dass die bisherigen Regelungen der verminderten Schubdeckung im Sinne der DIN 1045 (7.88) für den Anwendungsbereich klebarmierter Bauteile unter bestimmten Randbedingungen auf der unsicheren Seite liegen. Im Rahmen umfangreicher Parameterstudien werden in [6] Grenzwerte  $\nu$  festgelegt, die den für eine bestimmte Schubspannung  $\tau$  rechnerisch möglichen Rissverzahnungsanteil am Querkraftabtrag und damit die Höhe der zulässigen verminderten Schubdeckung bestimmen.

Mit der Gleichung

$$\Delta\tau = \nu \cdot \tau_0 \quad (3.1)$$

wird der durch Rissverzahnung getragene Querkraftanteil berechnet. Der Winkel der geneigten Druckstreben im Fachwerkmodell ergibt sich zu

$$\theta = \arctan(1 - \nu). \quad (3.2)$$

In [6] wird exemplarisch die Übertragbarkeit des hergeleiteten Modells auf den Anwendungsbereich der DIN 1045-1 aufgezeigt. Im Nachweiskonzept der DIN 1045-1 wird die erforderliche Querkraftbewehrung bei Anordnung von senkrechten Bügeln durch Gegenüberstellen des Bemessungswerts des Bauteilwiderstands  $V_{Rd,sy}$  und des Bemessungswerts der Einwirkungen  $V_{Ed}$  mit Gleichung (3.3) ermittelt.

$$V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot \cot\theta \geq V_{Ed} \quad (3.3)$$

Neben dem inneren Hebelarm  $z$  und dem Bemessungswert der Streckgrenzenspannung  $f_{yd}$  des Betonstahls wird bei der Ermittlung der erforderlichen Querkraftbewehrung die Druckstrebenneigung  $\theta$  berücksichtigt.

Für die Berechnung der Rissverzahnungskomponente am Querkraftabtrag wird analog zum Vorgehen in Abschnitt 2 ein globaler Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{Global} = 2,1$  angesetzt. Unter Annahme eines mittleren Sicherheitsbeiwertes für die Einwirkungen von  $\gamma_E = 1,4$  ergibt sich somit für die Materialseite ein Sicherheitsbeiwert von  $\gamma_C = 2,1/1,4 = 1,5$ . Dieser wird bei den im Folgenden dargestellten Bemessungsgleichungen bzw. -diagrammen berücksichtigt.

Aufgrund der komplexen Versagensmechanismen (Verbundbruch, Abhebeln der Lamellen durch Rissversatz, Lamellenbruch etc.) klebarmierter Bauteile ist eine pauschale Festlegung eines oberen Grenzwertes, der wirtschaftliche Ergebnisse zulassen soll, ohne weitere Untersuchungen derzeit nicht möglich. Auf der sicheren Seite liegend ist nach den bisherigen Erfahrungen bei klebarmierten Bauteilen mit innenliegender Querkraftbewehrung eine Übernahme des auf den Anwendungsbereich der DIN 1045-1 umformulierten Grenzwertes  $\tau_{02}$  nach DIN 1045 (7.88) als obere Grenze möglich.

#### 3.2. Bestimmung des Druckstrebenwinkels $\theta$

Im Folgenden wird analog zu den Ergebnissen der Parameterstudien in [6] in Abhängigkeit vom Bemessungswert der Einwirkungen  $V_{Ed}$ , von der Betonfestigkeitsklasse und vom Rissabstand  $a_r$  bzw.  $a_{r,mod}$  der rechnerisch über Rissverzahnung abtragbare Querkraftanteil  $\nu$  bestimmt. Mit Gleichung (3.2) kann anschließend der Druckstrebenwinkel  $\theta$  ermittelt werden.

Die Ergebnisse beziehen sich wie bereits oben beschrieben ausschließlich auf Bereiche mit Lamellendehnungen ab  $\epsilon_L \geq 2,5 \text{ ‰}$ . Bei Anwendung der angegebenen Gleichungen auf Querkraftbereiche mit kleineren Lamellendehnungen erhält man weit auf der sicheren Seite liegende und damit unwirtschaftliche Bemessungsergebnisse.

