

Neue Möglichkeiten und erweiterte Methoden zur Untersuchung des Querkrafttragverhaltens

Maximilian Schmidt, Josef Hegger, Rostislav Chudoba, Martin Claßen

*Lehrstuhl und Institut für Massivbau,
RWTH Aachen University,
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, Germany*

mschmidt@imb.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Das Querkrafttragverhalten von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung ist seit über 100 Jahren ein fester Bestandteil der Forschung im Massivbau. Mit dem Ziel der Ableitung neuer mechanisch konsistenter Modelle, die eine wirtschaftliche und nachhaltige Bemessung erlauben, werden die Einflussfaktoren auf das Querkraftversagen von Bauteilen intensiv erforscht und zum Teil kontrovers diskutiert. Hierbei gilt verschiedener Lastabtragsmechanismen zwar als bewiesen, jedoch werfen deren quantitativer Beitrag zur Gesamttragfähigkeit und die gegenseitige Beeinflussung weiterhin offene Fragen auf. In den letzten Jahren sind verschiedene mechanische Querkraftmodelle entwickelt worden, die eine Vielzahl wichtiger Erkenntnisse über die Hintergründe des Querkrafttragverhaltens aufzeigen und in der Lage sind, physikalische Erklärungsansätze für das Querkraftversagen in Bauteilen ohne Schubbewehrung zu liefern. Hierbei werden explizit die Lastabtragsmechanismen der Rissreibung, der Dübelwirkung, der Bruchprozesszone und der ungerissenen Druckzone berücksichtigt. Diese Modelle bedürfen jedoch weiterer experimenteller Validierung. Hierbei spielen neue Messverfahren (z. B. digitale Bildkorrelation oder faseroptische Dehnungsmessung), die tiefere Einblicke in das Tragverhalten schubbeanspruchter Stahlbetonbauteile zulassen, eine entscheidende Rolle. Ausgehend von experimentellen Untersuchungen mit modernen Messverfahren wurde eine Software entwickelt, die eine automatisierte Erfassung der Rissbildung basierend auf der Finite Elemente Methode mit detaillierter Auswertung der Kinematik und der im Riss übertragenen Spannungen durchführt. In diesem Beitrag wird ein Überblick über verschiedene Auswertungsmethoden experimenteller Untersuchungen mit modernen Messverfahren gegeben, auf deren Basis eine vertiefte Bewertung neuer Modellansätze erfolgen kann.

Keywords: Querkrafttragfähigkeit; Balken ohne Querkraftbewehrung; Digitale Bildkorrelation; Faseroptische Dehnungsmessung; Versagensmechanismus; Querkraftversagen

Abstract

The shear behavior of structural members without shear reinforcement has been part of research in concrete structures for more than 100 years. With the aim of deriving new mechanically consistent models that allow economic and sustainable design, the factors influencing the shear failure of structural members are intensively investigated and sometimes controversially discussed. Although the existence of different stress transfer mechanisms is considered to be proven, their quantitative contribution to the overall capacity and their mutual influence continue to raise open questions. In recent years, various mechanical shear models have been developed that provide a variety of important insights into the background of the shear behavior and are able to provide physical explanations for shear failure in RC members without shear reinforcement. Here, the stress transfer mechanisms of aggregate interlock, dowel action, the fracture process zone and the uncracked compression zone are explicitly considered. However, these models require further experimental validation. New measurement techniques (e. g. digital image correlation or fiber-optic strain measurement) play a decisive role in this context, allowing deeper insights into the load-bearing behavior of reinforced concrete components subjected to shear loads. Based on experimental investigations with modern measurement techniques, a software has been developed that performs an automated crack detection based on the finite element method with detailed evaluation of the kinematics and the stresses transferred in the crack. In this paper, an overview of different evaluation methods of experimental investigations with modern measurement techniques is given, on the basis of which an in-depth evaluation of new model approaches can be carried out.

Keywords: RC members without shear reinforcement; Digital Image Correlation; Fibre-optical strain measurement; Failure mechanism; Shear failure.

1 Einleitung

In den letzten Jahren wurden verschiedene mechanisch basierte Querkraftmodelle entwickelt, die eine Vielzahl neuer Erkenntnisse über die Hintergründe des Querkrafttragverhaltens liefern, indem sie (einzelne oder mehrere) physikalische Randbedingungen wie das Kräftegleichgewicht, das konstitutive Materialverhalten und die kinematische Kompatibilität berücksichtigen. Dabei werden (ausgewählte) elementare Effekte des Querkrafttragverhaltens in expliziter Form erfasst. Bei diesen elementaren Effekten des Querkrafttragverhaltens handelt es sich um (1) Risslokalisierung und Spannungsübertragung in der Bruchprozesszone (FPZ), (2) Rissausbreitung, (3) Zahnbiegung, (4) Schubübertragung im ungerissenen Beton (Druckzone), (5) Rissreibung, (6) Dübelwirkung sowie (7) Rissüberbrückungswirkung und Verbund der Längsbewehrung. Diese Effekte können in zwei Kategorien unterteilt werden: Einerseits primäre Effekte, die unmittelbar für die Übertragung von Schubspannungen in einem Nachweisschnitt verantwortlich sind (Effekte (1), (4), (5), (6)) und daher als Tragmechanismen bezeichnet werden, sowie andererseits sekundäre Effekte, die den Querkraftabtrag- und Versagensprozess zwar maßgebend beeinflussen, aber nicht direkt mit einem Mechanismus der Schubübertragung verbunden sind (Effekte (2), (3), (7)). Bei der Erfassung dieser elementaren Effekte fokussieren einige Modelle die Abbildung eines bestimmten, als dominierend angesehenen Tragmechanismus (z. B. die Rissreibung [1, 2], den Traganteil der Druckzone [3, 4] oder die Spannungsübertragung an der Risspitze [5, 6]), während in anderen Modellen mehrere Tragmechanismen einbezogen werden, z. B. [7–9]. Diese Multimechanismus-Modelle stellen einen Meilenstein im Verständnis des Querkraftversagens dar, da sie die Interaktionen verschiedener Schubübertragungsvorgänge im Riss in den Blick nehmen. Eine Auswertung der heute verfügbaren Modelle zeigt allerdings, dass keines in der Lage ist, alle als wesentlich identifizierten Effekte (1)–(7) abzudecken. Insbesondere werden der Effekt des Risswachstums und die daraus resultierenden Veränderungen von Rissform und Risskinematik im Belastungsprozess in bestehenden Modellen völlig außer Acht gelassen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsvorhabens die sog. *Shear Crack Propagation Theory* (SCPT) entwickelt [10, 11], eine mechanische Theorie, die auf Gleichgewicht, konstitutivem Materialverhalten und Starrkörperkinematik basiert und alle relevanten Trageffekte (1)–(7) in einem Algorithmus verbindet. Dieses Modell ermöglicht die Vorhersage des Schubrisswachstums und der Schubrissgeometrie, der übertragenen Gesamtquerkraft und Einzelbeiträge aller Tragmechanismen sowie aller Verformungen (Dehnungen, Rissuferverschiebungen etc.) über den gesamten Belastungsprozess von der Erstrissbildung bis zum Querkraftversagen.

