

Verzinken

Name der AiF-Forschungsvereinigung (FV)

IGF-Vorhaben-Nr:

Blatt-Nr./Jury-Nr.:

IGF-Antrags-Nr.: /

Aktenzeichen der FV

(wird von der AiF eingesetzt)

Kurzbeschreibung zum Forschungsantrag

1 Forschungsthema

Langtitel:

Technologie- und Sicherheitszuwachs bei der Anwendung von feuerverzinktem Betonstahl zum Ausbau einer nachhaltigen Marktposition im Stahlbetonbau

Kurztitel:

Feuerverzinken von Betonstahl

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

2.1 Forschungsanlass

Feuerverzinkte Betonstähle sind in Deutschland über eine bauaufsichtliche Zulassung geregelt. Die darin enthaltenen Vorgaben für den Verzinkungsprozess, die Verarbeitung und Bemessung wirken als Hemmnisse für die Anwendung von feuerverzinktem Betonstahl und verhindern eine Etablierung am Markt in großem Umfang, ohne dass diese Vorgaben aus Sicht der Antragsteller durch systematische wissenschaftliche Untersuchungen hinlänglich gesichert wären.

Die Antragsteller sehen in der Verwendung feuerverzinkter Betonstähle technisch für eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit bewehrter Betonbauteile und wirtschaftlich für die Erschließung neuer Marktanteile für die Hersteller und Weiterverarbeiter von Stahlbetonbewehrungen ein großes Potenzial, das mit dem beantragten Forschungsprojekt erschlossen werden soll.

2.2 Ausgangssituation

2.2.1 Allgemeines

In Deutschland ist seit 1981 das Feuerverzinken von Betonstahl zur Verwendung im Stahlbeton über die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) mit der Zulassungsnummer Z-1.4-165 geregelt. Die Arbeit an den europäischen Normentwürfen zu feuerverzinkten Betonstahlprodukten (prEN10348-1 und prEN10348-2) ist erschwert, da hinreichend gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse zu diesem Produkt fehlen.

Nach der derzeit gültigen Zulassung dürfen Betonstabstahl, Betonstahl in Ringen und Betonstahlmatten nach DIN 488 oder nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung feuerverzinkt werden. Die Anforderungen an das Feuerverzinken und die Zinkbadzusammensetzung sind in der DASt-Richtlinie 022 „Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen“ festgelegt. Die Zulassung deckt lediglich die Verfahrensweise ab, feuerverzinkten Betonstahl erst nach dem Feuerverzinken weiterzubearbeiten, das Biegen als Verarbeitungsschritt vor dem Feuerverzinken ist nicht zugelassen.

Feuerverzinkte Betonstähle dürfen nach der Zulassung wie unverzinkte Betonstähle nach EC 2/NA D (DIN EN 1992-1-1/NA, vor dem 01.07.2012 DIN 1045-1) zur Bewehrung von Stahlbeton verwendet werden. Ein Rückbiegen feuerverzinkter Betonstähle ist unzulässig. Betonstahl darf nach dem Verzinken nicht geschweißt werden.

2.2.2 Feuerverzinken von Betonstahl - Stand der Forschung

2.2.2.1 Werkstofftechnik

Kaltumgeformte Stahlteile weisen aufgrund des sich bei der Kaltumformung ausbildenden Eigenspannungszustandes grundsätzlich eine Anfälligkeit für eine flüssigmetallinduzierte Rissbildung (LMAC, Liquid Metal Assisted Cracking, LMAC, Flüssigmetall induzierten Spannungsrisskorrosion) beim Feuerverzinken auf. Dadurch werden die beim Verzinken ohnehin wirkenden Risikofaktoren wie thermisch bedingte Zugspannungen, flüssige Zinkschmelzen unterschiedlicher Zusammensetzungen und in unterschiedlichem Maße für LMAC anfällige Stähle zusätzlich verschärft.

Bei Betonstählen sind diese Zusammenhänge relevant, da diese bei der Herstellung (kaltverformt, kaltgereckt), Weiterverarbeitung (Richten von Ringmaterial) und beim Biegen vor dem Feuerverzinken (derzeit nicht zugelassen) in unterschiedlichem Maße kaltumgeformt werden.

Der Schadensmechanismus der LMAC und in diesem Zusammenhang insbesondere die Bedeutung der Zusammensetzung der Zinkschmelzen wurden in den letzten Jahren für den Bereich des Stahlbaus im Zusammenhang mit verschiedenen Schäden umfangreich untersucht. Für feuerverzinkte Betonstähle liegen keine diesbezüglichen Ergebnisse vor.

Unabhängig von einer mechanischen Beanspruchung führt das Feuerverzinken zu interkristallin ausgebildeten Randdefekten in der Größenordnung von 1-2 Kornlagen, die zu einer Verringerung der Dauerfestigkeit führen. Unter LMAC-Bedingungen erweitern sich diese Korngrenzschädigungen zu rissähnlichen Anfangsdefekten, von denen dann bei schwingender Beanspruchung Ermüdungsrisse ausgehen können. Die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-1.4-165 lässt nur eine Ausnutzung des Kennwertes der Ermüdungsfestigkeit von 75% zu, ohne dass dieser Wert durch systematische Untersuchungen bestätigt wäre.

2.2.2.2 Fertigungstechnik

Das Verformungsvermögen von Betonstählen hängt sowohl von materialbedingten Parametern (chemische Zusammensetzung, Gefügestruktur, Inhomogenitäten, Oberflächengestalt) als auch verfahrensbedingten Parametern (Umformtemperatur, Verformungsgeschwindigkeit, Spannungszustand in der Umformzone) ab. Beim Biegen feuerverzinkter Betonstähle sind darüber hinaus auch die Beschaffenheit der Zinkschicht und die Zinkschichtdicke von Bedeutung.