Analog zu den Angaben in DIN 1045-1 wird als minimaler Druckstrebenwinkel

$$\theta \geq 18,4^\circ \quad (\text{d.h. } \cot \theta \leq 3,0) \quad (3.4)$$

angesetzt. Bei der Ermittlung des Druckstrebenwinkels  $\theta$  mithilfe von Gleichung (3.6) ist bei einer Berücksichtigung der Vordehnung der Bewehrung bzw. bei einer von  $\epsilon_L = 8,5 \text{ ‰}$  abweichenden Lamellendehnung als Eingangswert anstelle des Wertes  $\alpha_r$  der modifizierte Rissabstand  $\alpha_{r,mod}$  nach Gleichung (2.1) anzusetzen.

In Abbildung 3.1 ist exemplarisch für die Betonfestigkeitsklasse C20/25 der ermittelte Zusammenhang zwischen  $v_{Ed}$  und dem oben beschriebenen Beiwert  $v$  in Abhängigkeit vom Rissabstand  $\alpha_r$  bzw.  $\alpha_{r,mod}$  dargestellt. Die einwirkende bezogene Größe  $v_{Ed}$  berechnet sich dabei analog zum Grundwert der Schubspannung  $\tau$  nach DIN 1045 (7.88) mit

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z_m} \quad (3.5)$$

Dabei bezeichnet  $z_m$  den mittleren Hebelarm der inneren Kräfte (Berechnung näherungsweise mit  $z_m = 0,9 \cdot d$ ). Mit  $b_w$  wird die kleinste Querschnittsbreite bezeichnet.

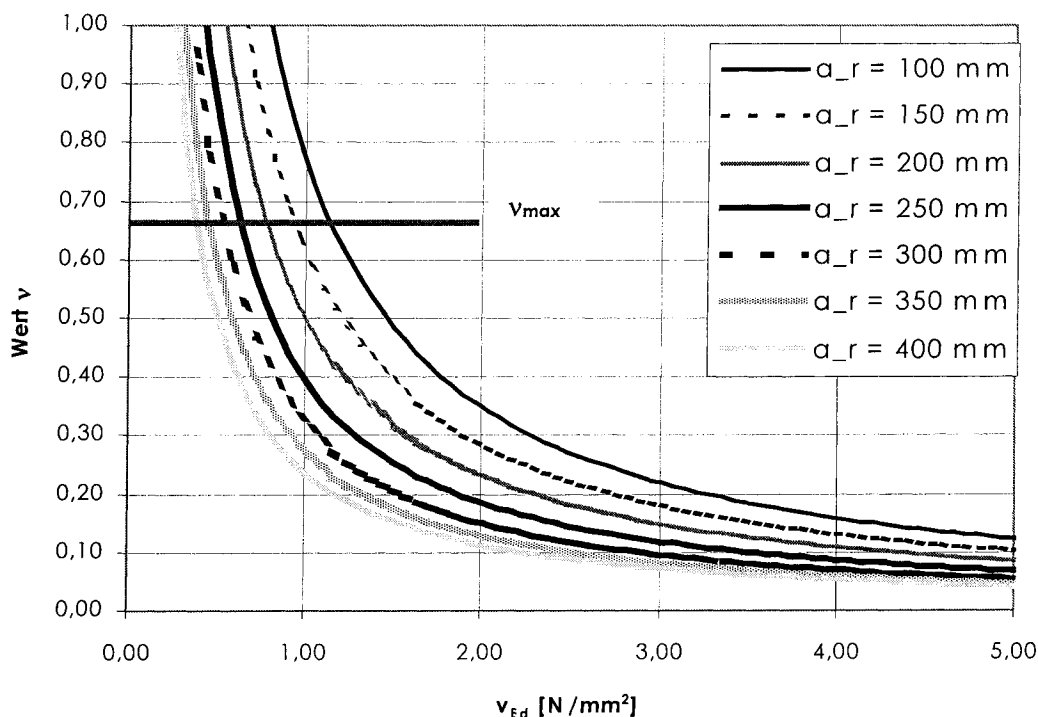


Abbildung 3.1: Beiwert  $v$  für  $\epsilon_L = 8,5 \text{ ‰}$ , C20/25

Zusätzlich ist in Abbildung 3.1 der sich für den minimal zulässigen Druckstrebenwinkel  $\theta = 18,4^\circ$  ergebende Beiwert  $v_{max} = (1 - \tan 18,4^\circ) = 0,67$  als obere Grenze dargestellt.