Die zuvor beschriebenen mechanischen Modellansätze [7, 8, 10, 9] können wichtige Erkenntnisse über die Hintergründe des Querkrafttragverhaltens aufzeigen und physikalische Erklärungsansätze für das Phänomen des Querkraft- bzw. Biegeschubversagens in Bauteilen ohne Schubbewehrung liefern. Hierbei herrscht weitgehend Einigkeit über die Existenz der identifizierten Effekte (1)–(7), jedoch wirft der quantitative Beitrag der einzelnen Tragmechanismen sowie ihre gegenseitige Beeinflussung innerhalb mechanischer Modellansätze weiterhin Fragen auf. Bisherige Versuche, die Traganteile zu quantifizieren, weisen teilweise erhebliche Unterschiede auf (z. B. [12–14]), unter anderem aufgrund heterogener konstitutiver Gesetze (z. B. [15–18]). Aus diesen Gründen bedarf es einer sorgfältigen experimentellen Validierung mechanischer Modelle, um die daran gewonnenen Erkenntnisse verallgemeinern zu können.

Um ein tieferes Verständnis für das Tragverhalten und das Biegeschubversagen von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung zu erlangen, werden in verschiedenen Forschungseinrichtungen Querkraftversuche mit modernen Messverfahren, wie z. B. digitaler Bildkorrelation [19] oder faseroptischer Dehnungsmessungen [20], durchgeführt. Diese Methoden erlauben eine eindeutige Nachverfolgung der Entwicklung des Versagensrisses sowie die Analyse der Risskinematik. Die gemessenen Verformungen (z. B. Rissbreiten, Rissgleitungen und Dehnungen des ungerissenen Betons) können genutzt werden, um anhand konstitutiver Gesetze die in der Schubzone wirkenden Querkrafttraganteile auszuwerten [21]. Die rechnerische Gesamttragfähigkeit eines Bauteils korreliert jedoch stark mit der Qualität der konstitutiven Gesetze zur Bestimmung der einzelnen Traganteile. Aus diesem Grund ist eine Validierung der konstitutiven Annahmen durch die Prüfung von Gleichgewichts- und Kompatibilitätsbedingungen im Versagensriss sinnvoll und ist einer losgelösten, unabhängigen Betrachtung der

Traganteile vorzuziehen. Eine derartige Vorgehensweise kann auf Basis mechanisch basierter und physikalisch konsistenter Auswertungsmethoden erfolgen [22]. Zudem sind Auswertungen über den gesamten Belastungsprozess [23, 24] solchen vorzuziehen, die lediglich den Bruchzustand betrachten.

Nachfolgend wird ein Überblick über verschiedene Auswertungsmethoden experimenteller Untersuchungen mit modernen Messverfahren gegeben, auf deren Basis eine vertiefte Bewertung neuer Modellansätze erfolgen kann.

2 Versuchsreihe zur vertieften Untersuchung der Traganteile

Um einen Erkenntnisgewinn durch neue Messtechniken und deren Potential zu generieren, sind experimentelle Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten bei systematischer Variation der geometrischen Parameter erforderlich. Der Versuchsstand sowie die untersuchten Geometrien der Versuchskörper sind in Bild 1 dargestellt. Die Anzahl und der Durchmesser der Biegelängsbewehrung sind in Tabelle 1 angegeben. Als konstruktive Bewehrung in der Biegedruckzone wurden in jedem Versuchskörper zwei Bewehrungsstäbe mit $\varnothing = 10$ mm eingebaut.

