

Verbundwerkstoff Stahlbeton: Forschung, Entwicklung und Anwendung

<https://doi.org/10.14459/mbs28.03>

Leopold Staller, Johannes Fröse, Oliver Fischer



Leopold Staller, M.Sc.

2019 B.Sc. Bauingenieurwesen, TUM
2021 M.Sc. Bauingenieurwesen, TUM
2021-23 Tragwerksplaner, Suess Staller Schmitt
seit 09.2023 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Lehrstuhl für Massivbau, TUM



Johannes Fröse, M.Sc.

2015 B.Eng. Bauingenieurwesen, HKA
2018 M.Sc. Bauingenieurwesen, TUM
seit 2018 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Lehrstuhl für Massivbau, TUM



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer

1988 Diplom Bauingenieurwesen, TUM

1989-95 Wissenschaftlicher Assistent, UniBw

1994 Promotion

1996-2009 Verschiedene Fach- und Führungspositionen in der Bauindustrie im In- und Ausland

2007 Diplomwirtschaftsingenieur, Univ. Hagen

seit 10.2009 Ordinarius für Massivbau, TUM

seit 2011 Prüferingenieur und EBA-Prüfer

Die zunehmende Automatisierung von Bewehrungs- und Fertigungsprozessen sowie der Einsatz neuer, ressourcenschonender und hochfester Werkstoffe erfordern eine Revision der bisherigen Modelle und Nachweiskonzepte, die auch in der neuen Generation des Eurocode 2 noch nicht vollständig abgeschlossen sein wird. Dieser Beitrag bietet einen Einblick in die aktuelle Forschung an der TUM zum Verbundverhalten von Betonstahlbewehrung, mit besonderem Fokus auf industrielle Vorfertigung, hochfeste Bewehrung, sowie die messtechnische Erfassung und experimentelle Beschreibung des Verbundes. Innovative Messverfahren wie faseroptische Dehnungsmessungen und Photogrammetrie ermöglichen eine präzisere Beschreibung des Verbundverhaltens. Darüber hinaus bieten sie die Möglichkeit, bestehende Bauwerke, bei denen herkömmliche rechnerische Nachweise nicht mehr anwendbar sind, auf Basis experimenteller Untersuchungen detailliert zu bewerten und nachzuweisen. Die aktuelle Verbundforschung ist ein entscheidender Baustein, um den Herausforderungen im Stahlbetonbau zu begegnen und die langfristige Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Bauwerken zu gewährleisten.

The increasing automation of reinforcement and fabrication processes, as well as the use of new, sustainable and high-strength materials, require a revision of the present models and design concepts, which will not be fully completed even in the new generation of Eurocode 2. This article provides an insight into the current research on the bond behaviour of concrete reinforcement at TUM, with a particular focus on

industrial prefabrication, high-strength reinforcement and the metrological recording and experimental description of bond. Innovative measurement methods, such as fibre-optic strain measurement and photogrammetry, provide a more accurate description of the bond behavior. Furthermore, they offer the possibility to evaluate and verify existing structures in detail on the basis of experimental investigations, where conventional computational verification is no longer applicable. Ongoing collaborative research is a crucial element in meeting the challenges of reinforced concrete construction and ensuring the long-term safety, economic efficiency and sustainability of structures.

Einleitung

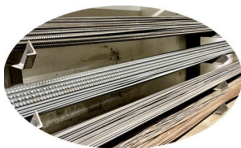
„Der Verbund [ist] erstaunlich komplex für ein Thema, das für Praktiker oft wie ein kleines Detailproblem erscheint“ [[1], Vorwort, S. IV, Übers. d. Verf.], schreibt John Cairns, ehemaliger Vorsitzender der Arbeitsgruppe *fib* TG4.5 „Verbund- und Materialmodelle“ (heute *fib* TG2.5) und maßgeblich an der Entwicklung der Verbundmodelle der 2. Generation des Eurocode 2 beteiligt. Auch mehr als ein Jahrhundert nach den ersten umfangreichen Verbunduntersuchungen an profilierten Bewehrungsstäben durch *Abrams* im Jahr 1913 [2] und vielen nachfolgenden Forschungsarbeiten, in Deutschland insbesondere durch *Rüsch*, *Rehm* und *Eligehausen* [3–5], ist die Untersuchung und Modellierung des Verbundverhaltens von unvermin- derter Bedeutung für das Streben nach einer nachhaltigen und wirtschaftlichen Stahlbetonbauweise. Dabei sind auch heute noch viele der Mechanismen des Verbundes zwischen Bewehrung und Beton nicht abschließend verstanden. Der Verbund ist nicht weniger als die Grundlage für die Leistungsfähigkeit des Stahlbetons – ein Verbundwerkstoff.

