

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit, Robert Adams

TU Kaiserslautern, Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner, Dr.-Ing. Holger Hoche, Dr. rer. nat. Dominik Körber

TU Darmstadt, Zentrum für Konstruktionswerkstoffe, Staatliche MPA Darmstadt, Fachgebiet und Inst. f. Werkstoffkunde

Dr.-Ing. Andreas Burkert, Gino Ebell

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Fachbereich 7.6 Korrosion und Korrosionsschutz

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

Bericht Nr. 165

Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V.

2017

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abstract

Die Feuerverzinkung von Betonstahl stellt auf der Grundlage der im Stahlbetonbau geltenden Regelwerke eine zusätzliche Maßnahme zur Steigerung der Dauerhaftigkeit insbesondere bei Korrosionsbeanspruchung infolge Karbonatisierung und/oder Chlorideinwirkung dar. Anders als im Ausland ist die Anwendung von feuerverzinktem Betonstahl in Deutschland bisher kaum verbreitet.

Im Rahmen des AiF-Forschungsprojekts IGF 499 „Technologie- und Sicherheitszuwachs bei der Anwendung von feuerverzinktem Betonstahl zum Ausbau einer nachhaltigen Marktposition im Stahlbetonbau“ sollten die einem breiteren Einsatz feuerverzinkter Betonstähle in Deutschland bisher entgegenstehenden offenen Fragestellungen beantwortet werden.

Die interdisziplinäre Forschergruppe bestand aus dem Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, Technische Universität Kaiserslautern (Forschungsstelle 1), mit dem Arbeitsschwerpunkt Fertigungstechnik, der staatlichen Materialprüfungsanstalt Darmstadt an der Technischen Universität Darmstadt (Forschungsstelle 2), mit dem Arbeitsschwerpunkt Werkstofftechnik, und der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin (Forschungsstelle 3), mit dem Arbeitsschwerpunkt Korrosionsschutz.

Das Forschungsprojekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen AiF unter dem Förderkennzeichen IGF 499 ZN/1 im Zeitraum vom 01.09.2013 - 31.08.2016 gefördert.

Der vorliegende Schlussbericht enthält die zusammenfassende Darstellung der im Rahmen des Forschungsprojekts „bearbeiteten Fragestellungen, der an den beteiligten Forschungsstellen durchgeführten Untersuchungen sowie eine Darstellung der Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen.

Die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen erzielten Ergebnisse sind geeignet, das angestrebte Ziel der Übernahme in die einschlägigen Norm- und Regelwerke zu verfolgen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Abstract

Based on actual rules and standards, the galvanizing of reinforcement steel represents an additional method to increase durability of reinforced concrete, particularly in case of exposure due to carbonation and chloride.

Compared to other countries the application of galvanized reinforcement steel is not common practice in Germany.

Open questions relating to the application of galvanized reinforcing steel should be answered within the scope of the research project “Increase of technology and reliability in the use of galvanized reinforcement steel to achieve a sustainable expanded market position in the field of reinforced concrete construction”.

The interdisciplinary research team consisted of the Department of construction material technology, TU Kaiserslautern (FWB) with the topic manufacturing engineering, the State Materials Testing Institute Darmstadt (MPA) with the topic materials engineering and the Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM) with the topic corrosion and corrosion protection.

The research project was government-funded by the federal ministry of economy and technology within the program for the support of industrial common research and development (IGF) by the consortium of industrial research associations (AIF) under the support code IGF 4999 ZN/1 in the period from 01.09.2013 – 31.08.2016.

This final report contains the summary of the investigations carried out within the research project, the achieved results and the conclusions, derived from the results.

The achieved results are suitable for the adoption in the relevant rules and standards for reinforcement steel and galvanized reinforcement steel.

The aim of the research project has been achieved.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Vorstellung des Forschungsprojekts	1
2.1	Struktur des Forschungsprojekts und beteiligte Stellen	1
2.2	Forschungsziele	3
2.3	Angestrebte Forschungsergebnisse	4
3.	Ergebnisse	5
3.1	Werkstoffcharakterisierung (Arbeitspaket 2)	5
3.1.1	Probenauswahl und Untersuchungsmethoden	5
3.1.2	Chemische Zusammensetzung	7
3.1.3	Gefügeuntersuchungen	8
3.1.4	Oberflächenbeschaffenheit	9
3.1.5	Härte ungebogene Proben	10
3.1.6	Zinkschicht (Dicke und Beschaffenheit)	11
3.1.7	Geometrische Merkmale (Rippenmessung)	13
3.1.8	Mechanische Eigenschaften (Zugversuche, Einfluss Verzinkung und Aderung)	14
3.1.9	Dauerschwingfestigkeit	17
3.1.10	Kerbschlagbiegeversuche	18
3.1.11	Zusammenfassung	19
3.2	Einflussgrößen (Arbeitspaket 2)	21
3.2.1	Untersuchungsmethoden	21
3.2.2	Gefügeuntersuchungen und Härteverläufe	26
3.2.3	Alterungsbeständigkeit	27
3.2.4	Eigenspannungsmessungen	28
3.2.5	Biegerollendurchmesser nach DIN EN 1992-1-1/NA D (EC2/NA D)	30
3.2.6	Biegeparameter für Untersuchungen im Arbeitspaket 3 Fertigungstechnik	31
3.2.7	Biegeparameter für Untersuchungen im Arbeitspaket 4 Werkstofftechnik	32
3.2.8	Numerische Berechnungen	34
3.3	Fertigungstechnik – Anwendungsparameter (Arbeitspaket 3)	35
3.3.1	Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen)	36
3.3.1.1	Beschädigungen der Zinkschicht in Abhängigkeit von den gewählten Material- und Biegeparametern und der Zinkschichtdicke	36
3.3.1.2	Verbleibende Gebrauchseigenschaften nach dem Biegen	41
3.3.2	Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken)	41
3.3.2.1	Untersuchungsmethoden	41
3.3.2.2	Zulässige Biegerollendurchmesser für nach Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) verzinkte Proben	42

3.3.3	Eignung zum Biegen bei tiefen Temperaturen	48
3.3.4	Rückbiegen unter Baustellenbedingungen	50
3.3.5	Biegen im Bereich der Schweißstelle bei der Herstellung von Mattenkörben	50
3.4	Werkstofftechnik – Anwendungsgrenzen (Arbeitspaket 4)	55
3.4.1	Untersuchungsmethoden	58
3.4.2	Angabe des Umfangs einer evtl. Abminderung der Dauerfestigkeit des Betonstahls durch eine Feuerverzinkung einschließlich Quantifizierung der verformungs- bzw. verzinkungsbedingten Randdefekte und ihrer Auswirkung auf die Schwingfestigkeitseigenschaften	59
3.4.3	Bewertung des Risikopotenzials und Ableitung der Anwendungsgrenzen in Bezug auf eine flüssigmetallinduzierte Rissbildung in Abhängigkeit von den Biegeparametern (Biegeradius, Biegewinkel, Biegetemperatur, Biegegeschwindigkeit), dem Stabdurchmesser und dem Herstellverfahren	61
3.4.4	Identifizierung notwendiger Prüfverfahren und des Prüfumfanga für die Konformitätskontrolle	64
3.5	Korrosion, Korrosionsschutz und Passivierungsverhalten (Arbeitspakete 5, 6)	67
3.5.1	Probenauswahl und Untersuchungsmethoden	67
3.5.1.1	Betonstahl	67
3.5.1.2	Herstellung Mörtelprobekörper	68
3.5.1.3	Impedanzmessungen	72
3.5.1.4	Elementstrommessungen	74
3.5.1.5	Polarisationsmessungen	75
3.5.1.6	Frischbetonmessungen	76
3.5.1.7	Beschichtungen	76
3.5.1.8	Computertomographische Untersuchungen von verzinktem Betonstahl in gerissenem Beton	77
3.5.1.9	Schnellkarbonatisierung	77
3.5.2	Korrosionsfortschritt in korrosiver Exposition (Chlorideinwirkung, Karbonatisierung)	78
3.5.2.1	Untersuchungen in Lösungen	78
3.5.2.2	Untersuchungen des Einflusses von chloridhaltigem Mörtel auf Makroelement- und Eigenkorrosion	82
3.5.2.3	Untersuchungen des Einflusses von karbonatisiertem Mörtel auf Makroelement- und Eigenkorrosion	85
3.5.3	Erfassung der Passivierungsreaktion beim Betonieren (Wasserstoffentwicklung) und von alternativen Passivierungsverfahren sowie der Wirkung von Inhibitoren im Beton zur Hemmung der Wasserstoffentwicklung	88
3.5.3.1	Untersuchungen zur Wasserstoffentwicklung im Frischbeton	88
3.5.3.2	Passivierungsmethoden und Inhibitoren	89
3.5.4	Bezifferung des Korrosionsfortschritts in gerissenem Beton in Abhängigkeit von der Rissbreite	94
3.5.5	Beurteilung von Beschädigungen an feuerverzinktem Betonstahl (ungeschützte Schnittkanten, Risse in der Zinkschicht an nachträglich gebogenen Betonstählen) in Abhängigkeit des Werkstoffzustandes (Biegen, Stahlarten, etc.) im Hinblick auf eine mögliche wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion am Betonstahl	96

3.5.6	Auswirkung der Verwendung feuerverzinkter Betonstähle auf die Nutzungsdauer von Stahlbetonbauteilen	96
3.5.6.1	Polarisationsmessungen an Kombinationen aus chloridhaltigen – chloridfreien Mörtelprismen	97
3.5.6.2	Polarisationsmessungen an Kombinationen aus karbonatisierten und alkalischen Mörtelprismen	99
3.5.7	Empfehlungen aus den Untersuchungen zur Korrosion und zum Korrosionsschutz	101
3.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	102
4.	Literaturverzeichnis	105

1. Einleitung

Die Feuerverzinkung von Betonstahl stellt auf der Grundlage der im Stahlbetonbau geltenden Regelwerke eine zusätzliche Maßnahme zur Steigerung der Dauerhaftigkeit dar.

Ein Vorteil, der sich in der bisherigen Praxis im Ausland abzeichnet [1], ist beim Vorliegen erhöhter Korrosionsrisiken zu erwarten, z. B. im Bereich von Fugen, an rissgefährdeten Stellen und Bauteilen, bei einer unzureichenden Betonqualität oder bei mangelhafter Bauausführung (verminderte Betondeckung infolge fehlender Lagesicherung der Bewehrung, unzureichende Nachbehandlung usw.) sowie vor allem in exponierten Lagen, z. B. in Küstennähe oder bei tausalzbeaufschlagten Bauteilen, in denen Chlorideinwirkung vorliegt. Einen weiteren Vorteil bietet die Verwendung von feuerverzinktem Betonstahl bei der Erstellung von Sichtbetonbauwerken, hier wird das Risiko einer korrosionsbedingten rot-braun-Färbung der Betonoberfläche, z.B. bei der Ausbildung von Arbeitsfugen, minimiert.

Feuerverzinkte Stähle mit hohen Zinkschichtdicken bieten zudem im Vergleich zu herkömmlichen Betonstählen auch wirtschaftliche Vorteile, wenn neben den Materialkosten auch die Lebensdauer und die zugehörigen Folgekosten, z.B. für Wartung und Instandhaltung (Lebenszykluskosten) mit in Betracht gezogen werden.

Anders als im Ausland ist die Anwendung von feuerverzinktem Betonstahl in Deutschland bisher kaum verbreitet. Die derzeitige Regelung der Anwendung erfolgt über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) mit der Zulassungsnummer Z-1.4-165 [2], die aufgrund fehlender gesicherter Erkenntnisse Auflagen bei der Anwendung macht, die de facto einer stärkeren Verbreitung der Verwendung feuerverzinkter Betonstähle entgegenstehen.

Im Rahmen des AiF-Forschungsprojekts IGF 499 „Technologie- und Sicherheitszuwachs bei der Anwendung von feuerverzinktem Betonstahl zum Ausbau einer nachhaltigen Marktposition im Stahlbetonbau“ sollten die Grundlagen erarbeitet werden, um das Potential, das feuerverzinkte Betonstähle für eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit bewehrter Betonbauteile und die Erschließung neuer Marktanteile für die Hersteller und Weiterverarbeiter von Stahlbetonbewehrungen bieten, zu erschließen.

2. Vorstellung des Forschungsprojekts

2.1 Struktur des Forschungsprojekts und beteiligte Stellen

Die Bearbeitung der mit dem Einsatz feuerverzinkter Betonstähle verbundenen offenen Fragestellungen erfolgte in dem seitens der AiF-Mitgliedsvereinigungen Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V. (GAV), Gemeinschaftsausschuss Kaltformgebung e.V. (GAK) und Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. – GfKORR initiierten Forschungsprojekt mit dem Titel

„Technologie- und Sicherheitszuwachs bei der Anwendung von feuerverzinktem Betonstahl zum Ausbau einer nachhaltigen Marktposition im Stahlbetonbau“ (IGF 499)

mit der Zielstellung das Potential, das feuerverzinkte Betonstähle bieten, für eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit bewehrter Betonbauteile und die Erschließung neuer Marktanteile für die Hersteller und Weiterverarbeiter von Stahlbetonbewehrungen zu erschließen.

Die offenen Fragestellungen bzw. Wissensdefizite und die daraus abgeleiteten Ziele des Forschungsprojektes sind in Bild 1 dargestellt.

Offene Fragestellungen – Wissensdefizite

Korrosionsschutz

- Reaktion und Auswirkungen zwischen Zink und Frischbeton
- Hemmung der Reaktion (Chromatreduzierer)
- Korrosionsverhalten bei Chlorideinwirkung

Werkstofftechnik

- Risiko einer flüssigmetallinduzierten Rissbildung (LMAC)
- Einfluss auf die Dauerschwingfestigkeit

Fertigungstechnik

- Verzinken nach dem Biegen
- Rückbiegen unter Baustellenbedingungen
- Biegen im Bereich von Schweißstellen

Forschungsziele

1. Erfassung der Passivierungsreaktion beim Betonieren (Wasserstoffentwicklung)
2. Ermittlung des Korrosionsverhaltens verzinkter Betonstähle im Hinblick auf den Korrosionsfortschritt und die Nutzungsdauer
3. Experimentelle und numerische Ermittlung gesicherter und wissenschaftlich fundierter Anwendungsgrenzen
 - nach dem Verzinken
 - vor dem Verzinkengebogener Betonstähle

Bild 1: Offene Fragestellungen und Wissensdefizite bei der Anwendung feuerverzinkter Betonstähle und festgelegte Forschungsziele

Zur Sicherstellung einer umfassenden Betrachtung der geschilderten Probleme erfolgte die Durchführung des Projektes disziplinübergreifend, um die Interaktionen zwischen werkstofftechnischen, korrosionsschutztechnischen und bauingenieurwissenschaftlichen Sachverhalten zu berücksichtigen und diese unter Berücksichtigung der Gesamtzielsetzung des Projektes zu einem Ganzen zu vereinen.

Die interdisziplinäre Forschergruppe bestand aus den folgende Forschungsstellen aus den Bereichen des Stahlbetonbaus, der Materialprüfung und des Korrosionsschutzes.

- Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, Technische Universität Kaiserslautern (FWB)
- Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt an der Technischen Universität Darmstadt (MPA-DA)
- Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin (BAM)

Die Zuständigkeitsbereiche der Forschungsstellen sind aus Bild 2 ersichtlich.

Forschungsstellen

- Fertigungstechnik FWB
- Werkstofftechnik MPA DA
- Korrosionsschutz BAM

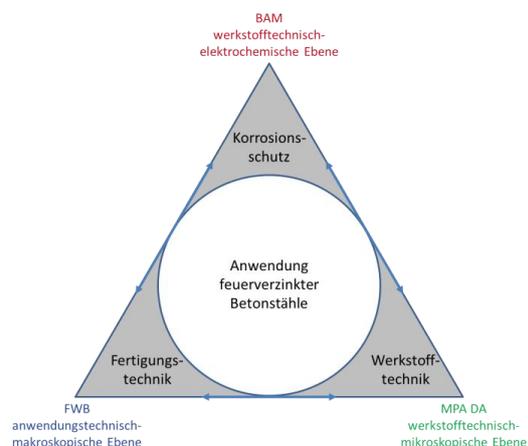


Bild 2: Interdisziplinärer Aufbau des Forschungsprojekts mit Zuständigkeitsbereichen der beteiligten Forschungsstellen

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens zu erbringenden Leistungen wurden mit Blick auf die angestrebten Ergebnisse in Form von Arbeitspaketen auf die beteiligten Forschungsstellen gemäß Bild 3 verteilt.

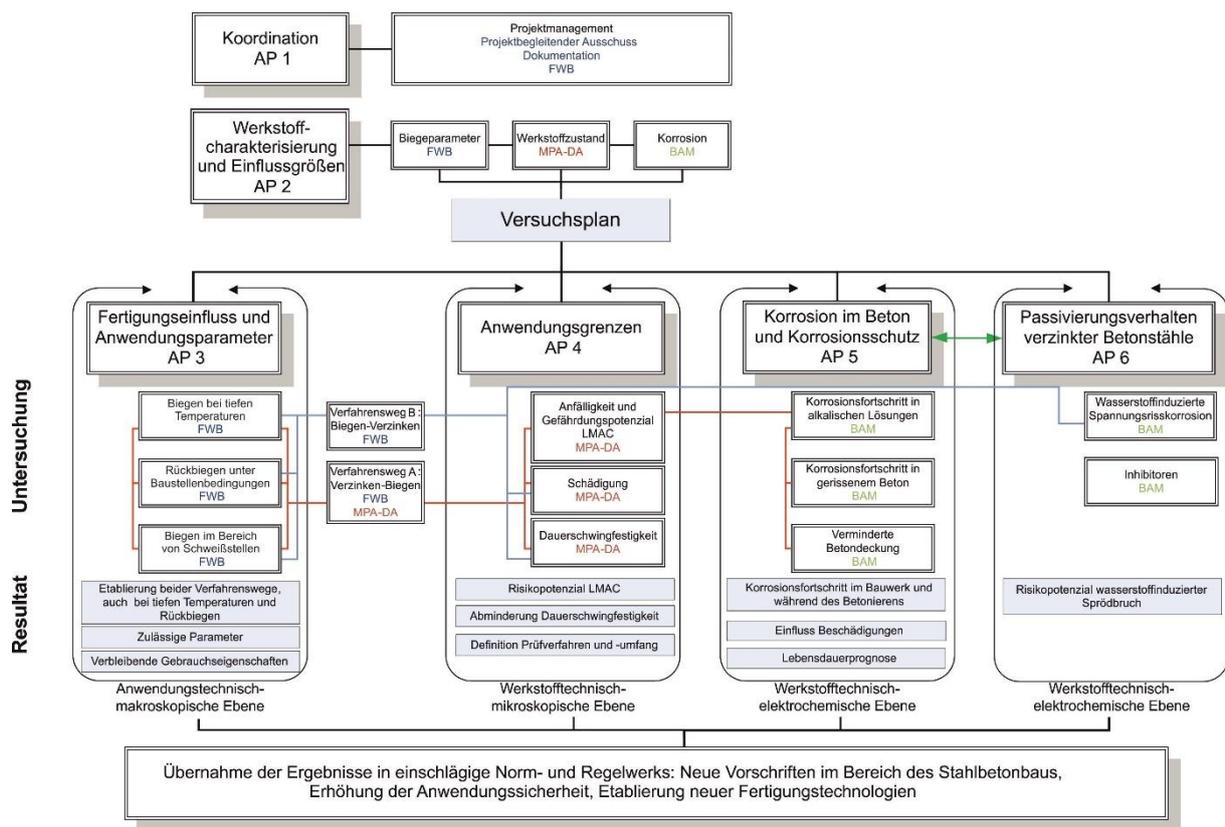


Bild 3: Aufbau des Projektes mit Darstellung der Arbeitspakete

2.2 Forschungsziele

Ziel des Forschungsprojekts war es, die derzeit bestehenden technischen und normativen Hemmnisse für die Anwendung von feuerverzinktem Betonstahl, die eine Etablierung am Markt in großem Umfang verhindern, abzubauen. Eine Übernahme der Ergebnisse in die einschlägigen Norm- und Regelwerke wurde angestrebt, um die Anwendungsgrenzen sicher zu definieren und die Einsatztiefe feuerverzinkter Betonstähle zu erweitern. Wegen der sehr langsamen Entwicklungen im Bereich der europäischen Betonstahlnormung sind Fortschritte in Bezug auf eine Normung allerdings kurz- und mittelfristig nicht zu erwarten.

Im Einzelnen wurden folgende Forschungsziele festgelegt:

1. Experimentelle und numerische Ermittlung gesicherter und wissenschaftlich fundierter Anwendungsgrenzen sowohl für nach dem Verzinken als auch vor dem Verzinken gebogene Betonstähle im Hinblick auf
 - zulässige Biegeparameter (Biegeradius, Biegewinkel, Temperatur, Geschwindigkeit, Stabdurchmesser, Herstellverfahren, Zinkschichtdicke),
 - das Risiko des Auftretens einer flüssigmetallinduzierten Rissbildung (LMAC) bei gebogenen und im Anschluss feuerverzinkten Betonstählen,
 - die bei der Bemessung anzusetzende Dauerfestigkeit feuerverzinkter Betonstähle,
 - die Absenkung der unteren Verarbeitungstemperatur beim Biegen auf Werte bis zu -20 °C ,
 - die Zulässigkeit des Rückbiegens unter Baustellenbedingungen,
 - die Zulässigkeit der Anwendung kleinerer Biegerollendurchmesser im Bereich von Schweißungen bei der Herstellung von Mattenkörpern,

- die Angabe notwendiger Prüfverfahren und des Prüfumfangs für die Konformitätskontrolle.
2. Ermittlung des Korrosionsverhaltens verzinkter Betonstähle im Hinblick auf den Korrosionsfortschritt und die Nutzungsdauer in Abhängigkeit von
 - der Exposition (Karbonatisierung, Chlorideinwirkung),
 - der Rissbreite in gerissenem Beton,
 - der Anwendung alternativer Passivierungsverfahren (Phosphatierung) bzw. der Zugabe von Inhibitoren zum Frischbeton.
 3. Erfassung der Passivierungsreaktion beim Betonieren (Wasserstoffentwicklung) im Hinblick auf
 - Störungen der Betonoberfläche,
 - das Risiko wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion an Beschädigungen an nach dem Verzinken gebogenen Betonstählen,
 - alternative Passivierungsverfahren,
 - die Zugabe von Inhibitoren zum Frischbeton zur Hemmung der Wasserstoffentwicklung im Frischbeton.

2.3 Angestrebte Forschungsergebnisse

Im Rahmen der festgelegten Forschungsziele wurden im Einzelnen folgende Forschungsergebnisse angestrebt, die zur besseren Übersicht getrennt nach den Bereichen

- Fertigungstechnik,
- Werkstofftechnik und
- Korrosionsschutz

aufgeführt sind.

Fertigungstechnik

Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen)

F1.1 Quantifizierung der Beschädigungen in Abhängigkeit von den gewählten Material- und Biegeparametern und der Zinkschichtdicke

F1.2 Verbleibende Gebrauchseigenschaften nach dem Biegen

Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken)

F2 Angabe zulässiger Biegerollendurchmesser im Vergleich zu EC2/NA D und ASTM A 767

Allgemein

F3 Ableitung von Anwendungsgrenzen und statistisch abgesicherte Feststellung der Eignung zum Biegen bei tiefen Temperaturen

F4 Ableitung von Anwendungsgrenzen und statistisch abgesicherte Feststellung der Zulässigkeit des Rückbiegens unter Baustellenbedingungen

F5 Ableitung von Anwendungsgrenzen bei der Herstellung von Mattenkörben beim Biegen im Bereich der Schweißstelle und Angabe zulässiger Biegerollendurchmesser

Werkstofftechnik

- W1** Angabe des Umfangs einer evtl. Abminderung der Dauerfestigkeit des Betonstahls durch eine Feuerverzinkung einschließlich Quantifizierung der verformungs- bzw. verzinkungsbedingten Randdefekte und ihrer Auswirkung auf die Schwingfestigkeitseigenschaften
- W2** Bewertung des Risikopotenzials und Ableitung der Anwendungsgrenzen in Bezug auf eine flüsigmetallinduzierte Rissbildung in Abhängigkeit der Biegeparameter (Biegeradius, Biegewinkel, Biegetemperatur, Biegegeschwindigkeit), Stabdurchmesser, Herstellverfahren
- W3** Identifizierung notwendiger Prüfverfahren und des Prüfumfanges für die Konformitätskontrolle

Korrosionsschutz

- K1** Bezifferung des Korrosionsfortschritts in korrosiven Expositionen und Bauarten (Karbonatisierung, Chlorideinwirkungen)
- K2** Erfassung der Passivierungsreaktion beim Betonieren (Wasserstoffentwicklung) unter Angabe/Bezifferung von Störungen der Betonoberfläche durch Blasenbildung/Poren infolge Wasserstoffentwicklung, von alternativen Passivierungsverfahren und der Wirkung von Inhibitoren im Beton zur Hemmung der Wasserstoffentwicklung
- K3** Bezifferung des Korrosionsfortschritts in gerissenem Beton in Abhängigkeit von der Rissbreite
- K4** Beurteilung von Beschädigungen an feuerverzinktem Betonstahl (ungeschützte Schnittkanten, Risse in der Zinkschicht an nachträglich gebogenen Betonstählen) in Abhängigkeit des Werkstoffzustandes (Biegen, Stahlsorten, etc.) im Hinblick auf eine mögliche wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion am Betonstahl
- K5** Auswirkung der Verwendung feuerverzinkter Betonstähle auf die Nutzungsdauer von Stahlbetonbauteilen (Aussage zu einer möglichen Reduzierung der Betondeckung/Reduzierung der Mindestdruckfestigkeitsklasse bei Verwendung von feuerverzinktem Betonstahl in Abhängigkeit von der Expositionsklasse)

3. Ergebnisse

Die im Rahmen des Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse werden im Folgenden entsprechend der unter 2.3 dargestellten angestrebten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse findet sich in den Berichten der einzelnen Forschungsstellen, die als Anlagen 1 und 23 beigelegt sind. Auf diese wird im Bedarfsfall jeweils verwiesen.

3.1 Werkstoffcharakterisierung (Arbeitspaket 2)

3.1.1 Probenauswahl und Untersuchungsmethoden

Wegen der Vielzahl möglicher Kombinationen war zur Reduzierung des Versuchsaufwandes eine Beschränkung der einzubeziehenden Werkstoffe erforderlich.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden folgende Werkstoffe und Durchmesser verwendet:

- B500B, Tempcore-Stahl, Durchmesser 10 mm (QT 10), 16 mm (QT 16) und 25 mm (QT 25)
- B500B, Ringmaterial (WR), Durchmesser 14 mm (WR 14)
- B500A, Ringmaterial (KR), Durchmesser 10 mm (KR 10)
- B500A, Betonstahlmatten, Durchmesser 10 mm

Mit dieser Auswahl werden der Großteil (> 95%) der in Deutschland/Europa marktüblichen Stahlvarianten sowie die gängigsten Durchmesser abgedeckt. Durch numerische Vergleichsrechnungen sollte zudem eine Übertragung der erzielten Ergebnisse auf größere Durchmesser sichergestellt werden.

Tabelle 1 gibt einen Überblick der im Rahmen der Werkstoff-Eingangscharakterisierung untersuchten Parameter und der verwendeten Methoden.

Tabelle 1: Untersuchte Parameter und Methoden

Gefüge	Längs- und Querschliffe, Lichtmikroskopie
Oberflächendefekte	Längs- und Querschliffe, Lichtmikroskopie
Kerndefekte	Röntgendurchstrahlungsprüfungen
Spannungszustand	Eigen Spannungsmessungen
Chemische Zusammensetzung	Funkenemissionsspektralanalyse
Werkstoffhärte	Härteprüfungen nach Vickers
Zinkschicht	Querschliffe, Lichtmikroskopie
Zinkschichtdicke	Gravimetrisches Verfahren nach DIN EN ISO 1460 e
Geometrische Eigenschaften	Rippenmessgerät RM 201/301 Fabr.ECM Datensysteme GmbH
Mechanische Eigenschaften	Zugversuch DIN EN ISO 15630-1
Dauerschwingfestigkeit	Dauerschwingversuch DIN EN ISO 15630-1

Lichtmikroskopische Schliiffuntersuchungen und Härtemessungen:

Die grundsätzliche Vorgehensweise der Schliiffherstellung und -untersuchung ist nach der in [3], [4] beschriebenen Methode an Beispiel des Werkstoffs WR 14mm im Bild 4 dargestellt. Die Schliiffebene befindet sich demnach mittig zur Probe.

Die Vickershärte mit einer Prüflast von 3,27 N (entspricht HV 0,3) nach DIN EN ISO 6507-1 wurde jeweils am Schliiff gemessen. Ausgehend vom Rand wurde jeweils ein Härtetiefenverlauf erstellt.

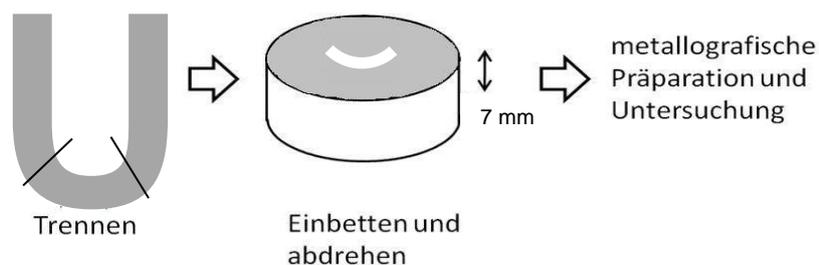


Bild 4: Beispielhafte Schliiffentnahme am gebogenen Betonstahl mit einem Stabdurchmesser von 14mm

Eigen Spannungsmessungen:

Die Gittereigen dehnungen (Eigen spannungen) wurden mit Cr-K α -Strahlung am {211}-Reflex des Eisens (Gitterkonstante 0,28730 nm) nach dem $\sin^2\psi$ - Verfahren mit einem Diffraktometer der Firma Stresstech, Modell XStress G3R in modifizierter ψ - Anordnung, bestimmt. Die Prüfung wurde nach DIN EN 15305:2008 (2009) durchgeführt. Dabei werden die Spannungswerte aus 7 Distanzwinkeln in $+\psi$ und $-\psi$ berechnet. Als röntgenelastische Konstante zur Berechnung der Eigen spannungswerte wurde $\frac{1}{2} s_2 = 5,76 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$ verwendet. Die Eigen spannungen wurden mit einer 1mm Blende (in Stablängsrichtung) gemessen.

Chemische Zusammensetzung:

Die chemischen Zusammensetzungen wurden mittels optischen Funkenemissionsspektralanalysen (FES-Analysen) an den Trennflächen des Querschnitts bestimmt. Vor der optischen Funkenemissionsspektralanalyse wurde die Messeinrichtung mit entsprechenden Referenzmaterialien rekali brier t. Zur Entfernung etwaiger Verunreinigungen wurde die metallisch blanke Analysenfläche vor der FES-Messung zuerst mit Ethanol gespült und nachfolgend getrocknet. Die Abschätzung der (absoluten) Messunsicherheiten erfolgte durch Analyse zertifizierter Referenzmaterialien mit ähnlicher chemischer Zusammensetzung wie das Probenmaterial und dem Vergleich der hierbei ermittelten Werte mit den zertifizierten Sollwerten sowie einer statistischen Betrachtung. Die Messunsicherheiten (U (\pm)) beziehen sich auf einen Vertrauensbereich von 95% (VB=95%).

Zugversuche nach DIN EN ISO 15630-1

Die Zugversuche wurden mit einer extern kalibrierten Universalprüfmaschine 600 kN, Klasse 1 nach DIN EN ISO 7500-1 durchgeführt. Die Messung der Probendehnung bis nach Erreichen der Streck-/Dehngrenze erfolgte mit einem Feindehnungsmessgerät „Mayer Falkenberg“.

Die Messung der Gleichmaßdehnung bei A_{gt} wurde berührungslos mit einem optischen Wegmesssystem WM 304 ECM Datensysteme GmbH durchgeführt.

Dauerschwingversuche

Die Untersuchungen zur Dauerschwingfestigkeit an ungebogenen Proben wurden mit einer 100kN-dyn. Universalprüfmaschine Hydropuls PSB der Fa. Schenck., Klasse 1, durchgeführt. Die Prüffrequenz betrug in allen Fällen 15 Hz.

3.1.2 Chemische Zusammensetzung

Die mittels optischer Funkenemissionsspektralanalysen (FES-Analysen) an den Trennflächen des Querschnitts bestimmten Gehalte der jeweils wichtigsten chemischen Elemente der Werkstoffe sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgelistet. Die vollständige Darstellung befindet sich im Bericht der Forschungsstelle 2 (Anlage 2 zum vorliegenden Bericht).

Tabelle 2: Ergebnisse der chemischen Analyse der Betonstähle vom Ring

Element	KR 10 mm (A)		WR 14 mm (B)	
	Analyse [M.-%]	*Werksangabe [M.-%]	Analyse [M.-%]	*Werksangabe [M.-%]
C	0,131 ± 0,010	0,05	0,205 ± 0,013	0,19
Si	0,160 ± 0,013 Sebisty Bereich	0,15 Sebisty Bereich	0,308 ± 0,008 Hochsiliziumbereich	0,29 Hochsiliziumbereich
Mn	0,592 ± 0,021	0,51	1,105 ± 0,041	1,06
P	0,027 ± 0,003	0,019	0,021 ± 0,003	0,021
S	0,057 ± 0,005	0,040	0,048 ± 0,005	0,044
Al	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Tabelle 3: Ergebnisse der chemischen Analyse der Tempcorestähle

Element	QT 10 mm		QT 16 mm		QT 25 mm	
	Analyse [M.-%]	*Werksangabe [M.-%]	Analyse [M.-%]	*Werksangabe [M.-%]	Analyse [M.-%]	*Werksangabe [M.-%]
C	0,173 ± 0,009	0,17	0,182 ± 0,013	0,15	0,172 ± 0,011	0,17
Si	0,275 ± 0,015 Hochsiliziumbereich	0,26 Hochsiliziumbereich	0,240 ± 0,006 Sebisty Bereich	0,21 Sebisty Bereich	0,227 ± 0,006 Sebisty Bereich	0,23 Sebisty Bereich
Mn	1,074 ± 0,035	1,06	1,018 ± 0,024	0,95	0,985 ± 0,024	1,01
P	0,021 ± 0,003	0,024	0,018 ± 0,003	0,018	0,022 ± 0,002	0,021
S	0,045 ± 0,003	0,040	0,033 ± 0,003	0,043	0,038 ± 0,002	0,035
Al	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

* Das den Werksangaben zugrundeliegende Verfahren zur chemischen Analyse ist unbekannt

Im Vergleich zu den Werksangaben ergaben sich nur geringe Abweichungen. Lediglich der Kohlenstoffgehalt beim KR 10 mm weicht deutlich ab, wird jedoch durch die Norm DIN 488-1 abgedeckt ($C_{\text{Soll}} < 0,22\text{M.-%}$). In Bezug auf den für eine Verzinkung relevanten Siliziumbereich sind die Werkstoffe QT 10 und WR 14 im Hochsiliziumbereich ($Si > 0,25\text{ M.-%}$), was einen voluminösen Schichtaufbau erwarten lässt [5]. Alle anderen Werkstoffe sind im Sebisty Bereich angesiedelt, in dem sich eine kompakte δ -Phase ausbildet [5].

3.1.3 Gefügeuntersuchungen

Die Werkstoffzustände wurden mit Hilfe von lichtmikroskopischen Untersuchungen an Quer- und Längsschliffen sowie makroskopischen Dokumentationen erfasst und bewertet.