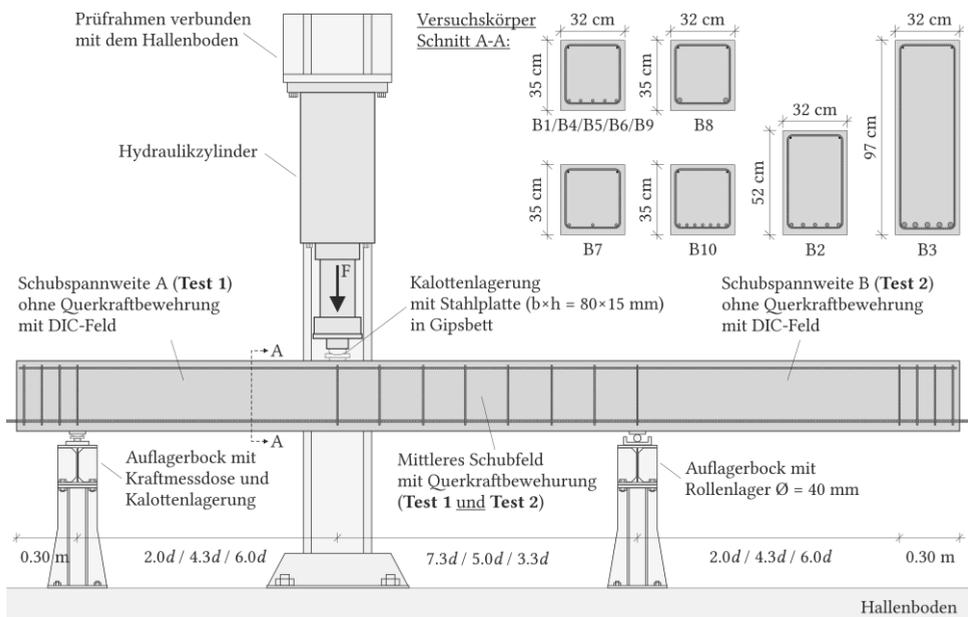


Bild 1 Versuchsaufbau – Dreipunktbiegeversuch am Einfeldträger mit Kragarm sowie untersuchte Querschnitte

Ausgehend von den in Tabelle 1 zusammengefassten experimentellen Untersuchungen erfolgte eine Auswertung der Rissentwicklung und Risskinematik als Basis für die Quantifizierung der Traganteile. Eine detailliertere Darstellung der Ergebnisse wird in [25] publiziert. Ausgewählte Ergebnisse aus dieser Serie werden hier zur Erläuterung der Auswertungsmethodik verwendet und vorgestellt.

Tabelle 1 Geometrische Randbedingungen der untersuchten Versuchskörper

Versuchskörper	Breite / Höhe	Stat. Nutzhöhe	Spanweite $L / L/d$ -Verhältnis	Max. Grobkorn-durchmesser	Schubspanweite	Bewehrung / Bewehrungsgrad	Schubschlankeit	Druckfestigkeit	Versagensquerkraft TV 1 / TV2
	b / h [mm]	d [mm]	$L / L/d$ [mm] / [-]	d_{gg} [mm]	a [mm]	ρ_1 [-] / [%]	$a/d = \lambda$ [-]	$f_{\text{cm,cyl}}$ [N/mm ²]	
B1-1/2	320 / 350	300	2.800 / 9,3	16	1.300	5Ø16 / 1.05	4,3	36,9	104,8 / 105,0
B2-1/2	320 / 520	470	4.400 / 9,3	16	2.000	5Ø20 / 1.05	4,3	33,4	137,5 / 118,5
B3-1/2	320 / 970	920	8.600 / 9,3	16	4.000	5Ø28 / 1.05	4,3	36,9	180,4 / 170,4
B4-1/2	320 / 350	300	2.800 / 9,3	16	600	5Ø16 / 1.05	2,0	32,7	245,2 / 194,7
B5-1/2	320 / 350	300	2.800 / 9,3	16	1.800	5Ø16 / 1.05	6,0	38,0	95,6 / 94,3
B6-1/2	320 / 350	300	2.800 / 9,3	8	1.300	5Ø16 / 1.05	4,3	46,2	100,6 / 102,7
B6-rep-1/2	320 / 350	300	2.800 / 9,3	8	1.300	5Ø16 / 1.05	4,3	30,4	101,4 / 94,1
B7-1/2	320 / 350	300	2.800 / 9,3	16	1.300	3Ø16 / 0.65	4,3	34,0	82,2 / 77,8
B8-1/2	320 / 350	300	2.800 / 9,3	16	1.300	2Ø25 / 1.03	4,3	38,0	94,1 / 99,4
B9-1/2	320 / 350	300	2.800 / 9,3	32	1.300	5Ø16 / 1.05	4,3	35,5	100,0 / 98,3
B10-1/2	320 / 350	300	2.800 / 9,3	16	1.300	7Ø16 / 1.47	4,3	33,9	115,3 / 111,9

3 Mess- und Auswertemethoden im untersuchten Schubfeld

Als Grundlage für die Quantifizierung der Traganteile werden digitale Bildkorrelation (*Digital Image Correlation* – DIC) und faseroptische Messverfahren (*Fiber-Optic Sensing* – FOS) kombiniert, mit dem Ziel, die Rissentwicklung im Beton, die Stauchung der Druckzone und die Dehnungsentwicklung in der Bewehrung gleichzeitig verfolgen zu können. Zusätzlich werden induktive Wegaufnehmer und Dehnungsmessstreifen (DMS) auf der Bewehrung zur Verifizierung der modernen Messverfahren verwendet.

3.1 Faseroptische Dehnungsmessung auf der Längsbewehrung

Faseroptische Messverfahren sind bereits seit Ende der 1980er Jahre bekannt und eröffnen ein breites Anwendungsspektrum im Bereich des Bauingenieurwesens. Für eine vertiefte Darstellung wird auf [26–29] verwiesen.

Im vorliegenden Beitrag wurden die Dehnungen entlang der Längsbewehrung auf der Ober- und Unterseite mit jeweils einem faseroptischen Sensor erfasst. Durch die getrennte Messung ist es möglich, die Anteile aus Normalkraft und lokaler Biegung in der Längsbewehrung zu separieren. Die Auswertung der FOS-Dehnungsmessung wird mit einem eigens entwickelten Tool (*FOS-Evaluator*) [26] durchgeführt.

3.2 Digitale Bildkorrelation zur Aufnahme der Verschiebungs- und Dehnungsfelder

Das Verfahren der digitalen Bildkorrelation wurde in der Forschung bereits zur Messung von Rissen in Betonbauteilen und speziell zur Ermittlung der Kinematik von Schubrisen verwendet, siehe z. B. [30, 19, 31].