Die zunehmende Automatisierung von Bewehrungs- und Fertigungsprozessen sowie neue, ressourcenschonende und hochfeste Werkstoffe erfordern eine Revision und Erweiterung der bisherigen Modelle und Nachweis- konzepte im Stahlbetonbau, die auch mit den Entwicklungen für die neue Generation des Eurocode 2 nicht abgeschlossen sein wird: So müssen für den generellen Einsatz hochfester Bewehrung die Grundlagen der Gebrauchstauglichkeitsnachweise überarbeitet werden. Die Verwendung von Betonstahl in Ringen, deren veränderte Rippengeometrie und Verbundverhalten sich wesentlich von herkömmlichem Betonstahl unterscheiden, stellt

einen weiteren Schritt in der Evolution der Betonstahleentwicklung dar. Gleichzeitig ermöglichen neue und innovative Messtechniken eine genauere Erfassung des Verbundes und damit die Ableitung präziser Verbundmodelle. Diese Fortschritte eröffnen die Möglichkeit bestehende Bauwerke, bei denen die bisherigen rechnerischen Nachweise nicht mehr anwendbar sind, auf Basis großmaßstäblicher experimenteller Untersuchungen detailliert zu bewerten und nachzuweisen. Damit ist eine fortwährende Erhaltung von Bestandsbauwerken trotz stetig steigender Anforderungen möglich, wie ein kürzlich durchgeführtes Praxisprojekt am Lehrstuhl für Massivbau der TUM eindrucksvoll gezeigt hat. Der folgende Beitrag gibt einen Einblick in die aktuelle Forschung zum Verbundverhalten von Betonstahlbewehrung, neue Entwicklungen und Anwendungen.

Innovative Betonstahlbewehrung

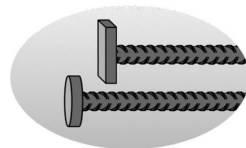
Die gesamte Baubranche befindet sich derzeit im Wandel hin zu einem klimafreundlicheren Bauen mit digitalen Prozessen und innovativen, automatisierten Fertigungsverfahren sowie dem Streben nach einem nachhaltigen Umgang mit Ressourcen und Materialien sowie die Reduktion von CO₂-Emissionen. Eine entscheidende Bedeutung kommt dem modularen Bauen durch industrielle Vorfertigung mit automatisierten Bewehrungskonzepten mit Betonstahl vom Ring, Hochleistungswerkstoffen, u.a. hochfester Bewehrung, und innovativen Konzepten zur Bewehrungsführung, wie z.B. Verankerung mittels Kopfbolzen oder Schlaufen zu (s.a. Abb. 1).



(a) Bewehrungsstabstahl



(b) Betonstahl vom Ring



(c) Stab mit Kopfbolzen

Abb. 1: Arten der Betonstahlbewehrung und -verankerung

Hochfeste Bewehrung: Der Einsatz von hochfester Bewehrung (Streckgrenze $\geq 700 \text{ N/mm}^2$) ermöglicht unter günstigen Randbedingungen eine Reduzierung der Bewehrungsmengen um bis zu 25 % gegenüber konventioneller Betonstahlbewehrung (Streckgrenze 500 N/mm^2) und ist ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zum ressourceneffizienten und damit nachhaltigen Bauen. Bei der Ausnutzung höherer wirksamer Stahlspannungen bei gleichzeitig geringeren Bewehrungsmengen sind jedoch größere Bauteilverformungen und Rissbreiten zu erwarten, die neben der Einhaltung der Anforderungen an den Grenzzustand der Tragfähigkeit die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit nicht überschreiten dürfen. In der Praxis findet hochfester Betonstahl derzeit überwiegend in druckbeanspruchten Bauteilen (Stützen) Anwendung. Ein Einsatz in biegebeanspruchten Bauteilen ist derzeit aufgrund fehlender Untersuchungen und Nachweiskonzepte ohne Zulassung im Einzelfall nicht möglich und führt zu einer Begrenzung der nutzbaren Stahlspannungen auf 500 N/mm^2 [6, 7]. Der Einsatz wirksamer höherfester Betonstahlbewehrung auch in biegebeanspruchten Bauteilen könnte jedoch zielführend sein, um die Potenziale von Stahlbeton nachhaltiger zu nutzen. Die nächste Generation der Eurocodes, vgl. FprEN 1992-1-1 [8] (Einführung bis 2027 [9]), lässt zukünftig Betonstahlbewehrung mit Streckgrenzen bis 700 N/mm^2 zu, über deren Verwendung letztlich der jeweilige Nationale Anhang entscheidet. Untersuchungen an hochfesten Bewehrungsstäben mit Rippengeometrien nach DIN 488 [10] sowie die Erarbeitung von Empfehlungen und Bemessungskonzepten sind derzeit Gegenstand laufender Forschung am Lehrstuhl für Massivbau der TUM.