Die in Abbildung 3.1 exemplarisch für die Betonfestigkeitsklasse C20/25 dargestellte Beziehung zwischen der Einwirkung  $v_{Ed}$  und dem Wert  $v$  kann allgemeingültig in Abhängigkeit vom Rissabstand  $\alpha_r$  bzw.  $\alpha_{r,mod}$ , von der Betonfestigkeitsklasse und der Lamellendehnung  $\epsilon_L$  mit Gleichung (3.6) berechnet werden.

$$v = (0,0031 \cdot f_{ck} + 0,0517) \cdot a_r^{-0,0051f_{ck}-0,7417} \cdot v_{Ed}^{0,1738a_r-1,1527} \quad (3.6)$$

Gleichung (3.6) ist durch Approximation der in [6] gefundenen Beziehungen zur Bestimmung des Wertes  $v$  im Rahmen einer Parametervariation hergeleitet worden. In Abbildung 3.2 ist die sehr gute Übereinstimmung der exakten Beziehung nach [6] und der approximierten Beziehung exemplarisch für die Rissbreiten  $a_r = 150$  mm, 250 mm und 350 mm dargestellt.

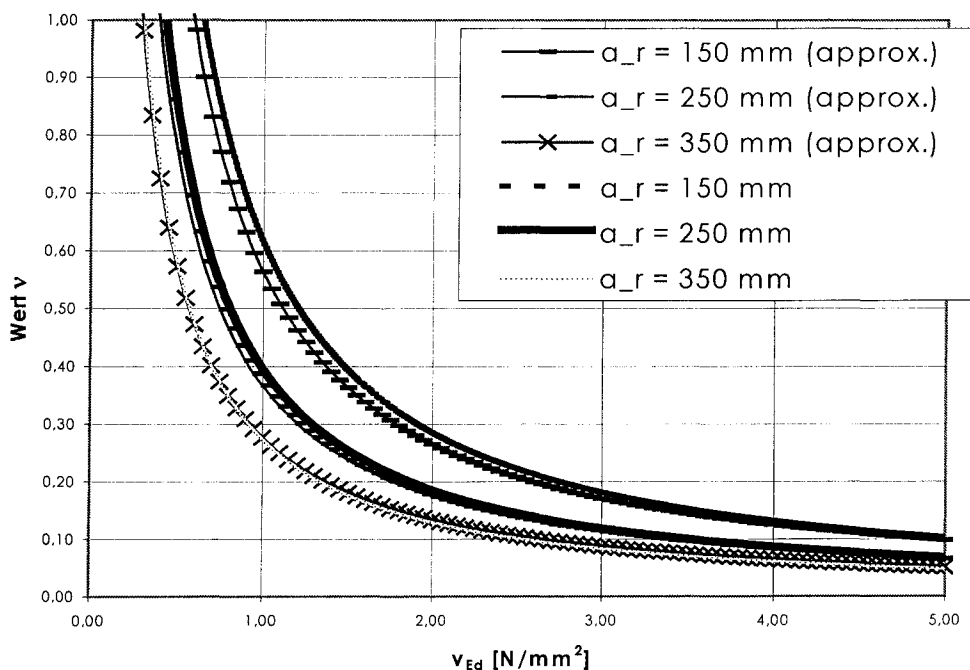


Abbildung 3.2: Genaue und approximierte Lösung zur Bestimmung von  $v$  (C20/25)

#### 4. Zusammenfassende Darstellung

Im vorliegenden Forschungsvorhaben werden auf der Grundlage bereits durchgeführter wissenschaftlicher Untersuchungen [5][6] Grenzwerte für die Querkrafttragfähigkeit mit CFK-Lamellen verstärkter Stahlbetonbauteile für den Anwendungsbereich der DIN 1045-1 formuliert. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens angegebenen Grenzwerte für die Querkrafttragfähigkeit beziehen sich dabei ausschließlich auf Bauteilbereiche mit großen Lamellendehnungen ( $\varepsilon_L \geq 2,5 ‰$ ) sowie großen Querkraftbeanspruchungen, die im Allgemeinen im Stützmomentbereich vorliegen.