Allgemein konzipierte Softwarelösungen zur Auswertung von DIC-Messungen sind nicht auf die Auswertung von Untersuchungen im Bereich des Betonbaus spezialisiert und liefern standardmäßig nur einfache Verfahren zur Bestimmung von Verschiebungen und resultierenden Dehnungen. Die manuelle Bestimmung der Risskinematik auf Basis von DIC-Daten durch die Festlegung virtueller Referenzpunkte auf beiden Seiten eines Risses ist aufwendig und wenig objektiv. Um die Objektivität der Auswertung zu erhöhen, wurden bereits verschiedene automatisierte Verfahren zur Identifizierung von

Rissverläufen vorgeschlagen, wie z. B. in [32] basierend auf einem 2D-Verschiebungsfeld. Dieser verfeinerte Ansatz nutzt bewährte Methoden der Bildverarbeitung, um ein Rissmuster zu erkennen.

3.3 Automatisierte Risserkennung (Crack Detection Tool – CDT)

Um die Genauigkeit und Robustheit der automatischen Risserkennung und -verfolgung zu erhöhen, werden in der hier beschriebenen Methode konstitutive Gesetze eingesetzt, um die Daten der DIC-Oberflächenmessung mit den im Bauteil ablaufenden physikalischen Prozessen zu verknüpfen. Auf Grundlage der detektierten Rissgeometrie wird eine automatische Auswertung des Rissöffnungs- und Gleitprofils entlang des Risses sowie eine Bestimmung des Rotationszentrums direkt aus der experimentellen Messung des durch DIC oberflächennah gemessenen Verschiebungsfeldes möglich. Durch die automatische Ermittlung der Risskinematik kann eine Vielzahl von Rissen (z. B. der gesamten Versuchsserie mit ca. 150 Rissen) systematisch und mit geringem Aufwand ausgewertet werden. Die so gewonnenen Erkenntnisse können, unter anderem aufgrund der Menge der kinematischen Parameter, die Weiterentwicklung von mechanisch konsistenten Bemessungsansätzen effektiv unterstützen und vorantreiben.

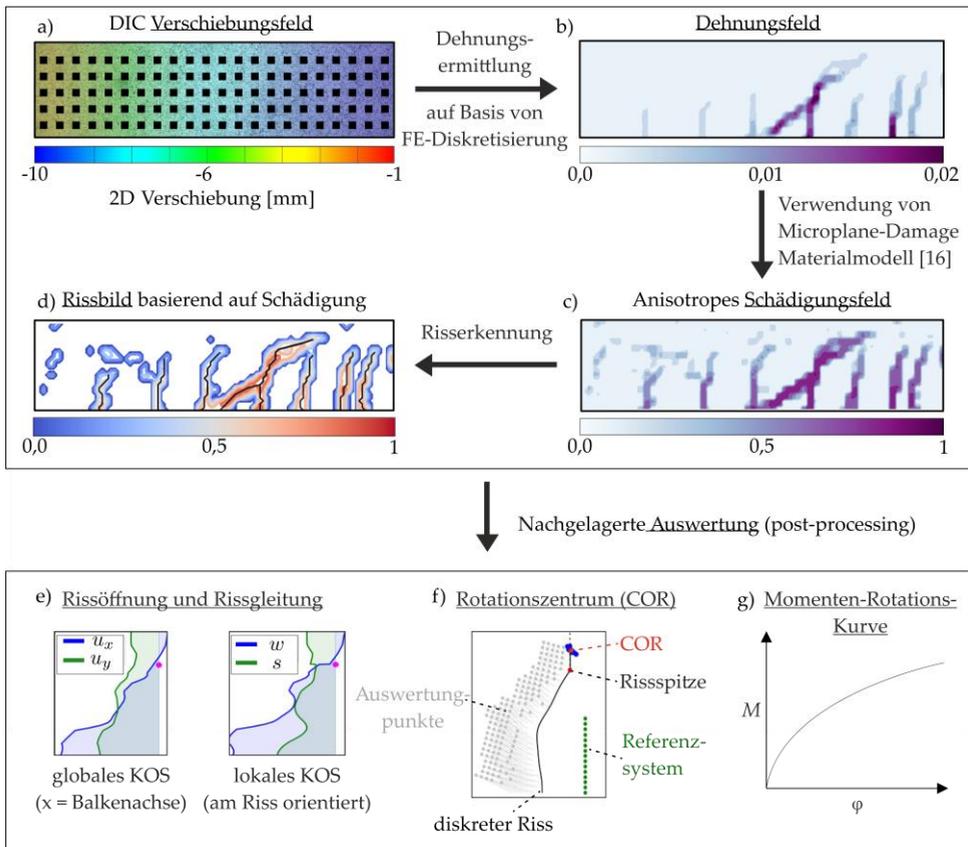


Bild 2 Zusammenfassung des Verfahrens zur Risserkennung mittels *Crack Detection Tool* und nachgelagerter Auswertung

Das Verfahren zur Risserkennung ist in Bild 2 skizziert. Der Algorithmus zur Risserkennung verwendet die aus der DIC-Messung gewonnenen 2D-Verschiebungsfelder als Eingangsgröße für eine datengesteuerte Analyse des Risslokalisierungsprozesses. Die DIC-Messpunkte, in Bild 2 a) als schwarze Quadrate angedeutet, bilden die Stützpunkte einer bilinearen Interpolation des Verschiebungsfeldes, das zur Auswertung des Dehnungstensorfeldes verwendet wird. Der an jedem Materialpunkt erhaltene Dehnungszustand dient als Eingangsparameter für die Bewertung der resultierenden

Schädigung unter Verwendung des *Microplane-Damage*-Materialmodells [33]. Das resultierende anisotrope Schädigungsfeld, das die gesamte Schubzone abdeckt, dient als Grundlage für den Algorithmus zur automatischen Risserkennung. Eine vertiefte Darstellung des Ansatzes ist in [34, 35] zu finden.