Die genannten Abhängigkeiten sind relevant bei der Angabe zulässiger Biegeparameter (Biegerolle/Stabdurchmesser, Biegetemperatur und Biegegeschwindigkeit) im Hinblick auf schadensfreie Biegeradien (Anrisse, Beschädigungen der Zinkschicht), sowie der Beurteilung einer möglichen Gefährdung durch LMAC, wenn die Verzinkung erst nach dem Biegen durchgeführt wird. Darüber hinaus sind sie von Bedeutung für das Rückbiegen unter Baustellenbedingungen und das Biegen im Bereich von Schweißungen bei der Herstellung von Mattenkörben.

Soweit Ergebnisse von Untersuchungen zum Biegen feuerverzinkter Betonstähle aus der Vergangenheit vorliegen, sind diese aufgrund der zwischenzeitlich erfolgten Entwicklungen in den Bereichen der Werkstoffe (Betonstahl, Beton) und der Fertigungsverfahren (Verzinkungsprozess) nicht ohne weiteres übertragbar. Für den im Rahmen des Forschungsprojektes angestrebten Verfahrensweg, erst nach dem Biegen zu Verzinken, liegen keine systematischen Ergebnisse früherer Untersuchungen vor. Gleiches gilt für die Frage der Zulässigkeit des Rückbiegens unter Baustellenbedingungen und des Schweißens feuerverzinkter Betonstähle.

Für die bereits bei herkömmlichen Betonstählen seitens der Weiterverarbeiter angestrebte Absenkung der zulässigen Verarbeitungstemperatur beim Biegen von derzeit -5 °C auf einen deutlich niedrigeren, der Baupraxis entsprechenden Wert und die Abminderung der für das Biegen geschweißter Bewehrung im geltenden Regelwerk vorgegebenen Biegerolldurchmesser bei der Herstellung von Mattenkörben aus geschweißten Lagermatten liegen ebenfalls keine Erkenntnisse vor.

2.2.2.3 Korrosionsschutz

Die Korrosionsschutzwirkung der Feuerverzinkung beruht in erster Linie auf einer Passivierung der Zinkoberfläche. Diese erfolgt in einem sehr frühen Stadium während der Erstarrung des Zementleims unter Bildung von Calciumhydroxozinkat auf der Zinkoberfläche, welches die weitere Zinkauflösung stark herabsetzt. Die im Zement enthaltenen Chromate bewirken eine Verminderung der Zinkkorrosion und ein Absinken des Potentials in den Bereich der Wasserstoffentwicklung.

Infolge der mit Einführung chromatreduzierter Zemente abgesenkten Chromatwerte findet eine verstärkte Anfangskorrosion der Zinkschichten im Frischbeton unter Bildung von Wasserstoff statt. Hierdurch wird das Verbundverhalten zwischen verzinktem Stahl und Beton nicht nachteilig beeinflusst. Rissbildungen in der Verzinkungsschicht oder ein Abplatzen von Schichten als mögliche Folge der Wasserstoffentwicklung konnten nicht beobachtet werden, so dass die dauerhafte Schutzwirkung der Verzinkungsschicht durch die Wasserstoffentwicklung nicht beeinträchtigt wird. Da Zink für Wasserstoff nahezu undurchlässig ist, kann eine Wasserstoffdiffusion in den Werkstoff bzw. in die Grenzfläche Stahl/Zink nur an Fehlstellen der Verzinkungsschicht (freiliegender Stahl) als realistisch angesehen werden.

Ergebnisse systematischer Untersuchungen zum Passivierungsverhalten und möglicher geeigneter Alternativen zur Hemmung der Wasserstoffreaktion, z. B. durch Phosphatierung oder Zugabe von Inhibitoren zum Frischbeton, nach der Einführung chromatreduzierter Zemente liegen nicht vor. Eine mögliche Auswirkung des entstehenden Wasserstoffs auf die Betonoberflächen filigraner Fertigbauteile oder Bauarten mit geringer Betondeckung durch Blasen- oder Porenbildung wurde bislang nicht hinreichend untersucht.

Die kathodische Schutzwirkung der Verzinkung in gerissenem Beton unter Einwirkung von chloridhaltigen Elektrolyten ist bisher nicht ausreichend erforscht. Die Reduktion der Zinkschicht innerhalb des Risses und eine daraus folgende Lochkorrosionserscheinung am freiliegenden Betonstahl wird erst möglich, wenn das Kontaktelement Stahl- Zink einen nicht ausreichend wirksamen Schutz bietet (Anoden-Kathoden-Verhältnis). In diesem Zusammenhang fehlen gesicherte Erkenntnisse zum Korrosionsverhalten in gerissenen Bereichen unter Chlorideinwirkung und eines kritischen Chloridgehalts sowie des. Eine Abschätzung der Lebensdauer und Aussagen zum wirtschaftlichen Vorteil der Feuerverzinkung sind auf der Basis des vorhandenen Wissens derzeit nicht möglich.

3 Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg

3.1 Forschungsziel

Das Forschungsprojekt zielt darauf ab, die derzeit bestehenden technischen und normativen Hemmnisse für die Anwendung von feuerverzinktem Betonstahl, die eine Etablierung am Markt in großem Umfang verhindern, abzubauen. Dabei wird grundsätzlich eine Übernahme der Ergebnisse in die einschlägigen Norm- und Regelwerke angestrebt.