Betonstahl vom Ring: Betonstahl vom Ring ist für die automatisierte industrielle Bauweise mit Vorfertigung von Bauteilen und Bauteilgruppen unverzichtbar. Günstige Lagerhaltung und ein erhebliches Einsparpotential durch Reduzierung des Verschnitts und maßgenaues Ablängen der Bewehrungsstäbe sind nur einige der wesentlichen Vorteile abgewickelter Bewehrungserzeugnisse gegenüber konventioneller Bewehrung mit Stabstahl und Matten. Um dem hohen Verschleiß der Rippen von Betonstahl vom Ring während des Richtprozesses der immer größer werdenden Stabdurchmesser entgegenzuwirken, werden die Rippen deutlich breiter und flacher ausgebildet als die typischerweise sichelförmigen Rippen des Bewehrungsstabstahls. Eine Vergrößerung der Kopfbreiten führt bei gleichbleibendem Rippenabstand zu kleineren Betonkonsolen (der mit Beton gefüllte Bereich

zwischen den Betonstahlrippen) und möglicherweise zu vorzeitigem Verbundversagen durch Abscheren derselben. Des Weiteren nimmt die Relativverschiebung zwischen Stahl und Beton zu, was zu einem weicheren Verbund und einer damit einhergehenden größeren Verformung und Rissbreite führt. Mit größer werdenden Stabdurchmessern und leistungsfähigeren Betonen steigt auch die Kraft, die über eine wirksame Rippengeometrie durch Verbund übertragen werden muss. Der Rechenwert der bezogenen Rippenfläche f_R ist wegen der fehlenden Berücksichtigung der Rippenbreite nicht pauschal für die zuverlässige Abbildung dieses Sachverhalts geeignet.

Kleinformatige Ausziehkörper, wie sie in RILEM [11], DIN10080 [12] oder auch Janovic [13] beschrieben sind, eignen sich sehr gut für den Vergleich unterschiedlicher Rippengeometrien, jedoch nicht für eine pauschale Übertragung auf reale Bauteile oder Tragwerke. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen an zentrischen und konsolenförmigen Ausziehkörpern mit marktüblichen Betonstahlgeometrien vom Ring und Betonstahl haben gezeigt, dass Betonstahl vom Ring bei Materialversuchen mit reinem Ausziehversagen (Abscheren der Betonkonsolen) im Mittel eine deutlich geringere maximale Verbundspannung erreicht als Betonstahl (Abb. 2a). Das zuletzt in [8] oder [14] diskutierte geometrische Verhältnis von Rippenbreite zu Rippenabstand b/c scheint die Abnahme der bezogenen Verbundspannung mit steigendem Verhältnis gut annähern zu können (Abb. 2b) und stellt eine sinnvolle Ergänzung zum derzeit üblichen Rechenwert der bezogenen Rippenfläche f_R dar. Für das für Bauteile mit praxisüblicher Betondeckung maßgebende Spaltversagen wurden jedoch kaum Unterschiede in der experimentell ermittelten Verbundfestigkeit verschiedener Rippengeometrien nach normativen Vorgaben festgestellt. Praxisnahe Endverankerungs- und Übergreifungsstoßversuche an Biegeträgern ergaben ein annähernd gleiches Verbundverhalten, aus dem bisher kein eindeutiger Trend hinsichtlich der dafür verantwortlichen geometrischen Eigenschaften der Betonstähle abgeleitet werden konnte. Die Formulierung entsprechender Empfehlungen für Praxis und Normung aus den umfangreichen Untersuchungen aus Material- und Bauteilversuchen ist Gegenstand eines aktuellen Forschungsprojektes am Lehrstuhl für Massivbau der TUM.

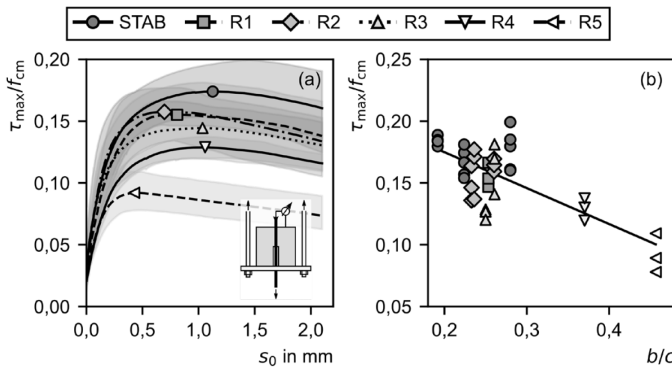


Abb. 2: Bezogene Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung (a) und Einfluss des b/c -Verhältnisses auf τ_{\max} (b) kategorisiert nach Rippengeometrien am Durchmesser 12 mm