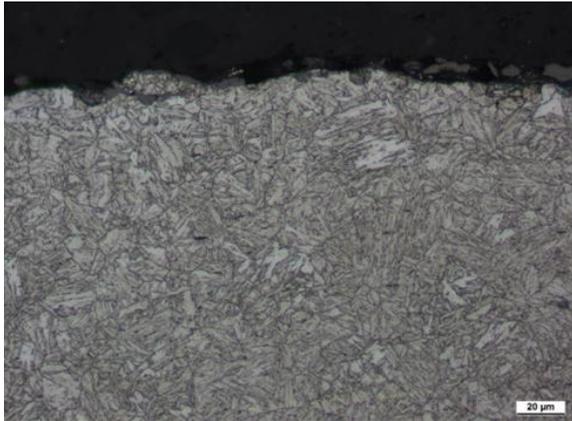


Bild 5: QT 10 mm, geätzter Schliff, Außenbereich Vergütungsgefüge

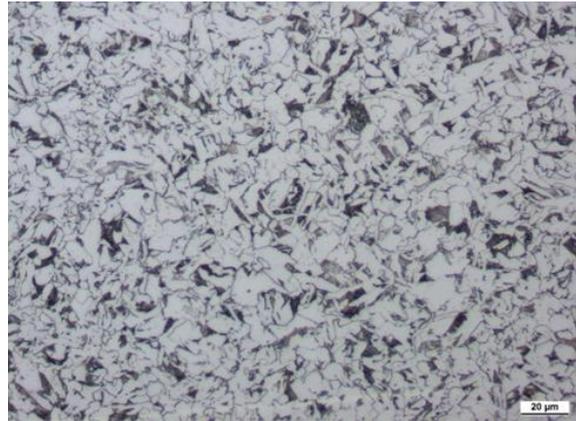


Bild 6: QT 10 mm, geätzter Schliff, Kerngefüge ferritisch-perlitisch

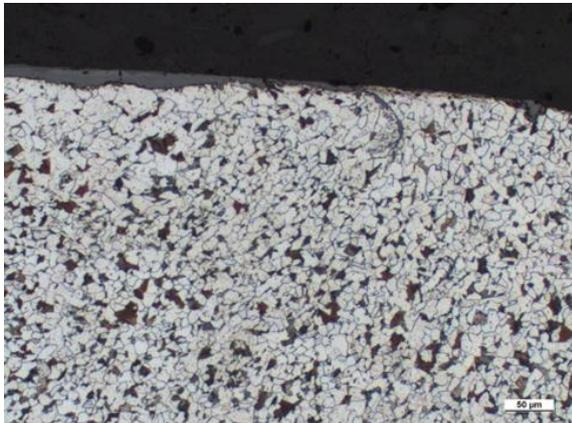


Bild 7: WR 14 mm, geätzter Schliff, Außenbereich ferritisch-perlitisches Gefüge

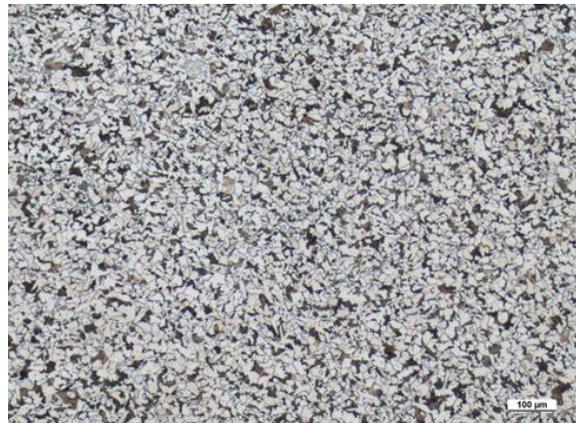


Bild 8: WR 14 mm, geätzter Schliff, Kerngefüge ferritisch-perlitisch

Alle Detailergebnisse der metallografischen Untersuchungen befinden sich in Anlage 2. Wesentliche Unterschiede zeigen sich im Gefüge der KR/WR Werkstoffe im Vergleich zum QT (Tempcore)-Werkstoff. Die Tempcore Werkstoffe weisen im Randbereich ein Vergütungsgefüge auf, während im Kern ein ferritisch-perlitisches Gefüge vorliegt (beispielhaft Bild 5 und Bild 6). Die KR/WR Werkstoffe sind durchgängig ferritisch-perlitisch (beispielhaft Bild 7 und Bild 8).

3.1.4 Oberflächenbeschaffenheit

Bei den Werkstoffen QT 10 mm und KR 10 mm zeigten sich teilweise stark ausgeprägte Randartefakte wie Riefen, Überwalzungen und Ungenzen an den Oberflächen, beispielhaft Bild 9 bis Bild 12.

Bei Werkstoff QT 25 mm konnten innenliegende fadenartige Hohlräume nachgewiesen werden. Eine stichprobenhafte Röntgen-Durchstrahlungsprüfung am Stabmaterial bestätigte den Sachverhalt.

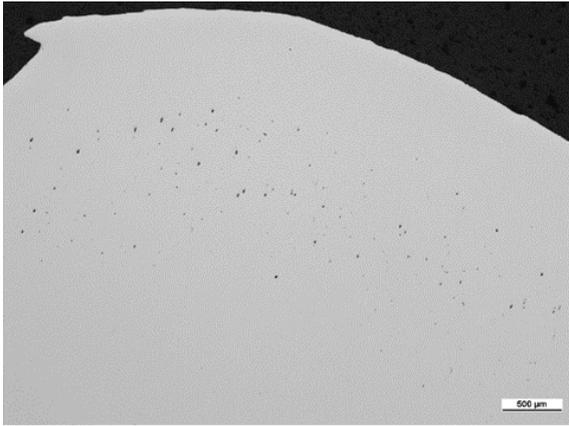


Bild 9: KR 10 mm, ungeätzter Querschliff



Bild 10: KR 10 mm, geätzter Querschliff

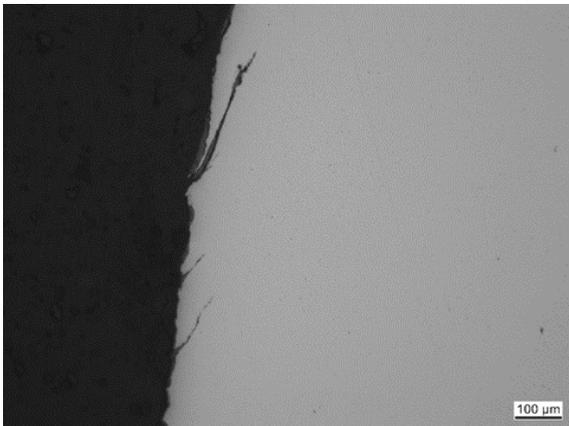


Bild 11: QT 10 mm, ungeätzter Querschliff

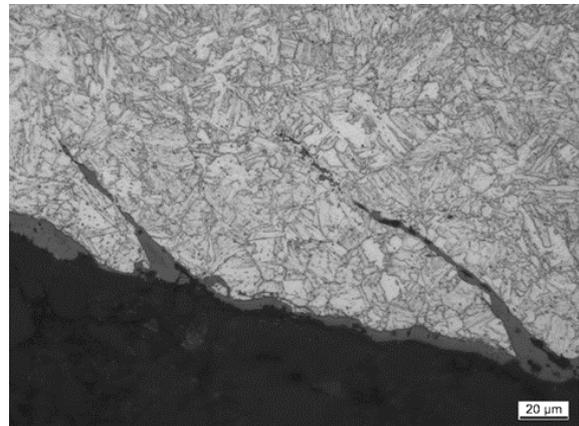


Bild 12: QT 10 mm, geätzter Querschliff

3.1.5 Härte ungebogene Proben

Die Vickershärte wurde mit einer Prüflast von 3,27 N (entspricht HV 0,3) nach DIN EN ISO 6507-1 jeweils am Schliff gemessen. Ausgehend vom Rand wurde jeweils ein Härtetiefenverlauf erstellt.

Wie erwartet sind die Tempcore-Werkstoffe im Randbereich deutlich härter als im Kern, während die Betonstähle vom Ring (KR/WR) über den Probenquerschnitt betrachtet auf einem nahezu identischen Niveau liegen (Bild 13 und Bild 14).

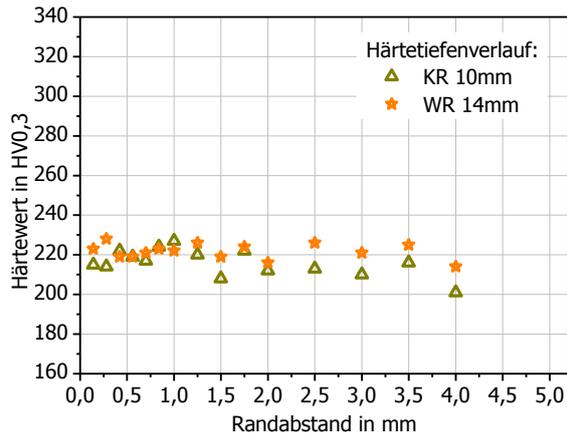


Bild 13: Härtemessungen, KR/WR Werkstoffe

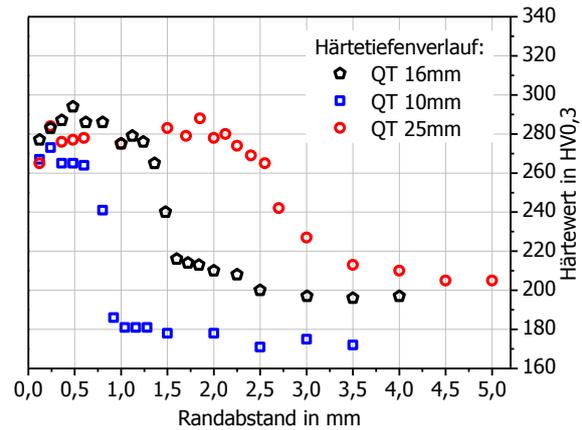


Bild 14: Härtemessungen QT Werkstoffe

3.1.6 Zinkschicht (Dicke und Beschaffenheit)

Die Zinkschichten für die für den Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) hergestellten Werkstoffe sind durchgängig gekennzeichnet von einer geringen bis kaum vorhandenen η -Schicht, einer zum Teil mehrere 100 μm starken ζ -Schicht und einer im Verhältnis schmal ausgebildeten δ -Schicht. Auch die Ausbildung der Zinküberzüge der vom Si-Gehalt im Hochsiliziumbereich liegenden Werkstoffe QT 10 und WR14 mm weisen hier keine signifikanten Unterschiede zu den restlichen Werkstoffen auf. Unter Berücksichtigung der knapp im Hochsiliziumbereich liegenden Analyseergebnisse, ist für den Randbereich eine Abminderung des Silizium-Gehalts hin zum Sebsty Bereich denkbar, so dass der voluminöse Schichtaufbau ausbleibt.

Fehlverzinkungen, auch im Bereich von Oberflächenartefakten, wurden nicht beobachtet, allerdings sind lokale Ablösungen der ζ -Schicht von der δ -Schicht als Hinweise auf eine versprödete Zinkschicht ersichtlich (Bild 15 und Bild 16). Unter Stoßbelastungen oder beim Biegen nach dem Verzinken gemäß Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) kann es an diesen Stellen zu einem Abplatzen der Schicht kommen.

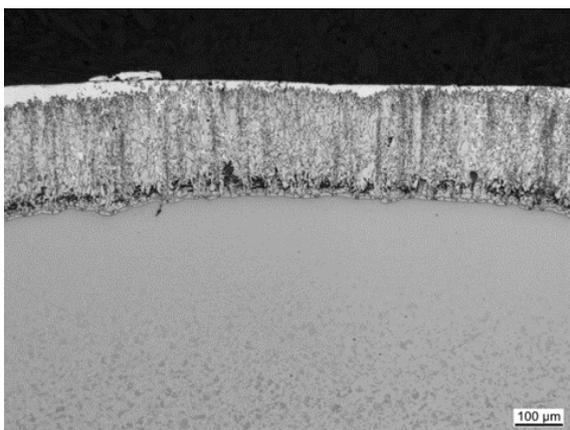


Bild 15: WR 14 mm, beispielhafte Aufnahme der Zinkschicht

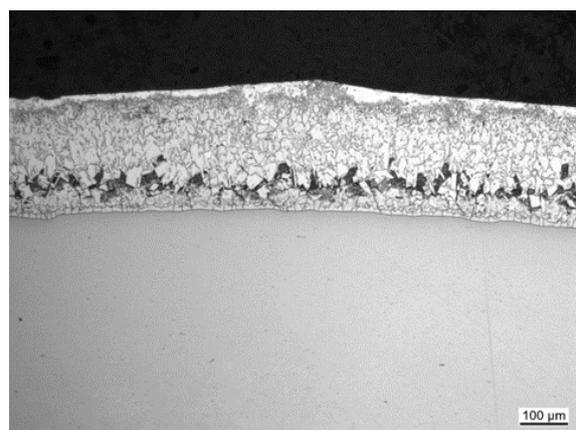


Bild 16: QT 16 mm, beispielhafte Aufnahme der Zinkschicht

Parallel zu den mikroskopischen Untersuchungen an der Forschungsstelle 2 wurde an der Forschungsstelle 1 die Zinkschichtdicke der Proben nach dem gravimetrischen Verfahren nach DIN EN ISO 1460 ermittelt. Tabelle 4, Bild 17 und Bild 18 zeigen die ermittelten Werte.

Tabelle 4: Zinkschichtdicke der für Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) verzinkten Proben (gravimetrisches Verfahren nach DIN EN ISO 1460)

d_{st} [mm]	d_{zn} [μm]
10 KR	213
10 QT	189
14 WR	296
16 QT	225
25 QT	179

Nach der bauaufsichtlichen Zulassung muss der Zinküberzug eine mittlere oberflächenbezogene Masse von mindestens 610 g/m^2 aufweisen. Dies entspricht einer mittleren Dicke des Überzuges von $85 \mu\text{m}$, wobei Einzelwerte $200 \mu\text{m}$ nicht überschreiten sollen.

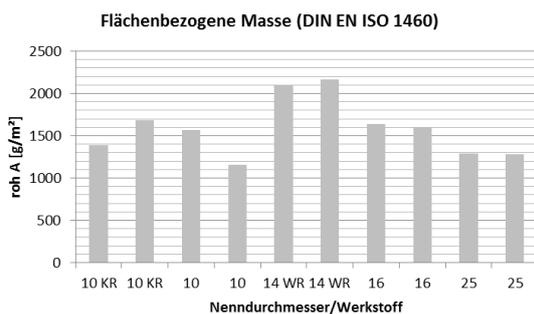


Bild 17: Flächenbezogene Masse der Zinkschicht der nach Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen) verzinkten Proben

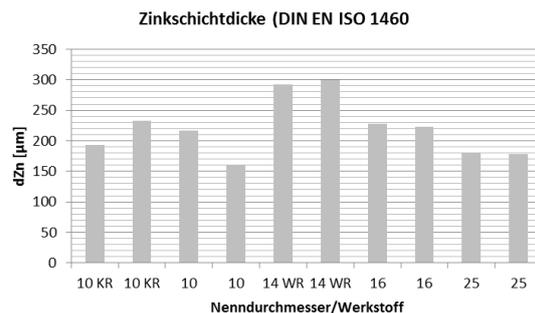


Bild 18: Zinkschichtdicke der der nach Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen) verzinkten Proben

Die mittels gravimetrischem Verfahren bestimmten Zinkschichtdicken zeigen mit Ausnahme des warmgewalzten Ringmaterials (WR), Durchmesser 14 mm, nur geringe Abweichungen von den an den Schliften mikroskopisch bestimmten Werten.

Das warmgewalzte Ringmaterial (WR), Durchmesser 14 mm, weist im Vergleich zu den übrigen Stählen die größte Zinkschichtdicke auf, was zum einen auf den vergleichsweise hohen Si-Gehalt des Grundmaterials, zum anderen auf größere Zinkansammlungen im Bereich des Übergangs von der Rippe auf den Schaft zurückgeführt werden kann.

Die ermittelten Ergebnisse liegen am oberen Rand des über die Zulassung abgedeckten Bereichs bzw. bereits darüber. Die Bewertung wird unter Punkt 3.3.1.1 bei der Beurteilung des Rissverhaltens der Zinkschicht vorgenommen (vgl. dort).

An den im Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) verzinkten Proben wurde an der Forschungsstelle 1 ebenfalls die Zinkschichtdicke der Proben nach dem gravimetrischen Verfahren ermittelt. Tabelle 5 zeigt die ermittelten Werte.

Tabelle 5: Zinkschichtdicke der im Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) verzinkten Proben (gravimetrisches Verfahren nach DIN EN ISO 1460)

d_{St}	d_{Zn}
[mm]	[μm]
10 KR	157
10QT	121
14 WR	172
16 QT	134

Gegenüber den für Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen) verzinkten Proben weisen die für Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) verzinkten Proben erkennbar geringere Zinkschichtdicken auf. Der in der Zulassung genannte obere Grenzwert von 200 μm wird nicht überschritten. Das warmgewalzte Ringmaterial (WR), Durchmesser 14 mm, weist im Vergleich zu den übrigen Stählen wiederum die größte Zinkschichtdicke auf.

Im Anschluss an die Versuche zum Biegen an der Schweißstelle wurde zusätzlich die Zinkschichtdicke der verzinkten Betonstahlmatten wiederum nach dem gravimetrischen Verfahren ermittelt. Hierbei ergab sich eine mittlere Zinkschichtdicke von 166 μm .

3.1.7 Geometrische Merkmale (Rippenmessung)

An den untersuchten Proben wurden mit Hilfe eines Rippenmessgerätes RM 201/301 der Firma ECM Datensystem GmbH die Kopfbreite und die bezogene Rippenfläche bestimmt. Die detaillierten Ergebnisse finden sich im Bericht der Forschungsstelle 1 (Anlage 1 zu diesem Bericht).

Für die Kopfbreite sind nach DIN 488 Richtwerte vorgegeben, wobei Werte bis $0,2 \cdot d$ in Rippenmitte zulässig sind.

Bild 19 zeigt die ermittelten Werte, wobei die Richtwerte (gestrichelt) und die zulässigen Werte (durchgezogen) eingetragen sind. Die vorgegebenen Richtwerte werden von den Proben QT 16 sw, QT 25 sw und QT 25 fvz erkennbar unterschritten. Die zulässigen Grenzwerte werden von den Proben KR 10 sw und KR 10 fvz (gerichtetes Material) überschritten.

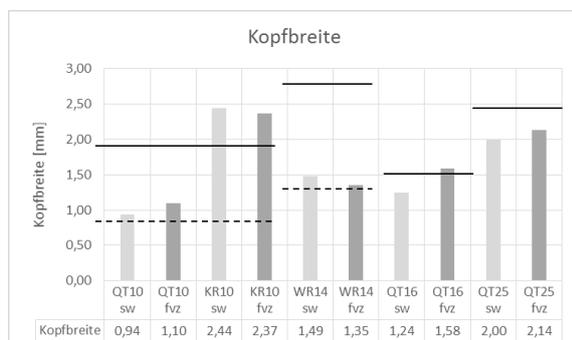


Bild 19: Kopfbreite der untersuchten Betonstähle

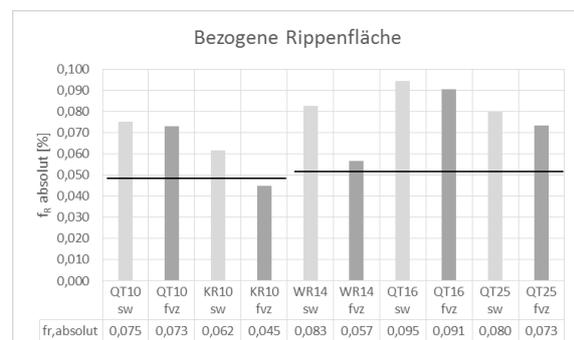


Bild 20: Bezogene Rippenfläche der untersuchten Betonstähle

Für die bezogene Rippenfläche gibt DIN 488 in Abhängigkeit vom Stabdurchmesser 5%-Fraktilwerte vor. Diese werden, wie Bild 20 zeigt, mit Ausnahme des feuerverzinkten KR 10 sicher erreicht.

Eine Kontrolle mit 6 weiteren feuerverzinkten Proben des Werkstoffs KR 10, die zunächst im verzinkten Zustand untersucht, anschließend entzinkt und wieder untersucht wurden, ergab die in Bild 21 und Bild 22 dargestellten Ergebnisse. Hiernach ergaben sich hinsichtlich der Kopfbreite praktisch keine Unterschiede, während die zu geringen Werte der bezogenen Rippenfläche eindeutig auf die Zinkschicht zurückgeführt werden müssen.

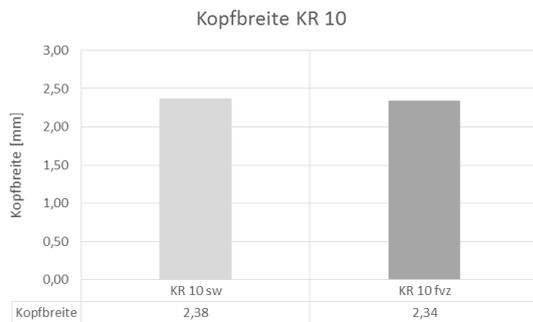


Bild 21: Kopfbreite des Betonstahls KR 10 vor und nach dem Entzinken

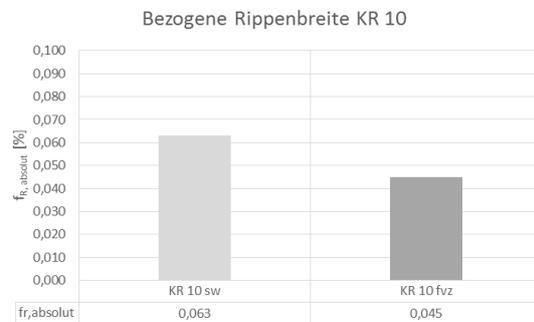


Bild 22: Bezogene Rippenfläche des Betonstahls KR 10 vor und nach dem Entzinken

Die Ergebnisse zeigen, dass die bezogene Rippenfläche durch die Verzinkung abnimmt. Dieser Effekt ist bei den untersuchten Ringmaterialien KR 10 und WR 14 am stärksten ausgeprägt. Bei den untersuchten Tempcorestählen wird der geforderte Mindestwert der bezogenen Rippenfläche im unverzinkten Zustand um ca. 40 – 50 % überschritten, wobei die Abnahme infolge der Verzinkung in allen Fällen geringer als 11 % bleibt. Bei Werkstoff WR 14 führt die Verzinkung dazu, dass der geforderte Wert trotz einer Überschreitung um 48 % im unverzinkten Zustand gerade noch eingehalten wird. Bei Werkstoff KR 10 wird der geforderte Mindestwert mit ca. 18 % im Vergleich zu den übrigen untersuchten Werkstoffen vergleichsweise gering überschritten, so dass die verzinkten Stäbe den geforderten Wert um ca. 13 % unterschreiten.

In der Literatur [6] wird eine Abnahme der bezogenen Rippenfläche bei Betonstahlmatten um 20 – 25 % beschrieben, die insbesondere mit großen Zinkschichtdicken in Verbindung gebracht wird. Dies ist bei den untersuchten Ringmaterialien KR 10 und WR 14 gegeben, wobei bei Werkstoff WR 14 das unverzinkte Ausgangsmaterial in Bezug auf die bezogene Rippenfläche offenbar ein ausreichendes Vorhaltemaß aufweist, so dass der geforderte Mindestwert trotz der hohen Zinkschichtdicke noch erreicht werden kann. Demgegenüber weist der untersuchte Werkstoff KR 10 das geringste Vorhaltemaß auf, so dass der geforderte Mindestwert nicht mehr erreicht wird.

Alle dem Institut Feuerverzinken vorliegenden und der Forschungsstelle 1 zur Auswertung vorgelegten Fremdüberwachungsberichte aus dem Zeitraum 2008 bis 2016 lassen bezüglich der Einhaltung der bezogenen Rippenfläche keine Probleme erkennen. Dennoch sollte bei Ringmaterialien, die im Zuge der Weiterverarbeitung gerichtet und anschließend verzinkt werden, auf eine möglichst geringe Zinkschichtdicke und ein entsprechendes Vorhaltemaß am Ausgangsmaterial geachtet werden.

3.1.8 Mechanische Eigenschaften (Zugversuche, Einfluss Verzinkung und Aderung)

Einfluss des Walzprozesses auf die mechanischen Eigenschaften (Tempcore)

Im Rahmen des Herstellungsprozesses der Tempcorestähle werden die aus der Stranggussanlage kommenden Knüppel je nach angestrebtem Stabdurchmesser in mehrere Teilstränge (Adern) aufge-

teilt, die jede für sich ausgewalzt und gekühlt werden. Infolgedessen können Proben aus unterschiedlichen Strängen/Adern unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, auch wenn sie aus derselben Charge hergestellt werden.

Bild 23 und Bild 24 zeigen die Zusammenhänge am Beispiel der Werkstoffe QT 10 mit 4 unterschiedlichen Strängen/Adern und QT 16 mit 3 unterschiedlichen Strängen/Adern. Zusätzlich ist der Einfluss einer vorhergehenden Alterung (a = gealtert) ablesbar.

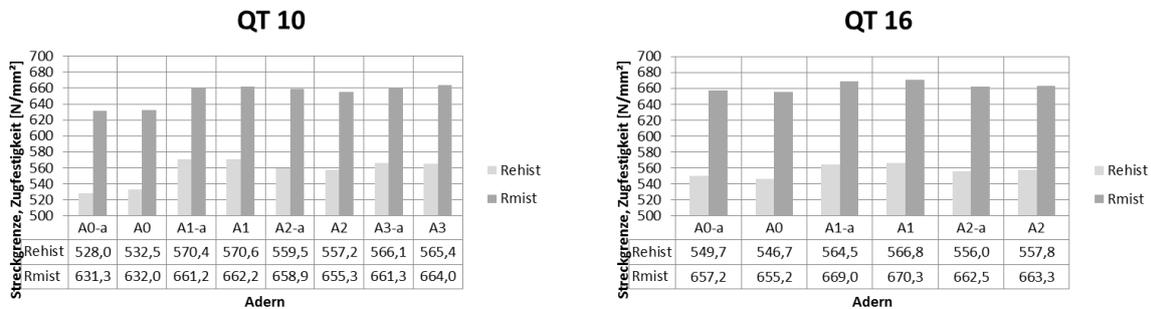


Bild 23: Streckgrenze und Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Ader

Bild 24: Streckgrenze und Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Ader

Bei Werkstoff QT 10 ergibt sich eine deutliche Abweichung bei Ader 0, die gegenüber den Adern 1 bis 3 um ca. 30 – 40 N/mm² niedrigere Werte bei der Streckgrenze und 30 N/mm² bei der Zugfestigkeit aufweist. Bei Werkstoff QT 16 weist Ader 1 ca. 5 -15 N/mm² höhere Werte bei der Streckgrenze und der Zugfestigkeit gegenüber den Adern 0 und 2 auf.

Einfluss der Verzinkung auf die mechanischen Eigenschaften

Beim Verzinkungsprozess werden die Stahlproben für die Dauer des Tauchvorgangs Temperaturen über 400 °C ausgesetzt. Dies führt dazu, dass die in die Untersuchung einbezogenen Ringmaterialien KR 10 (Bild 25 und Bild 27) und WR 14 (Bild 26 und Bild 28) nach der Feuerverzinkung wieder einen Fließbereich mit ausgeprägter Streckgrenze R_{eH} aufweisen.

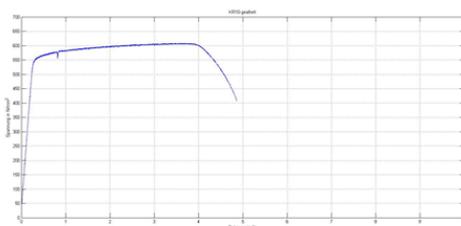


Bild 25: Spannungsdehnungslinie KR 10 unverzinkt

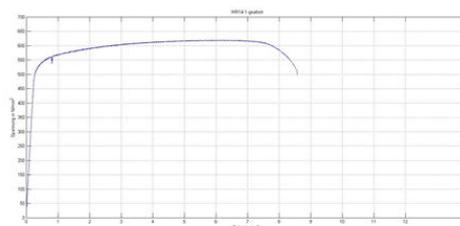


Bild 26: Spannungsdehnungslinie WR 14 unverzinkte

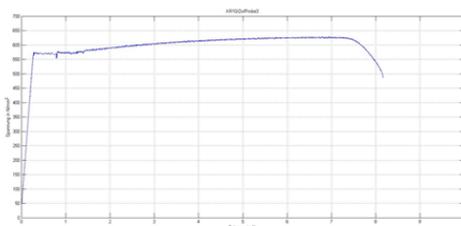


Bild 27: Spannungsdehnungslinie KR 10 verzinkt nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen)

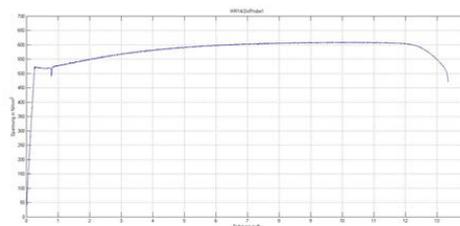


Bild 28: Spannungsdehnungslinie WR 14 verzinkt nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen)

Gegenüber dem unverzinkten Grundmaterial weisen beide Werkstoffe eine signifikant höhere Duktilität, ablesbar an den A_{gt} -Werten, auf (Bild 29 und Bild 30).

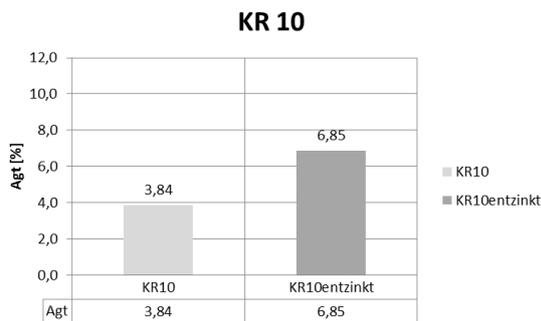


Bild 29: Vergleich A_{gt} -Werte unverzinkte und verzinkte Proben nach dem Entzinken

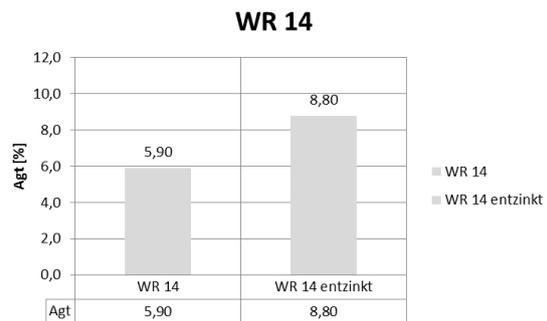


Bild 30: Vergleich A_{gt} -Werte unverzinkte und verzinkte Proben nach dem Entzinken

Zur Kontrolle eines möglichen Einflusses des Verzinkungsprozesses auf die Festigkeitseigenschaften des Grundmaterials wurden ergänzende Zugversuche mit unverzinkten, ungealterten (0) unverzinkten, gealterten (a), in Ablösemittel nach DIN EN ISO 1460 gelagerten unverzinkten (sw*) und entzinkten (fvz*) Proben durchgeführt. Die Berechnung erfolgte in allen Fällen mit dem Ist-Querschnitt der jeweiligen Probe.

Die Streckgrenze und Zugfestigkeit werden, wie Bild 31 und Bild 32 am Beispiel QT 10 und QT 16 zeigen, durch den Verzinkungsprozess nicht signifikant beeinflusst, wie ein Vergleich der an unverzinkten und an verzinkten Proben ermittelten und unter Zugrundelegung der tatsächlich vorhandenen Querschnittsfläche zeigt.

Dies gilt ebenfalls für die Werkstoffe KR 10 und WR 14, wie Bild 33 und Bild 34 zeigen.

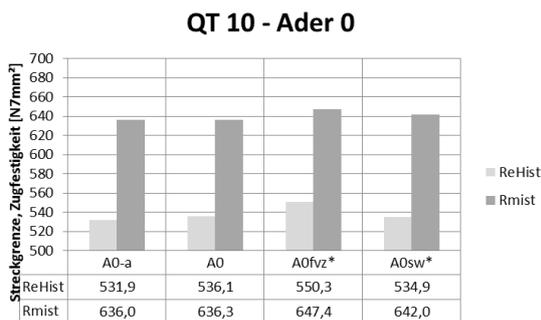


Bild 31: Einfluss des Verzinkungsprozesses QT 10

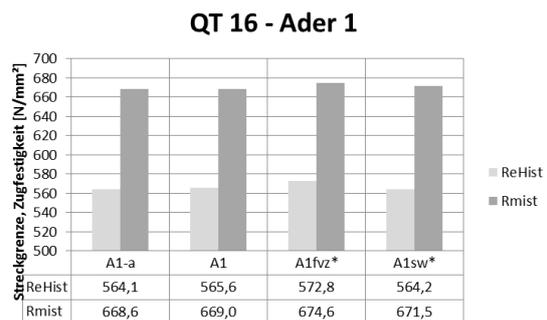


Bild 32: Einfluss des Verzinkungsprozesses QT 16

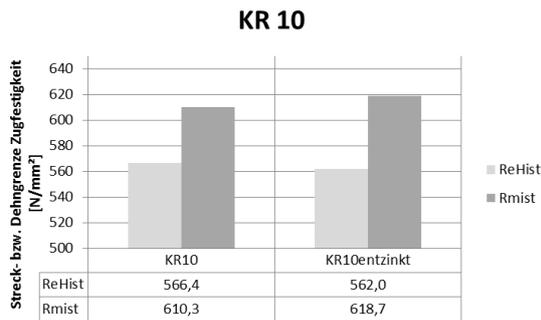


Bild 33: Einfluss des Verzinkungsprozesses KR 10 unverzinkte und verzinkte Proben nach dem Entzinken

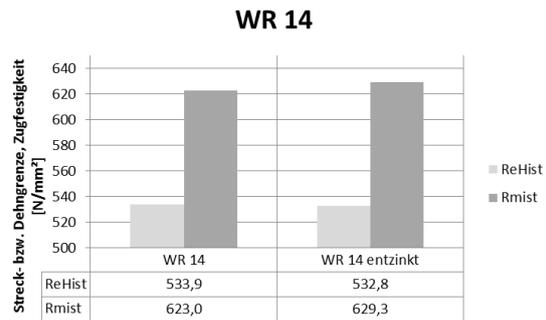


Bild 34: Einfluss des Verzinkungsprozesses WR 14 unverzinkte und verzinkte Proben nach dem Entzinken

3.1.9 Dauerschwingfestigkeit

In Ergänzung zu den an der Forschungsstelle 2 durchgeführten Dauerschwingversuchen (s. 3.4.2) an gebogenen Schlaufen wurden an der Forschungsstelle 1 Dauerschwingversuche mit geraden unverzinkten und nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) verzinkten Proben nach DIN EN ISO 15630-1 zur Bestimmung der Zeitfestigkeit am Werkstoff QT 10 durchgeführt.

Die Lasthorizonte wurden dabei in Abstimmung mit Forschungsstelle 2 festgelegt. Die Prüffrequenz betrug bei allen Versuchen 15 Hz.

Die in Bild 35 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) verzinkten Proben niedrigere Schwingspielzahlen erreichen als die unverzinkten Proben.

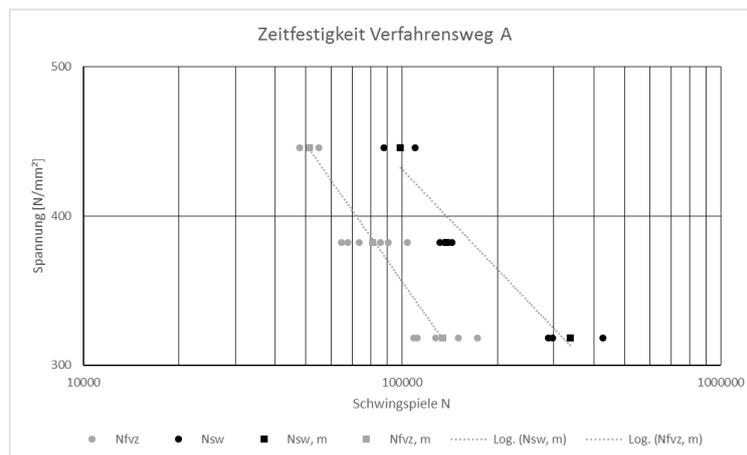


Bild 35: Zeitfestigkeit unverzinkte und nach Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen) verzinkte gerade Proben, Werkstoff QT 10

In der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für verzinkte Betonstähle [2] wird eine Abminderung der Dauerschwingfestigkeit um 25 % vorgegeben. Das bedeutet, dass die für unverzinkte Betonstähle vorgegebene Schwingbreite von 175 MPa auf $0,75 \cdot 175 \text{ MPa} = 131,25 \text{ MPa}$ abgemindert werden muss. Ein Versagen der Probe darf bei der Prüfung frühestens nach $2 \cdot 10^6$ Lastspielen erfolgen.

Mit feuerverzinkten Betonstählen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes Dauerschwingversuche an ungebogenen, unverzinkten und nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) verzinkten Proben aus den Werkstoffen QT 10 und KR 10 jeweils mit einem Durchmesser von 10 mm durchgeführt.

Die Dauerschwingversuche an ungebogenen und verzinkten Proben des Werkstoffs QT 10 zeigten bei dem Lasthorizont von 175 MPa nur Durchläufer. Diese Proben erfüllten somit auch die Anforderungen, die für unverzinkte Stähle nach DIN 488 im Rahmen der Fremdüberwachung des Weiterverarbeiters (Biegebetrieb) gefordert werden.

Bei den ungebogenen und verzinkten Proben aus KR 10 versagten auf dem Lasthorizont 175 MPa 3 von 5 Proben bei einer Schwingspielzahl von ca. $1,1 \cdot 10^6$ während 2 Proben bei ca. $9,2 \cdot 10^5$ Lastspielen versagten.

Die für unverzinkte Stabstähle bei der Erstprüfung des Betonstahlherstellers auf dem Lasthorizont 200 MPa geforderte Grenzlastspielzahl von $2 \cdot 10^6$ wurde von den verzinkten Stählen nicht erreicht.

Bei ungebogenen und feuerverzinkten Betonstahl lässt sich werkstoffunabhängig eine Reduktion der Dauerfestigkeit gegenüber dem unverzinkten Stahl feststellen. Bei vergleichbarem Lasthorizont erreichten die feuerverzinkten Proben weniger Lastspiele. Hier werden für beide Werkstoffe die Anforderungen nach der in der Norm vorgesehenen 25%-igen Abminderung erreicht.

In Bild 36 sind die charakteristischen Wöhlerlinien nach DIN EN 1992-1-1 (EC 2) für unverzinkte Betonstähle und nach Zulassung [2] für feuerverzinkte Betonstähle dargestellt und die von den geprüften Proben im Mittel erreichten Schwingspielzahlen eingetragen. Dabei ist ersichtlich, dass die auf den untersuchten Lasthorizonten erreichten Werte über der charakteristischen Wöhlerlinie für schwarze Betonstähle liegen.

Die für feuerverzinkte Betonstähle nach der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-1.4-165 bei der Bemessung nach DIN EN 1992-1-1 (EC 2) bei nicht vorwiegend ruhender Belastung anzusetzende abgeminderte charakteristische Wöhlerlinie ist in der Darstellung gestrichelt eingetragen.