3.1.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Für den Bereich der Fertigungstechnik werden die Ableitung von Anwendungsgrenzen und die statistisch abgesicherte Feststellung der Eignung zum Biegen bei tiefen Temperaturen, der Zulässigkeit des Rückbiegens unter Baustellenbedingungen und der zulässigen Biegerollendurchmessern bei der Herstellung von Mattenkörben im Bereich der Schweißstelle angestrebt.

Für den Bereich der Werkstofftechnik werden die verformungs- bzw. verzinkungsbedingten Randdefekte und deren Auswirkung auf die Schwingfestigkeitseigenschaften quantifiziert und der Umfang einer evtl. Abminderung der Dauerfestigkeit angegeben. Darüber hinaus werden für den bisher nicht zugelassenen Verfahrensweg Biegen – Verzinken das Risikopotenzial in Bezug auf eine flüssigmetallinduzierte Rissbildung bewertet und zulässige Biegeparameter angegeben.

Für die Konformitätskontrolle werden die notwendigen Prüfverfahren benannt und der erforderliche Prüfumfang angegeben.

Auf der Grundlage der elektrochemischen Untersuchungen wird der Korrosionsfortschritt in korrosiven Expositionen und Bauarten (Karbonatisierung, Chlorideinwirkungen) und in gerissenem Beton beziffert.

Die verarbeitungsbedingten Beschädigungen der Zinkschicht werden quantifiziert und im Hinblick auf eine mögliche wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion am Betonstahl beurteilt.

Darüber hinaus werden die Passivierungsreaktion und die Wasserstoffentwicklung im Frischbeton unter Angabe von Störungen der Betonoberfläche durch Blasenbildung/Poren, von alternativen Passivierungsverfahren und der Wirkung von Inhibitoren zur Hemmung der Wasserstoffentwicklung erfasst.

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wird die Auswirkung der Verwendung feuerverzinkter Betonstähle auf die Nutzungsdauer von Stahlbetonbauteilen und im Hinblick auf eine mögliche Reduzierung der Betondeckung/Reduzierung der Mindestdruckfestigkeitsklasse bei Verwendung von feuerverzinktem Betonstahl in Abhängigkeit von der Expositionsklasse abgeschätzt.

3.1.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Die elektrochemischen Untersuchungen erbringen neue Erkenntnisse zu den Korrosionsmechanismen feuerverzinkter Betonstähle im alkalischen Milieu und unter Chloridbeanspruchung bei Verwendung chromatreduzierter Zemente und gestatten zudem eine Aussage zur Nutzungsdauer von mit feuerverzinkten Betonstählen bewehrten Stahlbetonbauteilen. Es ist zu erwarten, dass die dabei gewonnenen Erkenntnisse auch im Stahlbau Anwendung finden können.

Die vorgesehenen Untersuchungen zum Dauerschwingverhalten und den Biegeeigenschaften werden zutreffende Erkenntnisse über den Einfluss der Verzinkung auf die mechanischen Eigenschaften feuerverzinkter Betonstähle und Werte für die bei der Bemessung anzusetzende Dauerfestigkeit liefern.

Durch die angestrebte Erweiterung des Temperaturbereichs im Hinblick auf die Verarbeitung bei tiefen Temperaturen wird die Wettbewerbsfähigkeit der Betonstahlhersteller auf dem Weltmarkt gestärkt. Der Nachweis der Zulässigkeit des Biegens geschweißter Betonstahlmatten (Mattenkörbe) mit reduzierten Biegerollendurchmessern und der Rückbiegbarkeit unter Baustellenbedingungen führen zu einer Vereinfachung und Beschleunigung des Bauablaufs und damit zu einer wirtschaftlicheren Produktions- und Bauweise. Die im Rahmen der Untersuchungen an feuerverzinkten Betonstählen gewonnenen Erkenntnisse werden sich auch auf herkömmliche Betonstähle übertragen lassen.

Für den bisher nicht zugelassenen Verfahrensweg Biegen – Feuerverzinken werden die Ergebnisse eine Modellbildung des für die flüssigmetallinduzierte Rissbildung (LMAC) bei Betonstählen verantwortlichen Schädigungsmechanismus ermöglichen, so dass auf der Grundlage von FEM-Simulationen ein gültiges Konzept für die Bewertung des LMAC-Risikopotenzials beim Verzinken von Betonstählen zur Verfügung gestellt werden kann. Zusammen mit den Ergebnissen der Biegeversuche lassen sich erstmalig Anwendungsgrenzen für die zulässigen Biegeradien bei diesem Verfahrensweg angeben.

Mit den erzielten Ergebnissen der systematischen Untersuchungen wird die Aufhebung der derzeit gültigen Einschränkungen zum Feuerverzinken kaltgebogener Stähle und die Etablierung einer neuen Fertigungsfolge bzw. Wertschöpfungskette am Markt angestrebt. In Verbindung mit den positiven Eigenschaften feuerverzinkter Betonstähle und der größeren Wirtschaftlichkeit durch die zu etablierende Fertigungsfolge ist eine deutliche Erhöhung der Einsatztiefe feuerverzinkter Betonstähle zu erwarten.

Die angestrebte Übernahme der Ergebnisse in die einschlägigen Norm- und Regelwerke wird zu neuen Vorschriften im Bereich des Stahlbetonbaus führen und mit einer verbesserten Aussagesicherheit Anwendungsgrenzen vorgeben, die zu einer größeren Anwendungssicherheit bei gleichzeitiger Steigerung der Wirtschaftlichkeit beitragen.