Verankerung mit Kopfbolzen: Der konventionelle Einsatz von Verankerungen und Übergreifungsstößen mit geraden Stabenden erreicht in der modernen, immer komplexer werdenden Baupraxis häufig die Grenzen der Herstellbarkeit. Die Ausführung von Verankerungen und Stabübergreifungen mit Ankerköpfen und Schlaufen ermöglicht dagegen eine deutliche kompaktere Bauweise bei gleichzeitig hohen Anforderungen an Robustheit, Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit. Im neuen Entwurf des Eurocode 2 [8, 15] wurden die Bemessungsregeln für Verankerungen und Übergreifungsstöße grundlegend überarbeitet und zusätzlich neue Bemessungsregeln für Verankerungen und Übergreifungsstöße von Stäben mit Ankerköpfen und Schlaufen eingeführt. In Deutschland liegen bisher nur wenige Erfahrungen mit den neu vorgeschlagenen Bemessungsvorschriften für diese Verankerungs- bzw. Übergreifungsvarianten vor. Derzeit wurden am Lehrstuhl für Massivbau der TUM verschiedene Forschungsvorhaben beantragt, um diese Wissenslücken zu schließen.

Neue Messverfahren

Neue Messverfahren wie die quasikontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung (DFOS, engl. *Distributed Fiber Optic Sensing*) in Kombination

mit Verfahren auf Basis der Nahbereichsphotogrammetrie und der digitalen Bildkorrelation (DIC, engl. *Digital Image Correlation*) eröffnen weitreichende Möglichkeiten und Perspektiven für die messtechnische Erfassung des Betonstahlverbunds. DFOS basiert auf der Rayleigh-Rückstreuung des Frequenzspektrums eines kohärenten Lichtsignals und ermöglicht sehr hochauflösende Messungen mit Messpunktabständen von weniger als einem Millimeter. Gegenüber konventioneller Messtechnik wie z.B. Dehnungsmessstreifen, induktiven Wegaufnehmern etc. liegt ein entscheidender Vorteil in dem wesentlich höheren Informationsgehalt aus einer nicht punktuellen, sondern quasikontinuierlichen Messung entlang der Sensorstrecke [16]. Da der Sensor gleichzeitig als Zuleitung dient, wird der Verbund nicht durch zusätzliche Kabel oder Messleitungen beeinflusst. Um auch die Dehnungszustände des Betons genau zu erfassen, können weitere faseroptische Sensoren auf die Betonoberfläche appliziert oder einbetoniert werden. Ergänzt durch die Erfassung der Rissbildung mittels digitaler Bildkorrelation ermöglicht dies einen tieferen Einblick in die „lokale“ Verbundproblematik bei praxisüblichen Betondeckungen. Die quasikontinuierliche Dehnungsmessung wurde am Lehrstuhl für Massivbau bereits in einer Vielzahl von experimentellen Untersuchungen und Forschungsarbeiten erfolgreich zur Erfassung des Verbundes eingesetzt (u.a. [17–19]) und daraus differenzierte Verbundmodelle abgeleitet (z.B. [20]).

Die DFOS-Messung an einbetonierten Bewehrungsstäben liefert eine räumlich und zeitlich kontinuierliche Erfassung der Dehnungszustände. Dies bedeutet, dass die Dehnungsverteilung über den räumlichen Untersuchungsbereich hochauflösend erfasst werden und zusätzlich eine hochfrequente Messung über viele Zeitschritte erfolgt. Aus den gemessenen Dehnungen $\varepsilon_s(x)$ können die quasikontinuierlichen Verläufe von Stahlspannung $\sigma_s(x)$, Verbundspannung $\tau(x)$ und Schlupf $s(x)$ zur Darstellung des Verbundverhaltens abgeleitet werden: Über die Multiplikation der ermittelten Stahldehnungsverteilung mit dem in Referenzversuchen ermittelten Elastizitätsmodul E_s des Bewehrungsstahls kann die Stahlspannungsverteilung entlang der Stabachse berechnet werden. Durch numerische Differentiation der Stahlspannungsverteilung erhält man die nichtlineare Verteilung der Verbundspannungen. Die Integration der Differenz zwischen der ermittelten Dehnungsverteilung des Stahls und der des Betons $\varepsilon_c(x)$ liefert den Schlupf zwischen Bewehrung und Beton. Das dargestellte Verfahren wird u.a. in [19, 20] ausführlich erläutert. Abb. 3(a) zeigt exemplarisch die fa-

seroptische Dehnungsmessung eines Dehnkörperversuchs mit zwei einbetonierten Bewehrungsstäben. Abb. 3(b) stellt die DIC-Messung eines Übergreifungsstoßversuchs mit verschiedenen Lastzuständen dar. Die kontaktlose, optische Erfassung der Betonverzerrung und Auswertung der relativen Pixelverschiebungen (DIC) ermöglicht zusammen mit DFOS eine gegenseitige Validierung, globale Verfolg der Rissbildung und analytische Betrachtung der Rissentwicklung.