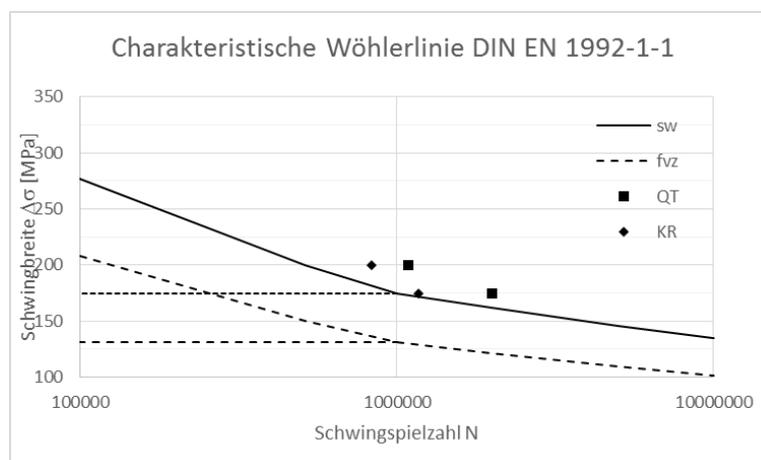


Bild 36: Lage der Versuchswerte im Vergleich zur charakteristischen Wöhlerlinie nach DIN EN 1992-1-1 (EC 2)

3.1.10 Kerbschlagbiegeversuche

Im Hinblick auf die Charakterisierung des Spröbruchverhaltens wurden an der Forschungsstelle 1 Kerbschlagbiegeversuche zur Feststellung der Übergangstemperatur durchgeführt.

Da die Literaturlauswertung [7] eine Vielzahl von Parametern auf den Wert der Kerbschlagzähigkeit erkennen ließ, insbesondere Kerbform, Kerbtiefe, Kerbradius und Kerbherstellung, wurden vergleichende Versuche mit unbearbeiteten Proben (vgl. [8]) aus Werkstoff KR 10 sowie herausgearbeiteten Proben mit den Werkstoffen WR 14, QT 16 und QT 25 durchgeführt. Dabei wurden die Kerbform (Rundkerb/Spitzkerb), die Kerbtiefe (2 mm und 5 mm bei Rundkerben, 2 mm bei Spitzkerben) und die

Temperatur (20 K-Stufen im Bereich von -40°C bis + 60°C) variiert. Die Versuche wurden jeweils an unverzinkten und nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) verzinkten Proben durchgeführt, wobei auf jeder Temperaturstufe 5 Proben geprüft wurden.

Bei Werkstoff QT 25 ergaben die Versuche an herausgearbeiteten Proben mit Rundkerb eine Übergangstemperatur von - 5 °C und mit Spitzkerb von -10 °C. Ein Einfluss des Verzinkungsprozesses war nicht feststellbar.

Bei Werkstoff QT 16 war lediglich an den unverzinkten Proben mit Spitzkerb eine Übergangstemperatur von -10 °C feststellbar. Bei den übrigen Proben war ein Steilabfall im betrachteten Temperaturbereich nicht zu beobachten.

Bei den Ringmaterialien WR 14 und KR 10 zeigte sich bei den verzinkten Proben eine deutlich erkennbare Verschiebung der Übergangstemperatur zu höheren Werten.

Bei Werkstoff WR 14 war an den herausgearbeiteten Proben mit Rundkerb eine Verschiebung der Übergangstemperatur von -5 °C bei den unverzinkten Proben zu +10 °C bei den verzinkten Proben zu beobachten. Bei den Proben mit Spitzkerb verschob sich die Übergangstemperatur von +10 °C zu + 25 °C.

Bei Werkstoff KR 10 war an den unbearbeiteten Proben eine Verschiebung der Übergangstemperatur von + 20 °C zu + 30 °C zu beobachten.

3.1.11 Zusammenfassung

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der metallografischen Untersuchungen in der Tabelle 6 dargestellt. Die Ergebnisse der im Rahmen der Eingangscharakterisierung ermittelten mechanischen Kennwerte sind für die unverzinkten Stähle in Tabelle 7 und die feuerverzinkten Stähle in

Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse der metallografischen Charakterisierung

		KR 10mm	WR 14mm	QT 10mm	QT 16mm	QT 25mm
Schwarzes Material	Gefüge	ferritisch-perlitisch		außen Vergütungsgefüge, innen ferritisch-perlitisch		
	Mechanisch-technologische Eigenschaften	Entspricht der Norm DIN 488 - 1				
	Artefakte	Riefen, Überwältigungen im Randbereich	teilweise Überwältigungen im Randbereich erkennbar	Riefen, Überwältigungen im Randbereich	teilweise Überwältigungen im Randbereich erkennbar	Fadenlunkerartige Hohlräume im Inneren
Verzinktes Material	Charakterisierung	wenig η-Schicht, mehrere 100µm ausgeprägte ζ-Schicht und schmal ausgebildete δ-Schicht, ζ-Schicht von der δ-Schicht teilweise abgelöst				
	Schichtdicke	rund 200µm bis 250µm				
Chemische Analyse		Entspricht der Norm DIN 488 - 1				
Härte		rund 220HV0,3		außen 265HV0,3; innen 170HV0,3	außen 290HV0,3; innen 195HV0,3	außen 280HV0,3; innen 205HV0,3

Tabelle 7: Ergebnisse der Eingangscharakterisierung mechanische Kennwerte der unverzinkten Stähle

Werkstoff	d [mm]	Zustand	x _i	R _{eH} bzw. R _{p0,2}			R _m			E		A _g		A _{gt}
				[N/mm ²]			[N/mm ²]			[N/mm ²]		[%]		
				x _m	s	WPK	x _m	s	WPK	x _m	s	x _m	s	WPK
QT 10 sw	10		3	555,1	5,3	586,5	650,6	6,6	671,5	204867	4608	8,3	1,2	9,6
		a	3	557,0	5,3		650,7	3,1		204802	1068	9,0	1,0	
KR 10 sw	10		3	552,5	4,9	556	588,5	6,5	606,5			2,7	0,6	4,3
		a	6	569,0	6,4		614,2	5,3		204843	1203	3,5	0,5	
WR 14 sw	14		3	527,5	8,3	536,0	611,3	6,3	616,8			6,9	0,8	7,7
		a	6	536,7	2,6		615,6	3,3		200167	5153	6,2	1,2	
QT 16 sw	16		12	562,7	3,1	556,0	672,0	1,9	667,8	205241	4388	11,0	0,8	13,5
		a	--											
QT 25 sw	25		3	573,0	2,0	576,3	673,7	1,2	680,5	203422	5098	9,1	0,7	11,6
		a	3	572,7	1,5		673,0	1,7		196616	2217	10,4	2,1	

Tabelle 8: Ergebnisse der Eingangscharakterisierung mechanische Kennwerte der nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) verzinkten Stähle

Werkstoff	d [mm]	Zustand	Nr.	ReH			R _m			E		A _g		A _{gt}
				[N/mm ²]			[N/mm ²]			[N/mm ²]		[%]		
				x _i	x _m	s	WPK	x _m	s	WPK	x _m	s	x _m	s
QT 10 fvz	10		5	559,0	3,5	586,5	646,3	1,0	671,5	203836	2863	9,7	0,1	9,6
KR 10 fvz	10		5	571,7	3,2	556,0	625,4	3,1	606,5	205770	6314	6,6	0,4	4,3
WR 14 fvz	14		5	527,2	4,6	536,0	616,1	4,5	616,8	200417	4609	9,2	0,3	7,7
QT 16 fvz	16		5	583,2	2,5	556,0	684,6	1,0	667,8	205146	2738	10,5	0,7	13,5
QT25 fvz	25		5	581,4	1,3	576,3	674,0	3,1	680,5	196816	6380	7,0	0,4	11,6

3.2 Einflussgrößen (Arbeitspaket 2)

3.2.1 Untersuchungsmethoden

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die für die Festlegung der Biegeparameter in den Arbeitspaketen 3 und 4 untersuchten Parameter und die verwendeten Methoden.

Tabelle 9: Untersuchte Parameter und Methoden

Gefüge	Längs- und Querschliffe, Lichtmikroskopie
Werkstoffhärte	Härteprüfungen nach Vickers
Alterungsbeständigkeit	Auslagerungsversuche
Spannungszustand	Eigen Spannungsmessungen
Biegeparameter	Rückbiegeversuch DIN EN ISO 15630-1 Numerische Berechnungen, Software Abaqus® Aufweitversuche in der Zinkschmelze
Mechanische Eigenschaften	Zugversuch DIN EN ISO 15630-1 an rückgebogenen Proben

Die Charakterisierung der Werkstoffgefüge, die Bestimmung der Werkstoffhärte und die Eigen Spannungsmessung wurden analog der unter 3.1.1 beschriebenen Vorgehensweise vorgenommen.

Alterungsbeständigkeit

Zur Untersuchung der Alterungsbeständigkeit wurden zunächst an den Forschungsstellen 1 und 2 Axialzugversuche zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte durchgeführt und mit den Werksangaben des Herstellers verglichen.

Anschließend wurden an der Forschungsstelle 2 um 180° (Schlaufen) mit einem Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 4 * d_{St}$ gebogene Betonstähle (unverzinktes Material) für 15min in einer Salzsäure bei 450 °C lastfrei ausgelagert, an der Forschungsstelle 1 zurückgebogen und die mechanisch-technologischen Eigenschaften im Zugversuch bestimmt (Bild 37). Zusätzlich wurden gerade Stäbe (schwarzes Material) für 15min in der Salzsäure ausgelagert und die mechanisch-technologischen Eigenschaften ermittelt (Bild 38).

Auf diese Weise sollten Unterschiede zwischen ausgelagerten und nicht-ausgelagerten geraden Proben aufgezeigt werden und darüber hinaus der explizite Einfluss einer durch die Biegung bedingten plastischen Verformung untersucht werden. Pro Betonstahlvariante wurde mindestens eine Abmessung untersucht. Jeweils 3 Einzelproben pro Serie wurden für die beschriebenen Versuche geprüft.

Der Werkstoff QT 25 mm wurde bei den Untersuchungen nicht berücksichtigt, da sich hier die Rückbiegung im Labor als nicht hinreichend reproduzierbar erwies.

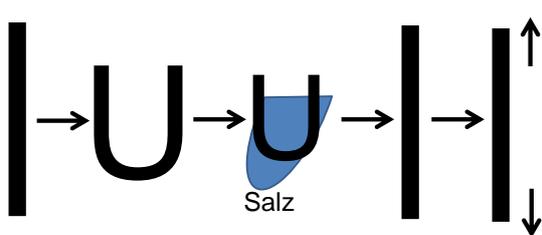


Bild 37: Versuchsanordnung bei gebogenen Proben (180°)

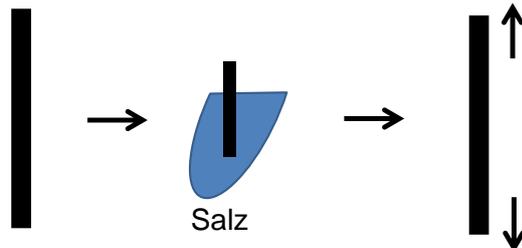


Bild 38: Versuchsanordnung bei geraden Proben (0°)

Rückbiegeversuche

Für den Nachweis einer bei der Verarbeitung ausreichenden Duktilität wurden an der Forschungsstelle 1 Rückbiegeversuche in Anlehnung an DIN EN 15630-1 durchgeführt. Hierzu wurden die gebogenen Proben zunächst 1 Stunde bei 100 °C gealtert. Dabei wurde die für die Aufheizung des jeweiligen Probequerschnitts erforderliche Vorlaufzeit bis zum Erreichen der Temperatur von 100 °C jeweils berücksichtigt. Nach dem Altern wurden die Schlaufen von Hand mittels eines übergeschobenen Rohres, die Winkel maschinell um $\geq 20^\circ$ zurückgebogen. Der Beurteilung wurde das in DIN 488 genannte Kriterium, wonach die Probe nach dem Versuch keinen Bruch oder Risse aufweisen darf, die für eine Person mit normaler oder korrigierter Sehkraft sichtbar sind, zugrunde gelegt.

Nach dem Biegen verbleibenden Eigenschaften

Für die Ermittlung der nach dem Biegen verbleibenden Eigenschaften wurden die Proben zunächst vollständig gerade gebogen und anschließend im Zugversuch nach erneuter Alterung geprüft.

In Abhängigkeit vom Werkstoff, Werkstoffzustand und dem Biegerollendurchmesser wurden ggf. bereits beim Rückbiegen aufgetretene Anrisse durch das Geradebiegen deutlicher sichtbar oder erst hervorgerufen.

Die feuerverzinkten Proben mussten zur Kontrolle, ob in der Zinkschicht vorhandene Risse bis in den Grundwerkstoff reichen, im Bereich der verformten Biegezone nach dem Rückbiegen um 20° nach dem in DIN EN ISO 1460 „Metallische Überzüge- Feuerverzinken auf Eisenwerkstoffen - Gravimetrisches Verfahren zur Bestimmung der flächenbezogenen Masse“ beschriebenen Verfahren entzinkt werden.

Sofern beim Geradebiegen kein Bruch oder erkennbar klaffende Risse auftraten, wurden auch Proben mit Anrissen einer Prüfung im Zugversuch unterzogen. Dabei wurde in Anlehnung an DIN 15630-1 davon ausgegangen, dass ein „oberflächlicher duktiler Riss“ am Grunde der Rippen auftreten darf und nicht als Fehler zu betrachten ist, wenn die Tiefe nicht größer als die Breite des Risses ist.

An der Forschungsstelle 1 wurden diesbezüglich an für den Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen) verzinkten Proben die Rissbildungen im Bereich der Rippenfüße exemplarisch überprüft, in dem die Proben entlang der Längsachse bis zur Probefälfte abgefräst und anschließend unter dem Mikroskop untersucht wurden. Darüber hinaus wurden an der Forschungsstelle 2 exemplarisch an nach Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) verzinkten Proben die Rissbildungen im Bereich der Rippenfüße mittels Computertomographie untersucht. Zusätzlich wurde an einer Probe aus Werkstoff QT 10 die Bruchfläche mikroskopisch untersucht.

Zusammenfassend ergaben die durchgeführten Untersuchungen, dass die Rissbildungen im Bereich der Rippenfüße auch eine größere Tiefe als Breite aufweisen können. Dies führte jedoch bei den Zugversuchen an den vollständig gerade gebogenen Proben nicht zu Brüchen in der Biegezone.

Bei der mikroskopischen Betrachtung des Rissbereichs an der Forschungsstelle 2 wurden in der Risszone Wabenbrüche festgestellt (Bild 39 bis Bild 42), d.h. es ist von einem duktilen Rissverhalten auszugehen.

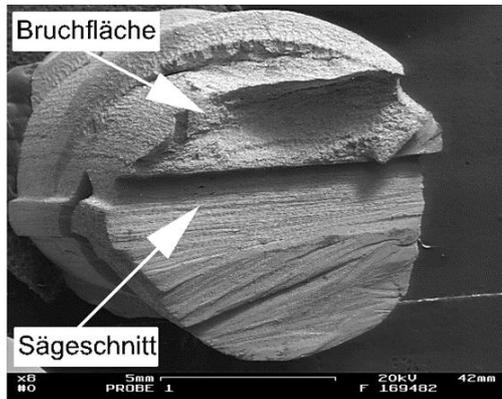


Bild 39: Anriss im Bereich des Rippenfußpunktes, Werkstoff QT 10

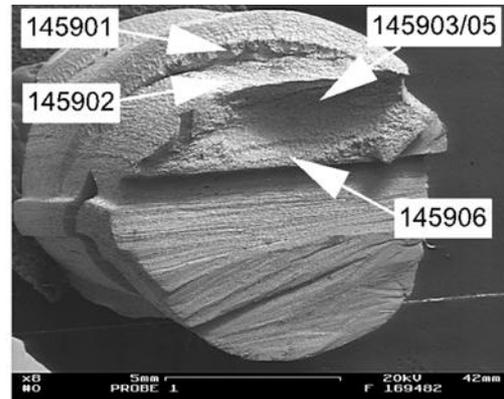


Bild 40: Lage der Untersuchungsstelle

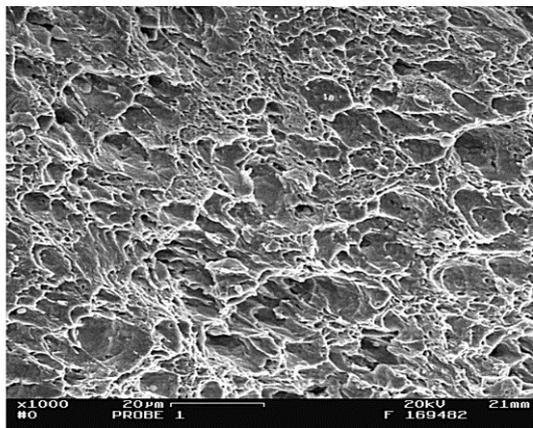


Bild 41: Wabenförmige Bruchfläche (Detailbereich 145901)

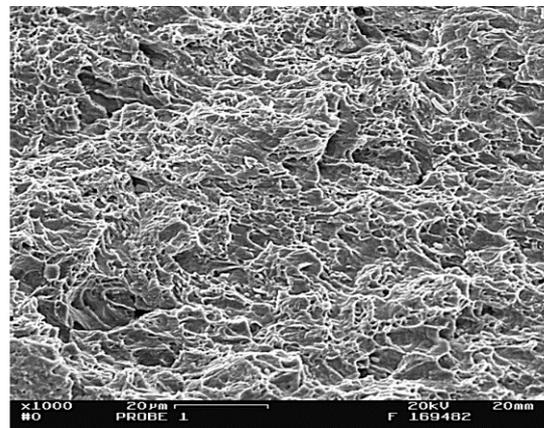


Bild 42: Wabenförmige Bruchfläche (Detailbereich 145902)

Für die Beurteilung der nach dem Biegen verbleibenden Eigenschaften wurden die im Rahmen der Zugversuche ermittelten Kriterien A_{gt} , R_m , Streckgrenzenverhältnis und Bruchlage herangezogen.

Die Versuchsabläufe erfolgten nach dem nachfolgenden Ablaufschema:

1. Biegen
2. Altern
3. Rückbiegen, $\geq 20^\circ$ (Rückbiegeversuch in Anlehnung an DIN 488) und augenscheinliche Untersuchung auf Rissbildungen; bei feuerverzinkten Proben ggf. zunächst Entzinkung der Biegezone mit Ablösemittel entsprechen DIN EN ISO 1460
4. Geradebiegen (Rückbiegen unter Baustellenbedingungen mit Rohrstück) und erneute augenscheinliche Untersuchung auf Rissbildung
5. Altern
6. Zugversuch nach DIN EN ISO 15630, Feststellung verbleibender mechanischer Eigenschaften ($R_{p0,2}$, R_m , A_{gt} im unverformten Bereich und in der Biegezone)

Aufweitversuche in der Zinkschmelze

Die an der Forschungsstelle 2 durchgeführten Aufweitversuche in der Zinkschmelze wurden über das Spannungs-Dehnungsdiagramm (Zugversuch) ausgewertet. [3], [4]. Die Vor- und Nachteile der Versuchsart sind in Bild 43 dargestellt.

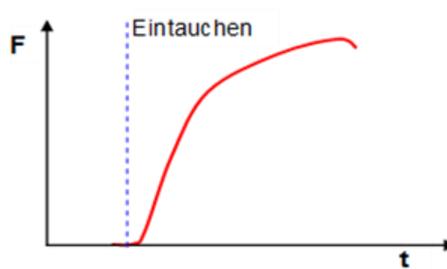
Versuchsart	Kraft-Zeitverlauf	Vorteile	Nachteile
Zugversuch -Konstante Wegzunahme -Instationäre Phase des Verzinkungsprozesses	 <p>Parameter: Traversengeschwindigkeit (0,05mm/sec) Ergebnis: Nennspannung und Aufweitung bei Versagen</p>	-Sehr hohe Belastungen möglich -Gute und schnelle Indikation (Rückgang der Kraft) -Einfache Wegsteuerung	-Keine Trennung der Einflussfaktoren Zeit und Belastung

Bild 43: Merkmale des Zugversuchs

Für eine detailliertere Beschreibung des Zugversuchs siehe [3], [4], [9]. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist im Bild 44 dargestellt.



Bild 44: Versuchsanlage zur Verzinkung

Nach einer Vorbehandlung der Proben (Tabelle 10) wird die Probe außerhalb der Schmelze in die eigens konzipierte Halterung eingespannt und nach dem manuellen Einschwenken der Ver-

such gestartet. Hierbei wird zunächst eine Vorlast von 20N für 30sec angefahren um Spiel in der Probenaufhängung auszugleichen und um Wärmedehnungen abzufangen. Danach startet der eigentliche Versuch in Wegsteuerung (Zugversuch).

Tabelle 10: Prozessreihenfolge bei der Probenvorbereitung

Schritt	Parameter	Bemerkung
1 Entfetten	alkalischer Reiniger „Roth RBS solid PF“ Ultraschallbad, ca. 15 min bei 60°C	nur bei äußerlich verunreinigten Stählen
2 Beizen	12% Salzsäure + 5g/l Fe (als Eisen-III-Chlorid), Inhibitor PM Lutter 10ml/l	ohne Benetzungsmittel, Gebrauch bis ca. 80g/l Fe
3 Spülen	Leitungswasser (fließend)	Zwischentrocknung
4 Fluxen	Ammoniumchlorid-Zinkchlorid (40:60), 450g/l 5 bis 10 min bei Raumtemperatur	Trocknung im Umluftofen, mind. 2,5h bei 80°C

Im Anschluss an die Versuche wurden ausschließlich metallografische Längsschliffe beispielhafter Proben nach der oben beschriebenen Vorgehensweise angefertigt und auf Risse im Grundmaterial hin untersucht.

Zugversuche

Zur Feststellung der nach dem Biegen verbleibenden Eigenschaften wurden an der Forschungsstelle 1 Zugversuche an vollständig rückgebogenen Proben durchgeführt. Die Zugversuche wurden mit einer extern kalibrierten Universalprüfmaschine 600 kN, Klasse 1 nach DIN EN ISO 7500-1 durchgeführt. Die Messung der Probendehnung bis nach Erreichen der Streck-/Dehngrenze erfolgte mit einem Feindehnungsmessgerät Mayer Falkenberg.

Die Messung der Gleichmaßdehnung bei A_{gt} wurde berührungslos mit einem optischen Wegmesssystem WM 304 ECM Datensysteme GmbH durchgeführt. Hierzu wurde beim Einbau der Probe darauf geachtet, dass die Biegezugzone und die Biegedruckzone in Richtung der erfassenden Kameras ausgerichtet waren. Das Messsystem gestattet die Festlegung von Messstrecken auf der Probenoberfläche, deren Verformung separat aufgenommen und ausgewertet werden kann.

An den gebogenen Proben wurde zur Erfassung von A_{gt} im Bereich der Biegezone der Scheitelpunkt markiert. Da bei den Ringmaterialien nach dem Geradebiegen eine Identifizierung der Biegeachse nicht mehr augenscheinlich möglich war, wurde vor dem Geradebiegen die Biegezugseite (Innenseite) zusätzlich markiert (Bild 45).

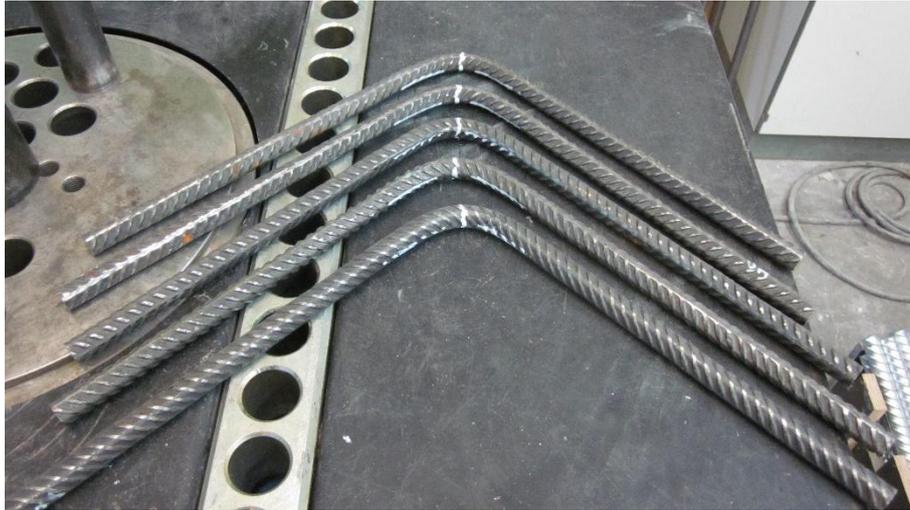


Bild 45: Kennzeichnung der Biegestelle und der Biegezugseite bei den Ringmaterialien vor Beginn des Rückbiegens (bei fvz-Proben nach erfolgter Rückbiegung nach dem Entzinken, vor dem vollständigen Geradebiegen)



Bild 46: Biegezone der gerade gebogenen Proben WR 14

Das vollständige Geradebiegen war insbesondere bei den Stabdurchmessern 14 mm und 16 mm nicht immer so möglich, dass eine vollständig gerade Stabachse vorlag (Bild 46).

Numerische Berechnungen

Mit Hilfe der Software Abaqus® wurden an der Forschungsstelle 2 auf Basis der bei den Axialzugversuchen (mechanisch-technologische Kennwerte) bestimmten Werkstoffgesetze, Berechnungen zum Eigenspannungszustand durchgeführt und mit bestehenden experimentellen Daten abgeglichen. Ziel war es durch numerische Berechnungen, Rückschlüsse auf die nach dem Biegen im Innenradius vorherrschenden Zugspannungen zu schließen. Durch eine Weiterentwicklung des Rechenmodells sollen dann Übertragungen auf andere Stab- und Biegerollendurchmesser möglich sein.

3.2.2 Gefügeuntersuchungen und Härteverläufe

An dem gebogenen Material wurden vergleichende metallografische Untersuchungen zum geraden Stabmaterial durchgeführt. Hinsichtlich des Gefüges wurden dabei keine Unterschiede zwischen „gebogen“ und „nicht-gebogen“ festgestellt. Auch hier liegt bei den Werkstoffen KR 10 mm und WR 14 mm über den gesamten Querschnitt jeweils ein ferritisch-perlitisches Gefüge vor, während bei

den QT Werkstoffen jeweils im Außenbereich ein Vergütungsgefüge vorliegt und im Kern ein ferritisch-perlititisches Gefüge. Die Härtetiefenverläufe entsprechen den Erwartungen. Insgesamt sind die Härten im Außenbereich bedingt durch das Biegen, etwas höher als im nicht-gebogenen Bereich (vergleiche die Maximalwerte in Bild 47 und Bild 48 (normierte Darstellung) zu Bild 13 und Bild 14.

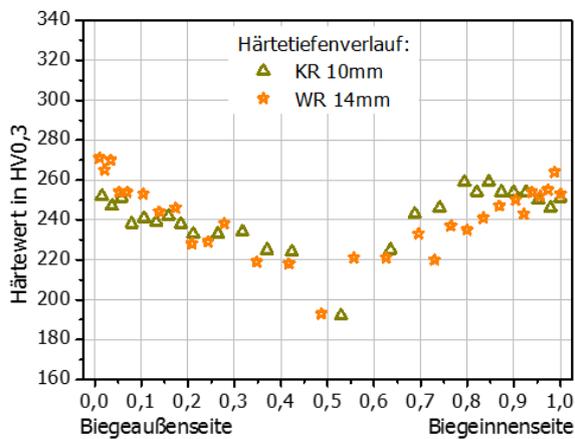


Bild 47: KR/WR Werkstoffe, Härtetiefenverlauf im gebogenen Bereich

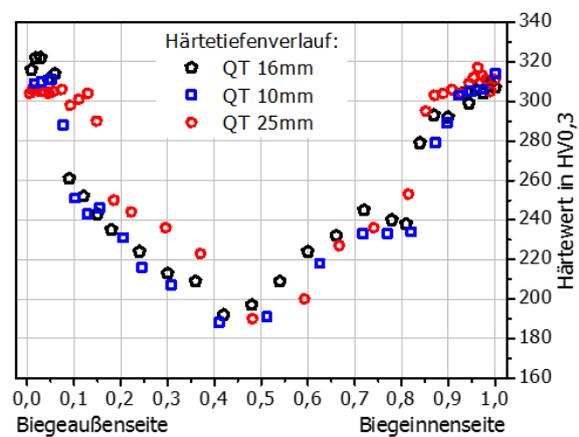


Bild 48: QT Werkstoffe, Härtetiefenverlauf im gebogenen Bereich

Ergänzend wurden an der Forschungsstelle 1 Härtemessungen an verzinkten und unverzinkten Proben aus Werkstoff QT 16 durchgeführt. Dabei wurden die Härteverläufe (Vickershärte HV 10) an bei Raumtemperatur und -20 °C mit den Biegerollendurchmessern 60 mm und 135 mm gebogenen Proben bestimmt.

Die Versuche ergaben eine Zunahme der Härte sowohl in den gehärteten Randbereichen als auch in Probenmitte in Abhängigkeit vom gewählten Biegerollendurchmesser. Ein Einfluss der Verzinkung oder der Biegetemperatur konnte mit dem gewählten Messverfahren nicht festgestellt werden.

3.2.3 Alterungsbeständigkeit

Mit Hilfe der Auslagerungsversuche sollte geklärt werden, inwieweit sich durch die Temperatureinwirkung (450 °C) in Verbindung mit der Verzinkungsdauer (rund 15min) und durch die Plastifizierung beim Biegen, Alterungseffekte einstellen, die zu einer späteren Versprödung des Werkstoffs führen.

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der axialen Zugversuche im Vergleich mit den Herstellerangaben (Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung aus jeweils drei bis fünf Einzelversuchen).

Die Werksangaben wurden im Wesentlichen bestätigt. Lediglich beim Werkstoff QT 10 ergeben sich Differenzen um rund 60 MPa (R_{eH}) und rund 35 MPa (R_m) zwischen den Werksangaben und den an der Forschungsstelle 2 ermittelten Werten. Die Norm 488-1:2009 wird in allen Fällen erfüllt.

Tabelle 11: Ergebnisse der an den Forschungsstellen 1 und 2 durchgeführten Axialzugversuche im Vergleich zu den Werksangaben

Werkstoffbezeichnung	KR	WR	QT		
Stabdurchmesser in mm	10	14	10	16	25
R_{eH} in MPa nach Werksangaben	556 *	536 ± 3	587 ± 3	556 ± 4	576 ± 3
R_{eH} in MPa nach MPA Darmstadt	564 ± 5	537 ± 2	528 ± 3	570 ± 1	580 ± 1
R_{eH} in MPa nach TU K'Lautern	568 ± 4	536 ± 2	--	563 ± 1	--
R_m in MPa nach Werksangaben	607 *	617 ± 4	672 ± 4	668 ± 4	681 ± 2
R_m in MPa nach MPA Darmstadt	612 ± 7	622 ± 3	635 ± 4	681 ± 1	681 ± 1
R_m in MPa nach TU K'Lautern	614 ± 4	615 ± 2	--	672 ± 1	--

* Es liegen jeweils lediglich zwei Einzelwerte vor, weswegen auf die Berechnung der Standardabweichung verzichtet wurde.

Die Ergebnisse der Auslagerungsversuche in einer Salzsäure (Mittelwerte der im Axialzugversuch ermittelten Einzelergebnisse; jeweils 3 Proben) sind zusammen mit der Standardabweichung den Angaben ohne Auslagerung vergleichend in der Tabelle 12 gegenübergestellt.

Tabelle 12: Ergebnisse der Alterungsversuche in einer Salzsäure

Werkstoff	Biege- winkel	Rollen- durchmesser	R _{eH} in MPa ¹		R _{eH} in MPa ²	R _m in MPa ¹	R _m in MPa ²
			Randbereich	Biegestelle			
KR 10 mm	180°	50 mm	545 ³	559 ³	564 ± 5	604 ± 4	612 ± 7
WR 14 mm	180°	70 mm	527 ± 1	570 ± 7	537 ± 2	629 ± 1	622 ± 3
QT 10 mm	180°	50 mm	576 ³	625 ³	528 ± 3	664 ± 3	635 ± 4
QT 16 mm	180°	85 mm	625 ± 1	647 ± 4	570 ± 1	723 ± 2	681 ± 1
KR 10 mm	0°	--	--	542 ± 4	564 ± 5	608 ± 2	612 ± 7
WR 14 mm	0°	--	--	526 ± 3	537 ± 2	630 ± 1	622 ± 3
QT 10 mm	0°	--	--	548 ± 2	528 ± 3	647 ± 2	635 ± 4

¹ Ergebnisse mit Auslagerung in der Salzsäure

² Ergebnisse ohne Auslagerung in der Salzsäure (siehe Tabelle 3 nach MPA Darmstadt)

³ Hier lag jeweils nur ein brauchbarer Wert vor

Vergleich gebogene Proben: Mit Auslagerung in einer Salzsäure – Ohne Auslagerung

Signifikante Unterschiede in der Zugfestigkeit R_m und der Streckgrenze R_{eH} sind beim Werkstoff KR 10 mm gegenüber dem Ergebnis der ausgelagerten Proben nicht zu erkennen. Die Werte sind nahezu identisch. Analog ist beim Werkstoff WR 14 mm nahezu kein Einfluss einer Auslagerung der Proben auf das Ergebnis zu erkennen. Im Bereich der Biegestelle ist eine leichte Erhöhung der Streckgrenze gegenüber den Werten der nicht-ausgelagerten Proben ersichtlich.

Bei den ausgelagerten Proben des Werkstoffs QT 10 mm zeigt die Streckgrenze -vor allem im Bereich der Biegestelle- eine deutliche Überhöhung. Die Zugfestigkeit ist in Betrachtung zu den Vergleichswerten (nicht ausgelagert) leicht erhöht. Für den Werkstoff QT 16 mm ergibt sich für die Streckgrenzen im Rand- und Biegebereich und die Zugfestigkeit gegenüber den nicht-ausgelagerten Proben, durchgängig eine Überhöhung der Werte, was auf Alterungseffekte hindeutet.

Vergleich gerade Proben: Mit Auslagerung in einer Salzsäure – Ohne Auslagerung

Beim Werkstoff KR 10 mm sind hinsichtlich der Zugfestigkeit R_m und der Streckgrenze R_{eH} keine Unterschiede gegenüber dem Ergebnis der ausgelagerten Proben zu erkennen. Die Werte sind nahezu identisch. Analog verhalten sich die Werkstoffe WR 14 mm und QT 10 mm. In der Streckgrenze und der Zugfestigkeit sind hier jeweils keine Unterschiede zu den Ergebnissen der ausgelagerten Proben ersichtlich.

Zusammenfassend zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass lediglich die gebogenen Proben des Werkstoff QT 16 mm leichte Alterungseinflüsse aufweisen. Im Vergleich zu den nicht-ausgelagerten Proben weist das Streckgrenzenverhältnis R_{eH}/R_m bei den ausgelagerten Proben hier einen höheren Wert auf (ausgelagert: 0,89; nicht-ausgelagert: 0,84). Alle anderen Werkstoffe zeigen keine Alterungseinflüsse.

3.2.4 Eigenspannungsmessungen

Die verschiedenen Werkstoffe (schwarzes Material) wurden um je 90° nach Norm gebogen und der Länge nach aufgetrennt, sodass die Messung in der Stabmitte erfolgen konnte. Anschließend wurde der Messbereich lokal elektrolytisch um rund 100 µm abgetragen, um durch das Trennen resultie-

rende Einflüsse auf den Eigenspannungszustand zu vermeiden (Bild 49). Ausgehend von der Biegeinnenseite wurden die Eigenspannungen über den Querschnitt im Abstand von 1 mm hin zur Biegeaußenseite bestimmt.

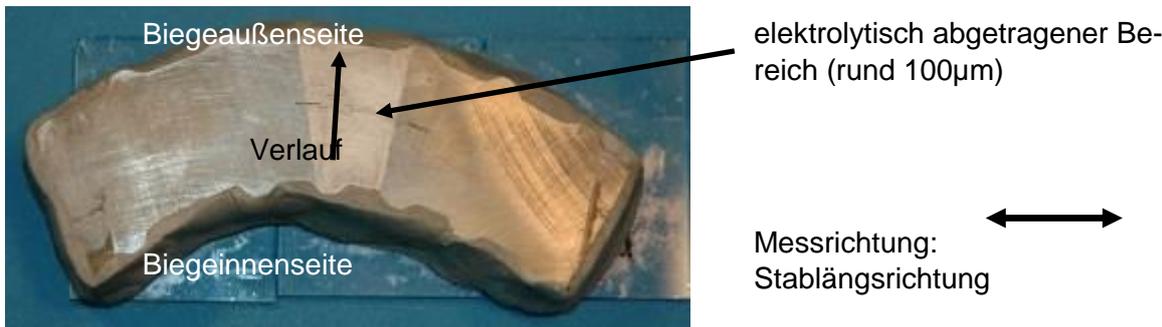


Bild 49: Eigenspannungsmessungen an um 90° gebogenen Proben, beispielhaft dargestellt für den Werkstoff QT 25 mm

Bild 50 zeigt die Ergebnisse in der Übersicht. Die x-Achse ist hier zwecks einer besseren Vergleichbarkeit auf die verschiedenen Durchmesser normiert dargestellt. Der Verlauf deckt sich mit den Erwartungen. Im Biegeinnenbereich liegen bei allen Werkstoffen Zugspannungen im Bereich von 200 MPa bis 300 MPa vor und im Biegeaußenbereich Druckspannungen in einer vergleichbaren Größenordnung. Im Bereich der Nulldurchgänge sind jeweils zum Teil stark ausgeprägte lokale Spannungsmaxima ersichtlich.