Im nächsten Abschnitt werden die zuvor genannten Methoden auf konkrete Versuchsdaten angewandt.

4 Rissskinematik und Dehnungszustände der Längsbewehrung

4.1 Rotationszentrum (*Center of Rotation, COR*) des Schubrisses

Zur Beschreibung der Rissskinematik nehmen bekannte mechanische Modelle die Existenz eines definiertes Rotationszentrums (*Center of Rotation – COR*) an und idealisieren die zwischen den Rissen liegenden Betonzähne als starre Körper, die keine (elastischen) Verformungen innerhalb des Belastungsprozesses erfahren. Die *Critical Shear Crack Theory (CSCT)* geht hierbei davon aus, dass sich das COR an der Rissspitze befindet [9], während die SCPT [10] postuliert, dass der Drehpunkt während des Belastungsprozesses eine variable Lage hat, die sich von seiner anfänglichen Position oberhalb der Rissspitze im ungerissenen Beton (niedrige Belastungsniveaus) zu einer Position knapp unterhalb der Rissspitze verlagert, wenn der Schubriss in die Druckzone vordringt und das Versagen initiiert wird. Kürzlich wurde die Existenz eines eindeutigen Rotationszentrums [36] gar vollständig in Frage gestellt, indem hinterfragt wurde, ob die Bewegung zweier ausgewählter Punkte in einem Zahn als Rotation um ein COR auf der anderen Seite des Risses ausgedrückt werden kann. Um die unterschiedlichen Hypothesen zu überprüfen, wurden mit Hilfe einer Vektoranalyse der zuvor beschriebenen interpolierten Verschiebungsfelder resultierende Rotationszentren benachbarter Betonzähne ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt. Die Auswertemethode ist in Bild 2 f) angedeutet, wobei in der nachfolgenden Darstellung nur der maßgebende Drehpunkt übernommen wurde. Für weiterführende Informationen zur Ermittlung des Rotationszentrums wird auf [34, 35] verwiesen.

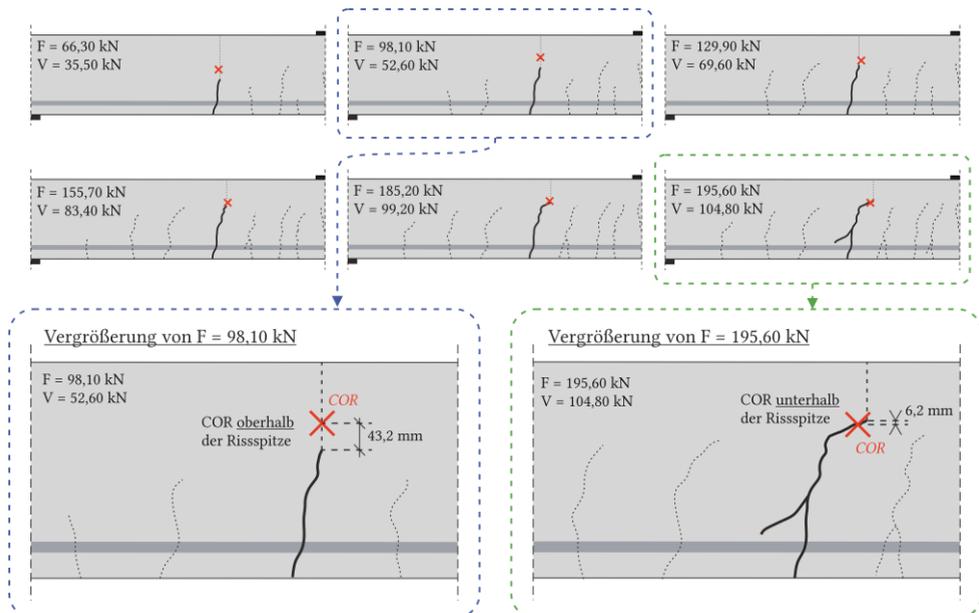


Bild 3 Darstellung des ermittelten Rissrotationszentrums (COR) für ausgewählte Laststufen

Die Auswertungen zeigen, dass ein anfänglich oberhalb der Rissspitze zentrierter Drehpunkt mit fortschreitendem Risswachstum näher an die Rissspitze wandert und letztlich kurz vor dem Versagen unterhalb der Rissspitze zu finden ist. Diese Ergebnisse decken sich sehr gut mit den Hypothesen in [10], wobei die Rissspitze im Bruchzustand noch deutlich weiter in die Druckzone hineinwachsen kann als im hier gezeigten Beispiel.

4.2 Dehnungsverteilung entlang der Längsbewehrung

Ausgehend von der Dehnungsverteilung entlang der Längsbewehrung lassen sich Aussagen über die Dehnungen der Längsbewehrung in diskreten Rissen als auch in den Bereichen zwischen den Rissen ableiten, wodurch z. B. Aussagen über die Effekte der Zugversteifung („*tension stiffening*“) oder den Verbund zwischen Bewehrung und Beton abgeleitet werden können.

Die im Versuch gemessenen Dehnungen sind aufgrund der Streuung der Messdaten zu filtern. Auf die Filtermethoden wird an dieser Stelle nicht eingegangen und stattdessen auf [26] verwiesen. Um lokale Einflüsse (z. B. Spannungsspitzen aus der Rippung des Stahls) zu eliminieren, werden die Messdaten mit einem gleitenden Mittelwertfilter, dessen Fenstergröße dem Stabdurchmesser entspricht, geglättet. Das Ergebnis ist in Bild 4 a) und b) dargestellt.