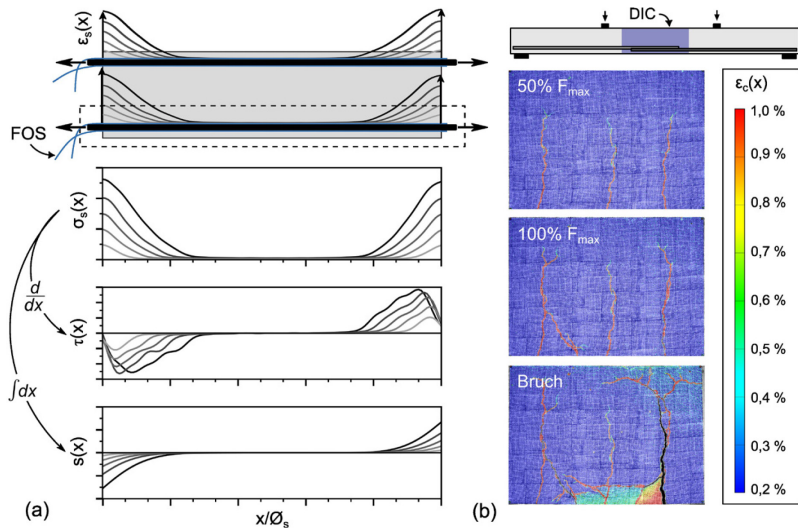


Abb. 3: (a) Dehnungs-, Stahlspannungs-, Verbundspannungs- und Schlupfverteilung in einem Dehnkörperversuch mit DFOS auf den einbetonierten Bewehrungsstäben, (b) DIC-Messung an einem Übergreifungsstoßversuch mit verschiedenen Lastzuständen

Präzise Modellbildung

Der Zusammenhang zwischen Verbundspannung und Schlupf, die sogenannte Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung, dient als Arbeitslinie für den Verbund und beschreibt die komplexen Zusammenhänge der Verbundtragwirkung. Modelle für eine Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung

gen werden i.d.R. experimentell ermittelt. Je nach Probenform und Messaufbau können sowohl die ermittelte Verbundtragfähigkeit als auch der Schlupfverlauf und damit die gesamte Charakteristik der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung stark voneinander abweichen. Aufgrund unzureichender messtechnischer Erfassung, ungenügender Abbildung der in der Praxis vorherrschenden Verhältnisse und unzutreffender, stark vereinfachender Annahmen, z.B. einer konstanten Verbundspannungsverteilung entlang der Verbundlänge des im Beton eingebetteten Bewehrungsstabes, weisen viele der üblicherweise verwendeten und experimentell abgeleiteten Verbundmodelle eine mehr als unzureichende Genauigkeit auf. Erst die genaue messtechnische Erfassung des lokalen Verbundverhaltens ermöglicht die Ableitung entsprechend valider und zutreffender Verbundmodelle.

Basierend auf Parameterstudien an faseroptisch instrumentierten Dehnkörperversuchen und weiteren materialwissenschaftlich ausgerichteten experimentellen Untersuchungen wurde ein detailliertes Verbundmodell abgeleitet und durch großmaßstäbliche Balkenversuche verifiziert. Dazu wurden an jeder Stelle der belasteten Stäbe der Dehnkörperversuche die Verläufe von Verbundspannung und Schlupf zueinander in Beziehung gesetzt und empirische Arbeitslinien bzw. lokale Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen abgeleitet (Abb. 4). Die mathematische Formulierung des Verbundmodells in Abhängigkeit der relevanten Einflussgrößen erfolgte mittels nichtlinearer Regression. Zusätzlich erfolgte eine Erweiterung und umfassende Validierung des Verbundmodells durch multivariate Modellanpassung an eine experimentelle Versuchsdatenbank. Die Versuchsdatenbank für Übergreifungsstöße und Verankerungen umfasst mehr als 1200 Bauteilversuche aus der Literatur mit praxisnahen Abmessungen. Das entwickelte Modell ermöglicht die detaillierte Ermittlung der Verbundspannungsverteilung entlang der Verbundlänge von im Beton eingebetteten Bewehrungsstäben, so dass die komplexen Zusammenhänge der Verbundtragwirkung bei unterschiedlichen Lastzuständen im GZT und GZG besser verstanden werden können. Dies erlaubt sowohl die Bemessung von Übergreifungsstößen und Verankerungen als auch die Berechnung von Rissbreiten oder die Berücksichtigung von Tension Stiffening. Mit dem Modell können weiterhin Aussagen zur Gebrauchstauglichkeit von Übergreifungsstößen und Verankerungen, zum Einsatz von hochfester Bewehrung oder Bewehrung aus Faserverbundwerkstoffen und zu Übergreifungsstößen und Verankerungen mit mechanischen Hilfsmitteln wie

Kopfbolzenanker getroffen werden. Das Modell und die Anwendung ist in [20] ausführlich dargestellt.