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Die angestrebten Ergebnisse erfordern eine umfassende Betrachtung sowohl auf der anwendungstechnisch-makroskopischen als auch auf der werkstofftechnisch-mikroskopischen und der werkstofftechnisch-elektrochemischen Ebene. Aus diesem Grund ist das Projekt interdisziplinär angelegt. An der Durchführung sind als Forschungsstellen die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), die Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt an der TU Darmstadt (MPA DA) und das Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der TU Kaiserslautern (FWB) beteiligt.

Der projektbegleitende Ausschuss (PA) wird aus Vertretern der Industrie (Betonstahlhersteller, -verarbeiter und Feuerverzinkereien), der Bauherrenschaft (DB Netz AG, Landesbetrieb Straßenbau NRW), der Bauaufsicht (DIBt) sowie den in diesem Fachgebiet aktiven, antragstellenden Forschungsvereinigungen GAV e.V., GAK e.V. und GfKORR e.V. gebildet und steht darüber hinaus auch interessierten Kreisen offen.

Die Koordination des Forschungsvorhabens erfolgt im Rahmen des Arbeitspaketes 1 durch das Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, TU Kaiserslautern (FWB).

Die Untersuchungen werden in Form experimenteller und numerischer Parameterstudien durchgeführt. Die Versuchsplanung erfolgt mit Hilfe statistischer Methoden. Für die Ergebnisse wird eine statistische Absicherung in Form von Quantilwerten angestrebt.

Wegen der Vielzahl möglicher Parameter und Kombinationen ist zur Reduzierung des Versuchsaufwandes eine Beschränkung der einzubeziehenden Werkstoffe erforderlich. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden Tempcore-Stähle, Durchmesser 16 mm und 25 mm, Ringmaterial WR, Durchmesser 14 mm, Ringmaterial KR, Durchmesser 10 mm und Betonstahlmatten, Durchmesser 10 mm, Duktilitätsklassen A und B verwendet. Mit dieser Auswahl werden der Großteil (> 95%) der in

Deutschland/Europa marktüblichen Stahlvarianten sowie die gängigsten Durchmesser abgedeckt. Durch die numerische Simulation ist eine Übertragung der erzielten Ergebnisse auf abweichende Durchmesser sichergestellt.

Im Arbeitspaket 2 (AP 2) wird zunächst auf der Grundlage des bestehenden Norm- und Regelwerks eine Eingangscharakterisierung der ausgewählten Stähle im unverzinkten und im verzinkten Zustand im Hinblick auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften und die chem. Zusammensetzung vorgenommen.

Darüber hinaus dient AP 2 der Identifikation und Gewichtung der maßgebenden Material- und Prozessparameter, die durch Variation einzelner Parameter (Treppenstufenversuche) erfolgt, um die Erstellung von Prüf- und Versuchsplänen für die folgenden Arbeitspakete zu ermöglichen. In Verbindung mit einer einfachen rechnerischen Abschätzung können bereits in diesem Arbeitsschritt Umformparameter identifiziert werden, die im Hinblick auf eine Umformung bei tiefen Temperaturen oder eine LMAC-Rissbildung als kritisch anzusehen sind.

Die Kennzeichnung des plastischen Verformungsvermögens der in die Untersuchung einbezogenen Stähle erfolgt im Biegeversuch nach DIN EN ISO 7438 (Biegevorrichtung gem. Bild 1 der Norm) und die Aufnahme von Biegeverfestigungskurven. Die Biegeradien werden hinsichtlich Eigenspannungen, Gefüge und Härte untersucht. Die nach dem Biegen verbleibenden Gebrauchseigenschaften und ggf. beim Rückbiegen auftretenden Beschädigungen werden durch Zugversuche an um 90 ° gebogenen Proben bestimmt.

Basierend auf den Ergebnissen wird ein systematisches Versuchsprogramm, insbesondere für die eng miteinander verzahnten AP 3 und AP 4, aufgestellt. Angestrebt wird ein teilfaktorieller Versuchsplan zur Reduktion des Versuchsumfangs, bei dem zur Identifikation der Anwendungsgrenzen feuerverzinkter Betonstähle primär die kritischen Werkstoff- bzw. Verformungszustände betrachtet werden.

Im Arbeitspaket 3 (AP 3) werden sowohl unverzinkte Betonstähle als auch nach den beiden Verfahrenswegen „Verzinken-Biegen“ und „Biegen-Verzinken“ verzinkte Betonstähle betrachtet. Schwerpunkte sind die Untersuchung des Biegens bei tiefen Temperaturen, des Rückbiegens unter Baustellenbedingungen und die Ermittlung zulässiger Biegeradien im Bereich von Schweißstellen bei der Herstellung von Mattenkörben.

In den Versuchen kommen lediglich Zinkbadzusammensetzungen zum Einsatz, die die Zinkbadklasse 1 nach DAST RiLi 022 erfüllen. Die Zinkschichtdicke wird zwischen den in der Zulassung vorgegebenen Grenzwerten 85 µm bis 200 µm eingestellt. Die zulässigen Grenzdehnungen werden in Anlehnung an die DAST RiLi 022 für Stabmaterial berechnet und den Praxisversuchen zugrunde gelegt. Für die Untersuchungen werden dieselben Prüfverfahren wie in AP 2 eingesetzt. Für die Untersuchung des Temperatureinflusses sind eine Klimakammer mit einer Kühlleistung bis zu -40 °C und diverse Kühleinrichtungen vorhanden. Um die Bedingungen des Rückbiegens unter Baustellenbedingungen zu erfassen, sind zusätzlich an gebogenen Proben unplanmäßige Rückbiegungen vorzunehmen.