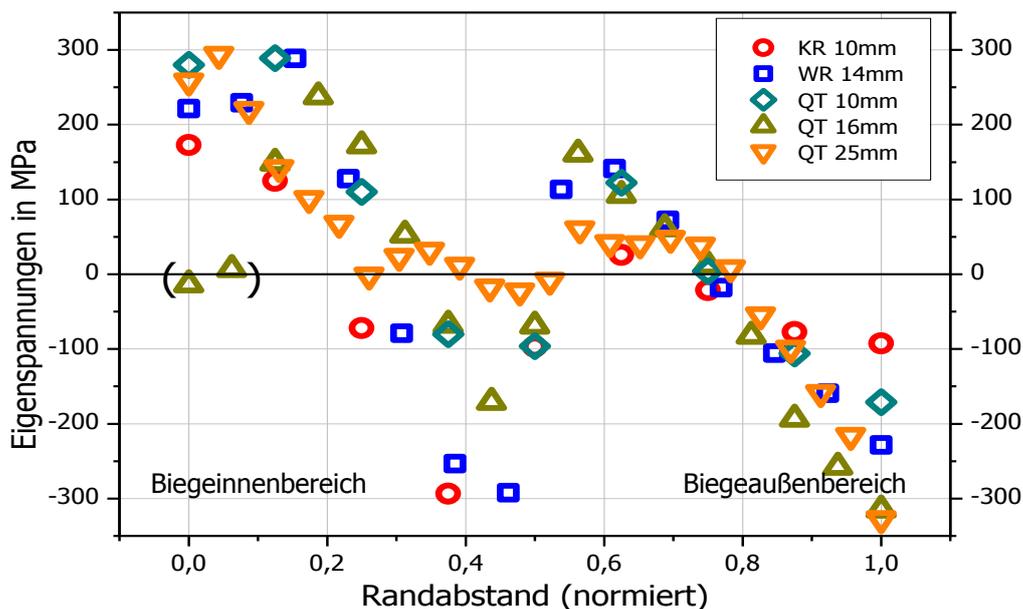


Bild 50: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen an unverzinkten Proben

Lediglich der Tempcore Werkstoff QT 25 mm zeigt im Bereich von rund 0,3 bis 0,8 Randabstand, schwach ausgeprägte Maxima um null herum oszillierend. Eine Erklärung hierfür liegt in den bei dem Werkstoff vorzufindenden Fehlstellen im Inneren. Dadurch können Spannungsspitzen lokal verlagert und abgeschwächt werden. Die beiden ersten Werte des Profils QT 16 mm sind auf Randeffekte zurückzuführen, zum Beispiel aufgrund einer Messung auf oder an einer Rippe.

Unter Berücksichtigung der Kerbwirkung der durch Kaltverformung eingebrachten Rippen, könnten die Spannungen am Rippenfuß lokal noch deutlich höher ausfallen. Hinsichtlich einer flüssigmetallinduzierten Rissbildung ist für den Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) dort eine Rissbildung am wahrscheinlichsten.

Analog zu der beschriebenen Vorgehensweise wurden an um 180° gebogenen und nach den Verfahrenswegen A und B hergestellten Proben im Vergleich zu unverzinkten Proben Eigenspannungsmessungen durchgeführt. Verwendet wurden jeweils drei Proben der Werkstoffe WR 14 mm und QT 16 mm, gebogen mit 50 mm Rollendurchmesser (WR 14 mm) und 60 mm Rollendurchmesser (QT 16 mm).

Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen sind in Bild 51 und Bild 52 gezeigt. Dargestellt ist jeweils die Mediankurve. Die Messmethodik ist identisch zu der zuvor beschriebenen. Der grundsätzliche Verlauf entspricht den Erwartungen. Auch hier liegen auf der Biegeinnenseite Zug- und auf der Biegeaußenseite Druckspannungen vor. Die Reduktion der Spannungmaxima bei den im Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) hergestellten Proben ist im Vergleich zu den unverzinkten und im Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) hergestellten deutlich ausgeprägt. Der Abbau der Eigenspannungen ist auf das Feuerverzinken zurückzuführen und wurde bereits in [9] belegt. Die Eigenspannungen reduzieren sich beim Werkstoff QT 16 mm um rund 100 MPa (rund 33%), beim Werkstoff WR 14 mm um rund 200 MPa (rund 45%). Die ersten Messpunkte im linken Teildiagramm sind nicht aussagekräftig. Hier wurde direkt auf einer Rippe gemessen weswegen die Werte zu vernachlässigen sind.

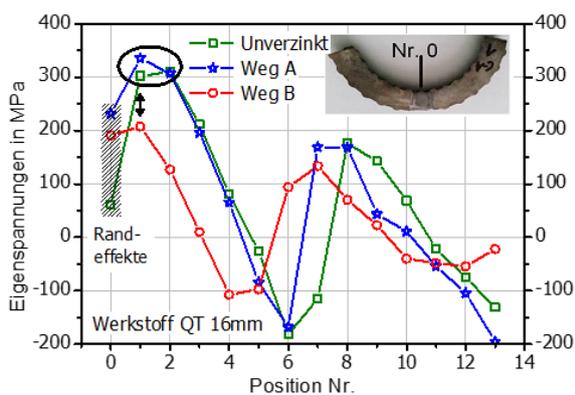


Bild 51: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen an den Werkstoffen QT 16 mm

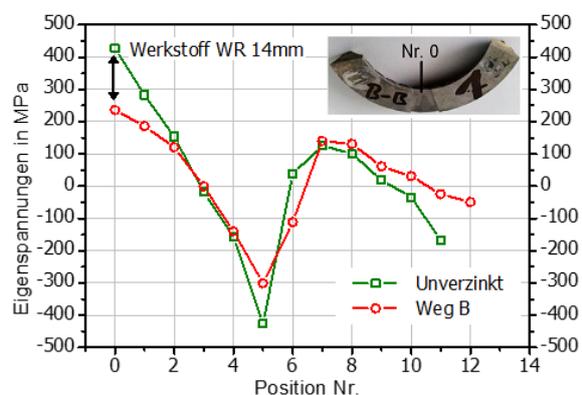


Bild 52: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen an den Werkstoffen WR 14 mm

3.2.5 Biegerollendurchmesser nach DIN EN 1992-1-1/NA D (EC2/NA D)

Nach den Vorgaben der DIN 1991-1-1/NA müssen die Biegerollendurchmesser für die Herstellung von Haken, Winkelhaken, Schlaufen und Bügeln bei Stabdurchmessern ≤ 16 mm mindestens $4 \times d_{St}$ und bei Stabdurchmessern ≥ 20 mm mindestens $7 \times d_{St}$ betragen.

Der Nachweis einer ausreichenden Biegefähigkeit erfolgt für Stabstähle nach DIN 488-2 mittels Rückbiegeversuch mit einem Biegerollendurchmesser von $5 \times d_{St}$ für Stabdurchmesser $d_{St} \leq 16$ mm bzw. von $8 \times d_{St}$ für Stabdurchmesser $16 \text{ mm} < d_{St} \leq 28$ mm und für Ringmaterial nach DIN 488-3 mit einem Biegerollendurchmesser von $5 \times d_{St}$ für Stabdurchmesser $d_{St} \leq 16$ mm.

Um abzuschätzen, ob bezüglich der vorgegebenen Biegerollendurchmesser noch Reserven im Werkstoff vorhanden sind, wurden auch Biegeversuche mit geringeren Biegerollendurchmessern durchge-

führt. Als Kriterium für ein positives Ergebnis wurde die in DIN 488 für die Prüfung im Rückbiegeversuch aufgeführte Bedingung, wonach die Probe nach dem Rückbiegen um $\geq 20^\circ$ keinen Bruch oder Risse aufweisen darf, die für eine Person mit normaler oder korrigierter Sehkraft sichtbar sind, zugrunde gelegt. Da die verzinkten Proben bei allen Versuchen Anrisse in der Zinkschicht aufwiesen, wurden sie zur Prüfung, ob diese bis in den Grundwerkstoff reichen, im Bereich der Biegezone mit dem in DIN EN ISO 1460 beschriebenen Verfahren entzinkt und anschließend einer Sichtprüfung unterzogen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind für die unverzinkten und die nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) verzinkten Werkstoffe in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Zulässige Biegerollendurchmesser

	unverzinkt		verzinkt	
	RB	GB	RB	GB
QT 10	3 * d _{St}	3 * d _{St}	4 * d _{St}	4 * d _{St}
	(30 mm)	(30 mm)	(40 mm)	(40 mm)
KR 10	4 * d _{St}			
	(40 mm)	(40 mm)	(40 mm)	(40 mm)
WR 14	3 * d _{St}	4 * d _{St}	3 * d _{St}	4 * d _{St}
	(40 mm)	(60 mm)	(40 mm)	(60 mm)
QT 16	4 * d _{St}	5 * d _{St}	4 * d _{St}	5 * d _{St}
	(60 mm)	(85 mm)	(60 mm)	(85 mm)

RB = Rückbiegen ($\geq 20^\circ$)

GB = Geradebiegen

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem Mindestbiegerollendurchmesser von $4 \times d_{St}$ das Auftreten von Rissen auf der Oberfläche beim Rückbiegen um 20° verhindert wird. Bei den Werkstoffen QT 10 und WR 14 wäre im unverzinkten Zustand diesbezüglich sogar noch eine Abminderung um eine Stufe möglich.

Versuchsreihen mit dem Werkstoff QT 25 zeigten, dass ein Biegen bei Raumtemperatur und -20°C mit einem Biegerollendurchmesser von 135 mm möglich ist, ohne dass Rissbildungen beim Rückbiegen um 20° auftreten. Weitere Tastversuche zeigten, dass dies auch bei Biegerollendurchmessern von 85 mm und 100 mm möglich ist. Da diese Stabdurchmesser bei der Verarbeitung mit einem Mindestbiegerollendurchmesser von $7 \times d_{St}$ gebogen werden müssen, liegt hier eine große Reserve vor.

3.2.6 Biegeparameter für Untersuchungen im Arbeitspaket 3 Fertigungstechnik

Für die im Rahmen des Forschungsprojekts bedeutsamen Biegeparameter Biegewinkel, Biegerollendurchmesser, Biegetemperatur, Biegegeschwindigkeit und Rippenorientierung wurden mit den Werkstoffen QT 10 und KR 10 Versuche durchgeführt, bei denen die genannten Einflussgrößen auf mehreren Stufen variiert wurden.

Aus den durchgeführten Untersuchungen waren eindeutige Abhängigkeiten nicht ablesbar. Lediglich die mit QT 10 durchgeführten Versuche ließen Tendenzen im Hinblick auf einen Einfluss des Biegewinkels und der Biegetemperatur auf die in der rückgebogenen Biegezone verbleibende Restduktilität erkennen. Bild 53 und Bild 54 zeigen exemplarisch die beschriebene Abhängigkeit. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte aus ≥ 3 Proben und als Fehlerindikator die empirische Standardabweichung.

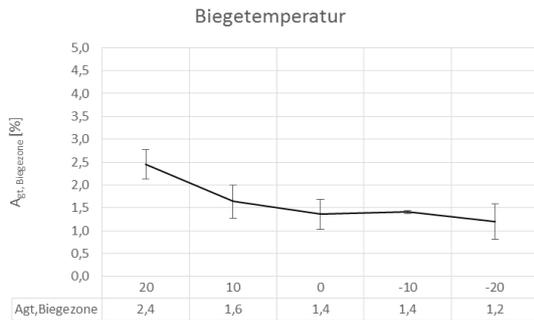


Bild 53: Einfluss der Biegetemperatur auf die in der Biegezone verbleibende Duktilität

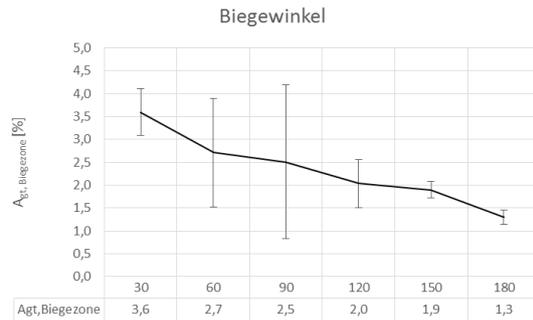


Bild 54: Einfluss des Biegewinkels auf die in der Biegezone verbleibende Duktilität

Eindeutig ließ sich jedoch feststellen, dass keine der untersuchten Proben mittig im Bereich der Biegezone gebrochen war, und alle Proben im Hinblick auf die Streck-/Dehngrenze, die Zugfestigkeit und A_{gt} die Anforderungen der DIN 488 erfüllten. Die A_{gt} -Messungen im Bereich der Biegezone belegen, dass auch in diesen stark beanspruchten Zonen noch eine Restduktilität vorhanden ist.

Eine vollständige Darstellung der Ergebnisse befindet sich in Anlage 1.

Für die weiteren Versuche im Hinblick auf das Biegen bei tiefen Temperaturen wurden folgende Parameter ausgewählt:

Biegewinkel: 90 °
 Biegegeschwindigkeit: 10 U/min, 20 U/min
 Biegetemperaturen: Raumtemperatur, -5°C und -20 °C (unverzinkte Proben)
 Raumtemperatur und -20 °C (verzinkte Proben)
 Biegerollendurchmesser: kleinstmöglich, entsprechend $4 \times d_{St}$ und bei unzureichenden Ergebnissen eine Stufe größer

Für die Versuche im Rahmen des Verfahrenswegs B (Biegen - Verzinken) wurden folgende Parameter ausgewählt:

Biegewinkel: 90 ° und 180 °
 Biegegeschwindigkeit: 10 U/min
 Biegetemperaturen: Raumtemperatur
 Biegerollendurchmesser: $4 \times d_{St}$, $6 \times d_{St}$ und $8 \times d_{St}$

Die Biegerollendurchmesser wurden in diesem Fall an den Vorgaben der amerikanischen ASTM 767 [5] ausgerichtet, die für das Biegen vor dem Verzinken für Stäbe bis 19 mm Stabdurchmesser einen Mindestbiegerollendurchmesser von $6 \times d_{St}$ vorgibt.

3.2.7 Biegeparameter für Untersuchungen im Arbeitspaket 4 Werkstofftechnik

Aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen wurden für die Versuche im Rahmen des Verfahrenswegs B (Biegen – Verzinken) die Werkstoffe KR 10 mm und QT 10 mm als die Werkstoffe, die hinsichtlich einer flüssigmetallinduzierten Spannungsrissskorrosion am empfindlichsten reagieren, verwendet. Neben der hohen Härte im Randbereich des Werkstoffs QT stellen Randartefakte wie Riefen, Überwalzungen und Ungängen weitere Gefährdungspotenziale dar.

Für die Untersuchungen wurden bei verschiedenen Temperaturen (-20 °C, -10 °C, 0 °C und Raumtemperatur (RT)) und mit verschiedenen Rollendurchmessern (30 mm, 40 mm und 50 mm) gebogene Betonstahlproben der Werkstoffe KR 10 mm und QT 10 mm an der Forschungsstelle 1 hergestellt. Die Biegegeschwindigkeit wurde auf $v_B = 10$ U/min eingestellt.

Mit diesen Proben wurden Zugversuche (Traversengeschwindigkeit 0,05 mm/sec) in einer Zinkschmelze der Klasse 1 (nach DASt Richtlinie 022) bei 450°C durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise findet sich in [3], [4] und [9].

Durch die gewählte Versuchsvariante (Zugversuche) werden über die Eigenspannungen und die beim Verzinken entstehenden thermischen Spannungen hinaus gehende zusätzliche Beanspruchungen erzeugt, durch die eine LMAC Schädigung provoziert und Unterschiede hinsichtlich des Einflusses der Biegetemperatur und des Biegerollendurchmessers identifiziert werden können. Bild 55 zeigt die Einzelergebnisse mit bis zu drei Proben pro Serie.

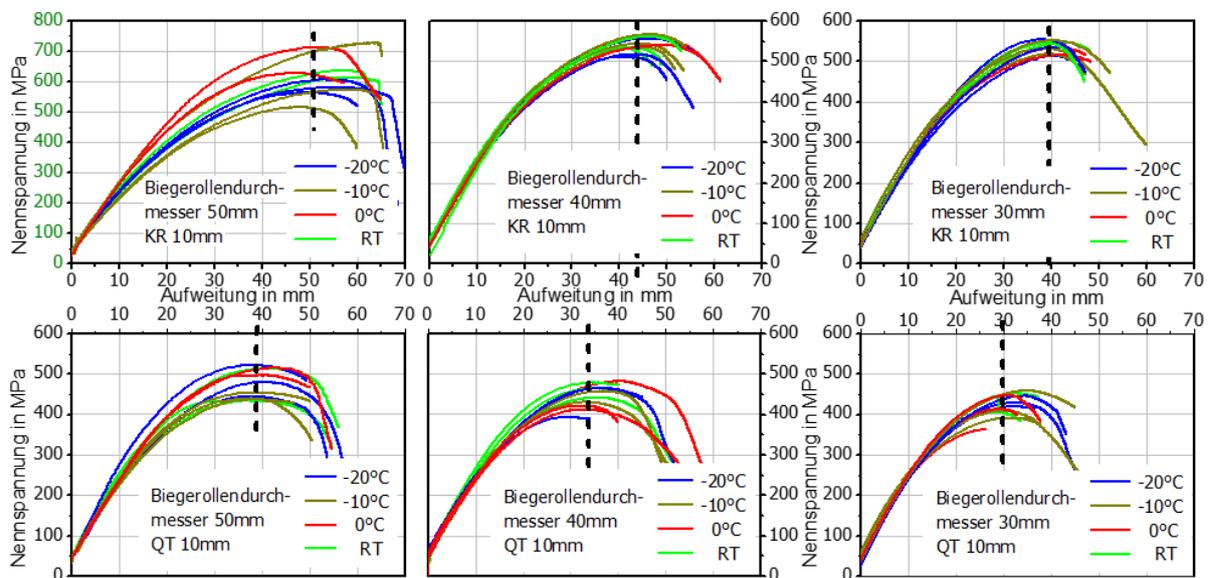


Bild 55: Ergebnisse der Versuche: Oben: KR 10 mm; unten: QT 10 mm; von links nach rechts, Rollendurchmesser (50-40-30) mm, grün RT, rot 0°C, gelb -10°C, blau -20°C

Zu beachten ist die im linken oberen Teilbild von den anderen Diagrammen abweichende Skalierung auf der y-Achse. Die bei den verschiedenen Biegetemperaturen gebogenen Proben zeigen bei der gewählten Versuchsführung untereinander keinen systematischen Zusammenhang hinsichtlich den erzielbaren Aufweitungen bzw. maximalen Nennspannungen. Hinsichtlich der Biegerollendurchmesser lässt sich ableiten, dass die maximal ertragbaren Spannungen mit kleiner werdendem Durchmesser sinken und sich gleichzeitig die Spannungsmaxima hin zu kleineren Aufweitungen verschieben. Der Werkstoff QT 10 mm erträgt im Vergleich zum KR 10 mm generell weniger Aufweitung (im Spannungsmaximum) und weniger Nennspannung.

Insgesamt wird deutlich, dass die Biegetemperatur keinen, der Biegerollendurchmesser durchaus einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Darüber hinaus wird ein Werkstoffeinfluss deutlich. Der Werkstoff QT 10 mm ist aufgrund der höheren Härte im Randbereich hinsichtlich einer LMAC Schädigung offensichtlich anfälliger. Daher wurde für die nachfolgenden Versuche im Arbeitspaket 4 ausschließlich der Werkstoff QT 10 mm verwendet und bei Raumtemperatur gebogen.

3.2.8 Numerische Berechnungen

Die zur numerischen Berechnung erforderlichen Werkstoffgesetze wurden über die wahre Dehnungskurve ermittelt. Für die bei der Forschungsstelle 1 verwendete Biegemaschine (Bild 56) wurden die Biege- und Umlenkrolle, sowie der Gegenhalter in einem 3D FE Modell nachgebildet (Bild 57). Relevant ist die exakte Position der Umlenkrolle, die je nach Stabdurchmesser und Rollendurchmesser variiert wird.

Nach dem Abgleich der Randbedingungen (Biegung und Rückfederung durch die Entlastung bei der realen Biegung), können dann mit Hilfe eines lokalen Koordinatensystems, wie im Bild 58 gezeigt, die maximalen Spannungen auf der Biegeinnenseite in Stablängsrichtung berechnet und ausgelesen werden.

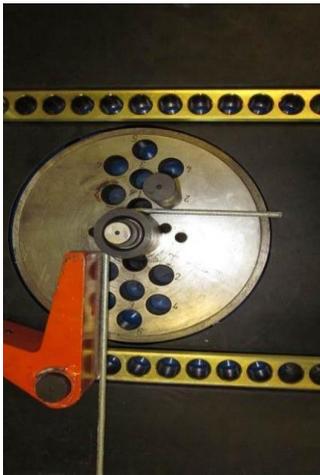


Bild 56: Biegemaschine

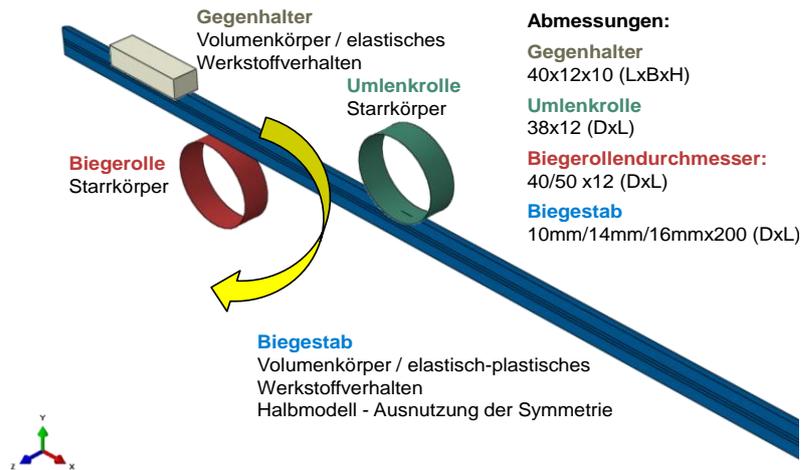


Bild 57: 3D FE Modell

Bild 58: Bestimmung der Spannung σ_{x1} (S11) in Stablängsrichtung Tabelle 14 zeigt beispielhafte, bei verschiedenen Stab- und Rollendurchmessern berechnete Eigenspannungen an der Oberfläche in Stablängsrichtung. Die Werte in den Klammern beziehen sich auf die experimentellen Daten aus Bild 28. Dabei ist zu beachten, dass die experimentelle Messung mit einer 1mm Blende (\sim Brennfleckdurchmesser) aufgenommen wurde und dadurch Spannungen über die Fläche betrachtet, gemittelt werden. Die Berechnungen wiederum beziehen sich auf die äußerste Faser an der Oberfläche und liegen damit höher.

Tabelle 14: Berechnete Spannungen in Drahtlängsrichtung an der Oberfläche

Stabdurchmesser	Rollendurchmesser		
	40mm	50mm	60mm
10mm	459 MPa	434 MPa	---
14mm	524 MPa	486 (420) MPa	---
16mm	---	484 MPa	461 (305) MPa

Mit Hilfe der beschriebenen Berechnungen ist eine Spannungsbestimmung bei beliebigen Stabdurchmesser und verschiedenen Rollendurchmessern möglich. Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis über die in Abhängigkeit vom Stabdurchmesser gesetzte Positionierung der Gegenrolle.

3.3 Fertigungstechnik – Anwendungsparameter (Arbeitspaket 3)

Betonstabstähle werden bei der Verarbeitung zu Bewehrungselementen in einer Vielzahl von Fällen planmäßig gebogen, z. B. für die Herstellung von Haken, Winkelhaken und Schlaufen für die Verankerung oder von Bügeln und Aufbiegungen (Schrägstäbe) für die Schubbewehrung. Betonstahlmatten (Lagermatten) werden zur Beschleunigung des Bauablaufs zunehmend zu sogenannten Mattenkörben gebogen. Ringmaterial muss vor der Weiterverarbeitung zu Bewehrungselementen zunächst gerichtet werden.

Darüber hinaus kann es unter baupraktischen Erfordernissen auch erforderlich sein, Bewehrungsstäbe aus Gründen der Zugänglichkeit und des Bauablaufs planmäßig gebogen einzubauen und im eingebauten Zustand wieder zurückzubiegen. Ein mehrmaliges Hin- und Zurückbiegen an derselben Stelle ist nach gültigem Regelwerk unzulässig.

Biegen zählt im Rahmen der Fertigungstechnik zu den Umformverfahren. Die wesentlichen Verfahrensparameter sind nach [10]

- die Umformtemperatur,
- die Verformungsgeschwindigkeit,
- der Spannungszustand und
- der Umformgrad.

Dabei wird das Formänderungsvermögen, d. h. der maximal bis zum Eintreten des Bruchs oder instabiler Verformungsverhältnisse mögliche Verformungsgrad/Umformgrad, von der Umformtemperatur, der Verformungsgeschwindigkeit und dem Spannungszustand in der Umformzone beeinflusst.

Allgemein führen eine hohe Umformtemperatur, eine sinkende Verformungsgeschwindigkeit und ein hoher Anteil an mehrachsialen Druckspannungen in der Umformzone zu einer Verbesserung des Formänderungsvermögens (höherer Umformgrad).

Da die Umformbarkeit vom Spannungszustand abhängig ist, muss das Formänderungsvermögen eines Werkstoffs für das jeweilige Umformverfahren experimentell ermittelt werden.

Unter praktischen Bedingungen hängt das plastische Verformungsverhalten metallischer Werkstoffe von der chemischen Zusammensetzung (Legierungselemente), der jeweiligen Gitterstruktur (krz, kfz, hdp) und der Gefügeausbildung (Korngrößen, Phasen, Verzerrung) sowie von Inhomogenitäten und Verunreinigungen ab.

Betonstähle sind unlegierte Qualitätsstähle mit kubisch-raumzentrierter Gitterstruktur (krz) und einem Kohlenstoffgehalt $< 0,25 \text{ M.-%}$, der eine ausreichende Duktilität bei der Verarbeitung sowie die Schweißbarkeit sicherstellt.

Die für die Tragfähigkeit erforderliche ausreichende Festigkeit wird wegen des niedrigen Kohlenstoffgehaltes in Abhängigkeit vom jeweiligen Herstellverfahren über unterschiedliche Härtungsmechanismen (Ausscheidungshärtung, Umwandlungshärtung, Kalthärtung) erzielt, die zu unterschiedlichen Gefügeausbildungen führen und die Duktilität des Betonstahls wesentlich bestimmen.

Auf der Makroebene wird die Duktilität durch die Oberflächengestalt beeinflusst, da eine Rippung oder Profilierung als Unstetigkeitsstelle Kerbspannungen hervorruft, die lokal zu mehrachsialen Spannungszuständen führen und sprödes Materialverhalten begünstigen können. Im gleichen Sinne wirken auch Oberflächenfehler und -schäden wie Kerben und Anrisse.

Obwohl Stahl ein vergleichsweise duktiler Werkstoff ist, dessen Bruchdehnung um zwei Größenordnungen (10er-Potenzen) über der des Betons liegt, sind die Biegeradien in Abhängigkeit vom Stabdurchmesser und der Betondeckung des Stahlbetonbauteils im aktuellen Regelwerk begrenzt, um zum einen ein Anreißen des Stahls beim Biegen und zum anderen eine Schädigung des Betons durch im Bereich der Biegestelle hervorgerufene Umlenkkräfte auszuschließen.

Wegen der beim Schweißen im Bereich der Schweißzone ablaufenden Gefügeveränderungen sind die Biegerollendurchmesser für nach dem Schweißen gebogene Bewehrung ebenfalls begrenzt.

Das geltende deutsche Regelwerk für das Biegen von Betonstahl lässt ein regelkonformes Biegen bei Temperaturen unter -5 °C nicht zu.

Mit Blick auf den europäischen und den Weltmarkt haben die Hersteller und die Verarbeiter von Betonstahl - Biegebetriebe und Anwender - ein großes Interesse an einem Nachweis der Zulässigkeit niedrigerer Verarbeitungstemperaturen bis zu einem unteren Grenzwert von -20 °C .

Darüber hinaus lassen die für das Biegen geschweißter Bewehrung im geltenden Regelwerk vorgegebenen Biegerollendurchmesser eine Verwendung geschweißter Lagermatten für die Herstellung von Mattenkörben in vielen Fällen nicht zu.

Im Hinblick auf eine Beschleunigung der Bauabläufe und die damit verbundenen wirtschaftlichen Vorteile besteht seitens der Verarbeiter großes Interesse an einem Nachweis der Zulässigkeit geringerer Biegerollendurchmesser bei der Herstellung von Mattenkörben.

Die zuvor beschriebenen Zusammenhänge gelten grundsätzlich auch für verzinkte Betonstähle, die gegenwärtig über eine bauaufsichtliche Zulassung geregelt sind.

Die bisherige, durch eine bauaufsichtliche Zulassung abgedeckte Verfahrensweise, feuerverzinkten Betonstahl erst nach dem Feuerverzinken weiterzubearbeiten, führt in der Praxis dazu, dass Schnittkanten und ggf. beim Biegen auftretende Beschädigungen der Zinkschicht nachträglich durch Auftragen einer zinkhaltigen Beschichtung ausgebessert werden müssen. Dies führt zu unwirtschaftlichen Verhältnissen, die eine Anwendung des Korrosionsschutzes durch Feuerverzinken deutlich erschwert bzw. verhindert, so dass seitens der Feuerverzinkungsindustrie großes Interesse an einem Nachweis der Zulässigkeit des Verzinkens nach dem Biegevorgang besteht.

3.3.1 Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen)

3.3.1.1 *Beschädigungen der Zinkschicht in Abhängigkeit von den gewählten Material- und Biegeparametern und der Zinkschichtdicke*

Beschädigungen der Zinkschicht in Form von Rissbildungen bis hin zu Abplatzungen traten bei Biegerollendurchmessern bis 200 mm (entsprechend $d_{br} = 14 \times d_{St}$ bei Stabdurchmesser 14 mm und $d_{br} = 12 \times d_{St}$ bei Stabdurchmesser 16 mm) auf, beispielhaft dargestellt in Bild 59.



Bild 59: KR 10 Beschädigungen der Zinkschicht in Abhängigkeit vom Biegerollendurchmesser auf der Biegezugseite außen (links) und der Biegedruckseite innen (rechts)

Die Schäden erstrecken sich dabei über die gesamte Biegelänge, wobei die Intensität mit abnehmendem Biegerollendurchmesser zunimmt.

Wie die Untersuchungen zum Biegeverhalten bei tiefen Temperaturen zeigten, wird die Intensität durch abnehmende Temperaturen zusätzlich verschärft.

Ergänzend wurden an der Forschungsstelle 1 Biegeversuche an Proben aus den für das Biegen an der Schweißstelle vorgesehenen Betonstahlmatten und an den für Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) verzinkten Proben durchgeführt. Diese Proben waren jeweils in einem eigenen Verzinkungsprozess verzinkt worden.

Hierzu wurden bei den für den Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) verzinkten Proben (Schlaufen/Winkel) die unverformten Schenkel abgetrennt und anschließend mit unterschiedlichen Biegerollendurchmessern um 90° gebogen.

Bei diesen Proben, die eine niedrigere Zinkschichtdicke als die für Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen) verzinkten Proben aufwiesen, waren die Ergebnisse in Abhängigkeit vom Werkstoff unterschiedlich. Jedoch war an keiner Probe eine Beschädigung der Zinkschicht auf der Biegeinnenseite feststellbar.

Bei Werkstoff QT 10 zeigten sich bei einem Biegerollendurchmesser von 40 mm vereinzelt feine Rissbildungen in der Zinkschicht. Bei Biegerollendurchmesser 50 mm waren Risse augenscheinlich nicht feststellbar (Bild 60).

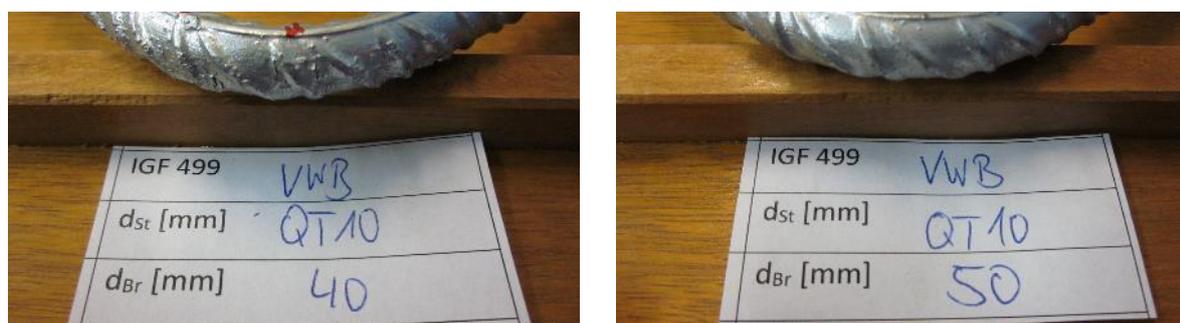


Bild 60: QT 10, Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken), Beschädigungen der Zinkschicht in Abhängigkeit vom Biegerollendurchmesser auf der Biegezugseite außen, Biegerollendurchmesser 40 mm (links) und 50 mm (rechts)

Bei Werkstoff KR 10 zeigten sich sowohl bei Biegerollendurchmesser 40 mm als auch bei 50 mm leichte Rissbildungen auf der Biegeaußenseite.

Werkstoff WR 14 wurde mit Biegerollendurchmessern 60 mm und 70 mm gebogen. Hier zeigten sich bei Biegerollendurchmesser starke Rissbildungen und Abplatzungen der Zinkschicht. Bei Biegerollendurchmesser 70 mm waren die Schäden etwas weniger stark ausgeprägt, es traten aber dennoch auch vereinzelte Abplatzungen auf.

Werkstoff QT 16 konnte aufgrund der kurzen Schenkellängen lediglich mit Biegerollendurchmesser 70 mm gebogen werden. Dabei traten Risse auf der Biegeaußenseite auf, deren Intensität in Abhängigkeit von der lokalen Qualität der Zinkschicht unterschiedlich ausgeprägt war. Abplatzungen waren nicht zu beobachten.

Von den für den Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) verzinkten Proben zeigten die aus Werkstoff WR 14 das ungünstigste Rissverhalten.

Die aus den Betonstahlmatten entnommenen Proben wurden mit Biegerollendurchmessern 40 mm, 60 mm und 85 mm gebogen. Beschädigungen in Form von Rissbildungen oder Abplatzungen traten auf der Biegeinnenseite nicht auf. Auf der Biegeaußenseite traten bei allen Biegerollendurchmessern Risse auf, deren Intensität (Anzahl, Abstand, Rissbreite) mit abnehmendem Biegerollendurchmesser zunahm. Bei Biegerollendurchmesser 40 mm traten auch Abplatzungen auf (s. Anlage 1).

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Dicke und Beschaffenheit der Zinkschicht von einer Vielzahl von Parametern abhängt, u. a. Stabdurchmesser, Rippenabstände, Abkühlgeschwindigkeit. In [6] sind Ergebnisse der Zinkschichtausbildung bei unterschiedlichen Randbedingungen (Stabstähle, Stahlmatten, Stabdurchmesser, Verzinkungsführung) beschrieben.

Hiernach treten erste durchgehende Risse in der Zinkschicht bereits kurz nach Überschreiten der 0,2%-Dehngrenze des Stahluntergrundes bevorzugt im Rippenbereich auf. Dabei nehmen die Rissanzahl und die Rissbreite mit zunehmender Dehnung zu. Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass es bei dicken Zinkauflagen bereits bei kleinen Dehnungen zu örtlichen Haftungsverlusten und Abblätterungen des Zinks kommen kann.

Tabelle 15 zeigt die im Rahmen des Forschungsprojekts an den verwendeten, in drei unterschiedlichen Verzinkungsprozessen verzinkten Werkstoffen bestimmten Zinkschichtdicken in der Übersicht.

Tabelle 15: Übersicht über die im Rahmen der Untersuchungen bestimmten Zinkschichtdicken

Verfahrensweg A		Verfahrensweg B		R 524 A	
d_{St}	d_{Zn}	d_{St}	d_{Zn}	d_{St}	d_{Zn}
[mm]	[μm]	[mm]	[μm]	[mm]	[μm]
10 KR	213	10 KR	157	10	166
10 QT	189	10 QT	121	--	--
14 WR	296	14 WR	172		
16 QT	225	16 QT	134		
25 QT	179	--	--		

Im Hinblick auf das Rissverhalten und Ablätzungen wirkt sich eine geringere Dicke der Zinkschicht wie die an den für Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) verzinkten Proben gefundenen Ergebnisse zeigen, offensichtlich günstig aus. Diese ist aber als Erklärungsansatz allein nicht ausreichend, da der Werkstoff WR 14 trotz deutlich geringerer Zinkschichtdicke als bei den nach Verfahrensweg A (Biegen - Verzinken) verzinkten Proben nach wie vor ein ungünstiges Rissverhalten aufweist.

Dies belegen auch die Vergleichsmessungen an den Mattenstücken, wonach die aus KR 10 gefertigten Matten trotz vergleichbarer Zinkschichtdicke von 166 μm ungünstigeres Rissverhalten als die nach Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) verzinkten Proben zeigen.

Da die Zinkschichtdicke nicht allein von der chemischen Zusammensetzung der Stähle sondern auch den Verzinkungsbedingungen (Stabdurchmesser, Prozessparameter, Oberflächengestalt) abhängt, ist eine allein auf die Zinkschichtdicke abstellende Analyse des Rissverhaltens nicht zielführend. Hierzu sind weitergehende Untersuchungen erforderlich, die im Rahmen des Forschungsprojektes nicht zu leisten waren.

Für eine genauere Bewertung der Beschädigungen in Abhängigkeit von den gewählten Material- und Biegeparametern wurden an der Forschungsstelle 2 zusätzlich mikroskopische Untersuchungen an gebogenen Proben durchgeführt. Hierbei wurden von den Werkstoffen QT 10 und KR 10 jeweils 3 mit Biegerollendurchmesser 40 mm sowie 50 mm gebogene Winkel (Biegewinkel 90 °) und Schlaufen (Biegewinkel 180 °) sowie vom Werkstoff WR 14 zusätzlich 3 mit Biegerollendurchmesser 60 mm gebogene Winkel untersucht.