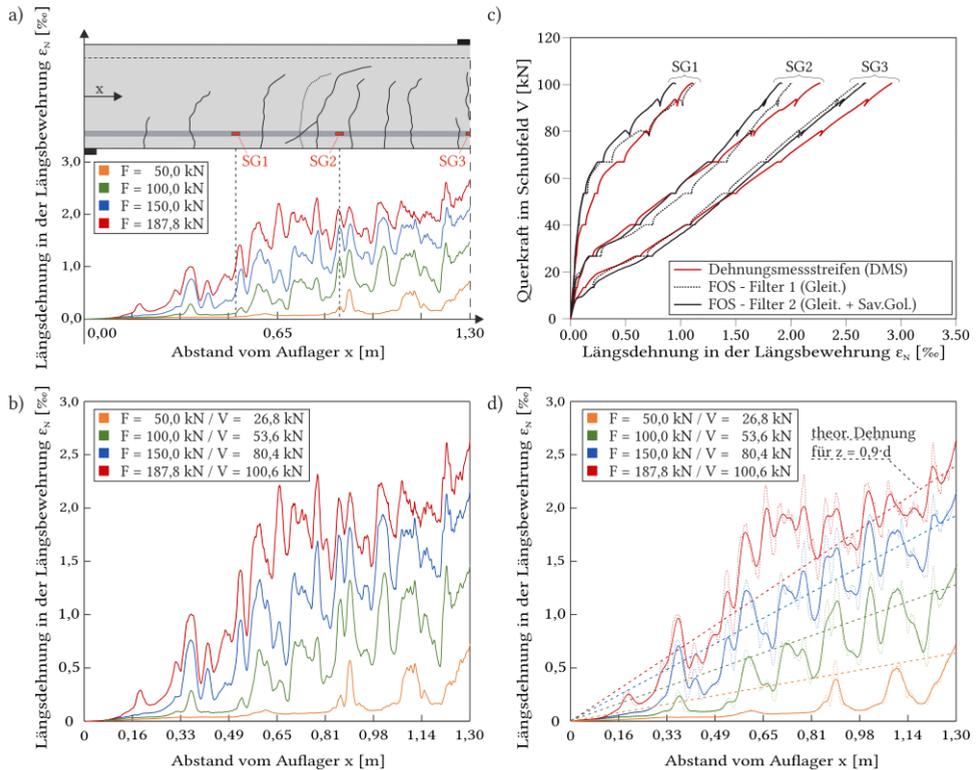


Bild 4 Ergebnisse der faseroptischen Messung von Dehnungen entlang der Längsbewehrung

Trotz der Anwendung des Mittelwertfilters weisen die Messdaten stets einen sprunghaften Verlauf auf. Diese Unstetigkeiten können unter anderem auf die Streuung des eigentlichen Messverfahrens [26], auf lokale Biegeeffekte am Rissufer [37] oder Verbundstörungen zurückzuführen sein. Eine zweite Glättung wurde mit einem Savitzky-Golay-Filter [38] durchgeführt. In Bild 4 c) ist der Vergleich der FOS-Dehnungen mit den gemessenen DMS-Dehnungen dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass die Dehnungsmessung durch FOS und die Dehnungsmessung durch DMS bedingt durch einen Faserausfall nicht am gleichen Stab stattgefunden haben. Zum Vergleich sind die geglätteten Ergebnisse in Bild 4 d) dargestellt. Weiter ist der theoretische Dehnungsverlauf im Stahl bei Annahme eines konstanten inneren Hebelarms $z = 0,9 \cdot d$ angegeben.

5 Verwendung ausgewählter Daten zur Modellvalidierung

Zur Validierung der SCPT werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen experimentellen Untersuchungen herangezogen. Es bietet sich z. B. die Möglichkeit des Vergleiches der Querkraft-Rissrotationsbeziehung einzelner Schubrisse an. Die experimentell bestimmte Rotation um das ermittelte COR

wird mit den errechneten Rotationen der SCPT verglichen. Die Ergebnisse eines solchen Vergleiches sind in Bild 4 dargestellt.

Für den hier dargestellten Versagensriss von B1-1 zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der ermittelten Rotation aus dem Versuch mit den errechneten Rotationen der SCPT. Weiter ist ausgehend von den SCPT-Berechnungen eine Darstellung der Verteilung der einzelnen Querkrafttragmechanismen (1) und (4)–(6) über den gesamten Belastungsverlauf möglich. Zukünftig werden Auswertungen für die gesamte Versuchsserie sowie für verschiedene Risse der Versuchskörper durchgeführt, um die Entwicklungen der Traganteile abhängig von geometrischen Parametern und der Position des Schubrisses im Schubfeld zu analysieren.

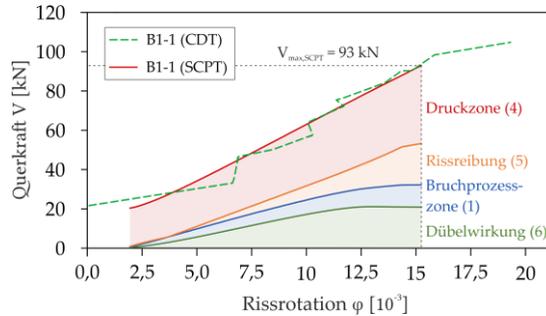


Bild 5 Ermittlung der Traganteile und Rissrotation auf Basis der SCPT und Vergleich mit der experimentell bestimmten Rissrotation

6 Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden ausgewählte Ergebnisse durchgeführter Untersuchungen an Stahlbetonbalken ohne Querkraftbewehrung gezeigt. Die Auswertung basiert einerseits auf den Ergebnissen aus faseroptischer Dehnungsmessung entlang der Längsbewehrung und einer Auswertung des Verschiebungsfeldes mithilfe digitaler Bildkorrelation. Die Auswertung der Daten aus faseroptischer Dehnungsmessung als auch digitaler Bildkorrelation werden mit eigens zu diesem Zwecke entwickelten Tools ausgewertet (*FOS-Evaluator* und *CDT*).