Die im Rahmen des AP 2 identifizierten Parameter werden auf mehreren Stufen variiert und in ihrer Wechselwirkung betrachtet. Ausgehend von worst-case-Überlegungen wird eine gestaffelte Vorgehensweise in Form einer teilfaktoriellen Versuchsplanung angestrebt.

Der statistische Nachweis in Form von Quantilwerten soll für den auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen identifizierten kritischsten Anwendungsfall durch regelmäßige Entnahme von Proben aus dem laufenden Produktionsprozess der externen Projektpartner (Hersteller und Biegebetriebe) geführt werden.

Die im Rahmen des Arbeitspakets 2 erzielten Ergebnisse finden Eingang bei der Auswahl der Untersuchungsparameter in den AP 4 bis AP 6.

Im Arbeitspaket 4 liegt der Fokus auf den mikrostrukturellen Aspekten einer Schädigung durch LMAC und den Auswirkungen der Feuerverzinkung auf das Ermüdungsverhalten.

Die systematischen Untersuchungen zum Risiko einer flüssigmetallinduzierten Rissbildung werden an einem Stabdurchmesser unter Variation der Biegebedingungen vorgenommen. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Stabdurchmesser ist durch vereinfachte Berechnung der Dehnungen im Biegeradius möglich und wird durch Tastversuche verifiziert.

Für die Verzinkungsversuche werden die Betonstahlstäbe um 180° gebogen und an den Enden fixiert, um eine Aufweitung während des Feuerverzinkens zu verhindern. Der verwendete Laborkessel verfügt über eine Belastungseinrichtung, die kraft- oder weggesteuert geregelt werden kann. Die Rege-

lung erfolgt so, dass keine Formänderung (Aufweitung der Stabenden) zulässig ist. Gleichzeitig werden die während des Feuerverzinkens auftretenden Kräfte gemessen. Durch Vergleichsversuche in Salzschmelzen kann anhand der Kraft-Weg-Diagramme eine Schädigung durch Rissbildung identifiziert werden. Die Untersuchung bzgl. einer Rissbildung erfolgt mittels Computertomographie und Metallographie. Darüber hinaus werden vorhandene Risse geöffnet und mikrofraktographisch mittels REM-EDX untersucht. Um Eigenspannungsumlagerungen der verformungsbehinderten Schlaufenproben infolge von Fließprozessen beim Feuerverzinken zu untersuchen, werden die Zinkschichten abgebeizt und die Proben anschließend mittels Röntgenbeugung auf ihre Eigenspannung(tiefen)zustände hin untersucht.

Unter Berücksichtigung der experimentellen Ergebnisse sind die Anwendungsgrenzen, bei denen es zur LMAC-Rissbildung kommt, für die geprüften Durchmesser bekannt. Die kritischen Grenzdehnungen werden für die Modellbildung und numerische Simulation rechnerisch am Modell des realen Stahls abgebildet. Mit dieser Kenntnis ist eine Übertragung der Ergebnisse für jede beliebige Parametervariation (Durchmesser, Biegewinkel, Biegeradius) möglich.

Als Grundlage für die FEM-Simulation der beim Verzinken auftretenden Beanspruchungen werden die Fließkurven in Warmzugversuchen bei Temperaturen bis 450°C und entsprechenden Dehnraten ermittelt, um die zugrunde liegenden Materialgesetze zu formulieren. Die gewonnenen Daten ermöglichen eine Modellbildung des für die flüssigmetallinduzierte Rissbildung (LMAC) bei Betonstählen verantwortlichen Schädigungsmechanismus.

Mit dem bereitgestellten Konzept für die Bewertung des LMAC-Risikopotenzials beim Verzinken von Betonstählen kann geprüft werden, inwieweit die Anwendungsgrenze für die heute üblichen qualitativ hochwertigen Betonstähle und einen möglicherweise verbesserten Verzinkungsprozess noch gültig ist.

Zur Erfassung des Einflusses der Feuerverzinkung werden Dauerschwingversuche an geraden Betonstahlabschnitten und an den um 180° gebogenen feuerverzinkten Stäben durchgeführt. Zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens werden Wöhlerlinien bis zu einer Grenzschwingspielzahl von 2×10^6 aufgenommen.

Im Hinblick auf die festzulegenden Anwendungsgrenzen gebogener und feuerverzinkter Betonstähle müssen die gebogenen Stähle frei von verzinkungsbedingten Rissen sein. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens an den Grenzbedingungen, die als i. O. befunden werden.

Im Arbeitspaket 5 werden die Korrosion im Beton und der Korrosionsschutz bei Einwirkung chloridhaltiger Elektrolyte, insbesondere in gerissenen Betonbereichen untersucht. Im Fokus der Untersuchungen stehen die chloridinduzierte Korrosion, der Wirkungsbereich des kathodischen Schutzes, bei Vorhandensein von Fehlstellen in der Feuerverzinkung, mögliche Einflüsse von Bindemitteln auf den Korrosionsfortschritt sowie Wechselwirkungen beim Einsatz von Inhibitoren oder passiviertem feuerverzinkten Betonstahl auf die Wirkung des kathodischen Schutzes.

Der Korrosionsfortschritt wird sowohl in Lösung als auch in Betonproben untersucht. Dabei kommen verschiedene elektrochemische Untersuchungsverfahren in Kombination mit computertomographischen Untersuchungen zum Einsatz.