Mit Hilfe metallografischer Längsschliffe sollte geklärt werden, inwieweit makroskopisch sichtbare Ablätzungen auf der Biegeaußenseite die komplette Zinkschicht betreffen oder nur bestimmte Eisen-Zink Legierungsphasen.

Die Ergebnisse sind für die mit den Biegerollendurchmessern 40mm und 50mm um 90° und 180° gebogenen Betonstählen (Verfahrensweg A) der Werkstoffe KR 10mm und QT 10mm in Bild 61 bis Bild 64 beispielhaft dargestellt. Im linken Teilbild ist jeweils die Zinkschicht in der Übersicht und im rechten Teilbild sind jeweils zwei Detailansichten dargestellt. Die vollständigen Ergebnisse finden sich in Anlage 2.

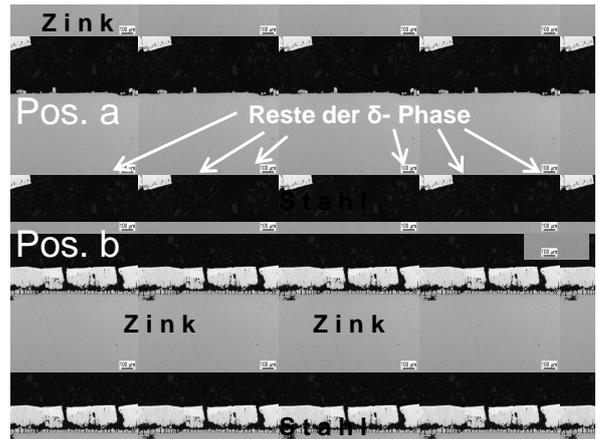
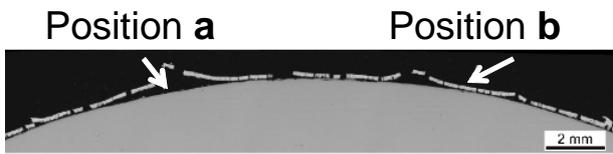


Bild 61: Werkstoff KR10, $d_{br} = 40\text{mm}$, Schlaufe (180°), Biegeaußenseite, Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen)

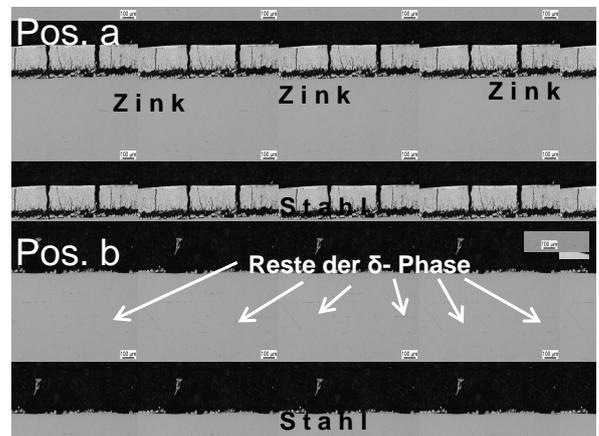
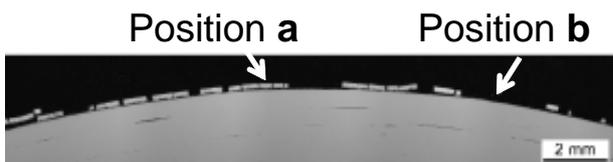


Bild 62: Werkstoff KR10, $d_{br} = 50\text{mm}$, Schlaufe (180°), Biegeaußenseite, Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen)

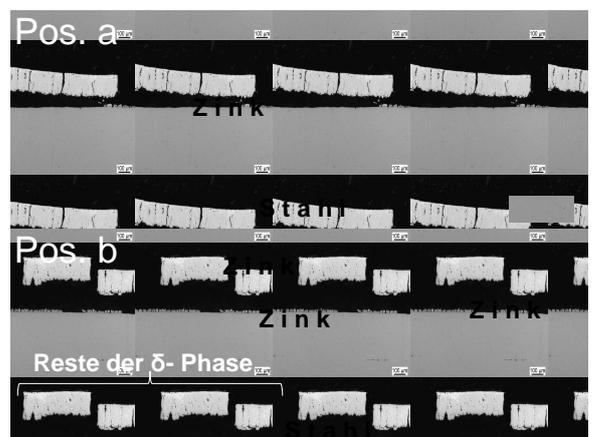
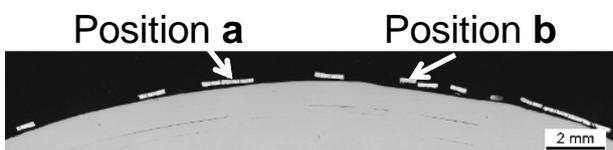


Bild 63: Werkstoff QT10, $d_{br} = 40\text{mm}$, Schlaufe (180°), Biegeaußenseite, Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen)

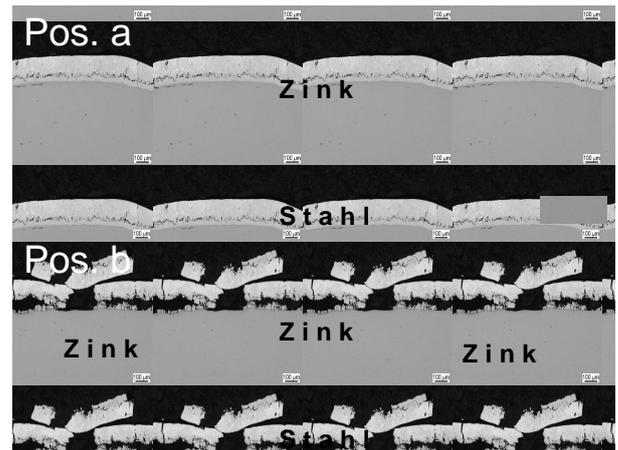
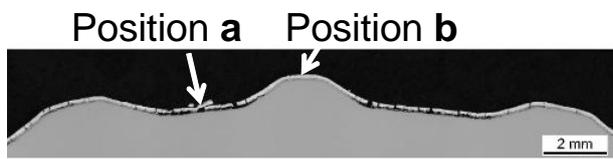


Bild 64: Werkstoff QT10, $d_{br} = 50\text{mm}$, Schlaufe (180°), Biegeaußenseite, Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen)

Insgesamt zeigen die Ergebnisse werkstoffunabhängig und unabhängig vom Biegerollendurchmesser ein einheitliches Bild. Neben Bereichen an denen die Zinkschicht offensichtlich anhaftet und Kontakt zur Stahloberfläche hat, zeigen sich in unmittelbarer Nähe komplett zinkfreie Bereiche an denen teilweise Reste der δ -Phase erkennbar sind. Die makroskopisch sichtbaren Abplatzungen im Verfahrensweg A beschränken sich folglich nicht ausschließlich auf die obersten Bereiche der Eisen-Zink Legierungsschicht, sondern wirken sich häufig auf die gesamte Zinkschicht aus.

Die mikroskopischen Untersuchungen zeigen, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich die Zinkschicht infolge des Biegevorgangs vollständig vom Grundwerkstoff ablöst.

3.3.1.2 Verbleibende Gebrauchseigenschaften nach dem Biegen

Die für die Ermittlung der nach dem Biegen noch verbleibenden Gebrauchseigenschaften angewandten Untersuchungsmethoden und Beurteilungskriterien wurden bereits unter 3.2.1 beschrieben. Diese wurden den Untersuchungen zum Biegen bei tiefen Temperaturen, zum Biegen nach Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) und zum Biegen im Bereich von Schweißstellen zugrunde gelegt.

3.3.2 Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken)

3.3.2.1 Untersuchungsmethoden

Für die Untersuchungen zum Biegen nach Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) wurden mit den Werkstoffen QT 10, KR 10, WR 14 und QT 16 Winkel und Schlaufen bei Raumtemperatur mit einer Biegegeschwindigkeit von 10 U/min hergestellt und anschließend verzinkt. Da ein Rückbiegen von mit Werkstoff QT 25 gebogenen Schlaufen labortechnisch nicht zu bewältigen war, wurden mit diesem Werkstoff lediglich Winkel hergestellt und verzinkt.

Tabelle 16 gibt eine Übersicht über die hergestellten Probeformen.

Tabelle 16: Probeformen für nach Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) verzinkte Proben

Werkstoff	Biegeform		Biegerollendurchmesser		
			4 x d _{St}	6 x d _{St}	8 x d _{St}
QT 10	Winkel	Schlaufen	40	60	85
KR 10	Winkel	Schlaufen	40	60	85
WR 14	Winkel	Schlaufen	50	85	100
QT 16	Winkel	Schlaufen	60	100	135
QT 25	Winkel		160	185	200

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden die Proben zunächst gealtert und zurückgebogen. Da die Zinkschicht in allen Fällen Risse aufwies, wurden die Proben nach dem in DIN EN ISO 1460 beschriebenen Verfahren im Biegebereich entzinkt, um festzustellen, ob die Risse bis in den Grundwerkstoff reichen. Anschließend wurden die Proben vollständig geradegebogen, gealtert und im Zugversuch geprüft. Die vollständigen Ergebnisse sind in Anlage 1 dargestellt.

3.3.2.2 Zulässige Biegerollendurchmesser für nach Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) verzinkte Proben

Die untersuchten Werkstoffe zeigten in Bezug auf das Rissverhalten unterschiedliches Verhalten:

Die mit einem Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 40$ mm gebogenen Proben aus Werkstoff **KR 10** zeigten weder beim Rückbiegen noch beim vollständigen Geradebiegen augenscheinlich erkennbare Anrisse im Grundwerkstoff. Die im Zugversuch an den vollständig rückgebogenen Proben ermittelten mechanischen Werte zeigen gleichwohl einen Abfall der Zugfestigkeit (Bild 65). Die A_{gt} -Werte liegen mit Ausnahme der an den Schlaufen ermittelten Werte bei allen Proben im Mittel bei 0,7 % (Bild 66).

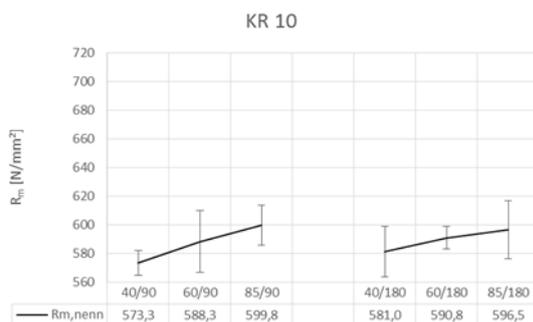


Bild 65: Zugfestigkeit der vollständig rückgebogenen Proben, Werkstoff KR 10

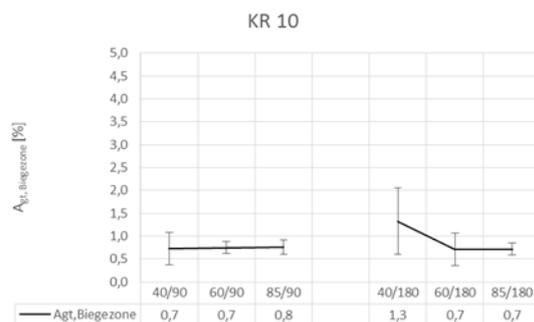


Bild 66: A_{gt} -Werte der vollständig rückgebogenen Proben in der Biegezone, Werkstoff KR 10

Dieser Werkstoff kann nach den vorliegenden Ergebnissen mit einem Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 40$ mm gebogen werden.

Die mit einem Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 40$ mm gebogenen Proben aus Werkstoff **QT 10** zeigten beim Rückbiegen augenscheinlich erkennbare Anrisse im Bereich der Rippenfüße, die sich beim vollständigen Geradebiegen noch aufweiteten. Die mit einem Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 60$ mm gebogenen Proben blieben hingegen sowohl beim Rück- als auch Geradebiegen augenscheinlich rissfrei.

Die nach dem Biegen verbleibenden Eigenschaften wurden sowohl an den angerissenen als auch den ungerissenen Proben bestimmt (Bild 67 und Bild 68).

Dabei zeigten sich keine signifikanten Unterschiede der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Biegerollendurchmesser und der Biegeform Winkel/Schlaufe.

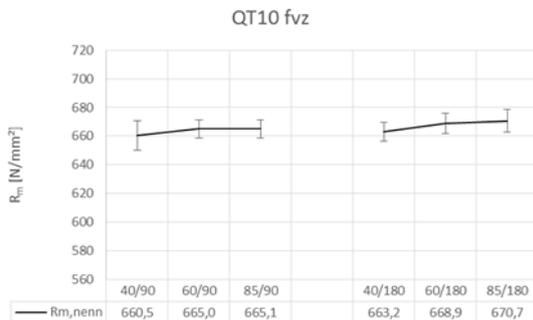


Bild 67: Zugfestigkeit der vollständig rückgebogenen Proben, Werkstoff QT 10

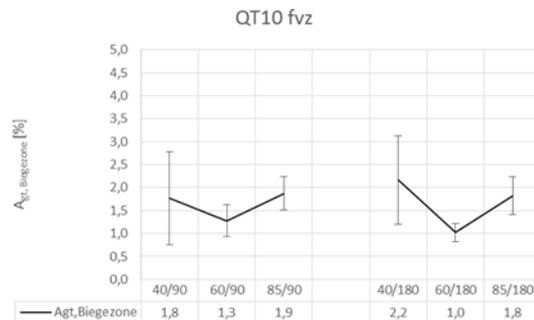


Bild 68: A_{gt} -Werte der vollständig rückgebogenen Proben in der Biegezone, Werkstoff QT 10

Die Ergebnisse der Zugversuche belegen, dass die bei Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 40$ mm entstehenden Anrisse als duktile Anrisse zu werten sind, die die mechanischen Eigenschaften nicht erkennbar beeinflussen. Gleichwohl kann dieser Biegerollendurchmesser nicht als praxistauglich angesehen werden, da die Risse bereits beim Rückbiegen bis in den Grundwerkstoff hineinreichen und an diesen Stellen der Korrosionsschutz durch die Zinkschicht aufgehoben ist.

Bei den mit einem Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 50$ mm gebogenen Proben aus Werkstoff **WR 14** traten an einigen Proben im Gegensatz zu den übrigen Werkstoffen Sprödbrüche bereits beim Rückbiegen auf (Bild 69). Die restlichen Proben zeigten beim Rückbiegen Anrisse, die sich beim vollständigen Geradebiegen weiter aufweiteten.



Bild 69: Sprödbrüche bei Werkstoff WR 14 ($d_{Br} = 50$ mm, Winkel 90°) nach Rückbiegen $\geq 20^\circ$, Biegezone entzinkt

Die mit einem Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 85$ mm gebogenen Proben blieben hingegen sowohl beim Rück- als auch Geradebiegen augenscheinlich rissfrei, Sprödbrüche traten nicht auf.

Die nach dem Biegen verbleibenden Eigenschaften wurden wiederum sowohl an den angerissenen als auch den ungerissenen Proben bestimmt (Bild 70 und Bild 71).

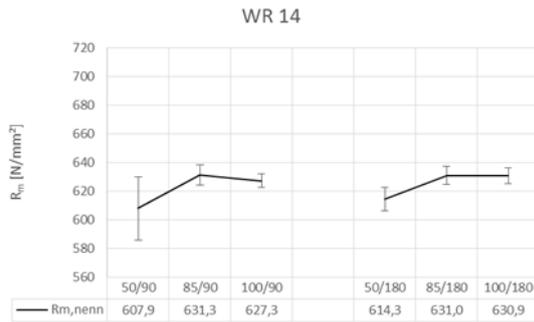


Bild 70: Zugfestigkeit der vollständig rückgebogenen Proben, Werkstoff WR 14

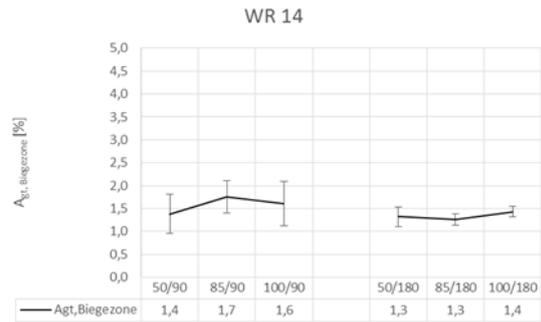


Bild 71: A_{gt}-Werte der vollständig rückgebogenen Proben in der Biegezone, Werkstoff WR 14

Dabei zeigte sich bei den mit einem Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 50$ mm gebogenen Proben ein deutlich erkennbarer Abfall der Zugfestigkeit, bei den geprüften Winkelproben zudem verbunden mit vergleichsweise großen Streuungen. Die Ergebnisse der Zugversuche belegen, dass die bei diesem Biegerollendurchmesser entstehenden Anrisse die mechanischen Eigenschaften erkennbar beeinflussen. Darüber hinaus besteht bei diesem Biegerollendurchmesser die Gefahr des spröden Versagens, die bei den größeren Biegerollendurchmessern nicht zu beobachten war.

Als mögliche Ursache für dieses nur vereinzelt aufgetretene Phänomen wurden lokal vorhandene Störungen im Werkstoffgefüge vermutet. Darüber hinaus könnte der Eigenspannungszustand der Proben von Bedeutung sein, wenn sich bei der Probeherstellung die aus dem Richtprozess des Ringmaterials und die aus dem Biegeprozess resultierenden Eigenspannungen ungünstig überlagern und diese bei der Verzinkung nicht abgebaut werden können.

Mikroskopische Untersuchungen der Forschungsstelle 2 zeigen, dass der Riss von Fehlstellen im Gefüge ausgeht und in der Querschnittsfläche sowohl Bereiche mit spröden Trennbrüchen als auch Bereiche mit duktilen Gleitbrüchen vorliegen (Bild 72 bis Bild 77).

„Der glatte linsenförmig aussehende Bruchausgangsbereich zeigt mehrere Fehlstellen. Von hier aus verlaufen fächerförmig Bruchbahnen. Die Bruchmikrostrukturen zeigen transkristalline Trennungen in Form von Spaltflächen, einen Saum aus duktilen Waben und dann im weiteren Bruchverlauf wieder transkristalline Spaltflächen. Im oberen Drittel der Probenmitte findet sich ein Bereich mit Gleitbruchcharakter in Form von Waben“

(Zitat Untersuchungsbericht Forschungsstelle 2)

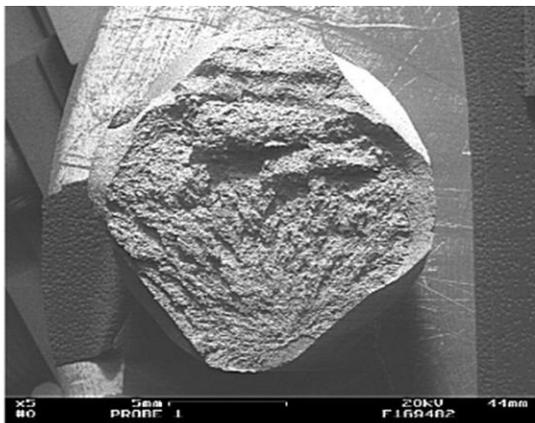


Bild 72: Querschnittsfläche der Probe

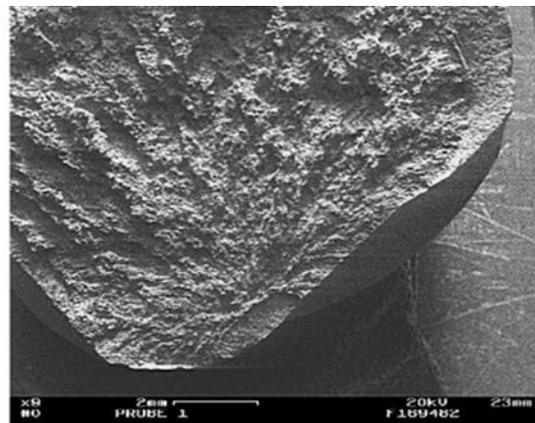


Bild 73: Detailausschnitt aus Bild 43

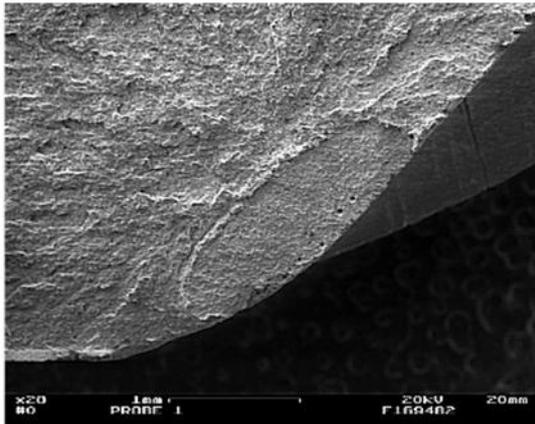


Bild 74: Bruchausgangsbereich

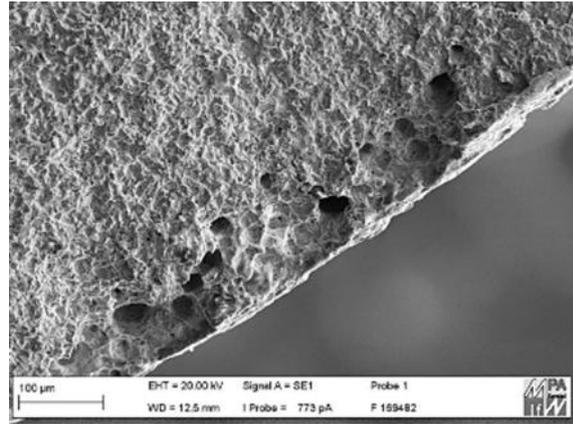


Bild 75: Detailaufnahme Bruchausgangsbereich

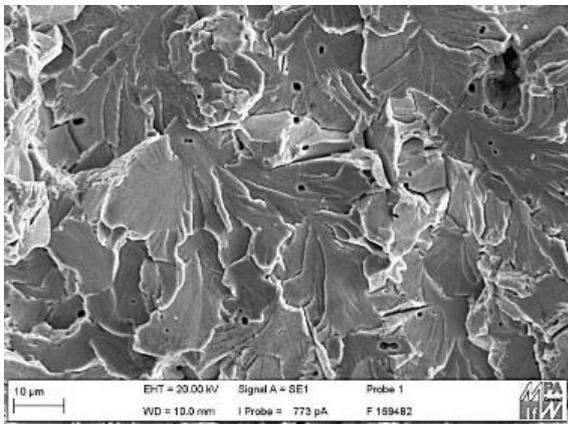


Bild 76: Spaltbruchflächen

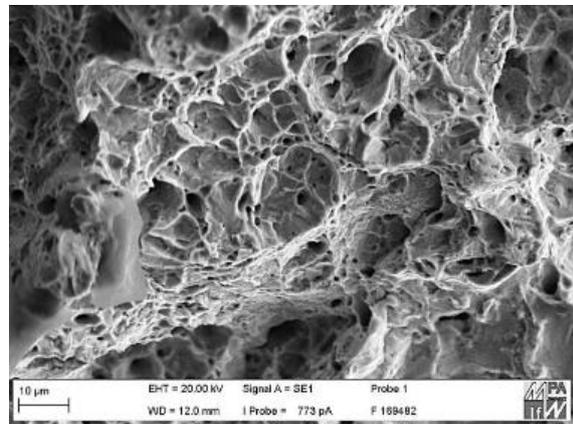


Bild 77: Wabenförmige Bruchflächen

Die mit einem Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 60$ mm gebogenen Schlaufen und Winkel aus Werkstoff **QT 16** versagten überwiegend bereits beim Rückbiegen durch klaffende, von den Rippenfüßen ausgehende und in die weitere Grundfläche verlaufende Risse, die sich mit zunehmendem Biegevorgang zunehmend aufweiteten (Bild 78). Diese Rissbildungen traten bei nahezu allen geprüften Proben an den Winkeln und Schlaufen auf. Das Rissverhalten kann jedoch als duktil beschrieben werden.



Bild 78: QT 16, 60/90, Rückbiegen $\geq 20^\circ$, klaffende, vom Rippenfuß in die Zwischenfläche verlaufende Risse

Eine Prüfung dieser Proben im Zugversuch war mit Ausnahme von 2 vollständig gerade gebogenen Winkelproben nicht möglich. Diese zeigten einen starken Abfall der Zugfestigkeit, so dass von einer tiefgehenden Querschnittsschwächung auszugehen ist (Bild 79 und Bild 80).

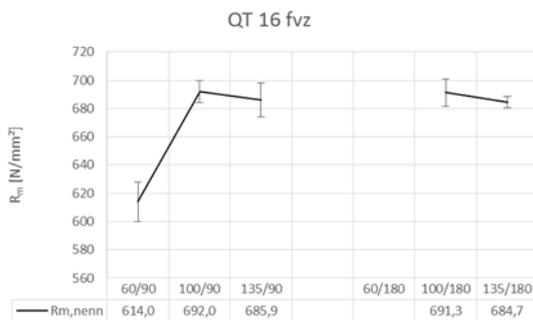


Bild 79: Zugfestigkeit der vollständig rückgebogenen Proben, Werkstoff QT 16 (Proben 60/90 waren stark geschädigt!)

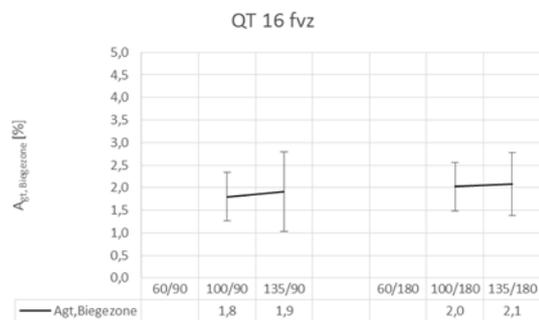


Bild 80: A_{gt} -Werte der vollständig rückgebogenen Proben in der Biegezone, Werkstoff WR 14

Die mit einem Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 100$ mm gebogenen Proben zeigten beim Rückbiegen augenscheinlich erkennbare Anrisse im Bereich der Rippenfüße, die sich beim vollständigen Geradebiegen noch aufweiteten. Bei 2 der geprüften Schlaufen zeigten sich beim Rückbiegen auch die bei Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 60$ mm bereits aufgetretenen klaffenden Rissbildungen.

Die mit einem Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 135$ mm gebogenen Proben blieben hingegen beim Rückbiegen augenscheinlich rissfrei, während sich beim Geradebiegen vereinzelte Anrisse im Bereich der Rippenfüße zeigten.

Die nach dem Biegen verbleibenden Eigenschaften wurden sowohl an den angerissenen als auch den ungerissenen Proben bestimmt. Dabei zeigten sich keine signifikanten Unterschiede der Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Biegerollendurchmesser und der Biegeform Winkel/Schlaufe. Die Ergebnisse der Zugversuche belegen, dass die bei Biegerollendurchmesser $d_{Br} = 100$ mm entstehenden Anrisse als duktile Anrisse zu werten sind, die die mechanischen Eigenschaften nicht erkennbar beeinflussen.

Gleichwohl kann dieser Biegerollendurchmesser nicht als praxistauglich angesehen werden, da die Risse bereits beim Rückbiegen bis in den Grundwerkstoff hineinreichen können und an diesen Stellen der Korrosionsschutz durch die Zinkschicht aufgehoben ist.

Die mit Biegerollendurchmessern $d_{Br} = 160, 185$ und 200 mm gebogenen Winkel aus Werkstoff **QT 25** zeigten beim Rückbiegen um 20° duktile Anrisse im Bereich der Rippenfüße, die sich mit zunehmendem Biegevorgang zunehmend aufweiteten. Eine Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften im Zugversuch war nicht feststellbar.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen lassen sich die in Tabelle 17 dargestellten Mindestbiegerollendurchmesser (grün unterlegt) angeben.

Dabei wird zugrunde gelegt, dass unter Baustellenbedingungen aus Korrekturgründen oder infolge Fremdeinwirkung Verformungen bis zu einem Grenzdurchmesser von 16 mm nicht zielsicher auszuschließen sind. Aus diesem Grund dürfen die Proben bei dieser Beanspruchung keine Anrisse im Grundmaterial zeigen, da in diesem Fall der Korrosionsschutz aufgehoben ist, auch dann nicht, wenn die mechanischen Eigenschaften durch die auftretenden Risse offensichtlich nicht beeinträchtigt werden. Eine ausreichende Sicherheit ist im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen durch das (an-) rissfreie Verhalten der Proben beim Rückbiegen um 20° belegt.

Tabelle 17: Zulässige Biegerollendurchmesser Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken)

			Biegerollendurchmesser		
			4 d_{St}	6 d_{St}	8 d_{St}
QT 10	Winkel	Schlaufen	40	60	85
KR 10	Winkel	Schlaufen	40	60	85
WR 14	Winkel	Schlaufen	50	85	100
QT 16	Winkel		60	100	135
				7 d_{St}	8 d_{St}
QT 25	Winkel		160	185	200

Die angegebenen Grenzdurchmesser können als Empfehlungen für das Verzinken nach Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) angesehen werden.

Auch wenn der Werkstoff **KR 10** nach den durchgeführten Prüfungen mit einem Biegerollendurchmesser von 40 mm gebogen werden kann, wird aus baupraktischen Gründen empfohlen, für Stabdurchmesser bis 14 mm einheitlich einen Mindestbiegerollendurchmesser von $6 \cdot d_{St}$ vorzugeben.

Wegen der nicht sicher auszuschließenden Rissbildungen beim Rückbiegen des Werkstoffs **QT 16** bei einem Biegerollendurchmesser 100 mm wird für diesen Werkstoff ein Mindestbiegerollendurchmesser von $8 \cdot d_{St}$ empfohlen. Unabhängig von der Verzinkung stellt für Stabdurchmesser $d_{St} \geq 20$ mm ein Biegerollendurchmesser von $d_{Br} = 7 \cdot d_{St}$ die untere Grenze dar. Ein Rückbiegen dieser Stabdurchmesser erscheint unter Baustellenbedingungen praktisch ausgeschlossen.

Ebenfalls aus baupraktischen Gründen wird daher empfohlen, für Stabdurchmesser ≥ 16 mm einheitlich einen Mindestbiegerollendurchmesser von $8 \cdot d_{St}$ vorzugeben, wenn die Proben um einen Winkel $\geq 90^\circ$ gebogen werden sollen.

Grundsätzlich lassen die Ergebnisse aber auch die Möglichkeit offen, die Funktionsfähigkeit kleinerer Biegerollendurchmesser unter Beachtung der oben genannten Gesichtspunkte im Einzelfall nachzuweisen.

Zum Vergleich wird in [11] für Stabdurchmesser ≤ 19 mm unabhängig von der Stahlgüte eine Mindestbiegerollendurchmesser von $d_{Br} = 6 \times d_{St}$ und erst für Stabdurchmesser ≥ 22 mm ab einer Stahlgüte „grade 350“ ein Mindestbiegerollendurchmesser von $d_{Br} = 8 \times d_{St}$.

3.3.3 Eignung zum Biegen bei tiefen Temperaturen

Die Untersuchungen wurden an unverzinkten Betonstählen und für Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen) verzinkten Betonstählen durchgeführt.

Die in Arbeitspaket 2 durchgeführten Untersuchungen lieferten weder Anhaltspunkte für einen systematischen Einfluss der Biegetemperatur im Temperaturbereich zwischen -20 °C und Raumtemperatur noch einen nachweisbaren Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit, im Bereich zwischen 10 U/min und 20 U/min.

Für den Anwendungsfall Biegen bei tiefen Temperaturen wurden unverzinkte Proben bei den Temperaturstufen Raumtemperatur, -5 °C und -20 °C mit dem in Arbeitspaket 2 ermittelten kleinsten Biegerollendurchmesser und einer weiteren Stufe geprüft. Da die ersten Versuche keine negativen Ergebnisse erwarten ließen, wurden die für Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen) verzinkten Proben nur bei den Temperaturstufen Raumtemperatur und -20 °C geprüft. Mit Blick auf die in DIN 1045-3 gegebene Empfehlung, bei Biegetemperaturen zwischen 0 °C und -5 °C die Biegegeschwindigkeit angemessen zu reduzieren, wurden zusätzlich einzelne Versuchsreihen bei einer Biegegeschwindigkeit von 20 U/min durchgeführt.

Die Kennzeichnung des plastischen Verformungsvermögens erfolgte analog zu Arbeitspaket 2 im Biegeversuch und Rückbiegeversuch.

Hierzu wurden die Proben unter Laborbedingungen auf einer vorhandenen Biegevorrichtung mit dem vorgesehenen Biegewinkel gebogen. Die Proben für die Prüfung bei Raumtemperatur wurden im Laborklima bei 20 ± 2 °C gelagert. Temperierte Proben wurden über Nacht in einer Kühltruhe mit einer Kühlleistung bis zu -40 °C bei der vorgesehenen Temperatur zuzüglich eines Vorhaltemaßes von ca. 2 K gelagert, in einem mit Kühlflüssigkeit gefüllten Behälter zur Biegemaschine transportiert und nach Entnahme aus der Kühlflüssigkeit zügig gebogen. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass die Proben die vorgesehene Temperatur aufwiesen.

Nach dem Biegen wurden die temperierten Proben zunächst im Labor bis zum Erreichen der Raumtemperatur gelagert und anschließend bei 100 °C gealtert. Nach dem Rückbiegen um 20 ° mit einer Biegevorrichtung und ggf. Entzinken der verformten Biegezone wurden die Proben augenscheinlich auf Rissbildungen untersucht und anschließend vollständig gerade gebogen.

Die Kennzeichnung der nach dem Biegen verbleibenden Gebrauchseigenschaften wurde nach erneuter Alterung bei 100 ° durch Zugversuche an den gerade gebogenen Proben ermittelt.

Bei den Biegeversuchen traten beim Hinbiegen weder Sprödbrüche noch Rissbildungen im Grundwerkstoff auf. Bei den verzinkten Proben führte die Abkühlung jedoch zu einer zunehmenden Intensität der bereits zuvor beschriebenen Rissbildungen in der Zinkschicht.

Die vollständigen Ergebnisse sind in Anlage 1 dargestellt.

Alle nach dem vollständigen Geradbiegen im Zugversuch geprüften Stähle erfüllten die Anforderungen der DIN 488 an die mechanischen Kennwerte. Systematische, eindeutig erkennbare Einflüsse der Biegetemperatur und/oder der Belastungsgeschwindigkeit lassen sich aus den Ergebnissen nicht ablesen.

Eine statistische Betrachtung der im Rahmen der Zugversuche ermittelten verbleibenden Eigenschaften (s. Anlage 1) zeigt anhand der für eine Aussagewahrscheinlichkeit $W = 90$ % berechneten 10%-

Fraktilwerte für die jeweiligen Prüfbedingungen ausreichende Werte für die im Bereich der Biegezone verbleibende Dehngrenze und die Duktilität (A_{gt}) sowohl bei den unverzinkten als auch den verzinkten Stählen. Lediglich bei den Ringmaterialien KR 10 und WR 14 lassen sich bei einzelnen Prüfreiheiten keine befriedigenden Werte für die Duktilität (A_{gt}) nachweisen. Aufgrund der vergleichsweise großen Streuungen ist für eine weitergehende Absicherung eine Vergrößerung des Stichprobenumfangs erforderlich.

Die grafische Auswertung (Bild 124 bis Bild 171 in Anlage 1) lässt keine signifikante Abhängigkeit der verbleibenden Eigenschaften von den variierten Prüfbedingungen erkennen. Fasst man die am jeweiligen Werkstoff ermittelten Werte unter statistischen Gesichtspunkten jeweils zu einer Gesamtheit zusammen, so lassen sich für die unverzinkten Werkstoffe mit einer statistischen Aussagesicherheit von $W = 90\%$ folgende Proben 5%-Fraktilwerte angeben:

Tabelle 18: 5%-Fraktilwerte der nach dem vollständigen Rückbiegen verbleibenden Eigenschaften der unverzinkten Stähle

Werkstoff	Rand	Biegezone				
	$R_{eH}, R_{p0,2}$	$R_{p0,2}$	R_m	$A_{gt, Rand}$	$A_{gt, Biegezone}$	R_m/R_p
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	
KR 10 sw	535,9	508,6	576,5	2,6	0,2	1,06
QT 10 sw	547,6	533,6	643,0	5,9	0,8	1,15
WR 14 sw	510,7	538,5	614	4,8	0,4	1,09
QT 16 sw	548,5	558,4	668,3	7,9	1,1	1,13

Auffällig sind dabei die vergleichsweise geringen A_{gt} -Werte im Randbereich, die darauf zurückgeführt werden können, dass dieser Wert jeweils zu Vergleichszwecken nicht über die gesamte Probenlänge sondern nur auf einer Messstrecke von 100 mm im der Nähe der Probeneinspannung gemessen wurde. Bei Vergleichsmessungen konnte gezeigt werden, dass der A_{gt} -Wert an ein und derselben Probe von der Lage der Messstrecke abhängt und sich größere Werte in der Messstrecke ergeben, in der sich die Einschnürung ausbildet. Eine Vielzahl weiterer Einflussgrößen auf den A_{gt} -Wert sind in [12] beschrieben.

Die zusätzlich durchgeführten Härteprüfungen an bei -20 °C gebogenen Proben ergaben keine Hinweise auf einen Einfluss der Biegetemperatur. Obwohl die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche einen Einfluss der Verzinkung auf die Übergangstemperatur bei den Werkstoffen KR 10 und WR 14 nahelegen, lässt sich ein negativer Einfluss im Rahmen der durchgeführten Rückbiege- und Zugversuche nicht feststellen.