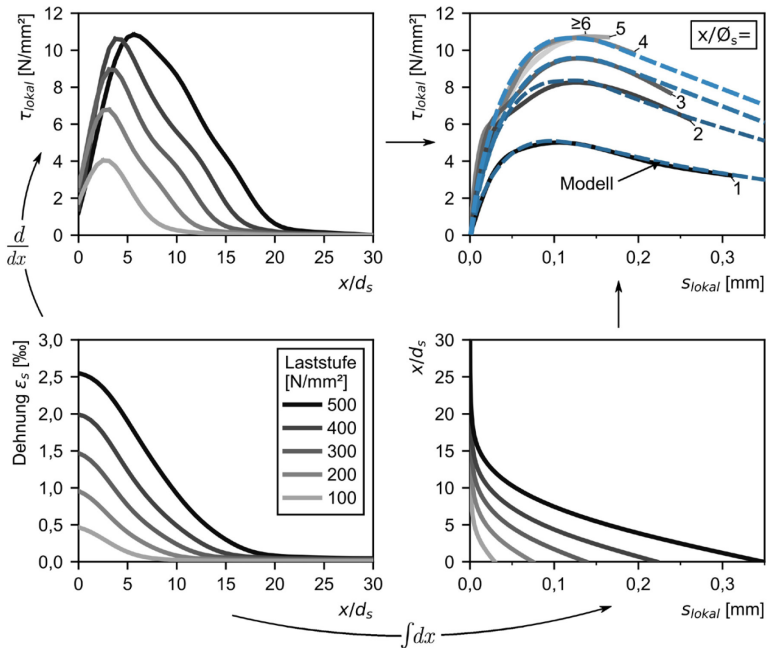


Abb. 4: Bestimmung einer lokalen Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung am Beispiel des Dehnkörperversuchs aus Abb. 3(a)

Da die Anwendung solch komplexer Verbundmodelle jedoch für die Praxis häufig nicht sinnvoll ist, müssen die entsprechenden Erkenntnisse in zugängliche Berechnungsgleichungen überführt werden. Zu diesem Zweck wurden die Bemessungskonzepte und die Bemessungsgleichungen für Verankerungen und Übergreifungsstöße aus FprEC2 [8] sowie *fib* Model Code 2010 und 2020 [21, 22] ebenfalls anhand der Versuchsdatenbank verifiziert, validiert und optimiert (siehe [18, 20, 23]).

Untersuchungsgestützte Bestandsbewertung

Die Anforderungen an bestehende Ingenieurbauwerke haben sich im Laufe der Zeit unter anderem durch höhere Belastungen, wie z.B. Schwerlastverkehr, kontinuierlich verändert. Die langfristige Erhaltung dieser infrastrukturell bedeutsamen Bauwerke ist nicht nur aus volkswirtschaftlicher Sicht von großer Wichtigkeit, sondern spielt auch im Kontext einer nachhaltigen und ressourceneffizienten Bauwirtschaft eine zentrale Rolle. Obwohl vereinfachende Annahmen in der Tragwerksplanung für die Berechnung und Bemessung unerlässlich sind, können die tatsächlichen Verhältnisse oder veränderte Lastanforderungen erheblich von diesen Annahmen abweichen. Hinzu kommen Planungs- und Ausführungsmängel, insbesondere im harten Wettbewerb der schnelllebigen Baubranche. Wo rechnerische Nachweisverfahren an ihre Grenzen stoßen, bieten angepasste experimentelle Untersuchungen wertvolle Erkenntnisse für eine versuchsgestützte Bemessung und Erhaltung des Bestands. Diese Untersuchungen ermöglichen die Verifizierung bestehender Modelle oder die Entwicklung neuer Methoden, die auf die spezifische Situation des Bauwerks zugeschnitten sind. Den zuvor skizzierten innovativen Messkonzepten zur Erfassung des Verbundverhaltens sowie den detaillierten und präzisierten Verbundmodellen kommt dabei eine entscheidende Rolle zu, wie an einem Beispiel verdeutlicht werden soll.

Bei einem wichtigen Infrastrukturbauwerk führten mangelhafte Planung und Bauausführung zu erheblichen Schadstellen entlang der Übergreifungsstöße, bei denen aufgrund einer zu dichten Bewehrungsführung Bereiche von über 80 cm teilweise unvollständig mit Beton ausgegossen wurden. Die bis zur Freilegung der Folgebaumaßnahmen nicht einsehbaren Unterseiten der Träger verhinderten die Entdeckung der Fehlstellen. Herkömmliche Berechnungsverfahren sowie detaillierte numerische Analysen waren allein nicht mehr in der Lage, die ausreichende Tragsicherheit des Bauwerks nachzuweisen. Aus diesem Grund wurden maßgebende Belastungsszenarien an großformatigen Balken unter Berücksichtigung schadhafter Übergreifungsstößen durchgeführt, um den Einfluss der fehlerhaften Bauausführung zu evaluieren. Die intensive messtechnische Erfassung durch verteilte faseroptische Sensoren (DFOS) an Bewehrung und Beton, die Erfassung der Rissbildung durch photogrammetrische Verfahren mit digitaler Bildkorrelation sowie konventionelle Kraft-, Verformungs- und