Für die Ermittlung des Korrosionsfortschritts werden die Cl-Konzentrationen variiert, um verschiedene Korrosionsbelastungen abzubilden. Zur Ermittlung des Korrosionsfortschritts geschädigter Oberflächen werden zusätzlich zu den Cl-Konzentrationen die Flächen des freiliegenden Substrats variiert. Die zu wählenden Flächen orientieren sich an den Ergebnissen aus den AP 3 und AP 4.

Im Arbeitspaket 6 steht das Passivierungsverhalten verzinkter Betonstähle, insbesondere die Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase bei der Verwendung chromatreduzierter Zemente im Mittelpunkt der Untersuchungen. Analog zu AP5 wird zusätzlich die Wirksamkeit von Phosphatierungen und Inhibitoren in Bezug auf die Vermeidung einer wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion untersucht.

Das Risiko einer möglichen wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion an plastifizierten Teilbereichen eines feuerverzinkten und gebogenen Betonstahls soll mittels Wasserstoffpermeationsmessungen ermittelt werden.

Neben verschiedenen Zementarten (CEM I, CEM II und CEM III) werden die Fehlstellengrößen durch definierte Verhältnisse Kathoden- zu Anodenfläche abgebildet. Hier fließen die Ergebnisse aus den AP 3 und AP 4 ein. Darüber hinaus werden Prüfungen an realen umgeformten Betonstählen beider Verfahrenswege („Verzinken-Biegen“ und „Biegen-Verzinken“) durchgeführt, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis sicherzustellen.

Aus den beschriebenen Arbeitspaketen ergeben sich Schnittstellen zwischen den beteiligten Forschungsstellen, die eine interne Abstimmung der Forschungsstellen erforderlich machen. Hierfür wird eine entsprechende Projektstruktur in dem an der TU Kaiserslautern und anderen Universitäten genutzten Learning Management System (LMS) OLAT (= Online Learning and Training) eingerichtet, auf die die Projektbeteiligten Zugriff haben und die u. a. den Datenaustausch, die Kontrolle des Projektstandes und die zeitlich synchrone und asynchrone Kommunikation ermöglicht.

Für die Durchführung des Projekts sind je Forschungsstelle ein wissenschaftlicher Mitarbeiter, ein Laborant und studentische Hilfskräfte erforderlich.

4 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die Vorstellung der Ergebnisse erfolgt zunächst im Rahmen der obligatorischen Berichte, die während und nach der Laufzeit auf einer Projekthomepage und den Homepages der beteiligten Forschungsstellen publiziert werden.

Durch die Beteiligung der Verbände, maßgeblicher Vertreter der Bauherrnschaft und der Bauaufsicht ist der Transfer in die Mitgliedsunternehmen einerseits und die Baupraxis (Anwenderseite) andererseits sichergestellt. Während der Laufzeit erfolgt die Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse in den Sitzungen des PA und den Arbeitskreisen der Verbände. Nach Abschluss des Projekts ist die Erstellung einer Anwenderbroschüre vorgesehen.

Die Ergebnisse sollen grundsätzlich in die einschlägigen technischen Regelwerke und Normen übernommen werden. Durch die Mitarbeit der Antragsteller und der Forschungsstellen in den maßgebenden internationalen und nationalen Gremien und Normausschüssen ist eine frühe Einbindung dieser Gremien sichergestellt und ein Transfer in die Baupraxis (Anwender) möglich.

Eine zweisprachige Veröffentlichung der Ergebnisse in den einschlägigen Fachzeitschriften ist für die Forschungsstellen obligatorisch. Darüber hinaus fließen die Ergebnisse in Vorträge auf Fachtagungen und die akademische Lehre an Hochschulen sowie die Veranstaltungen zur beruflichen Weiterbildung an der TU Kaiserslautern und der TU Darmstadt ein.

5 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen

5.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Die voraussichtliche Nutzung der Forschungsergebnisse ist in den Fachgebieten Werkstofftechnik und Konstruktion (Werkstoffe/Materialien, Konstruktion und Produktion) sowie bei der Herstellung und Verarbeitung (Biegen, Feuerzinken) von Betonstählen und im Baugewerbe zu erwarten.

5.2 Voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der KMU

Für die maßgeblich mittelständisch geprägte Verzinkungsindustrie können auf der Grundlage der Ergebnisse erstmals neue innovative Einsatzmöglichkeiten erschlossen und somit der Markt für feuerverzinkte Betonstähle dauerhaft ausgebaut werden. Dies führt zu einer unmittelbaren Verbesserung der wirtschaftlichen Situation dieser Unternehmen und einer Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit. Hierbei lassen die mit dem neuen Verzinkungsverfahren des Verzinkens nach dem Biegevorgang verbundenen fertigungstechnischen und logistischen Vorteile für Verzinkungsbetriebe zusätzliche erhebliche wirtschaftliche Vorteile erwarten.

Die Übernahme der Ergebnisse in die für den Stahlbetonbau geltenden Regelwerke werden eine Ausnutzung der großen Vorteile der Feuerverzinkung hinsichtlich ihrer Lebensdauer, dem Wegfall der Instandhaltung und den damit verbundenen drastisch reduzierten Folgekosten für Wartung, Instandhaltung und Nutzungseinschränkung ermöglichen. Durch die geplante anwenderfreundliche Aufbereitung der Forschungsergebnisse in Form von Anwendungshilfen und -empfehlungen werden die Kosten der KMU im Bereich Planung und Entwurf gesenkt.