Ausgehend von den Auswertungen lässt sich Folgendes festhalten:

- Die Risskinematik lässt sich als Ergebnis der Rotation um ein Rotationszentrum beschreiben. Die Betonzähne können in guter Näherung als starre Körper idealisiert werden;
- Die Auswertung der Längsdehnungen der Bewehrung ermöglicht Rückschlüsse auf die Verbundcharakteristik entlang des Schubfeldes und der einzelnen Betonzähne. Weitere Untersuchungen fokussieren die Fragestellung, inwieweit das Verbundverhalten bzw. Verbundversagen der Längsbewehrung die Initiierung des Querkraftversagens beeinflusst.

7 Danksagung

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wird für die Förderung des Projektes “Shear behavior of RC members without shear reinforcement—development of a consistent experimental, analytical and numerical characterization methodology” (Projektnummer 420545423, CL789/1-1 und CH 276/9-1) ausdrücklich gedankt. Dieser Veröffentlichung liegen Teile der im Rahmen des zuvor genannten Projektes durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde.

8 Quellen

- [1] Vecchio, F.J.; Collins, M.P.: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. In: *ACI Structural Journal*, Vol. 83 (1986), Iss. 2, pp. 219-231. <https://doi.org/10.14359/10416>.
- [2] Fernández Ruiz, M.; Muttoni, A.; Sagaseta, J.: Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: A mechanical approach to consistently account for size and strain

- effects. *In: Engineering Structures* 99 (2015), S. 360-372. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.05.007>.
- [3] *Zararis, P.D.; Papadakis, G.C.*: Diagonal Shear Failure and Size Effect in RC Beams without Web Reinforcement. *In: Journal of Structural Engineering*, Vol. 127 (2001), Iss. 7, pp. 733-742. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:7\(733\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(733)).
- [4] *Zink, M.*: Zum Biegeschubversagen schlanker Bauteile aus Hochleistungsbeton mit und ohne Vorspannung. Leipzig, Germany, Universität Leipzig, Dissertation, 1999.
- [5] *Bazant, Z.P.; Kim, J.-K.*: Size Effect In Shear Failure Of Longitudinally Reinforced Beams. *In: ACI Journal*, Vol. 1984 (1984), pp. 579-583.
- [6] *Fischer, J.; Hagsten, L.G.*: Mechanical model for the shear capacity of R/C beams without stirrups: A proposal based on limit analysis. *In: Engineering Structures*, Vol. 115 (2016), pp. 220-231. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.02.035>.
- [7] *Tue, N.V.; Theiler, W.; Tung, N.D.*: Schubverhalten von Biegebauteilen ohne Querkraftbewehrung. *In: Beton- und Stahlbetonbau* 109 (2014), Heft 10, S. 666-677. <https://doi.org/10.1002/best.201400058>.
- [8] *Cladera, A.; Mari, A.; Bairán, J.-M. et al.*: One-Way Shear Design Method Based on a Multi-Action Model – A compromise between simplicity and accuracy. *In: Concrete International* (2017), 40 bis 46.
- [9] *Cavagnis, F.; Fernández Ruiz, M.; Muttoni, A.*: An analysis of the shear-transfer actions in reinforced concrete members without transverse reinforcement based on refined experimental measurements. *In: Structural Concrete*, Vol. 19 (2018), Iss. 1, pp. 49-64. <https://doi.org/10.1002/suco.201700145>.
- [10] *Classen, M.*: Shear Crack Propagation Theory (SCPT) – The mechanical solution to the riddle of shear in RC members without shear reinforcement. *In: Engineering Structures*, Vol. 210 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110207>.
- [11] *Schmidt, M.; Schmidt, P.; Wanka, S. et al.*: Shear Response of Members without Shear Reinforcement—Experiments and Analysis Using Shear Crack Propagation Theory (SCPT). *In: Applied Sciences*, Vol. 11 (2021), Iss. 7, pp. 1-16. <https://doi.org/10.3390/app11073078>.
- [12] *Mari, A.; Cladera, A.; Bairán, J. et al.*: Shear-flexural strength mechanical model for the design and assessment of reinforced concrete beams subjected to point or distributed loads. *In: Frontiers of Structural and Civil Engineering*, Vol. 8 (2014), Iss. 4, pp. 337-353. <https://doi.org/10.1007/s11709-014-0081-0>.
- [13] *Fenwick, R.C.*: The shear strength of reinforced concrete beams. Christchurch, New Zealand, University of Canterbury, PhD Thesis, 1966.
- [14] *Yang, Y.*: Shear Behaviour of Reinforced Concrete Members without Shear Reinforcement – A New Look at an Old Problem. Delft, Delft University of Technology, Dissertation, 2014.
- [15] *Walraven, J.C.*: Fundamental Analysis of Aggregate Interlock. *In: ASCE Journal of the Structural Division*, Vol. 107 (1981), ST11, pp. 2245-2270.
- [16] *Baumann, T.; Rüschi, H.*: Schubversuche mit indirekter Krafteinleitung. Versuche zum Studium der Verdübelungswirkung der Biegezugbewehrung eines Stahlbetonbalkens – DAfStb-Heft 210. Ernst & Sohn, 1970.
- [17] *Hillerborg, A.*: Analysis of One Single Crack. *In: Wittmann, F.H. (ed.): Fracture mechanics of concrete, Developments in civil engineering*, 1983, pp. 223-249.
- [18] *Ungermann, J.; Adam, V.; Classen, M.*: Fictitious Rough Crack Model (FRCM): A Smeared Crack Modelling Approach to Account for Aggregate Interlock and Mixed Mode Fracture of Plain Concrete. *In: Materials*, Vol. 13 (2020), Iss. 12, p. 2774. <https://doi.org/10.3390/ma13122774>.
- [19] *Huber, P.; Huber, T.; Kollegger, J.*: Investigation of the shear behavior of RC beams on the basis of measured crack kinematics. *In: Engineering Structures*, Vol. 113 (2016), pp. 41-58. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.025>.
- [20] *Lemcherreg, Y.; Galkovski, T.; Mata-Falcón, J. et al.*: Application of Distributed Fibre Optical Sensing in Reinforced Concrete Elements Subjected to Monotonic and Cyclic Loading. *In: Sensors (Basel, Switzerland)*, Vol. 22 (2022), Iss. 5. <https://doi.org/10.3390/s22052023>.
- [21] *Huber, T.; Huber, P.; Kollegger, J.*: Influence of aggregate interlock on the shear resistance of reinforced concrete beams without stirrups. *In: Engineering Structures*, Vol. 186 (2019), pp. 26-42. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.074>.