Werkstoff QT 25 darf bei der Verarbeitung nur mit Biegerollendurchmessern $d_{Br} \geq 7 \cdot d_{St}$ gebogen werden. Bei Vergleichsversuchen mit einem Biegerollendurchmesser von 100 mm ($4 \cdot d_{St}$) blieben die unverzinkten Proben auch bei einer Biegetemperatur von -20 °C beim Hin- und Rückbiegen rissfrei. Die verzinkten Proben ließen sich mit Biegerollendurchmessern von 180 mm (ca. $7 \cdot d_{St}$) und 135 mm (ca. $4 \cdot d_{St}$) bei -20 °C rissfrei hin- und zurückbiegen.

Ein Biegen bei tiefen Temperaturen bis -20 °C ist auf der Grundlage der gefundenen Ergebnisse mit Biegerollendurchmessern $\geq 4 \cdot d_{St}$ für Stabdurchmesser $d_{St} \leq 16$ mm bzw. $\geq 7 \cdot d_{St}$ für Stabdurchmesser $d_{St} > 16$ mm ohne Beeinträchtigung der Werkstoffeigenschaften grundsätzlich möglich.

3.3.4 Rückbiegen unter Baustellenbedingungen

Im Rahmen der Versuche zum Biegen bei tiefen Temperaturen und dem Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) wurden Untersuchungen an unverzinkten Betonstählen und für den Verfahrensweg A und B verzinkten Betonstählen durchgeführt.

Die nach dem Rückbiegen verbleibenden Gebrauchseigenschaften wurden dabei durch Zugversuche an den gerade gebogenen Proben ermittelt. Dabei wurden auch die Bedingungen des Rückbiegens unter Baustellenbedingungen erfasst, indem die um 20° im Rückbiegeversuch rückgebogenen Proben von Hand vollständig gerade gebogen und auch die Beschädigungen an der Rückbiegestelle erfasst wurden.

Für das Rückbiegen unter Baustellenbedingungen gelten DIN EN 1992-1-1/NA D und das DBV Merkblatt „Rückbiegen von Betonstahl und Anforderungen an Verwahrkästen nach Eurocode 2“, Januar 2011. Die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse lassen den Schluss zu, dass die untersuchten Stähle im Hinblick auf den dort vorgegebenen Grenzbiegerollendurchmesser von $6 \times d_{St}$ von der Duktilität her Reserven aufweisen, die ein Rückbiegen unter Baustellenbedingungen zulassen.

Die für Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen) verzinkten Proben verhalten sich wie unter Punkt 3.3.4 gezeigt, in Bezug auf ihre Biegeeigenschaften wie die unverzinkten Stähle. Beim vollständigen Rückbiegen sind Schäden an der Verzinkung zu erwarten. Diese sind ggf. zur Wahrung des Korrosionsschutzes fachgerecht auszubessern.

Da jedoch in diesem Anwendungsfall auch Fragen der Dauerschwingfestigkeit im eingebauten Zustand von Bedeutung sind (vgl. hierzu [13]), die nicht Gegenstand des Forschungsprojektes waren, ist eine abschließende Empfehlung nicht möglich.

Die für Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) verzinkten Proben weisen nach den an der Forschungsstelle 2 durchgeführten mikroskopischen Untersuchungen bereits vor dem Rückbiegen im unverformten Zustand Mikrorisse im Bereich der Rippenfüße auf. Im Hinblick auf die mit einer unkontrollierten Rückbiegung unter Baustellenbedingungen bestehende Gefahr einer Rissbildung wird empfohlen, für diese Stähle ein planmäßiges Rückbiegen nicht zu gestatten.

3.3.5 Biegen im Bereich der Schweißstelle bei der Herstellung von Mattenkörben

Gemäß Forschungsantrag sollten Betonstahlmatten der Duktilitätsklassen A und B mit einem Stabdurchmesser von 10 mm sowohl im unverzinkten als auch im verzinkten Zustand nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) untersucht werden. Zu Vergleichszwecken sollte auch der Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) mit einbezogen werden.

Dabei sollte die Lage der Biegestelle ausgehend von der derzeitig normativ vorgegebenen Lage „ $a \geq 4 \times d_{St}$ “ schrittweise reduziert werden, im Extremfall so, dass die Biegestelle direkt unterhalb der Schweißstelle liegt.

Nach Abstimmung mit den Partnern der Forschungsgemeinschaft 1 (GAV) wurde vereinbart, im laufenden Projekt zunächst nur Matten der Duktilitätsklasse A zu untersuchen.

Die nach dem Biegen verbleibenden Eigenschaften sollten wie bei den Stabstählen und dem gerichteten Ringmaterial im Rahmen von Zugversuchen an den vollständig zurückgebogenen Stahlproben ermittelt werden.

Im Hinblick auf die vorgesehenen Versuche erwies sich eine Betonstahlmatte R524 A als gut geeignet, da diese eine Stablage mit Durchmesser 10 mm und zusätzlich in Längsrichtung einen Abstand der

Querstäbe von 250 mm aufweist. Trennt man die Längsstäbe unter- und oberhalb eines Querstabes unmittelbar an den beiden angrenzenden nächsten Querstäben ab, erhält man Proben mit einer Länge von ca. 490 mm Länge und einem Querstab in der Probenmitte.

Diese weisen eine ausreichende Länge von mindestens 100 mm auf, um im unverformten Bereich A_{gt} messen zu können, während die Bestimmung von A_{gt} im Bereich der Biegezone an die Länge der Biegezone gebunden ist.

Da nach gültigem Regelwerk die Lage der Biegestelle in einem Abstand $a \geq 4 \times d_{st}$ liegen und bei einer Verringerung dieses Abstandes eine Vergrößerung des Biegerollendurchmessers vorgenommen werden soll, war vorgesehen eine Biegung mit Biegerollendurchmesser $4 \times d_{st}$ an der Stelle $x = 4 \times d_{st}$ und dann an den Stellen $x = 2 \times d_{st}$ und $x = 0$ vorzunehmen. Die Bezeichnungen sind aus Bild 81 ersichtlich.

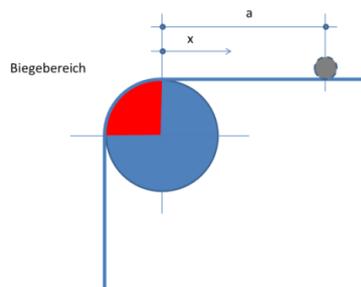


Bild 81: Biegen an der Schweißstelle, Bezeichnungen

Für die vorgesehenen Versuche wurden 3 Matten zunächst in einem Biegebetrieb so geschnitten, dass Streifen mit einer Länge von ca. 490 mm entstanden.

Für die Untersuchung an unverzinkten Proben und nach Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) hergestellten Proben wurden jeweils 4 Streifen anschließend mit den Biegerollendurchmessern 40 mm, 60 mm und 80 mm an unterschiedlichen Stellen gemäß Bild 82 gebogen

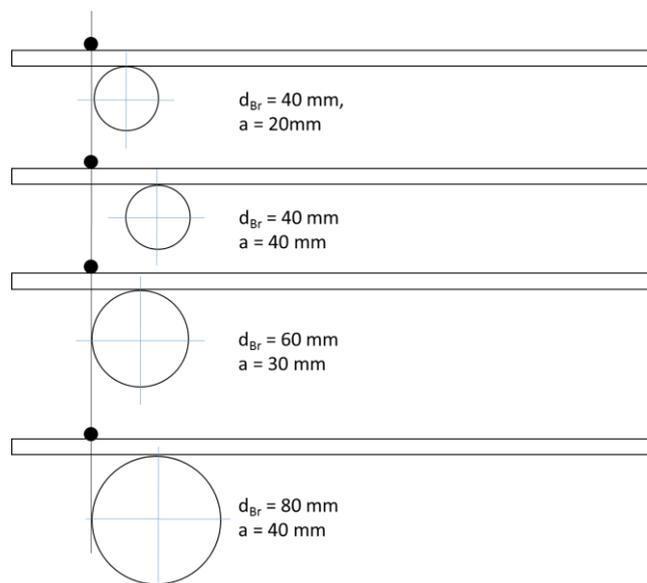


Bild 82: Lage der Biegestellen und Biegerollendurchmesser



Bild 83: Biegen der Mattenstücke (Mattenkörbe), $d_{Br} = 80 \text{ mm}$, $a = 40 \text{ mm}$

Zusätzlich wurden aus einem Teil der verbleibenden ungebogenen Streifen einzelne Stäbe für Zugversuche an geraden Proben sowie Biegeversuche unmittelbar an der Schweißstelle mit Biegerolldurchmessern 40, 50, 60, 70 und 85 mm im Labor vorbereitet, so dass mit jedem Biegerolldurchmesser 5 Proben gebogen werden konnten.

Die übrigen Streifen wurden zusammen mit den bereits für den Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) hergestellten Proben in die Verzinkerei geliefert und dort verzinkt.

Anschließend wurden wieder jeweils 2 Streifen unter den in Bild 82 dargestellten Bedingungen gebogen sowie an Einzelstäben Biegungen unmittelbar an der Schweißstelle mit den Biegerolldurchmessern 40, 50, 60, 70 und 85 mm durchgeführt.

Die nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) hergestellten Proben wiesen beim Biegen Schäden in Form von Rissbildungen und Abplatzungen in der Zinkschicht auf, deren Intensität mit zunehmendem Biegerolldurchmesser abnahm (Bild 84 bis Bild 86).

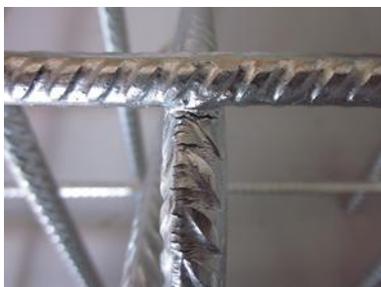


Bild 84: Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen)
 $d_{Br} = 40 \text{ mm}$, $a = 40 \text{ mm}$



Bild 85: Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen)
 $d_{Br} = 80 \text{ mm}$, $a = 40 \text{ mm}$



Bild 86: Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken)
 $d_{Br} = 40 \text{ mm}$, $a = 40 \text{ mm}$

Die nach Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) hergestellten Proben wiesen demgegenüber erwartungsgemäß keinerlei Beschädigungen in der Biegezone auf. Zur Ermittlung der nach dem Biegen verbleibenden Gebrauchseigenschaften wurden an den im Labor hergestellten Einzelproben zunächst

mit den Biegerollen 40, 50, 60, 70, 85 mm 90°-Biegungen unmittelbar an der Schweißstelle ausgeführt. Nach der optischen Untersuchung auf Beschädigungen an der Schweißnaht wurden die Proben anschließend gealtert, geradegebogen, wiederum gealtert und dann im Zugversuch auf die noch vorhandenen Gebrauchseigenschaften untersucht.

Unabhängig vom Behandlungszustand - unbehandelt, verzinkt nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen), verzinkt nach Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) - waren weder an den gebogenen Mattenstreifen noch an den im Labor hergestellten Einzelproben Schäden im Bereich der Schweißstelle zu erkennen (Bild 87).

An den vollständig gerade gebogenen Proben waren ebenfalls weder Schäden im Bereich der Schweißstelle noch Anrisse zu erkennen (Bild 87).



Bild 87: Schweißstelle nach dem Biegen um 90°



Bild 88: Probenoberfläche nach dem vollständigen Zurückbiegen (dBr = 40 mm, a = 0 mm, Biegewinkel = 90°) (FWB); Riefen aus dem Herstellprozess der Betonstahlmatte (keine Risse!)

Bei den im Zugversuch geprüften Proben traten in keinem Fall Brüche im Bereich der Biegezone auf. Die im unverformten Randbereich ermittelten Streckgrenzen (verzinkte Proben) bzw. Dehngrenzen (unverzinkte Proben) sowie die Zugfestigkeiten lagen sämtlich im Bereich der an ungebogenen Vergleichsproben ermittelten Schwankungsbreite.

Im Bereich der Biegezone wiesen die Proben eine Dehngrenze auf, deren Höhe im Bereich der in den unverformten Probenrandbereichen ermittelten Streck- bzw. Dehngrenzen liegt. Da die im Bereich der Biegezone ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien abhängig von der niemals vollständig geraden Probenachse und zufälligen Abweichungen bei der Einspannung im allgemeinen keinen geraden Verlauf aufweisen, sollten diese Werte nur als Vergleichswerte betrachtet werden.

Die verzinkten Proben wiesen im ungebogenen Randbereich aufgrund des Verzinkungsprozesses deutlich höhere A_{gt} -Werte auf als die unverzinkten Proben.

Die im Bereich der Biegezone ermittelten A_{gt} -Werte zeigten starke Streuungen. Die Mittelwerte lagen unabhängig vom Behandlungszustand bei allen Proben bei Werten $\geq 0,5$ %, Einzelwerte $> 0,2$ %.

Das Streckgrenzenverhältnis der verzinkten Proben weist höhere Werte als das der unverzinkten Proben auf.

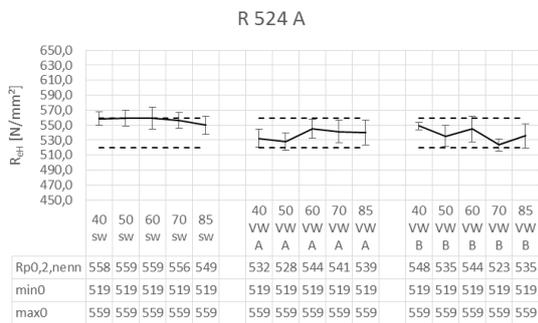


Bild 89: 0,2%Dehngrenze (unverzinkt) und Streckgrenzen der nach Verfahrensweg A (Verzinken - Biegen) und Verfahrensweg B (Biegen - Verzinken) verzinkten Proben im unverformten Randbereich

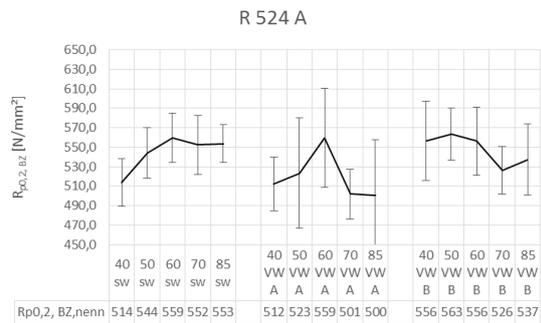


Bild 90: 0,2%-Dehngrenzen im Bereich der Biegezone

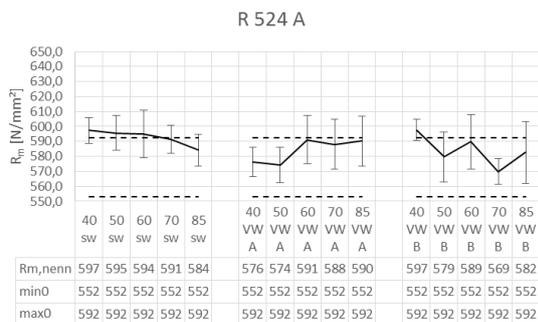


Bild 91: Zugfestigkeit der vollständig rückgebogenen Proben

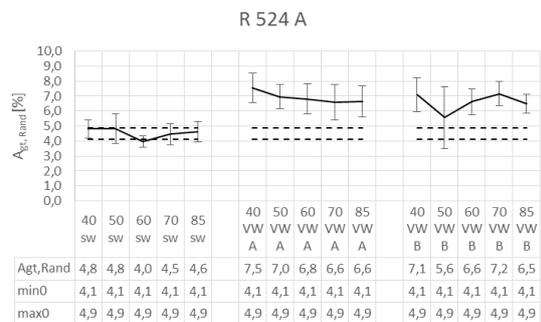


Bild 92: Agt-Werte der vollständig rückgebogenen Proben im unverformten Randbereich

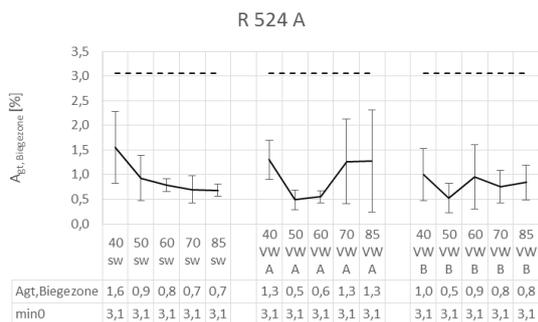


Bild 93: Agt-Werte der vollständig rückgebogenen Proben im Bereich der Biegezone

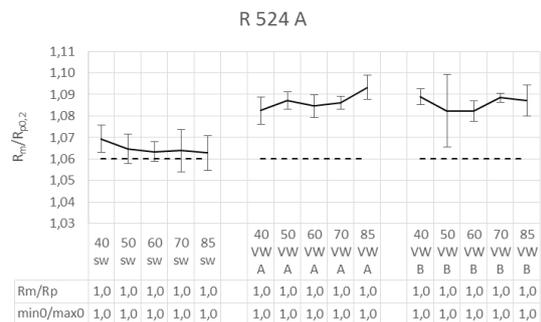


Bild 94: Streckgrenzenverhältnis der vollständig zurückgebogenen Proben

Die ermittelten Ergebnisse zeigen, dass ein Biegen unmittelbar an der Schweißstelle auch mit einem Biegerollendurchmesser von $4 \cdot d_{St} = 40$ mm unproblematisch möglich ist.

3.4 Werkstofftechnik – Anwendungsgrenzen (Arbeitspaket 4)

Nach der bauaufsichtlichen Zulassung [2] können gebogene feuerverzinkte Stähle grundsätzlich genau wie unverzinkte Stähle zur Bewehrung von Stahlbetonbauteilen nach EC2/NA D (bisher DIN 1045) verwendet werden. Wesentliche Eigenschaften des Betonstahls wie Zugfestigkeit und Bruchdehnung werden durch den Prozess des Verzinkens zwar nicht unzulässig beeinflusst, jedoch ist z.B. die Herstellungsfolge Biegen-Verzinken von vorneherein ausgeschlossen. Derzeit zulässig ist die Abfolge Verzinken-Biegen mit dem Nachteil, dass durch die Abplatzung der Zinkschicht, freiliegende Stahloberflächen nachträglich unter hohem Kosten- und Zeitaufwand nachbearbeitet werden müssen. Hintergrund für die Bestimmungen ist die Anfälligkeit kaltverformter Stähle für eine flüssigmetallinduzierte Spannungsrisskorrosion während des Verzinkens [14], [15], [16]. Dabei wird aufgrund der teilplastischen Kaltumformung ein Eigenspannungszustand ausgebildet mit resultierenden Zugspannungen auf der Biegeinnenseite. Die durch das Biegen induzierten Zugspannungen können sich mit thermisch bedingten Zugspannungen, bedingt durch das Eintauchen des Bauteils in die Zinkschmelze, überlagern und in Verbindung mit flüssigem Zink zu von der Bauteiloberfläche ausgehenden interkristallinen Schädigungen führen [3]. Der Zusammensetzung der Zinkschmelze kommt in dem Zusammenhang eine besondere Bedeutung bei. Maßgeblich sind hierbei die Legierungselemente Blei, Zink und Wismuth, deren Maximalgehalte in der DASt Richtlinie 022 geregelt sind [17]. Unabhängig von einer mechanischen Beanspruchung führt das Feuerverzinken zu interkristallin ausgebildeten Randdefekten in der Größenordnung von 1-2 Kornlagen [18], und dies führt zu der in [4] festgestellten Verringerung der Dauerfestigkeit. Unter LMAC-Bedingungen erweitern sich diese Korngrenzenschädigungen zu rissähnlichen Anfangsdefekten, von denen dann bei schwingender Beanspruchung Ermüdungsrisse ausgehen können.

Zu den wissenschaftlichen Ursachen des der LMAC Schädigung (Liquid Metal assisted Cracking) zugrundeliegenden Mechanismus' liegen bisher lediglich theoretische Beschreibungen vor. Eine der Hypothesen geht bei der Ursache des Eindringens des Zinks entlang der Korngrenzen des Werkstoffs von einer elektrochemischen Auflösung des Grundmaterials aus [19], was heute allerdings als unwahrscheinlich angesehen wird. Die derzeitigen Hypothesen gehen von einem diffusionsgesteuerten Mechanismus aus. Dabei wird der Gefügezusammenhalt erheblich geschwächt und in Verbindung mit einer Zugspannung schließlich ein Riss ausgelöst. Ein Ansatz zu einer mathematischen Beschreibung dieser Schädigung wird in [20] gegeben. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um einen rein theoretischen Ansatz handelt, der bisher nicht überprüft wurde und der das Zusammenspiel der Diffusion mit einer Zugspannung unberücksichtigt lässt.

Ein anderer Aspekt der Rissentstehung wird in [21] dargelegt. Demnach bilden sich an den Korngrenzen unter Beteiligung oberflächenaktiver Elemente -z.B. aus (legierter) Zinkschmelze-, niedrigschmelzende Phasen, bestehend aus Elementen aus der Zinkschmelze und aus dem zu verzinkenden Grundmaterial. Die Festigkeit des Kornverbandes wird dadurch erheblich herabgesetzt, sodass es letztendlich zu interkristallinen Trennungen kommt (Rehbinder Effekt). Die bedingt durch den Abkühlprozess entstehenden Zugspannungen fördern ebenfalls die adsorptive Wanderung der die Korngrenzen schädigenden Elemente [21]. Nach Bild 95 hängt die Rissentstehung allgemein von der zur Verfügung stehenden Menge der flüssigen (oberflächenaktiven) Substanzen ab sowie deren Verteilung und Erstarrungstemperatur auf der Kornoberfläche. Rissbegünstigend wirken sich dabei speziell die Substanzen aus, die sich als dünner benetzender Film über die (innere) Oberfläche der Kristalle ausbreiten (Bild 1, Teilbild a). Im Vergleich dazu können viskosere Flüssigkeiten mit einem geringeren Benetzungsgrad und höheren Erstarrungstemperaturen bereits vorhandene Werkstofftrennungen ausfüllen (Bild 1 Mitte), ohne dabei ein weiteres Risswachstum zu verursachen (Bild 1, Teilbild b). Eine Benetzung der Kristalle findet hier nicht statt.

Eine weitere Theorie zum Schädigungsmechanismus wird in [22] aufgestellt. Demnach werden absorbierte Atome der Zinkschmelze an der Oberfläche des mit Flüssigmetall umgebenden Werkstoffs gelöst und dringen entlang den aufgrund einer Zugbeanspruchung gedehnten Korngrenzen in den Werkstoff ein. Die Duktilität des Materials wird dabei lokal reduziert und Gleitvorgänge im Metallgitter erschwert. Die Überschreitung einer kritischen Konzentration von Flüssigmetall in einem gewissen Tiefenbereich löst schließlich den interkristallinen Anriss im Bauteil aus. Ausgangspunkt ist dabei die Spitze eines Versetzungsstaus, der sich unter anderem an Hindernissen wie z.B. an Korngrenzen bildet. Korngrenzen sind für Versetzungen nicht durchdringbar, weswegen hier die Spannungen bezogen auf die durch die absorbierten Atome der Zinkschmelze reduzierte Duktilität des Materials überkritisch werden können [22] (Bild 96).

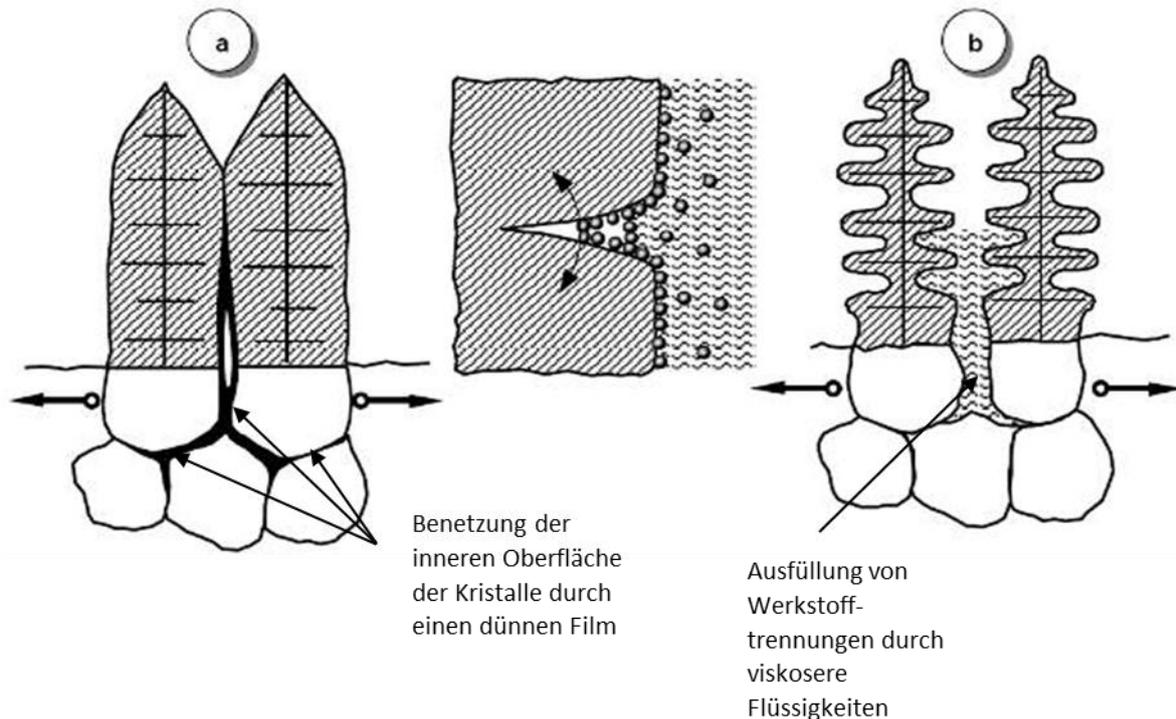


Bild 95: Zur Rissentstehung durch oberflächenaktive Elemente [21]

In [23], [24] wird ein in etwa vergleichbarer Ansatz einer Erklärung geliefert. Nach Darstellung der Autoren wird die Oberflächenenergie durch das flüssige Metall lokal verringert und in Verbindung mit einer Zugspannung das Grundmaterial auf atomarer Ebene aufgebrochen. Das nachfließende Flüssigmetall ist somit in der Lage, die nächste Atomlage aufzubrechen, wodurch sich ein wiederkehrender Prozess einstellt. Das Grundmaterial wird durch das flüssige Metall fortlaufend geschädigt, wobei die durch den Riss bedingte Kerbwirkung zusätzlich rissbegünstigend wirkt.

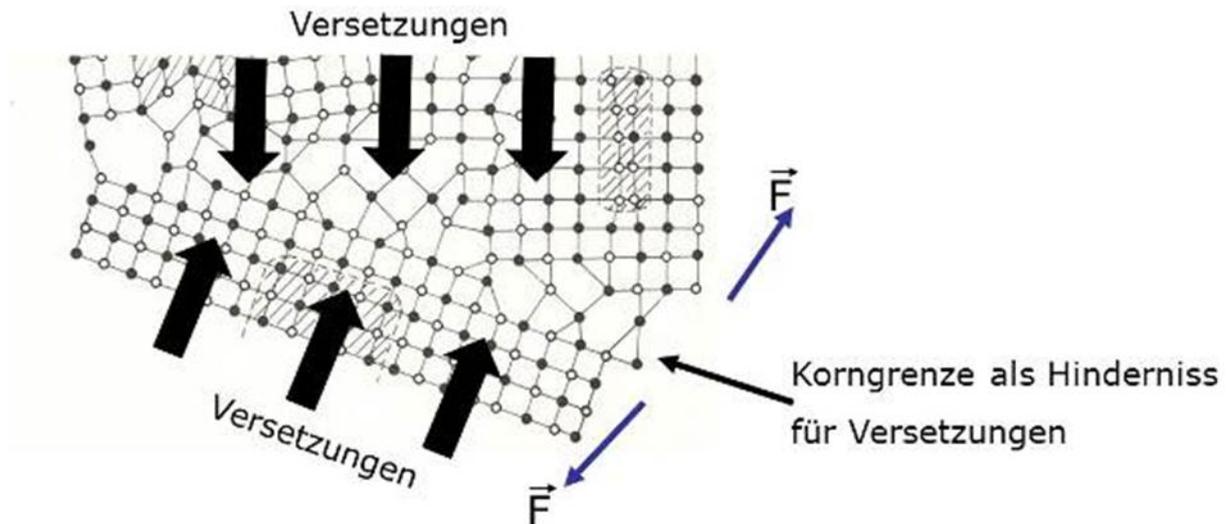


Bild 96: Zum Versetzungsstau an einer Korngrenze [22]

Eine negative Wirkung von (Normaltemperatur-) Zinküberzügen auf die Ermüdungsfestigkeit von Schrauben wurde in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen [25], [26], [27], [28], [29]. Im direkten Vergleich zwischen unverzinkten und feuerverzinkten Proben (und Schrauben) liegt die Dauerfestigkeit im feuerverzinkten Zustand signifikant (je nach Schichtdicke bis zu 50% nach [25]) unterhalb der Dauerfestigkeit der unverzinkten Proben. Die Ursachen der negativen Wirkung der Normaltemperaturverzinkung lassen sich nach [28] auf die spröde Eisen-Zink-Legierungsschicht zurückführen und nach [26] insbesondere auf Schwindungsrisse innerhalb der δ_1 - und ζ -Phase des Zinküberzugs, die bei Belastung eine mikrokerbbedingte Spannungsüberhöhung im Grundwerkstoff verursachen und somit Auslöser einer verfrühten Ermüdungsrissinitiierung sind. Bild 97 zeigt den Ablauf der verfrühten Ermüdungsrissinitiierung schematisch.

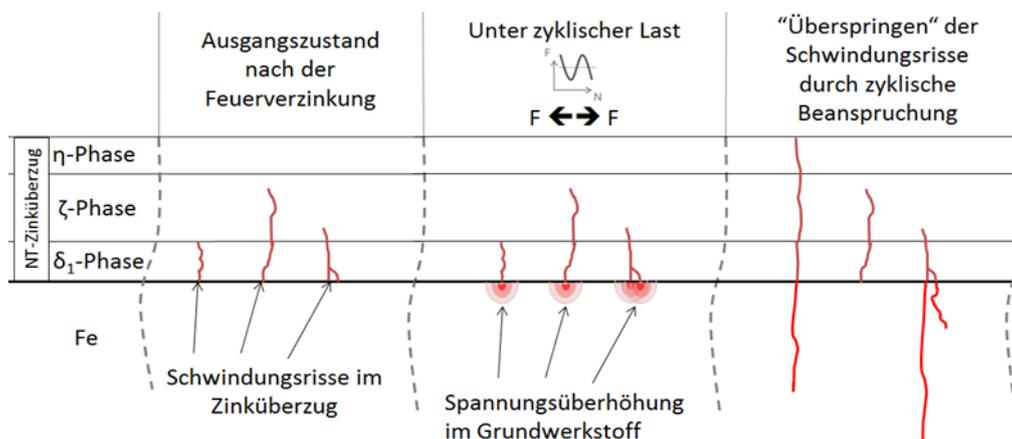


Bild 97: Schematische Darstellung der Ermüdungsrissinitiierung bei feuerverzinkten Bauteilen [29]

In Bezug auf die Anwendung von Betonstahl lässt die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-1.4-165 nur eine Ausnutzung des Kennwertes der Ermüdungsfestigkeit von derzeit 75% zu [2].

3.4.1 Untersuchungsmethoden

LMAC-Rissempfindlichkeit

Für die experimentelle Untersuchung in diesem Versuchsteil kommen Zeitstandversuche zum Einsatz, die über das Traversen-Zeitdiagramm (Zeitstandversuch) ausgewertet werden [3], [4]. Die Vor- und Nachteile der Versuchsart sind im Bild 98 dargestellt.

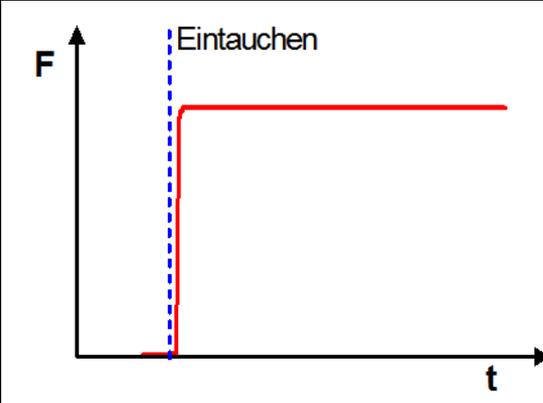
Versuchsart	Kraft-Zeitverlauf	Vorteile	Nachteile
Zeitstandversuch -Konstante Spannung (Kraft) -Stationäre Phase des Verzinkungsprozesses	 <p>Parameter: Nennspannung Ergebnis: Tauchdauer bis zum Versagen</p>	-Definierter Nullpunkt für die Wegmessung -Keine Lastspitze beim Tauchen -Gute Indikation (Zunahme der Weggeschwindigkeit) -Trennung der Einflussgrößen Zeit und Belastung	-Kraftregelung erforderlich

Bild 98: Merkmale des Zeitstandversuchs

Für eine detailliertere Beschreibung des Zeitstandversuchs siehe [3], [4], [9]. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist analog zu der zuvor beschriebenen. Analog zu oben wird zunächst eine Vorlast von 20N für 30sec angefahren um Spiel in der Probenaufhängung auszugleichen und um Wärmedehnungen abzufangen. Danach startet der eigentliche Versuch in Kraftsteuerung (Zeitstandversuch).

Dauerschwingversuche

Es wurden um 180° gebogene Schlaufen hergestellt und hinsichtlich der Verfahrenswege A und B vergleichend zum unverzinkten Zustand im Dauerschwingversuch bei $R = -1$ geprüft. Die Prüffrequenz lag durchgehend bei rund 16Hz bei in Abhängigkeit vom Verfahrensweg unterschiedlichen Lasthorizonten. Pro Lasthorizont wurden mindestens 3 Proben geprüft. Eine beispielhafte Aufnahme der Prüfeinrichtung zeigt Bild 99. Die Auswertung erfolgte über Wöhlerkurven.

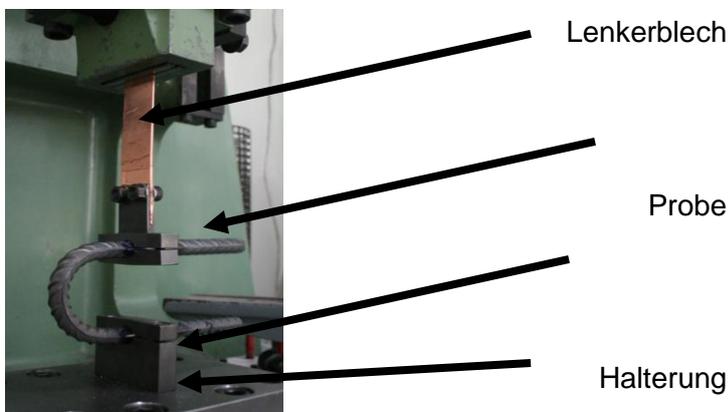


Bild 99: Beispielhafte Darstellung der Prüfeinrichtung für die Dauerschwingversuche

3.4.2 Angabe des Umfangs einer evtl. Abminderung der Dauerfestigkeit des Betonstahls durch eine Feuerverzinkung einschließlich Quantifizierung der verformungs- bzw. verzinkungsbedingten Randdefekte und ihrer Auswirkung auf die Schwingfestigkeitseigenschaften

Es wurden bei Raumtemperatur um 180° gebogene Schlaufen des Werkstoffs QT 10 mm verwendet und im Dauerschwingversuch in den Verfahrenswegen A - B - unverzinkt, unter identischen Versuchsbedingungen vergleichend geprüft. Die Ergebnisse der Dauerschwingversuche sind als Wöhlerkurven in Bild 100 bis Bild 102 gezeigt.

Grundsätzlich liegen die Ergebnisse auf einem vergleichbaren Niveau. Bei genauerer Betrachtung werden geringfügige Unterschiede deutlich. So beträgt die Dauerfestigkeitsspannung $\delta_b 50\%$ für die unverzinkte Variante 168 MPa, für den Weg A 189 MPa und für den Weg B 191 MPa. Eine Reduktion der Dauerfestigkeit der nach dem Weg B hergestellten Proben im Vergleich zu den nach dem Weg A hergestellten Proben ist nicht erkennbar.

Eine Erklärung könnte der durch die Verzinkung bedingte Abbau von Eigenspannungen sein [9], der durch die Untersuchungen im Abschnitt 3.2.4 bestätigt wurde. Hier zeigt sich bei nach dem Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) im Vergleich zu unverzinkten oder zum Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) geprüften Proben eine signifikante Reduktion der Eigenspannungen ab. Bedingt durch den hohen Wärmeeintrag werden die Zugeigenspannungen beim Verzinken abgebaut, sodass Risse zwar vorhanden sein könnten, durch die reduzierten Zugeigenspannungen im Biegeinnenradius jedoch nicht in dem Ausmaß zur Geltung kommen, wie man es vermuten würde.