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass eine Erweiterung des Temperaturbereichs im Hinblick auf die Verarbeitung bei tiefen Temperaturen für die Betonstahlhersteller einen Wettbewerbsvorteil für den Export (insbesondere in Länder mit langandauernden Winterperioden) darstellt. Für die betonstahlverarbeitenden Betriebe – Biegebetriebe, Verlegebetriebe, Rohbauunternehmen – bietet die Erweiterung des Temperaturbereichs den Vorteil, dass das Risiko von Ausfallzeiten wegen zu niedriger Temperaturen in gemäßigten Klimazonen praktisch ausgeschlossen wird.

Im Hinblick auf das Biegen geschweißter Betonstahlmatten (Mattenkörbe) führt eine Reduzierung der Biegerollendurchmesser zu einer Vereinfachung und Beschleunigung des Bauablaufs und damit zu einer wirtschaftlicheren Produktions- und Bauweise.

Ein zusätzlicher Synergieeffekt ist dadurch gegeben, dass die Ergebnisse im Hinblick auf niedrigere Verarbeitungstemperaturen und reduzierte Biegerollendurchmesser bei der Herstellung von Mattenkörben auch auf unverzinkte Betonstähle übertragen werden können.

5.3 Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der Forschungsergebnisse nach Projektende.

Die industrielle Umsetzung der Forschungsergebnisse erfolgt bei der Produktion (Biegebetrieb/Feuerverzinkerei) durch die Etablierung des neuen Verfahrensweges „Biegen – Verzinken“ sowie bei der Herstellung von Mattenkörben mit geringeren Biegerollendurchmessern.

Bei der Planung und Ausführung von Stahlbetonbauwerken wird die Umsetzung durch die Übernahme der Ergebnisse in die einschlägigen technischen Regelwerke (DIN, ZTV-Ing) und die Bereitstellung von Planungshandbüchern, Arbeitshilfen, Planungsinformationen und technischen Merkblättern in Form von Broschüren und im Internet ermöglicht.

6 Durchführende Forschungsstellen

TU Kaiserslautern
Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit
Gottlieb-Daimler-Str. Geb. 60, Raum 508
67663 Kaiserslautern

Technische Universität Darmstadt
Zentrum für Konstruktionswerkstoffe
Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt
Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde
Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner
Grafenstraße 2
64283 Darmstadt

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Fachbereich 6.1
Korrosion im Bauwesen
Dr.-Ing. Andreas Burkert
Unter den Eichen 87
12205 Berlin

Verzinken

Name der AiF-Forschungsvereinigung (FV)

IGF-Vorhaben-Nr:

Blatt-Nr./Jury-Nr.:

IGF-Antrags-Nr.: /

Aktenzeichen der FV

(wird von der AiF eingesetzt)

Konzept zum Projektmanagement

An dem interdisziplinär angelegten Projekt sind als Forschungsstellen die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), die Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt an der TU Darmstadt (MPA DA) und das Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der TU Kaiserslautern (FWB) beteiligt (Bild 1).

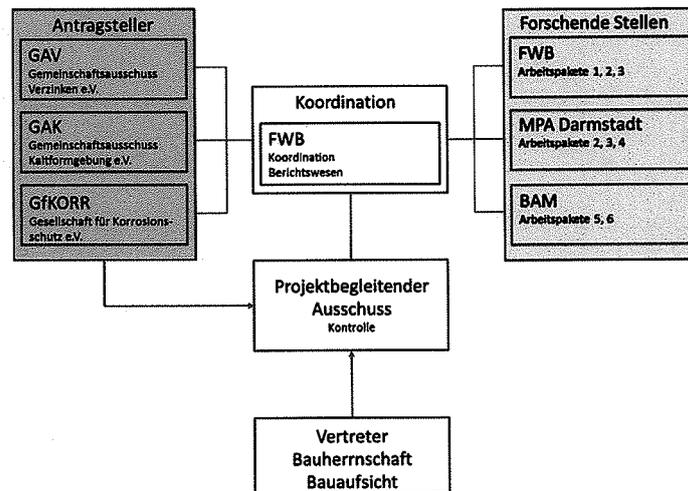


Bild 1: Konzept zum Projektmanagement

Diese verfügen über die für die Bearbeitung erforderliche wissenschaftliche Qualifikation und die für eine bestimmungsmäßige Mittelverwendung notwendige Administration.

Der projektbegleitende Ausschuss (PA) wird aus Vertretern der Industrie (Betonstahlhersteller, -verarbeiter und Feuerverzinkereien), der Bauherrnschaft (DB Netz AG, Landesbetrieb Straßenbau NRW), der Bauaufsicht (DIBt) sowie den antragstellenden aktiven Forschungsvereinigungen GAV e.V., GAK e.V. und GfKORR e.V. gebildet

Die Projektabwicklung in Form von Arbeitspaketen, die jeweils von einer Forschungsstelle bearbeitet werden, die klare Beschreibung der jeweils angestrebten Ziele, sowie die Ablaufplanung mit festgelegten Meilensteinen ermöglichen eine effektive Durchführung und Kontrolle und gewährleisten eine sachgerechte und zielgerichtete Verwendung der beantragten Mittel. Die zeitliche Struktur des Projekts ist aus dem beigefügten Arbeitsdiagramm ersichtlich.

Die Koordination und Steuerung des Forschungsprojektes wird vom Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen übernommen. Die damit verbundenen Aufgaben, insbesondere die Koordinierung und Abstimmung der Versuchsplanungen der Forschungsstellen sowie die Koordinierung des projektbegleitenden Ausschusses, sind im Einzelnen im Antrag beschrieben/aufgelistet.