Die für die Übernahme in die Bemessungsrichtlinie maßgebenden Bemessungsgleichungen lassen sich zusammengefasst wie folgt angeben:

##### 1. Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung

Nachweisformat:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,ct}$$

- für  $\varepsilon_L < 2,5 ‰$ :  $V_{Rd,ct,DIN 1045-1} = 0,1 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_L \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d$  [MN]  
[vgl. DIN 1045-1, Gleichung (70)]

- für  $\varepsilon_L \geq 2,5 ‰$ :  $V_{Rd,ct} = V_{Rd,ct} \cdot b_w \cdot z_m \leq V_{Rd,ct,DIN 1045-1} = 0,1 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_L \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d$  [MN]  
[vgl. DIN 1045-1, Gleichung (70)]

mit

$z_m$  mittlerer Hebelarm der inneren Kräfte, näherungsweise mit  $z_m = 0,9 \cdot d$  [m]

$b_w$  kleinste Querschnittsbreite [m]

$d$  statische Nutzhöhe [m]

$\rho_L$  Längsbewehrungsgrad [-]

$V_{Rd,ct}$  bezogener Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft in Abhängigkeit vom Rissabstand  $a_r$  bzw.  $a_{r,mod}$  (siehe Biegebemessung) [MN/m<sup>2</sup>]

$$V_{Rd,ct} = f_{ck} \cdot (0,3129 \cdot a_r^4 - 0,8216 \cdot a_r^3 + 0,7847 \cdot a_r^2 - 0,3308 \cdot a_r + 0,0591) - \\ 3,8925 \cdot a_r^4 + 9,0611 \cdot a_r^3 - 7,0426 \cdot a_r^2 + 1,9275 \cdot a_r - 0,0435 \quad [MN/m^2]$$

mit

$f_{ck}$  charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons [MN/m<sup>2</sup>]

$a_r$  Rissabstand (siehe Biegebemessung) [m] bzw.

$a_{r,mod}$  modifizierter Rissabstand [m]

Berechnung des modifizierten Rissabstandes zur Berücksichtigung einer Vordehnung bzw. für Lamellendehnungen  $\varepsilon_L \neq 8,5 ‰$ :

$$a_{r,mod} = a_r \cdot \frac{\varepsilon_L}{0,0085} + \frac{w_{t=0}}{0,0085} \quad [m]$$

mit

$w_{t=0}$  vorhandene Rissbreite zum Zeitpunkt der Verklebung [m]

## II. Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung

Bestimmung des Druckstrebenwinkels  $\theta$ :

- für  $\varepsilon_L < 2,5 ‰$ :  $1,0 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2}{(1 - V_{Rd,c} / V_{Ed})} \leq 3,0$  [vgl. DIN 1045-1, Gleichung (73)]

- für  $\varepsilon_L \geq 2,5 ‰$ :  $1,0 \leq \cot \theta = \frac{1}{(1 - \nu)} \leq 3,0$  [-]

bzw.

$45,0^\circ \geq \theta = \arctan(1 - \nu) \geq 18,4^\circ$  [°]

Beiwert:  $\nu = (0,0031 \cdot f_{ck} + 0,0517) \cdot \alpha_r^{-0,0051 \cdot f_{ck} - 0,7417} \cdot V_{Ed}^{0,1738 \cdot \alpha_r - 1,1527}$  [-]

mit

$f_{ck}$  charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons [MN/m<sup>2</sup>]

$\alpha_r$  Rissabstand (siehe Biegebemessung) [m] bzw.

$\alpha_{r,mod}$  modifizierter Rissabstand (siehe Gleichung oben) [m]

bezogene einwirkende Querkraft:  $v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z_m}$  [MN/m<sup>2</sup>]

mit

$z_m$  mittlerer Hebelarm der inneren Kräfte, näherungsweise mit  $z_m = 0,9 \cdot d$  [m]

$b_w$  kleinste Querschnittsbreite [m]

$d$  statische Nutzhöhe [m]

## 5. Literatur

- [1] Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstofffaserverstärkten Kunststofflamellen (CFK-Lamellen). Fassung September 1998, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [2] DIN 1045: Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung. Ausgabe 1988, Beuth Verlag, Berlin
- [3] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Ausgabe Juli 2001, Beuth Verlag, Berlin
- [4] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Ausgabe Juli 2001, Beuth Verlag, Berlin
- [5] Zilch, K.; Schmidhuber, Ch.: Festlegung der Schubbereichsgrenzen bei der Verstärkung von Stahlbetonplatten und Stahlbetonbalken mit aufgeklebten CFK-Lamellen; Forschungsbericht, Technische Universität München; 2001
- [6] Schmidhuber, Ch.: Neumodellierung des Schubtragverhaltens mit CFK-Lamellen verstärkter Stahlbetonbauteile; Dissertation, Technische Universität München; 2004
- [7] Niedermeier, R.: Zugkraftdeckung bei klebarmierten Bauteilen; Dissertation, Technische Universität München, 2000