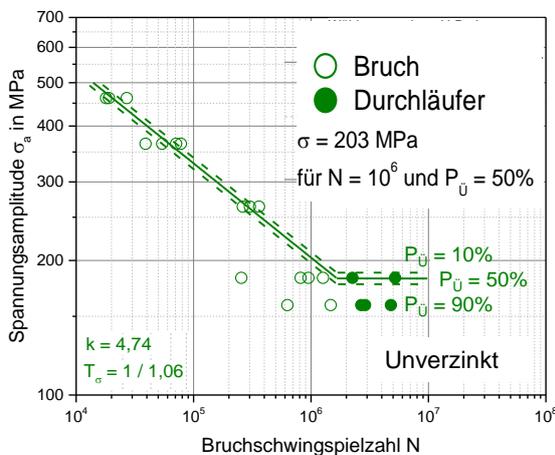


Bild 100: Wöhlerkurve der unverzinkten Proben (Schlaufen)

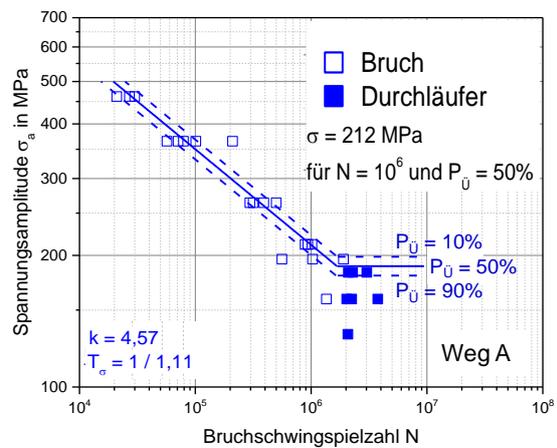


Bild 101: Wöhlerkurve der nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) verzinkten Proben (Schlaufen)

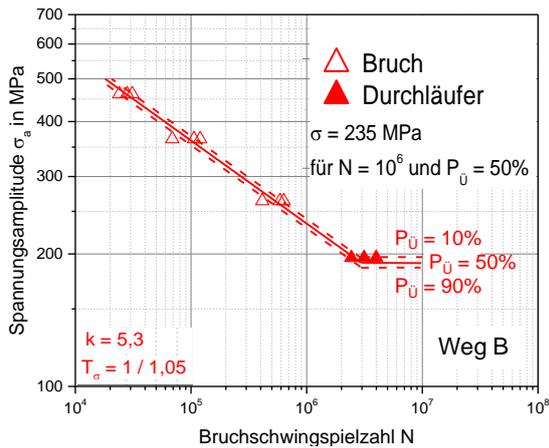


Bild 102: Wöhlerkurve der nach Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) verzinkten Proben



Bild 103: Metallografische Befunde von Durchläufern, unverzinkt und verzinkt nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen)

Gestützt wird diese Hypothese durch metallografische Untersuchungen an Durchläufern. In Bild 103 bis Bild 105 sind beispielhafte Ergebnisse vergleichend dargestellt. Die Risse in den Proben aus dem Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) sind gleich stark ausgeprägt wie die bei identischem Belastungshorizont geprüften unverzinkten Proben (Bild 103). Die Risse der mit dem Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) hergestellten Proben sind -bei einem etwas höheren Belastungshorizont- deutlich tiefer. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass auch hier alle Risse vom Rippenfuß ausgehen (Bild 103). Bruchflächenuntersuchungen im Rasterelektronenmikroskop zeigten typische Merkmale von Ermüdungsbrüchen (siehe Anlage 2).

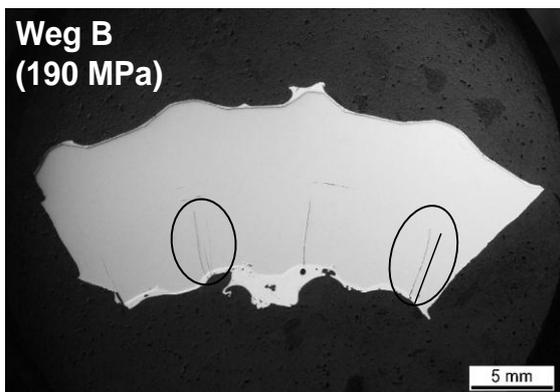


Bild 104: Metallografische Befunde von Durchläufern, unverzinkt und verzinkt nach Verfahrensweg B

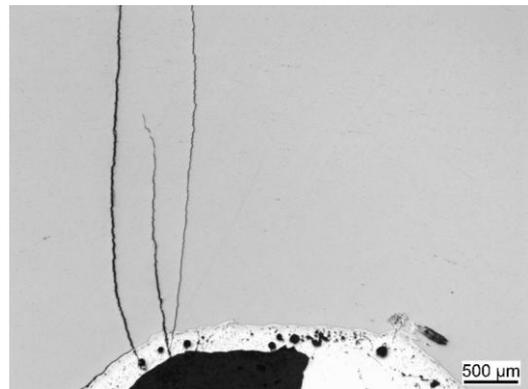


Bild 105: Detail aus Bild 78

Unter Berücksichtigung der metallografischen Befunde sowie der zuvor diskutierten Reduktion der Zugeigenspannungen beim Verzinken, ist eine Abminderung der Dauerfestigkeit im Verfahrensweg B

(Biegen – Verzinken) gegenüber den Proben aus dem Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) und den unverzinkten, -werkstoffunabhängig- nicht zu erwarten.

Zusammenfassend lässt sich eine Kombination aus Zugeigenspannungen in Verbindung mit herstellungsbedingten Kerben als Rissinitiierungspunkte an den Rippenfüßen als Ursache für die Risse ausmachen. Der Einfluss der genannten Effekte auf die Dauerschwingfestigkeit ist größer als der Einfluss der Verzinkung. Hinsichtlich der Wöhlerkurven ist unter Berücksichtigung der gewählten Versuchsführung, der Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) unkritisch. Bei nicht gebogenem Betonstahl lässt sich bei verzinkten Proben hingegen werkstoffunabhängig eine Reduktion der Dauerfestigkeit gegenüber den unverzinkten feststellen. Bei vergleichbarem Lasthorizont erreichten die feuerverzinkten Proben weniger Lastspiele (siehe hierzu 3.1.9).

3.4.3 Bewertung des Risikopotenzials und Ableitung der Anwendungsgrenzen in Bezug auf eine flüssigmetallinduzierte Rissbildung in Abhängigkeit von den Biegeparametern (Biegeradius, Biegewinkel, Biegetemperatur, Biegegeschwindigkeit), dem Stabdurchmesser und dem Herstellverfahren

In Bezug auf die Rissemempfindlichkeit sind bei den Verfahrenswegen A und B unterschiedliche Vorgehensweisen gewählt worden:

Da eine LMAC Rissbildung im Verfahrensweg A nicht möglich ist, wurden hier jeweils drei verzinkte Proben des Werkstoffs QT 10mm mit 22mm, 30mm und 40mm Rollendurchmesser gebogen und auf Risse auf der Biegeaußenseite hin untersucht. Im Anschluss wurden die Proben zurückgebogen und auf Risse in der Biegeinnenseite untersucht. Zur Untersuchung wurden die Proben durch Beizen in inhibierter Salzsäure entzinkt.

Im Verfahrensweg B wurden mit bei verschiedenen Rollendurchmessern (40mm und 50mm) gebogene Betonstahlproben des Werkstoffs QT 10mm Zeitstandversuche (detaillierte Beschreibung in [3], [4], [9]) in einer Zinkschmelze der Klasse 1 bei 450 °C durchgeführt und die Proben im Anschluss zurückgebogen. Die Prüfung auf Risse erfolgte hier ausschließlich auf der Biegeinnenseite, weil es aufgrund der Zugeigenspannungen nur dort zur LMAC-Rissbildung kommen kann. Eine Übersicht der verwendeten Parameter ist in der Tabelle 19 gezeigt.

Tabelle 19: Parametervariation bei der Untersuchung der Verfahrenswege A und B

Verfahrensweg	Werkstoff	Biegerollendurchmesser	Rückbiegen	Befund
A	QT 10mm	22mm, 30mm, 40mm	20°, 70°	Biegeaußenseite, Biegeinnenseite
B		40mm, 50mm	20°	Biegeinnenseite

Verfahrensweg A

Die Ergebnisse der makroskopischen Befunde sind in der Tabelle 20 dargestellt. Dargestellt sind hier die Einzelergebnisse. Als bei beiden Rückbiegewinkeln (20° und 70°) zuverlässig rissfrei hat sich die Variante mit dem Rollendurchmesser von 40 mm herausgestellt (Bild 106). Die Proben der restlichen Versuchsserien wiesen zum Teil klaffende Risse auf.

Tabelle 20: Rissverhalten in Abhängigkeit vom Biegerollendurchmesser, Werkstoff QT 10

Probe	Biegerollendurchmesser [mm]	Schlaufen(Biegewinkel 180°) Biegeaußenseite bei Hinbiegen		Rückbiegen (entzinkt), Biegeinnenseite (Grundmaterial)	
		Zinkschicht	Grundmaterial (entzinkt)	Rückbiegen (20°)	Geradebiegen
4.1	40	X	✓	✓	✓
4.2			✓	✓	✓
4.3			✓ (OfI.-defekt)	✓	✓
3.1	30	X	✓	✓	X
3.2			✓ (OfI.-defekt)	X	X
3.3			✓	✓	✓
2.1	20	X	✓	X	X
2.2			✓	X	X
2.3			✓	X	X

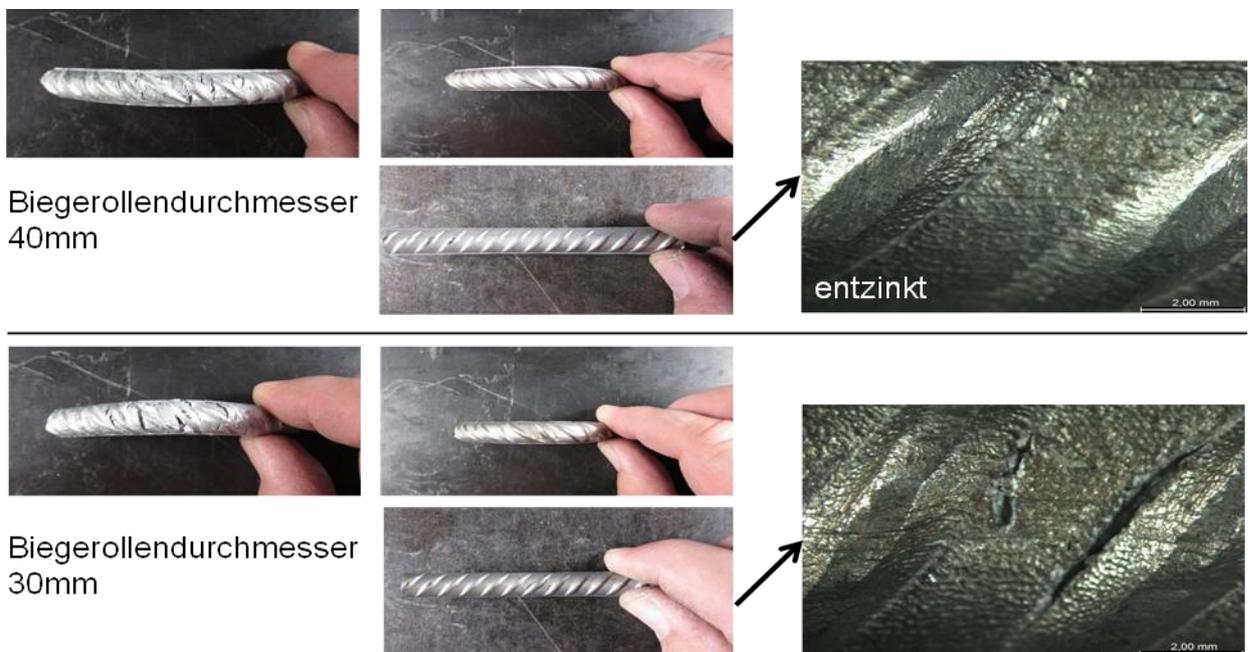


Bild 106: Rissverhalten in Abhängigkeit vom Biegerollendurchmesser, Werkstoff QT 10 verzinkt

Verfahrensweg B

Es wurden jeweils acht Proben mit 0MPa (lastfreie Auslagerung) 50 MPa, 100 MPa und 200 MPa im Zeitstandversuch in der Zinkschmelze für die typische Verzinkungsdauer von rund 15 Minuten geprüft. Hintergrund der Untersuchungen ist die Fragestellung, ab welcher zusätzlichen Beanspruchung sich ein Risswachstum einstellt. Mittels lichtmikroskopischer Untersuchungen an Längsschliffen wurde anschließend überprüft, ob und wie ausgeprägt sich Risse ausbilden. Aus den Ergebnissen aus 3.2.7 und den dort durchgeführten Zugversuchen ist ein linear-elastischer Bereich bis rund 200MPa erkennbar. Für die hier durchgeführten Versuche bedeutet die Wahl der Vorbelastungen daher bei Versuchsende (und Entlastung) eine Rückfederung der Proben bis idealerweise in die Ausgangsposition.

Im Bild 107 sind die Ergebnisse der Zeitstandversuche der mit 200 MPa und mit 100 MPa zusätzlich belasteten Probe beispielhaft gezeigt. Alle Kurven haben durchgängig eine Krümmung, eine Rissbildung ist aus den Kurvenverläufen nicht ersichtlich. Bei den mit 200 MPa zusätzlich beaufschlagten Proben zeigt sich ein Kriecheinfluss, bedingt durch die Wärmeeinwirkung und der im Versuch gewählten Belastungsstufe. Bei den mit 100 MPa beaufschlagten Proben zeichnet sich ein Gleichgewicht zwischen von außen anliegender Nennspannung und wirkenden Rückstellkräften in der Probe ab. Die Aufweitung bleibt ab einem bestimmten Punkt zeitlich konstant. Hinsichtlich ihres Kurvenverlaufs gibt es zwischen den mit 40mm und mit den 50mm Rollendurchmesser gebogenen Proben keine signifikanten Unterschiede bei den durchgeführten Versuchen.

Je vier Proben verblieben zu metallografischen Untersuchungen bei der Forschungsstelle 2, mit den restlichen Proben wurden an der Forschungsstelle 1 Rückbiegeversuche bis 20° nach DIN 488-1 durchgeführt und im Anschluss von der Forschungsstelle 2 metallografisch untersucht. Die makroskopischen Befunde der Rückbiegeversuche sind in der Tabelle 21 dargestellt.

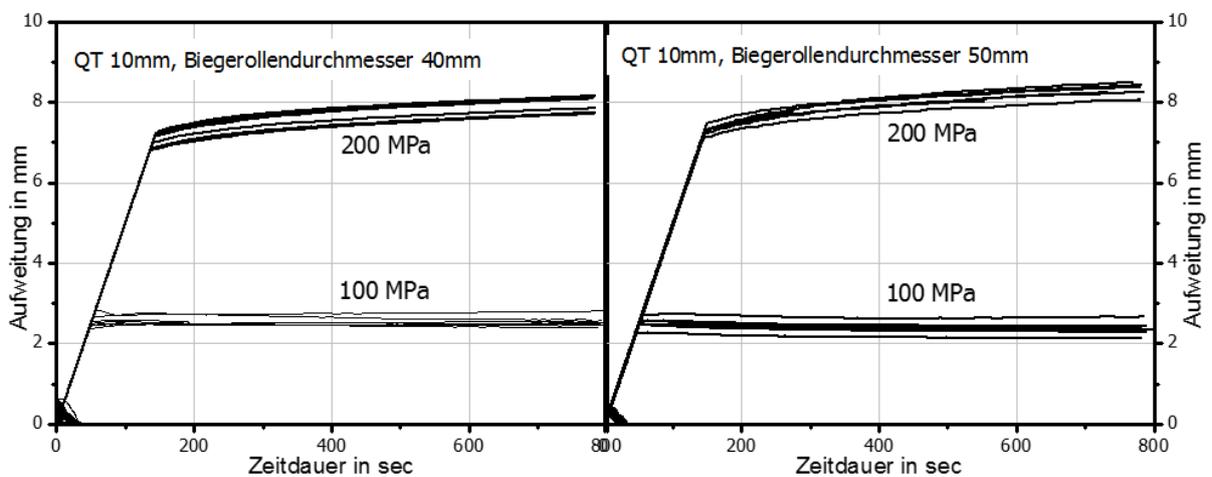


Bild 107: Beispielhafte Kurven aus den Zeitstandversuchen

Tabelle 21: Rissbildungen auf der Biegeinnenseite nach dem Rückbiegen um 20°, Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken)

Rollendurchmesser	Probe	Beanspruchung in der Zinkschmelze			
		200 MPa	100 MPa	50 MPa	0 MPa
40 mm	1	✓	✓	✓	
	2	X	✓	✓	✓
	3	X	X	X	X
	4	✓	X	Durchbruch ¹⁾	X
50 mm	1	X	✓	X	✓
	2	X	X	X	✓
	3	X	✓	✓	
	4	X	X	X	✓

1) Die Probe hatte während des Versuchs nachweislich eine Überlast erfahren und ist somit nicht zu berücksichtigen

In Bezug auf die metallografischen Befunde ist festzustellen, dass nahezu alle untersuchten Proben vor dem Rückbiegen vom Rippenfuß ausgehende, beginnende LMAC Schädigungen aufweisen. Nach dem Rückbiegen sind die Schädigungen durch die dabei einwirkende mechanische Beanspruchung tendenziell stärker ausgeprägt, verlaufen jedoch -bis auf einen Fall (d=40 mm, 50 MPa, Probe 4)- nur wenige Millimeter ins Grundmaterial. Beispielhafte metallografische Ergebnisse zeigen Bild 108 und Bild 109. Insbesondere aus dem linken Teilbild geht hervor, dass die Risse im Fuß der Rippe beginnen

und nach dem Zurückbiegen (rechtes Teilbild) deutlich stärker aufgeweitet sind. Alle metallografischen Befunde von vor und nach dem Rückbiegen untersuchten Proben sind im Anlage 2 zu finden.

Für die oben beschriebenen Versuche wird somit eine Diskrepanz zwischen den experimentellen Versuchskurven und den metallografischen Auswertungen deutlich. Aus den Belastungskurven zeigen sich bei allen Proben unabhängig von Biegerollendurchmesser und zusätzlich beaufschlagter Beanspruchung im Vergleich zu den zuvor beschriebenen metallografischen Befunden, keine Anzeichen von Rissen. Bis auf eine Ausnahme konnten alle in dem Versuchsteil geprüften Proben zurückgebogen werden, sodass der Rückbiegeversuch nach DIN ISO 15630-1 durchgeführt werden konnte.

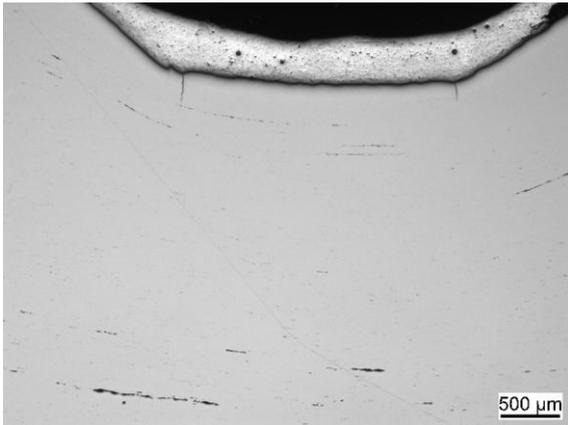


Bild 108: Werkstoff QT 10, $d_{Br} = 50 \text{ mm}$, $\sigma_{nenn} = 50 \text{ MPa}$, beispielhafte Risse vor dem Rückbiegen (20°)

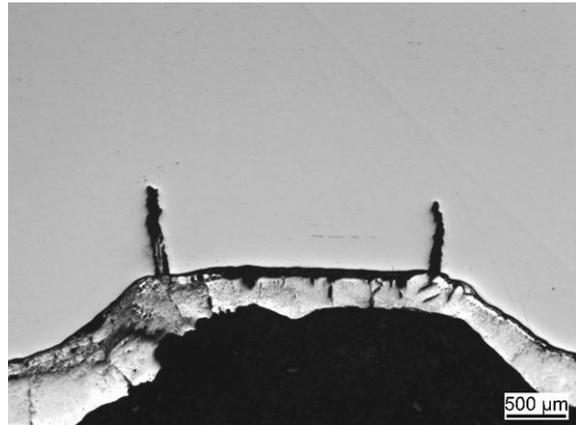


Bild 109: Werkstoff QT 10, $d_{Br} = 50 \text{ mm}$, $\sigma_{nenn} = 50 \text{ MPa}$, beispielhafte Risse nach dem Rückbiegen (20°)

Als Konsequenz aus den Befunden wurde in enger Abstimmung mit der Forschungsstelle 1 für die Dauerschwingversuche im Abschnitt 3.4.3, Proben des bei Raumtemperatur gebogenen Werkstoffs QT 10 mm vorgeschlagen. Sowohl für den Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) als auch für den Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) wurde im Vergleich zum unverzinkten Zustand (als Referenz) der Biegerollenradius 40 mm als unterste Grenze für eine funktionierende Verzinkung nach Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) identifiziert.

3.4.4 Identifizierung notwendiger Prüfverfahren und des Prüfumfangs für die Konformitätskontrolle

Die Bestätigung der Übereinstimmung feuerverzinkter Betonstähle mit den Bestimmungen der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung muss nach [2] für jedes Herstellwerk mit einem Übereinstimmungszertifikat auf der Grundlage einer werkseigenen Produktionskontrolle und einer regelmäßigen Fremdüberwachung einschließlich einer Erstprüfung des Erzeugnisses nach Maßgabe der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung erfolgen.

Werkseigene Produktionskontrolle:

Im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) sind am Vormaterial der Lieferschein und der Verwendungszweck und am feuerverzinkten Betonstahl (Bauprodukt) die Oberflächenbeschaffenheit (Sichtprüfung), die Zinkschichtdicke, die Einhaltung der Spezifikation Feuerverzinken IFG-FV 2014 zu prüfen.

Darüber hinaus ist die Prüfung der Dauerschwingfestigkeit vorgesehen, falls der Stahl für nicht vorwiegend ruhende Belastung verwendet werden soll.

Die Prüfung der Dauerschwingfestigkeit von Stabstählen und Ringmaterial nach DIN 488-6 wird bereits bei der Betonstahlherstellung im Rahmen der Erstprüfung auf den Lasthorizonten 175 MPa und 200 MPa und im Rahmen der Fremdüberwachung auf dem Lasthorizont 175 MPa geprüft.

Der Weiterverarbeiter (Biegebetrieb) muss die Dauerschwingfestigkeit weder bei der Erstprüfung noch bei der werkseigenen Produktionskontrolle sondern nur im Rahmen der Fremdüberwachung auf dem Lasthorizont 175 MPa nachweisen.

In der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für verzinkte Betonstähle wird eine Abminderung der Dauerschwingfestigkeit um 25 % vorgegeben. Das bedeutet, dass die für unverzinkte Betonstabstähle im Eurocode 2 vorgegebene Schwingbreite von 175 MPa auf $0,75 * 175 \text{ MPa} = 131,25 \text{ MPa}$ abgemindert wird. Ein Versagen der Probe darf bei der Prüfung frühestens nach $2 * 10^6$ Lastspielen erfolgen.

Mit feuerverzinkten Betonstählen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes Dauerschwingversuche an gebogenen unverzinkten sowie nach den Verfahrenswegen A und B verzinkten Proben aus Werkstoff QT 10 und darüber hinaus an ungebogenen, unverzinkten und nach Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) verzinkten Proben aus den Werkstoffen QT 10 und KR 10 jeweils mit einem Durchmesser von 10 mm durchgeführt.

Die Dauerschwingversuche an ungebogenen und verzinkten Proben des Werkstoffs QT 10 zeigten bei dem Lasthorizont von 175 MPa nur Durchläufer. Diese Proben erfüllten somit auch die Anforderungen, die für unverzinkte Stähle nach DIN 488 im Rahmen der Fremdüberwachung des Weiterverarbeiters gefordert werden.

Bei den ungebogenen und verzinkten Proben aus KR 10 versagten auf dem Lasthorizont 175 MPa 3 von 5 Proben bei einer Schwingspielzahl von ca. $1,1 * 10^6$ während 2 Proben bei ca. $9,2 * 10^5$ Lastspielen versagten.

Die für unverzinkte Stabstähle bei der Erstprüfung auf dem Lasthorizont 200 MPa geforderte Grenzlastspielzahl von $2 * 10^6$ wurde von den verzinkten Stählen nicht erreicht.

Bei ungebogenem und feuerverzinktem Betonstahl lässt sich werkstoffabhängig eine Reduktion der Dauerfestigkeit gegenüber dem unverzinkten Stahl feststellen. Bei vergleichbarem Lasthorizont erreichten die feuerverzinkten Proben weniger Lastspiele. Hier werden für beide Werkstoffe die Anforderungen nach der in der Norm vorgesehenen 25%-igen Abminderung erreicht.

Dies wird durch die vom Institut Feuerverzinken der Forschungsstelle 1 zur Auswertung vorgelegten vollzähligen Fremdüberwachungsberichte aus dem Zeitraum 2008 bis 2016 bestätigt.

Die Versuche an den gebogenen Proben ergaben zudem keine Abminderung der Dauerschwingfestigkeit für die verzinkten (insbesondere die nach Verfahrensweg B verzinkten Proben) Proben in den gebogenen Probenbereichen. Insbesondere bei Verfahrensweg B kann der Abbau von Zugeigenspannungen am Biegeinnenradius infolge des Verzinkungsprozesses eine Rolle spielen.

Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen und der durch die vorliegenden Fremdüberwachungsberichte dokumentierten Langzeiterfahrungen lässt sich die Empfehlung aussprechen, die Abminderung der Dauerschwingfestigkeit bei 75 % zu belassen, in diesem Fall aber auf die Durchführung von Dauerschwingversuchen im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle zu verzichten.

Die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen an Werkstoff QT 10 gewonnenen Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass eine Abminderung nicht in jedem Fall vorgenommen werden muss, da diese Proben dieselben Anforderungen erfüllten, wie sie im Rahmen der Fremdüberwachung unverzinkter Stähle bei der Weiterverarbeitung nachgewiesen werden müssen.

Aus diesem Grund wird empfohlen, die Ausnutzung der nicht reduzierten Dauerschwingfestigkeit in die Zulassung aufzunehmen, wenn die Voraussetzungen hierfür vor der Verwendung im Rahmen einer Verfahrensprüfung nachgewiesen werden.

Fremdüberwachung:

Im Rahmen der Fremdüberwachung (mindestens einmal jährlich) ist die werkseigene Produktionskontrolle zu überprüfen. Darüber hinaus sind die Oberflächenbeschaffenheit (Sichtprüfung), die Zinkschichtdicke und die bezogene Rippenfläche, die eingesetzte Zinkschmelze sowie die Dauerschwingfestigkeit zu prüfen. Darüber hinaus sind Zug- und Biegeversuche nach DIN EN ISO 15630-1 durchzuführen.

In Bezug auf die bezogene Rippenfläche zeigen die erzielten Ergebnisse, dass die bezogene Rippenfläche durch die Verzinkung abnimmt. Dieser Effekt, der auch in der Literatur [5] beschrieben wird, ist bei den untersuchten Ringmaterialien KR 10 und WR 14 am stärksten ausgeprägt. Die Zinkschichtdicken der untersuchten Proben liegen am oberen Rand des über die Zulassung abgedeckten Bereichs bzw. bereits darüber. Dennoch wird der geforderte Mindestwert der bezogenen Rippenfläche lediglich beim Werkstoff KR 10 nicht erreicht.

Die vom Institut Feuerverzinken der Forschungsstelle 1 zur Auswertung vorgelegten vollzähligen Fremdüberwachungsberichte aus dem Zeitraum 2008 bis 2016 lassen bezüglich der Einhaltung der bezogenen Rippenfläche keine Probleme erkennen. Dennoch sollte bei Ringmaterialien, die im Zuge der Weiterverarbeitung gerichtet werden, insbesondere bei kleinen Stabdurchmessern auf eine möglichst geringe Zinkschichtdicke und ein entsprechendes Vorhaltemaß am Ausgangsmaterial geachtet werden.

Die bezogene Rippenfläche ist im Rahmen der Fremdüberwachung weiterhin zu prüfen.

Bezüglich der geforderten Biegeversuche ist festzustellen, dass ein ausreichendes Biegeverhalten des Grundmaterials bereits im Rahmen der bei der Betonstahlherstellung und der Weiterverarbeitung erfolgenden Prüfungen hinlänglich belegt ist. Beim Biegen entstehende Rissbildungen in der Zinkschicht sind ggf. nach Maßgabe der bauaufsichtlichen Zulassung auszubessern.

Für die im Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) hergestellten Proben werden auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen Mindestbiegerollendurchmesser angegeben, die auch unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten eine ausreichende Sicherheit gegen Rissbildungen bieten. Soll im Zuge einer Baumaßnahme von diesen Vorgaben abgewichen werden, so ist die ausreichende Eignung des Materials vor Baubeginn mittels der im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Prüfungen (Rückbiegeversuche, Zugversuche) nachzuweisen.

Diese empfohlenen Mindestbiegerollendurchmesser liegen zudem mit einem Biegerollendurchmesser von $6 \times d_{St}$ bzw. $8 \times d_{St}$ über dem in den Dauerschwingversuchen an der Forschungsstelle 2 verwendeten Biegerollendurchmesser von $4 \times d_{St}$, so dass bei Verwendung dieser Biegerollendurchmesser eine Verschlechterung der Dauerschwingeneigenschaften in den gebogenen Bereichen nicht zu erwarten ist.

Nach den Vorgaben im Prüfplan der bauaufsichtlichen Zulassung werden im Rahmen der Fremdüberwachung Zugversuche im Umfang von mindestens 3 Proben je verzinktem Durchmesser je 10 t verzinktem Betonstahl gefordert.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine große Anzahl von Zug- und Biegeversuchen durchgeführt. Diese erbrachten den Nachweis, dass sich die verzinkten Betonstähle selbst bei Verarbeitung bei tiefen Temperaturen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften im Zugversuch und im Biegeversuch nicht schlechter verhalten als die unverzinkten.

Da bei allen Zugversuchen zur Kontrolle die Streck- bzw. Dehngrenze sowie die Gleichmaßdehnung bei Höchstlast im unverformten Randbereich mitgemessen wurden, steht eine ausreichende Werteanzahl für die Berechnung von 5%-Fraktilwerten zur Verfügung. Die Ergebnisse zeigen sowohl bei den für den Verfahrensweg A (Verzinken – Biegen) als auch den für Verfahrensweg B (Biegen – Verzinken) verzinkten Proben, dass die beide Werte sowie das Streckgrenzenverhältnis als 5%-Fraktilwert die nach DIN 488 geforderten Werte überschreiten.

Darüber hinaus weisen die vom Institut Feuerverzinken der Forschungsstelle 1 zur Auswertung vorgelegten vollzähligen Fremdüberwachungsberichte aus dem Zeitraum 2008 bis 2016 keinen Fall aus, in dem die Werte der DIN 488 nicht erreicht worden sind.

Der in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-1.4-165 vorgegebene Prüfumfang in Abhängigkeit von den Stabdurchmessern und der Tonnage erscheint hier deutlich zu hoch.

Auf der Grundlage der im Rahmen des Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse kann die Häufigkeit der Biege- und Zugversuche ungeachtet der verzinkten Tonnage lediglich auf 3 Proben je verzinktem Nenndurchmesser und Betonstahlsorte reduziert werden.

3.5 Korrosion, Korrosionsschutz und Passivierungsverhalten (Arbeitspakete 5, 6)

3.5.1 Probenauswahl und Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Korrosionsuntersuchungen zu den in Kapitel 2 aufgeführten Themenkomplexen durchgeführt. Nachfolgend werden die Ergebnisse zu den einzelnen Themenkomplexen dargestellt. Für die Korrosionsversuche in Mörtel wurden ausschließlich Tempcore Betonstähle mit 10 mm Durchmesser verwendet, für die Lösungsversuche wurden glatte S235 Stähle verwendet. Um die Korrosionseigenschaften des verzinkten Betonstahls verstehen zu können, wurden verschiedene Prüfverfahren eingesetzt. Mit Hilfe von elektrochemischen Untersuchungsmethoden lassen sich die charakteristischen Kennwerte ermitteln. Die begleitenden Untersuchungsmethoden, wie elektrochemische Charakterisierung des Elektrolytwiderstandes, dienen zur widerstandsfreien Berechnung der elektrochemischen Kennwerte. Für alle elektrochemischen Potentialmessungen wurde eine gesättigte Silber-Silberchlorid Bezugselektrode (Ag/AgCl sat.) verwendet. Das Potential der Ag/AgCl sat., gemessen gegen eine Standardwasserstoffelektrode [SHE], beträgt +197 mV.

3.5.1.1 Betonstahl

Für die Frischbetonversuche und die herzustellenden Mörtelprismen sind verschiedene verzinkte Betonstähle zum Einsatz gekommen. Bild 110 zeigt links den 10 cm langen und mit einem senkrechten Schweißdraht versehenen feuerverzinkten Betonstahl für die Herstellung der Frischbetonproben. Auf der rechten Seite von Bild 110 ist die Variante für Mörtelprismen abgebildet. Die Betonstähle für die Herstellung der Mörtelprismen haben eine Länge von 14 cm und sind mit einem Schweißdraht

versehen der im rechten Winkel von der Stirnseite des Betonstahls abgewinkelt wurde. Für beide Varianten sind vor dem Feuerverzinken 2 mm Schwarzstahlschweißdrähte mittels WIG-Schweißverfahren angeschweißt worden.



Bild 110: Betonstahlvarianten: links für die Herstellung von Frischbetonproben, rechts für die Herstellung von Mörtelprismen

Für die Lösungsversuche sind ungerippte Stähle mit einem Durchmesser von 1 cm und einer Länge von 10 cm verwendet worden.

In Tabelle 22 ist die Schmelzenzusammensetzung der verwendeten Zinkschmelze angegeben, die dargestellten Werte sind Mittelwerte aus 5 Einzelbestimmungen.

Tabelle 22: Schmelzenanalyse der verwendeten Zinkschmelze

Pb	Sn	Cd	Cu	Fe	Al	Ni	Bi	Zn	Summe
1,1933	0,0138	0,0007	0,0227	0,0410	0,0010	0,0010	0,0039	98,7217	99,9990

Die für den Feuerverzinkungsprozess relevanten Parameter sind vereinfacht in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Verzinkungsparameter

1. Saure Entfettung	4. Flussmittel	7. Temperatur der Zinkschmelze: 444 °C
2. Beizen o. Inhibitoren	5. Trocknung im Ofen	8. Kein Abblasen mit Luft
3. 2 x Spülen	6. Tauchdauer 10 Min	9. 140 -160 µm Schichtdicke

3.5.1.2 Herstellung Mörtelprobekörper

Die Herstellung der Mörtelprobekörper für die Laborversuche basiert auf der in Tabelle 24 aufgezeigten Betonzusammensetzung. Dabei wurde für die Frischbetonproben, für die Mörtelprismen und für die Mörtelchips die gleiche Rezeptur verwendet. Eine Besonderheit gilt für die Chips und für Mörtelprismen mit partiellem Chloridgehalt. Hier wurden die chloridhaltigen Bereiche gezielt mit einem Betonzusatzstoff rot pigmentiert.

Tabelle 24: Betonzusammensetzung und Mischanweisung für die Prismenherstellung

1. Betonzusammensetzung und Mischanweisung					
Stoffart		Zusammensetzung		Mischanweisung	
				1,5	1,5
				Einzelkomp.	additiv
Zementwerk:	Schwenk	kg/m ³		kg	kg
Zement	CEM I 42,5 R	605,8		0,91	0,91
Wasser (gesamt)		273		0,41	0,41
Wasser (wirksam)		272,9		---	---
Zuschlag (gesamt)		1304	%	1,96	1,96
0 / 0,3	<i>Quarzsand</i>				
0 / 0,5	<i>Okrilla</i>	385	30	0,58	0,58
0,5 / 1,0	<i>Okrilla</i>	237	18	0,36	0,94
1,0 / 2,0	<i>Okrilla</i>	267	21	0,40	1,34
2,0 / 4,0	<i>Okrilla</i>	415	32	0,62	1,96
Frischbeton		2183	--	3,28	3,28

Für die Versuche wurden ausschließlich Prismen mit einer Größe von 4 x 4 x 16 cm hergestellt. In Summe wurden 10 verschiedene Serien der Mörtelprismen hergestellt, diese sind in aufgeführt. Der angegebene Chloridgehalt versteht sich als Angabe in M.- % bezogen auf den Zementgehalt.

Tabelle 25: Varianten der hergestellten Mörtelprismen (Cl in M.- %)

Probenbezeichnung	Cl 0,2	Cl 0,4	Cl 1,0	Cl 2,0	Riss Cl 0	Cl 0
PMS Partiieller Cl-Gehalt und pigmentiert	X	X	X	X	-	-
OPMS Homogener Cl-Gehalt	X	X	X	X	-	-
OPOS und CARB	-	-	-	-	X	X

Von den chloridhaltigen Mörtelprismen wurden je Chloridgehalt 15 Proben in der Variante pigmentiert (partielle Chloridbeaufschlagung) und unpigmentiert (homogener Chloridgehalt über die gesamte Probenlänge) hergestellt. Von der Serie Riss wurden 24 und von der chloridfreien ungerissenen Serie 45 Proben hergestellt. In Bild 111 sind die verschiedenen Mörtelprismen-Serien dargestellt. Die pigmentierte Serie wurde ebenfalls mit 0,2, 0,4, 1,0 und 2,0 M.-% Cl hergestellt.