Der PA wird von den Forschungsstellen im Rahmen regelmäßiger Sitzungen sowie in Abhängigkeit von den definierten Meilensteinen über den aktuellen Stand und die erreichten Ergebnisse informiert.

Für die interne Abstimmung der Forschungsstellen und der Verbände wird eine entsprechende Projektstruktur in dem an der TU Kaiserslautern und anderen Universitäten genutzten Learning Management System (LMS) OLAT (= Online Learning and Training) eingerichtet, auf die nur die Projektbeteiligten Zugriff haben und die u. a. den Datenaustausch, die Kontrolle des Projektstandes und die zeitlich synchrone und asynchrone Kommunikation ermöglicht.

Durch die vorgesehenen Maßnahmen zum Transfer der Forschungsergebnisse ist zudem ein größtmögliches Maß an Transparenz sichergestellt.

Verzinken

Name der AiF-Forschungsvereinigung (FV)

IGF-Vorhaben-Nr:

Blatt-Nr./Jury-Nr.:

IGF-Antrags-Nr.: /

Aktenzeichen der FV

(wird von der AiF eingesetzt)

Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die projektbegleitende Zusammenarbeit der Forschungsstellen mit allen an der Planung, Zulieferung, Herstellung und Nutzung von Stahlbetonbauteilen beteiligten Stellen sowie den Industrievertretern der Betonstahlhersteller (GAK) und der Feuerverzinkung (GAV) stellt die Umsetzung der Forschungsergebnisse für die praktische Anwendung sicher und garantiert, dass die Forschungsergebnisse in allen Bereichen des Stahlbetonbaues und der Feuerverzinkung verbreitet werden.

Durch die Beteiligung der zuständigen Verbände und Institutionen (Institut für Stahlbetonbewehrung e. V., Industrieverband Feuerverzinken e. V., GfKORR e.V.) ist die breite Veröffentlichung der Forschungsergebnisse, die zudem in den zugehörigen Arbeitskreisen vorgestellt und diskutiert werden, obligatorisch. Ferner sind Publikationen in der einschlägigen Literatur und den Fachzeitschriften „Stahlbetonbau, Feuerverzinken, Stahlbetonkalender, Bauingenieur, DAFStb, etc.“ vorgesehen, um die Praxis über die Hintergründe und die wirtschaftlichen Vorteile zu informieren. Die Anfertigung einer praxistauglichen Anwenderbroschüre, in der alle für die Neuentwicklungen relevanten Angaben zusammengefasst sind, ist vorgesehen.

Durch die Beteiligung der Forschungsstellen an aktuellen Forschungsprojekten besteht bereits ein intensiver Forschungsaustausch mit nationalen und internationalen Forschungsstellen des Stahlbetonbaues.

Die Mitarbeit in den nationalen und internationalen Gremien zum Beispiel TC 104 stellt sicher, dass die Forschungsergebnisse sowohl national als auch international diskutiert und verbreitet werden.

Die geplanten Maßnahmen sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Geplante Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Rahmen	vorauss. Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Vorstellung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse	Treffen zu Beginn und am Ende eines neuen Arbeitsschrittes	2 x jährlich
Gremienarbeit, Einbeziehung von Multiplikatoren	Präsentation und Diskussion der Ergebnisse bereits während der Laufzeit durch Experten im Rahmen von regelsetzenden Gremien	Sitzungen von Gremien und Normausschüssen	laufend
Transfer der Ergebnisse in die Industrie durch ISB, GAV, Institut Feuerverzinken	Ergebnistransfer in die Industrie	ISB-Homepage ISB-Mitteilungen Homepage Industrieverband Feuerverzinken	laufend
Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Vermittlung der Ergebnisse an Studierende der Fachrichtungen Bauingenieurwesen und Architektur	Lehre an der TU Kaiserslautern und der TU Darmstadt Vorlesungen, Studienarbeiten, Diplom-/Masterarbeiten Gastvorlesungen	laufend

Geplante Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Rahmen	vorauss. Zeitraum
Veröffentlichungen	Ergebnistransfer in die Industrie und wissenschaftliche Publikation (zweisprachig deutsch/englisch)	Abschlussbericht Fachzeitschriften: Beton, Verlag Bau+Technik Bauingenieur Springer-VDI-Verlag BFT International Betonwerk + Fertig-teil-Technik, Bauverlag BV GmbH, Feuerverzinken	September 2015
Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Vermittlung der Ergebnisse an Studierende der Fachrichtungen Bauingenieurwesen und Architektur	Lehre an der TU Kaiserslautern und der TU Darmstadt Vorlesungen, Studienarbeiten, Diplom-/Masterarbeiten Gastvorlesungen	
Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Vermittlung der Ergebnisse im Rahmen der beruflichen Weiterbildung für Bauingenieure	Vorträge auf Fachtagungen Weiterbildung für Tragwerksplaner an der TU Kaiserslautern in Zusammenarbeit mit der Ingenieurkammer Rheinland-Pfalz	
Transfer der Ergebnisse in die Industrie durch ISB, GAV, Institut Feuerverzinken	Ergebnistransfer in die Industrie	ISB-Homepage ISB-Mitteilungen Homepage GAV Homepage Industrieverband Feuerverzinken	September 2015
Gremienarbeit, Einbeziehung von Multiplikatoren	Berücksichtigung der Forschungsergebnisse bei der Überarbeitung und Erstellung von Normen und Richtlinien	Sitzungen von Gremien /Normausschüssen	September 2015