- [22] *Seemab, F.; Baktheer, A.; Hegger, J. et al.*: Mixed mode criterion for discrete crack propagation through RC shear zones. In: *Júlio, E.; Valença, J.; Louro, A.S.* (eds.): Concrete Structures: New Trends for Eco-Efficiency and Performance – Proceedings of the fib Symposium 2021 held online from Lisbon, Portugal, 14-16 June 2021, 2021.
- [23] *Autrup, F.; Jørgensen, H.B.; Hoang, L.C.*: The influence of small amounts of shear reinforcement on the shear-transferring mechanisms in RC beams: An analysis based on refined experimental measurements. In: *Structural Concrete* (2022). <https://doi.org/10.1002/suco.202200193>.
- [24] *Montoya-Coronado, L.A.; Ribas, C.; Ruiz-Pinilla, J.G. et al.*: Time-history analysis of aggregate interlock in reinforced concrete beams without stirrups. In: *Engineering Structures*, Vol. 283 (2023), p. 115912. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115912>.
- [25] *Schmidt, M.; Seemab, F.; Josef Hegger et al.*: New insights to the fundamentals of shear in reinforced concrete structures: A detailed study based on tests with refined measurements. In: *Engineering Structures* (in preparation) (2023).
- [26] *Janiak, T.; Becks, H.; Camps, B.H. et al.*: A unified approach to the evaluation of distributed fibre optic sensors in structural concrete. In: *Materials and Structures* (2023), accepted.
- [27] *Becks, H.; Baktheer, A.; Marx, S. et al.*: Monitoring concept for the propagation of compressive fatigue in externally prestressed concrete beams using digital image correlation and fiber optic sensors. In: *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 46 (2023), Iss. 2, 514-526. <https://doi.org/10.1111/ffe.13881>.
- [28] *Clauß, F.; Ahrens, M.A.; Mark, P.*: Thermo-mechanical experiments on reinforced concrete beams: Assessing thermal, mechanical, and mixed impacts on fiber optic measurements. In: *Structural Concrete* 23 (2022), Heft 6, S. 3521-3537. <https://doi.org/10.1002/suco.202100890>.
- [29] *Schmidt-Thrö, G.; Scheufler, W.; Fischer, O.*: Kontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung im Stahlbetonbau. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016), Heft 8, S. 496-504. <https://doi.org/10.1002/best.201600026>.
- [30] *Cavagnis, F.*: Shear in reinforced concrete without transverse reinforcement: from refined experimental measurements to mechanical models. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Dissertation, 2017.
- [31] *Adam, V.*: Shear in Reinforced Concrete Structures without Shear Reinforcement - Analysis and Design. Aachen, RWTH Aachen University, Dissertation, 2021.
- [32] *Gehri, N.; Mata-Falcón, J.; Kaufmann, W.*: Automated crack detection and measurement based on digital image correlation. In: *Construction and Building Materials*, Vol. 256 (2020), p. 119383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119383>.
- [33] *Baktheer, A.; Aguilar, M.; Chudoba, R.*: Microplane fatigue model MS1 for plain concrete under compression with damage evolution driven by cumulative inelastic shear strain. In: *International Journal of Plasticity*, Vol. 143 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2021.102950>.
- [34] *Seemab, F.; Schmidt, M.; Baktheer, A. et al.*: On the existence of the center of rotation around a shear crack; numerical inspection of digital image correlation measurements. In: *Stokkeland, S.; Braarud, H.C.* (eds.): Concrete Innovation for Sustainability. International Federation for Structural Concrete, fib International Congress 2022 Oslo. The Norwegian Concrete Association/Tekna, 2022, digital proceedings.
- [35] *Seemab, F.; Schmidt, M.; Baktheer, A. et al.*: Automated detection of propagating cracks in RC beams based on DIC-controlled modeling of damage localization. In: *Engineering Structures* (im Review) (2023).
- [36] *Dönmez, A.; Bažant, Z.P.*: Critique of critical shear crack theory for fib Model Code articles on shear strength and size effect of reinforced concrete beams. In: *Structural Concrete*, Vol. 20 (2019), Iss. 4, pp. 1451-1463. <https://doi.org/10.1002/suco.201800315>.
- [37] *Cantone, R.; Fernández Ruiz, M.; Muttoni, A.*: A detailed view on the rebar-to-concrete interaction based on refined measurement techniques. In: *Engineering Structures*, Vol. 226 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111332>.
- [38] *Savitzky, A.; Golay, M.J.E.*: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. In: *Analytical Chemistry* 36 (1964), Heft 8, S. 1627-1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>.