Dehnungssensoren ermöglichten eine umfassende Bewertung des Verbundverhaltens entlang der fehlerhaft ausgeführten Übergreifungsstöße. Abb. 5 zeigt die Untersuchung eines solchen Übergreifungsstoßversuchs mit Fehlstellen, die durch zu dicht verlegte Bewehrungsstäbe in der unteren Lage entstanden sind. Erst auf Grundlage dieser umfassenden untersuchungsgestützten Bewertung mit detaillierten messtechnischen Erfassung des Verbundes konnte ein Ertüchtigungskonzept ausgearbeitet werden, das den nachhaltigen Betrieb des Bauwerks ermöglicht.

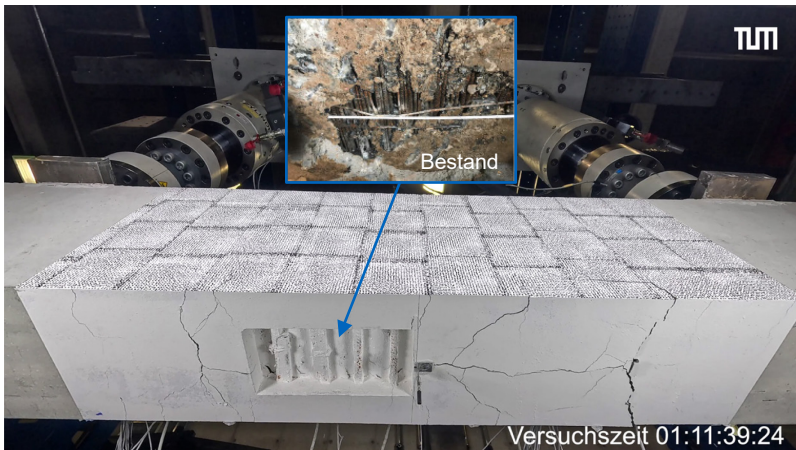


Abb. 5: Kombinierte Unter- und Seitenansicht eines Übergreifungsstoßversuchs mit Fehlstelle, Untersicht am realen Bauwerk

Fazit

Der Beitrag gibt einen Einblick in die aktuelle Forschung zum Verbundverhalten von Betonstahlbewehrung an der TUM sowie neue Entwicklungen und Anwendungen. Die industrielle Vorfertigung mit automatisierten Bewehrungskonzepten mit Betonstahl vom Ring, Hochleistungswerkstoffen wie hochfester Bewehrung sowie innovativen Bewehrungslösungen wie Verankerungen mit Kopfbolzen oder Schlaufen kommt bei der Transformation zum klimafreundlichen Massivbau dabei eine entscheidende Bedeutung zu: Hochfeste Bewehrung bietet erhebliche Einsparpotenziale bei

den Bewehrungsmengen. Gleichzeitig sind im Hinblick auf die Begrenzung der Rissbreiten ausgereifte Bemessungskonzepte für den gezielten Einsatz erforderlich, die derzeit Gegenstand laufender Forschung sind. Weiterhin wird das Verbundverhalten von Betonstahl in Ringen untersucht und es werden Parameter entwickelt, die eine bessere Bewertung der veränderten Rippengeometrie ermöglichen.

Neue Messverfahren wie die quasikontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung oder photogrammetrische Verfahren mit digitaler Bildkorrelation eröffnen weitreichende Möglichkeiten und Perspektiven für die messtechnische Erfassung des Betonstahlverbundes und der „lokalen“ Verbundproblematik bei praxisüblichen Betondeckungen. Die Messverfahren sind vielseitig einsetzbar und erlauben eine wesentlich bessere Beschreibung des Verbundverhaltens und die Ableitung präziserer Verbundmodelle. Da die Anwendung zu komplexer Modelle für die Praxis oft nicht sinnvoll ist, werden die entsprechenden Erkenntnisse in zugängliche Berechnungsgleichungen überführt.

Diese messtechnischen Fortschritte sowie die präzise Modellierung und Beschreibung des Verbundverhaltens eröffnen neue Möglichkeiten zur detaillierten Bewertung und zum Nachweis bestehender Bauwerke, bei denen die herkömmlichen rechnerischen Nachweise nicht mehr anwendbar sind. Ein aktuelles Praxisprojekt zeigt, dass trotz defizitärer Bausubstanz und mangelhafter Bauausführung mit Hilfe solcher versuchsbasierten Nachweiskonzepte das Bauwerk erhalten werden konnte. Dieses Beispiel verdeutlicht das Potenzial aktueller Innovationen und messtechnischer Neuentwicklungen in der Verbundforschung, die einen direkten Transfer in die Praxis ermöglichen.

Literatur

- [1] *Bond and Anchorage of Embedded Reinforcement: Background to the fib Model Code for Concrete Structures 2010*, fib Bulletin 72, Fédération internationale du béton (fib), Lausanne, 2014.
- [2] D. A. Abrams, "Test of Bond Between Concrete and Steel (Bulletin No. 71)", University of Illinois, 1913.
- [3] H. Rüschi, "Zur Frage der zulässigen Spannungen für die hochwertigen Betonstähle", *Betonstein-Zeitung*, Nr. 10, 1951.

- [4] G. Rehm, H. Martin und P. Noakowski, "Einfluß der Profilierung und des Betons auf die Verbundqualität von Stahl in Beton: Ausziehversuche an gefrästen Stählen", Technische Universität München, 1970.
- [5] R. Eligehausen, *Übergreifungsstöße zugbeanspruchter Rippenstäbe mit geraden Stabenden: DAfStb-Heft 301*. Ernst & Sohn, 1979.
- [6] *Betonstahl: Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung*, DIN 488-1, Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Berlin, Aug. 2009.
- [7] *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken: Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, DIN EN 1992-1-1/NA, Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Berlin, Apr. 2013.
- [8] *Final Draft FprEN 1992-1-1: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*, FprEN 1992-1-1, Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel, Apr. 2023.
- [9] Förderverein Massivbau der TU München e.V., Hg., *26. Münchener Massivbau Seminar*, 26. Aufl. München, 2022.
- [10] *Betonstahl: Betonstahl in Ringen, Bewehrungsdraht*, DIN 488-3, Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Berlin, Aug. 2009.
- [11] International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, "RC6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test" in *Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials*, International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, Hg., S. 218–220.
- [12] *Stahl für die Bewehrung von Beton: Schweißgeeigneter Betonstahl - Allgemeines; Deutsche Fassung EN 10080:2005*, DIN EN 10080, Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Berlin, Aug. 2005.
- [13] K. Janovic, "Bericht über den neuen konsolenförmigen Ausziehkörper als Vorschlag für eine allgemeingültiges Verbundprüfverfahren", Technische Universität München, München 1349/Ja/K, 1979.
- [14] J. Fröse und O. Fischer, "Influence of Rib Geometry on the Bond Strength of Reinforcing Steel in Coils" in *fib Symposium 2023*, Istanbul, 2023, S. 536–545, doi: 10.1007/978-3-031-32519-9_52.

- [15] Europäisches Komitee für Normung, Hg., *Updated Draft by SC2/WG1/CDG prEN 1992-1-1-D7 Working File (Rev. 7) 2020-11-16 AFTER SC2 FOR CEN-ENQUIRY: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules - Rules for buildings, bridges and civil engineering structures*. Brüssel: Europäisches Komitee für Normung.
- [16] O. Fischer, S. Thoma und S. Crepaz, "Quasikontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung zur Rissdetektion in Betonkonstruktionen", *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 114, Nr. 3, S. 150–159, 2019, doi: 10.1002/best.201800089.
- [17] G. Schmidt-Thrö, W. Scheufler und O. Fischer, "Kontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung im Stahlbetonbau", *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 111, Nr. 8, S. 496–504, 2016, doi: 10.1002/best.201600026.
- [18] J. Hegger, O. Fischer, B. Camps und J. Fröse, "Wirtschaftliche Bemessungsansätze für Betonstahlverbundverankerungen und Übergreifungsstöße auf der Grundlage von faseroptisch instrumentierten Bauteilversuchen" Schlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 20443 N, RWTH Aachen University / Technische Universität München, 2022.
- [19] J. Fröse und O. Fischer, "Investigations on the Bond Behavior of Ribbed Reinforcing Bars with the Use of Fiber-Optic Strain Measurement" in *Bond in Concrete: Bond, Anchorage, Detailing: 5th International Conference: Stuttgart, Germany, 25th - 27th July 2022 : proceedings*, J. Hofmann und G. Plizzari, Hg., Universität Stuttgart, 2022, S. 50–61.
- [20] J. Fröse, "Zum Verbundverhalten von gerippter Betonstahlbewehrung bei Spaltversagen" Dissertation (eingereicht), Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, München, 2024.
- [21] fédération internationale du béton, Hg., *fib Model Code for Concrete Structures (2010)*. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.
- [22] fédération internationale du béton, Hg., *fib Model Code for Concrete Structures (2020)*. Lausanne: Ernst & Sohn, 2023.
- [23] L. Staller, J. Fröse und O. Fischer, "Versuchsdatengestützte Evaluierung neuester Verbundbemessungsmodelle für die Verankerung und Übergreifung von Betonstahlbewehrung (peer-reviewed)", *Bauingenieur*, Jg. 99, Nr. 11, 2024.