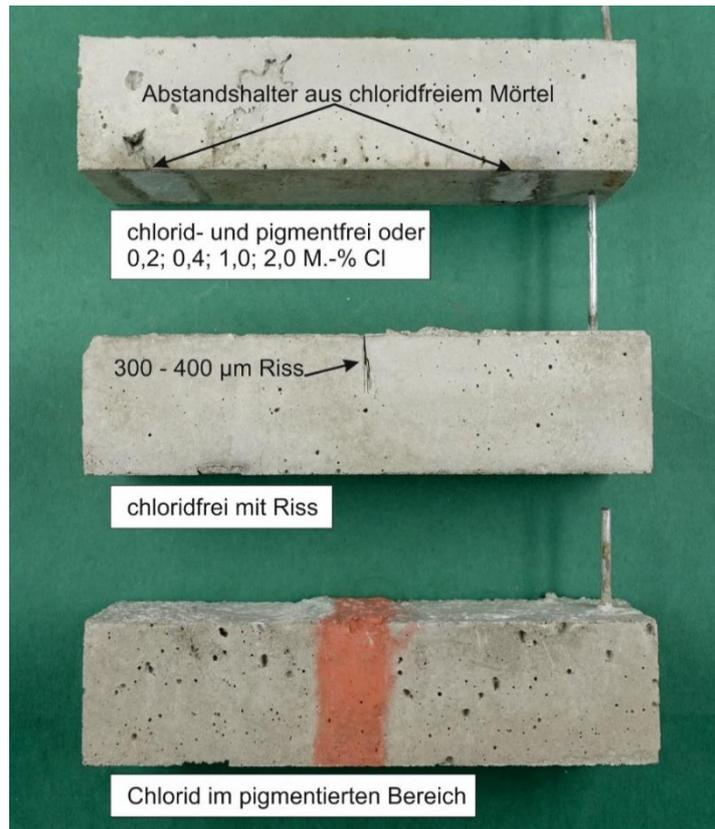


Bild 111: Darstellung der verschiedenen Mörtelprismen-Serien

Eine schematische Darstellung des Prismenaufbaus ist Bild 112 zu entnehmen. Der mit AE (Arbeits-
elektrode) bezeichnete Schweißdraht stellt die elektronenleitende Verbindung für die elektrochemi-
schen Messungen sicher. Die in Bild 111 und Bild 112 gezeigten Abstandshalter sind aus der gleichen
Mörtelzusammensetzung hergestellt worden wie der chloridfreie Mörtel. Der chloridhaltige, pigmen-
tierte Bereich wurde mit dem umgebenden chloridfreien Mörtel frisch in frisch betoniert. Hierzu
wurde eine 0,8 mm starke Schalung (Bild 113) mit einem Zwischenraum von 2cm eingesetzt und nach
dem Befüllen, während des Verdichtungsprozesses, entnommen.

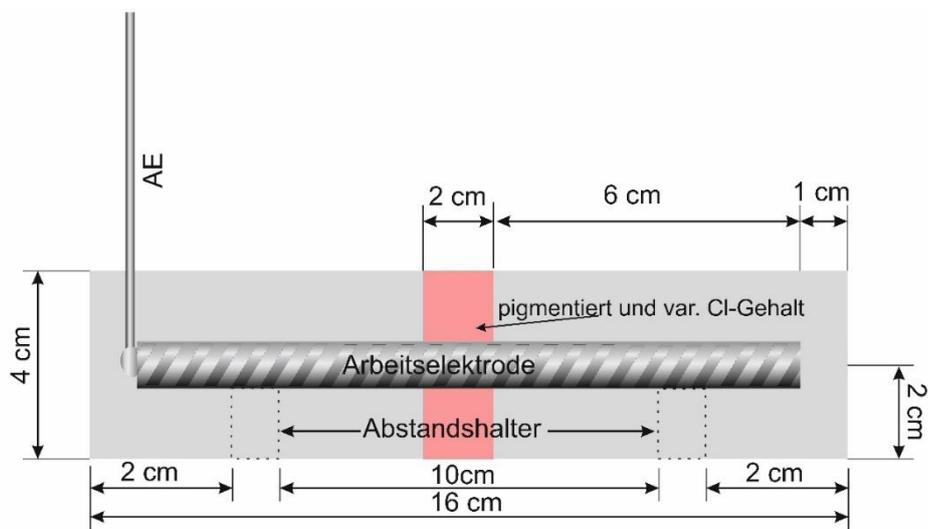


Bild 112: schematische Darstellung des Prismenaufbaus



Bild 113: Schalungsaufbau für die Herstellung der pigmentierten Mörtelprismen

Die Bezeichnung der Mörtelchips für die nachfolgend beschriebenen Elektrolytwiderstandsmessungen sind in Tabelle 26 aufgeführt. Um einen eventuellen Einfluss der Pigmentierung auf die Leitfähigkeit bzw. den Elektrolytwiderstand beschreiben zu können wurden zwei Serien mit variierenden Chloridgehalten hergestellt. Dabei wurde eine Serie pigmentiert, die andere nicht. Weiterhin wurde eine chloridfreie Serie mit Pigmenten versetzt.

Tabelle 26: Probenserien der Mörtel-Chips

Probenbezeichnung	Cl 0,2	Cl 0,4	Cl 1,0	Cl 2,0	Cl 0
Pigmentiert	PMS 0,2	PMS 0,4	PMS 1,0	PMS 2,0	POS
Ohne Pigmente	OPMS 0,2	OPMS 0,4	OPMS 1,0	OPMS 2,0	OPOS

Je Serie wurden 24 Chips hergestellt, in Summe ergibt das 240 Probekörper für die Bestimmung des Elektrolytwiderstandes.

Der Soll-Durchmesser der Proben beträgt dabei 50 mm und wurde für jede Probe an zwei Stellen gemessen, die Probendicke (soll = 20 mm) wurde an vier Stellen gemessen, siehe Messanordnung in Bild 114.

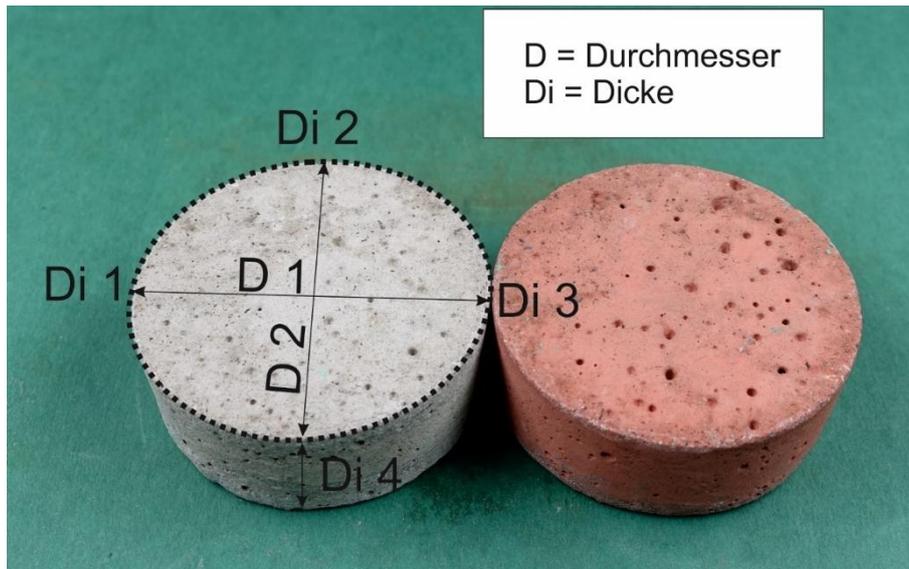


Bild 114: Mörtel-Chips links unpigmentiert mit schematischer Darstellung der Messpunkte; rechts pigmentierte Probe

3.5.1.3 Impedanzmessungen

Elektrochemische Impedanzmessungen wurden in Abhängigkeit von verschiedenen Frequenzen (100 Hz, 1 kHz, 10 kHz und 100 kHz) durchgeführt. Die Probenlagerung erfolgte bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 % und konstanter Temperatur von 20°C (± 2°C). Die angelegte Messspannung betrug 50 mV. Als Messgerät wurde ein Keysight E4980A Präzisions-PCR-Meter verwendet.

Die Ermittlung des spezifischen Elektrolytwiderstandes ρ in $\Omega \text{ cm}^2$ erfolgte nach Formel 1.

$$\rho = R * \frac{A}{L}$$

Formel 1

Mit:

$$\rho = \Omega \text{ cm}^2$$

$$R = \Omega$$

$$A = \text{cm}^2$$

$$L = \text{cm}$$

Die Ankopplung der Probekörper an die Elektrodenflächen erfolgte mittels einem chloridfreien Elektrolytgel. Der schematische Messaufbau sowie die simulierte Feldverteilung sind Bild 115 zu entnehmen. Hierbei wird deutlich, dass ein linearer Spannungsabfall über die Probenlänge erfolgt, der die Ermittlung des spezifischen Elektrolytwiderstandes ρ mittels Formel 1 ermöglicht.

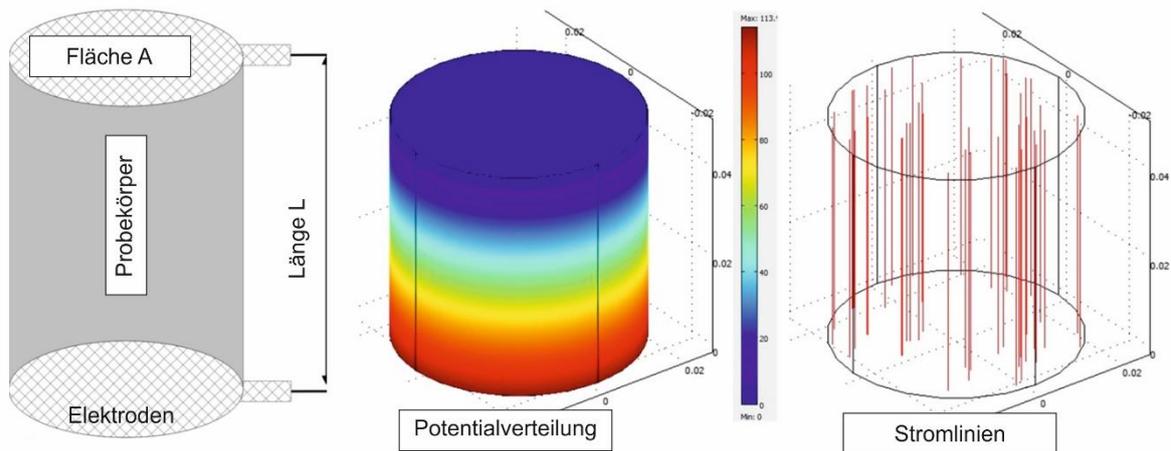


Bild 115: Schematische Darstellung des Messaufbaus für die Ermittlung des spezifischen Elektrolytwiderstandes sowie die simulierte Potential und Stromlinienverteilung während einer Messung

Für die grundlegende Betrachtung eines Makroelements ist die Ermittlung des spezifischen Elektrolytwiderstands, speziell bei variierenden Chloridgehalten, erforderlich. Die an den zuvor beschriebenen Mörtelchips ermittelten spezifischen Widerstände bei einem Probenalter von einem Jahr sind in Bild 116 dargestellt. Für die spätere Ermittlung des Geometriefaktors, zur Bestimmung des spezifischen Widerstands an Mörtelprismen, wurde die Serie POS ebenfalls nach einer 5 tägigen Wasserlagerung gemessen. Es ist deutlich zu erkennen das der Chloridgehalt bei Konstantklimalagerung einen signifikanten Einfluss auf den Widerstand hat. Weiterhin haben die pigmentierten und unpigmentierte Chips (Serie POS) einen vergleichbaren Widerstand. Der Geometriefaktor für die Mörtelchips wurde gemäß Formel 1 ermittelt und beträgt im Mittel 0,102141031 m.

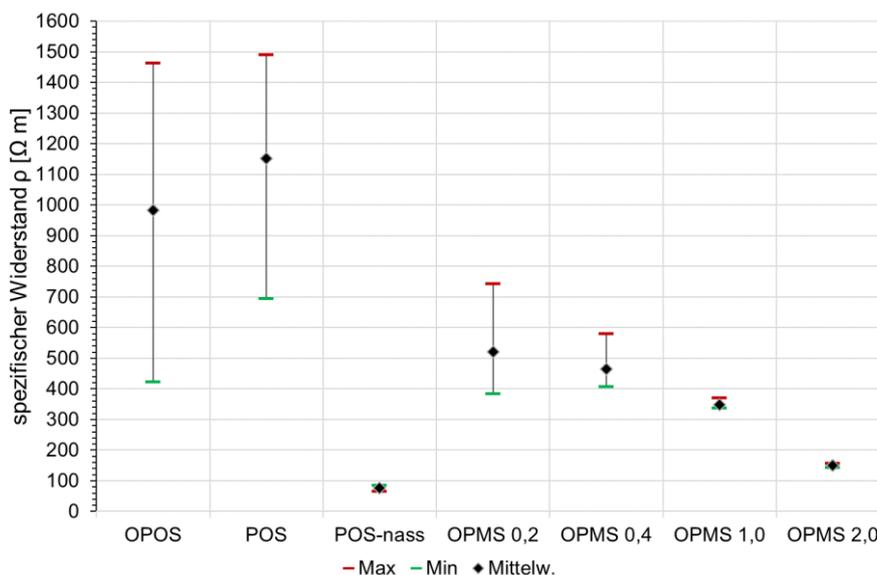


Bild 116: spezifischer Elektrolytwiderstand der verschiedenen Mörtel / Probenalter 12 Monate

Der Spezifischer Widerstand der Mörtelprismen wird durch Verwendung eines Geometriefaktors Kappa ermittelt. Der Geometriefaktor Kappa, errechnet sich aus gemessenem Widerstand des Mörtelprismas geteilt durch den spezifischen Widerstand des Mörtelchips (gleicher Mörtel und Alter) in wassergesättigtem Zustand, siehe Formel 2. Der Geometriefaktor K beträgt im Mittel 0,427282787 m.

$$K = \frac{\rho_{Chip} [\Omega m]}{R_{Prisma} [\Omega]}$$

Formel 2

In Bild117 sind die spezifischen Widerstände der Mörtelprismen mit variierenden Chloridgehalten dargestellt. Die Widerstände wurden im wassergesättigten Zustand erfasst. Im Vergleich zu den an den Mörtelchips ermittelten spezifischen Widerständen unter Konstantklimalagerung zeichnet sich hier kein signifikanter Einfluss des Chloridgehaltes ab. Daraus resultiert das in wassergesättigten Betonen der Chloridgehalt keinen signifikanten Einfluss auf den Widerstand und somit auf die Makroelementverteilung hat.

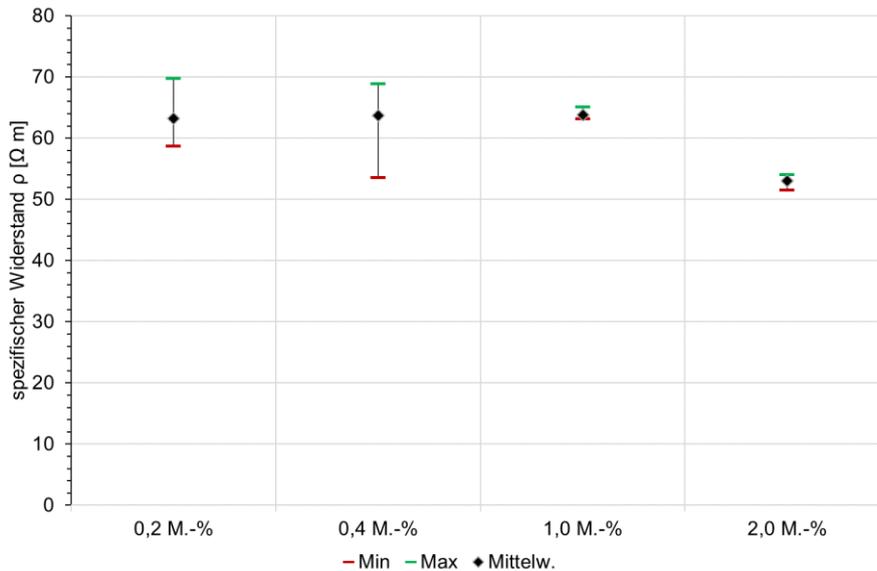


Bild117: spezifischer Elektrolytwiderstand der Mörtelprismen mit verschiedenen Chloridgehalten

3.5.1.4 Elementstrommessungen

Die Elementstrommessungen dienen der Abschätzung eines in der Praxis auftretenden Elementstromes zwischen Aktiv-Passiv-Elementen oder auch Konzentrationselementen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zwei Varianten der elektrolytischen Probenankopplung untereinander verwendet. In Bild 118 ist die Variante mit einer wässrigen Elektrolytlösung dargestellt. Dieser Versuchsaufbau dient der Ermittlung des Elementstromes zwischen chloridhaltigen Proben und chloridfreien Proben. In Kombination mit einer partiellen Wassersättigung soll hier die höchste korrosive Belastung für feuerverzinkten Betonstahl simuliert werden. Für die Untersuchungen des Elementstromes an Korrosionselementen die auf Konzentrationsunterschieden, wie sie im Falle der Karbonatisierung in Kombination mit verzinktem passiven Betonstahl auftreten, erfolgten die Messungen mit einem anderen Messaufbau. Die elektrolytische Ankopplung musste eine bei wässrigen Lösungen auftretenden Ionen-konzentrationsausgleich erschweren und wurde unter Verwendung eines Elektrolytgels realisiert.

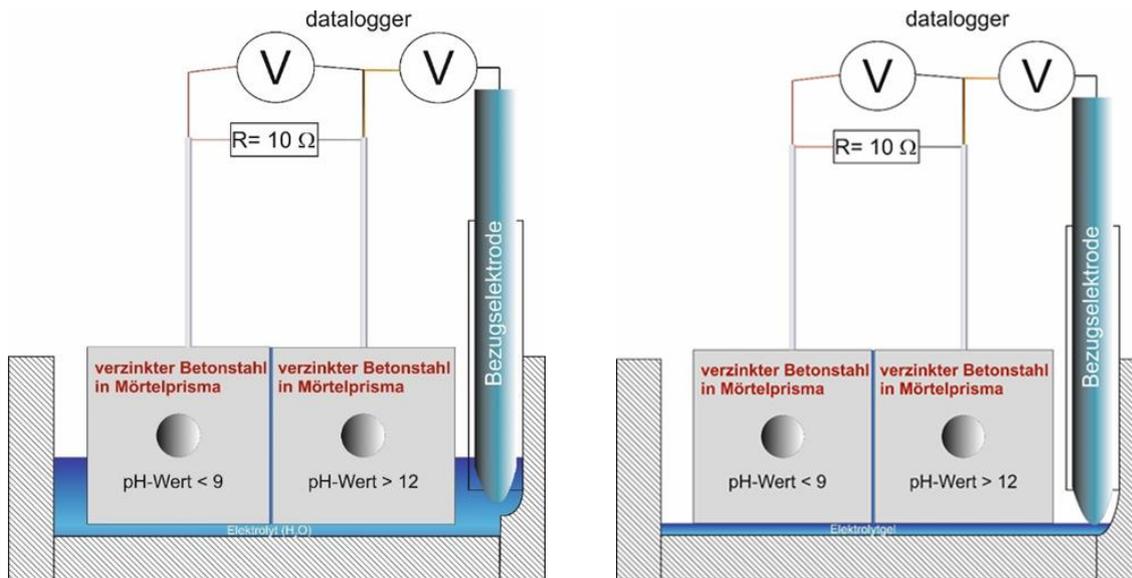


Bild 118: schematischer Aufbau der Messzelle für Potential- und Elementstrommessung in wässrigen Elektrolyten (links) und der Messzelle für Potential- und Elementstrommessung mit gelartigen Elektrolyten (rechts)

Der Kurzschluss des Elementes erfolgt über einen 10Ω Messwiderstand. Gemessen wird der Spannungsabfall über den Widerstand, daraus kann unter Anwendung des Ohm'schen Gesetzes der Elementstrom errechnet werden, Formel 2.

$$U = R * I$$

Formel 3

Mit:

$U = \text{Spannung [V]}$

$R = \text{Widerstand } [\Omega]$

$I = \text{Strom [A]}$

3.5.1.5 Polarisationsmessungen

Im Rahmen der elektrochemischen Untersuchungen wurden potentiodynamische und galvanostatische Messmethoden verwendet. Die Polarisationsmessungen erfolgten mit einer klassischen Dreielektrodenanordnung, ein schematischer Messaufbau ist in Bild 119 dargestellt.

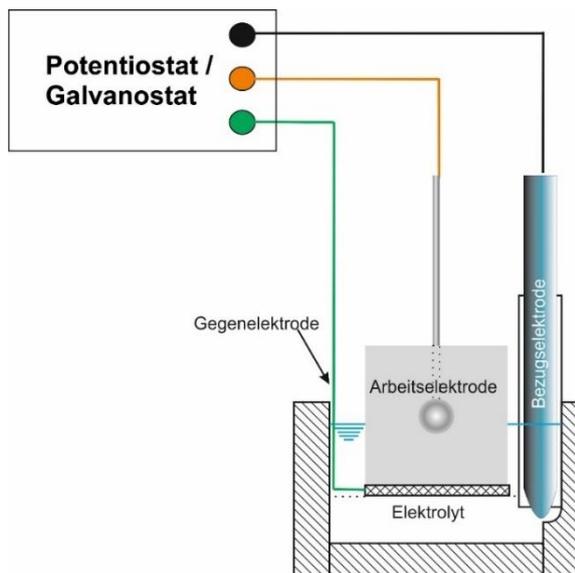


Bild 119: Schematische Darstellung des Messaufbaus für Polarisationsmessungen an Mörtelprismen

Ziel der Polarisationsmessungen ist es eine Aussage über das Eigenkorrosionsverhalten der verzinkten Betonstähle in den Mörtelprismen zu beschreiben. Hierzu werden Strom-Potentialkurven erstellt und Polarisationswiderstände bestimmt.

3.5.1.6 Frischbetonmessungen

Um die Elektrochemischen Kennwerte von Verzinktem Betonstahl in Frischbeton zu untersuchen bedarf es einem speziellen Messaufbau. Dabei gilt es das Potential des verzinkten Betonstahls ab dem ersten Kontakt zum Frischbeton zu erfassen. Die Freien Korrosionspotentiale im Frischbeton wurden unter außenstromlosen Bedingungen gegen eine gesättigte Ag/AgCl Bezugselektrode gemessen und über den zuvor beschriebenen Datenlogger erfasst. Der in Bild 120 dargestellte schematische Messaufbau zeigt die Verwendung eines Pappbechers als Papiermembran. Dies bietet die Möglichkeit die Potentiale der verzinkten Betonstähle im frischbeton messen zu können ohne einen direkten Kontakt zwischen Beton als Elektrolyt und der Bezugselektrode.

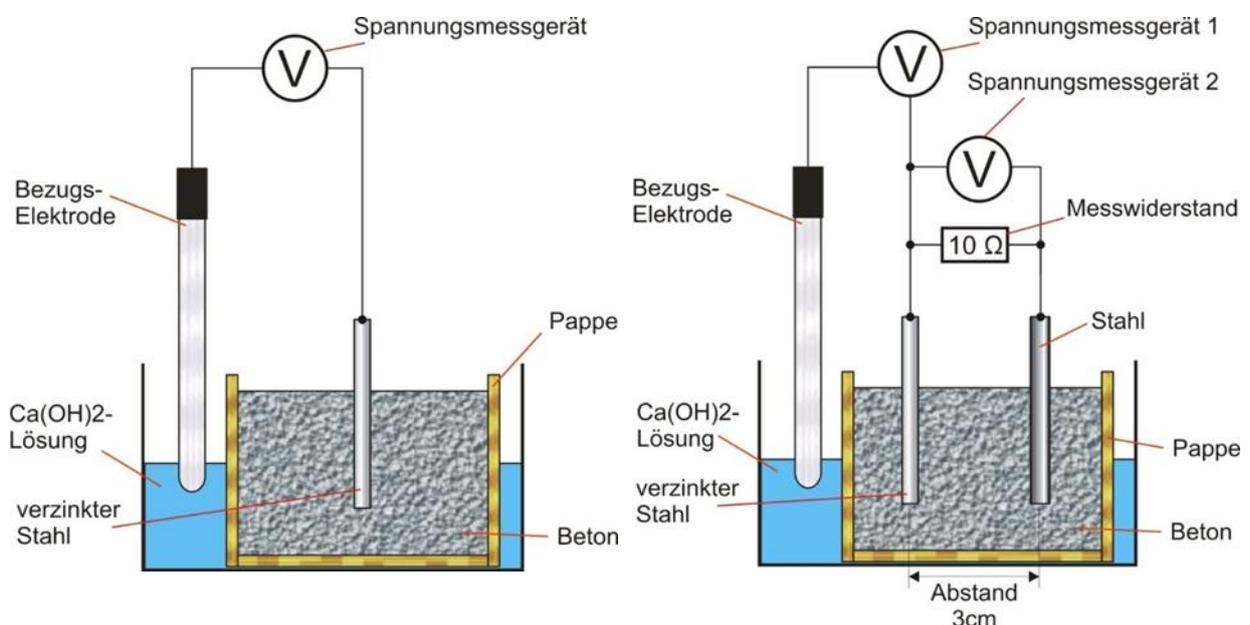


Bild 120: Elektrochemische Messzelle mit Papiermembran (Pappe) für die Messung des Freien Korrosionspotential im Frischbeton links und Messung des Elementstromes und des Freien Korrosionspotential im Frischbeton rechts

Vorhergehende Untersuchungen [2] haben gezeigt das der Spannungsabfall bei Polarisationsmessungen und Potentialmessungen über das Papiermembran zu vernachlässigen ist. Als Ankoppelelektrolyt zwischen Bezugselektrode und

Neben der Potentialmessung im Frischbeton erfolgten auch Elementstrommessungen im Frischbeton. Der Elementstrom wurde zwischen verzinktem und unverzinktem Betonstahl gemessen. Die Elementstrommessung erfolgte indirekt über den Spannungsabfall eines 10 Ω Messwiderstand (Shunt). Unter Verwendung des Ohm'schen Gesetzes (Formel 3) wurde der Spannungsabfall über den Widerstand in den Elementstrom umgerechnet.

3.5.1.7 Beschichtungen

Für die Untersuchung der Wirksamkeit einer organischen Beschichtung der feuerverzinkten Betonstähle wurden in Summe 16 verschiedene Beschichtungen a 3 Proben untersucht. Genauere Angaben zu den Beschichtungen dürfen nach Vorgabe der Hersteller nicht bekannt gemacht werden.

3.5.1.8 Computertomographische Untersuchungen von verzinktem Betonstahl in gerissenem Beton

Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll der Korrosionsfortschritt in gerissenem Beton untersucht werden. Für die Untersuchung wurden galvanostatische Halteversuche durchgeführt. Da im Falle des Korrosionsfortschrittes im Beton keine Flächenzuweisung und somit keine Korrosionsrate ermittelt werden kann wurden kombinierte Untersuchungsverfahren durchgeführt. Diese bestehen aus elektrochemischen Polarisationsmessungen und 3D-Computerthomographie. Mittels 3D-CT können aktiv korrodierende / korrodierte Flächen ermittelt werden und deren Oberfläche errechnet. Aus den errechneten Flächen können die gemessenen Ströme in Stromdichten umgerechnet werden. Ein schematischer Messaufbau für die 3D-CT-Messung ist in Bild 121 dargestellt.

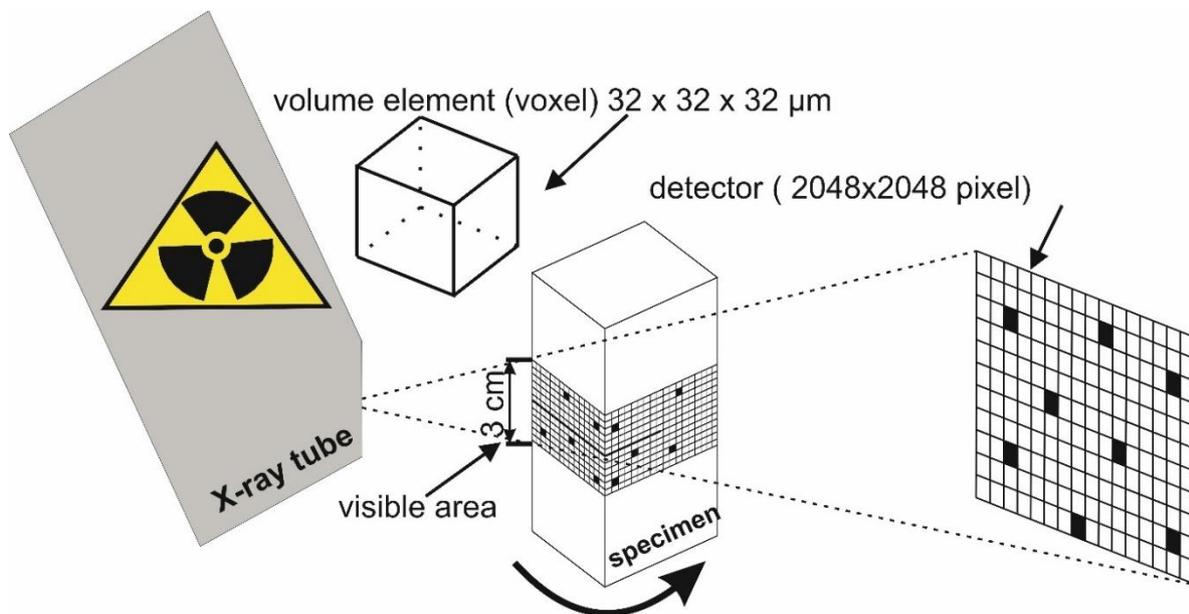


Bild 121: Schematische Darstellung einer CT-Untersuchung von Stahl in Beton

3.5.1.9 Schnellkarbonatisierung

Für die Herstellung der karbonatisierten Proben wurde eine Karbonatisierungskammer verwendet. Die Kammer wird mit CO₂ geflutet wobei diese mit einem Überdruck in Höhe von 0,4 bar und einer Durchflussrate von 6 l/h betrieben wird. Die Temperatur betrug ca. 25° C und die relative Luftfeuchtigkeit ca. 60 %. Die Gesamtdauer bis zur vollständigen Karbonatisierung der Proben betrug ca. 3,5 Monate. Um die Permeabilität der zu karbonatisierenden Proben zu erhöhen wurde die Zementleimschicht im Vorfeld abrasiv entfernt. In Bild 122 sind die Proben sowie unbewehrte Referenzproben in der Prüfkammer abgebildet. Für die Überprüfung der Karbonatisierungstiefe wurden alle drei Tage frische Bruchstellen an den Referenzproben mit Phenolphthalein besprüht und der Karbonatisierungsfortschritt photographisch dokumentiert.



Bild 122: Karbonatisierungs- und Referenzproben in der Karbonatisierungskammer

3.5.2 Korrosionsfortschritt in korrosiver Exposition (Chlorideinwirkung, Karbonatisierung)

3.5.2.1 Untersuchungen in Lösungen

Die Lösungsversuche sind mit drei verschiedenen pH-Werten mit und ohne Zusatz von Chloriden durchgeführt worden. Anhand dieser Untersuchungen soll der Einfluss des pH-Wertes in Wechselwirkung mit Chloriden auf das Freie Korrosionspotential beschrieben werden. Die verwendeten Lösungen sind Tabelle 27 entnehmen und sollen Betonporenwässer von Frischbeton mit CEM I als Bindemittel bis hin zu karbonatisiertem Beton simulieren.

Tabelle 27: Elektrolytlösung und ihre Eigenschaften

Elektrolyt	pH-Wert	Chloridgehalt [mol]
Calciumhydroxid / Ca(OH)₂ (karbonatisiert)	9	0
Calciumhydroxid / Ca(OH) ₂ (karbonatisiert)	9	3
Calciumhydroxid / Ca(OH)₂ gesättigt	12,4	0
Calciumhydroxid / Ca(OH) ₂ gesättigt	12,4	3
Künstliche Betonporenlösung	13,6	0
Künstliche Betonporenlösung	13,6	3

Für die Erfassung der Freien Korrosionspotentiale (E_{cor}) wurde ein Datalogger vom Typ Agilent 34970A mit einer Eingangsimpedanz größer 1 G Ω verwendet. Gemessen wurden die Potentiale gegen eine gesättigte Ag/AgCl Bezugelektrode, die dabei verwendete Aufzeichnungsfrequenz der Potentiale betrug 0,0166 Hz.

Bei den Lösungsversuchen handelt es sich um außenstromlose Auslagerungsversuche bei denen das Potential über eine Dauer von 48 h aufgezeichnet wurde. Nach 48 h sind potentiodynamische Mes-

sungen durchgeführt und Strompotentialkurven erstellt worden. Die daraus ermittelten Eigenkorrosionsraten sind in Tabelle 28 dargestellt. Durch eine erhöhte Eigenkorrosionsrate wird der Einfluss der Chloridzugabe bei den pH-Werten 9 und 12,4 deutlich. Bei einem pH-Wert von 13,6 ist dies nicht gegeben.

Tabelle 28: Eigenkorrosionsraten der chloridhaltigen Serien

Probe	Eigenkorrosionsstrom [μA]	Stromdichte [mA/m^2]	Korrosionsrate aus Eigenkorrosion [$\mu\text{m}/\text{a}$]
pH 9	19	17	25
pH 9-Cl	150	138	207
pH 12,4	4	4	5
pH 12,4-Cl	14	17	25
pH 13,6	3300	3407	5099
pH 13,6-Cl	3050	3339	4997

In Bild 123 ist der Potentialverlauf in einer Lösung mit pH 9 dargestellt der Unterschied des freien Korrosionspotentials infolge der Zugabe von Chlorid ist deutlich sichtbar. Die Proben ohne Chlorid weisen ein instabiles Korrosionspotential auf, welches Hinweise auf einer gestörten Deckschichtausbildung liefert. Unter Zugabe von Chloriden ist das Freie Korrosionspotential 300 mV negativer als das der chloridfreien Proben.

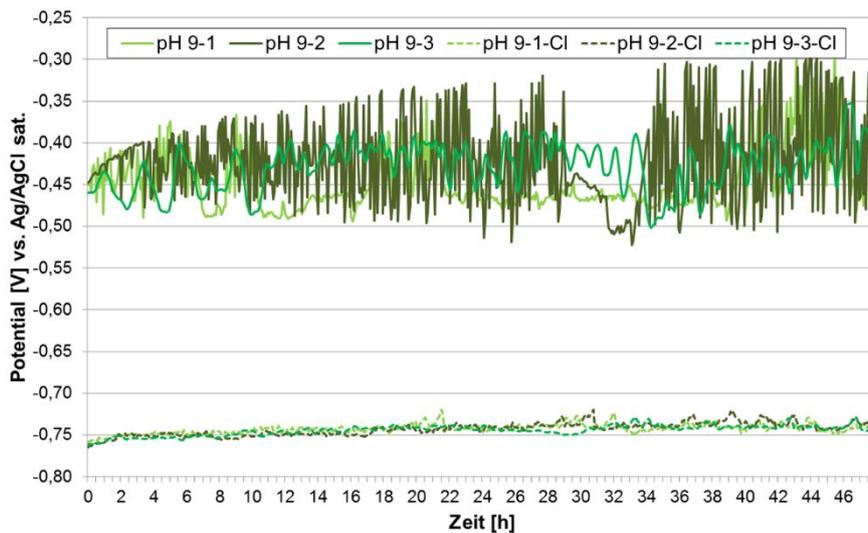


Bild 123: Lösungsversuch mit pH 9 chloridfrei und chloridhaltig

Die Proben der Serie mit pH-Wert 12,4 zeigen in Bild 124 unter Zugabe von Chloriden eine deutlich beschleunigte Deckschichtbildung. Das Potential steigt nach spätestens 10 h sprunghaft an.

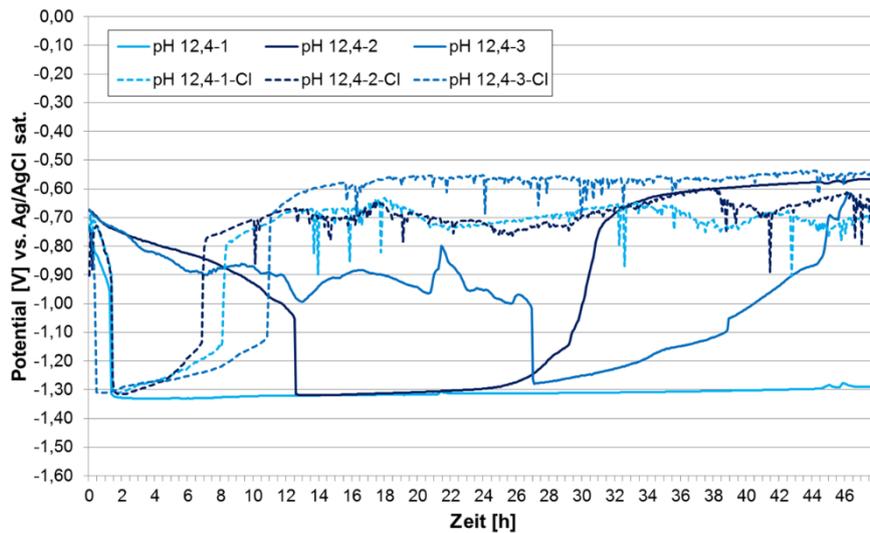


Bild 124: Lösungsversuch mit pH 12,4 chloridfrei und chloridhaltig

Bei allen Proben kommt es zu einer Degradation der vorhandenen atmosphärisch gebildeten Deckschicht, wobei diese bei zwei Chloridfreien Proben zeitlich verzögert erfolgt. Nach einem sprunghaften Abfall des Potentials in den Bereich der Wasserstoffentwicklung steigen die Potentiale bei fast allen Proben wieder an. Nur eine chloridfreie Probe bleibt über dem Betrachtungszeitraum von 48 Stunden dauerhaft aktiv. Die beschleunigte Deckschichtbildung basiert auf dem erhöhten Ladungsumsatz im Bereich der Wasserstoffentwicklung. Die peak-artigen Potentialeinbrüche nach dem erneuten Potentialanstieg sind auf die Ausbildung einer diffusen Deckschicht zurückzuführen. In Lösung kann die diffuse Deckschicht zum Ablösen von Korrosionsprodukten führen und die hierdurch entstandenen partiellen Störungen Potentialeinbrüche generieren.

Die Potentiale der Serien mit pH-Wert 13,6 zeigen in Bild 125 keinen signifikanten Unterschied. Hier wird in keinem Fall eine Deckschichtbildung beobachtet. Die chloridhaltigen Lösungen weisen geringfügig positivere Potentiale auf.

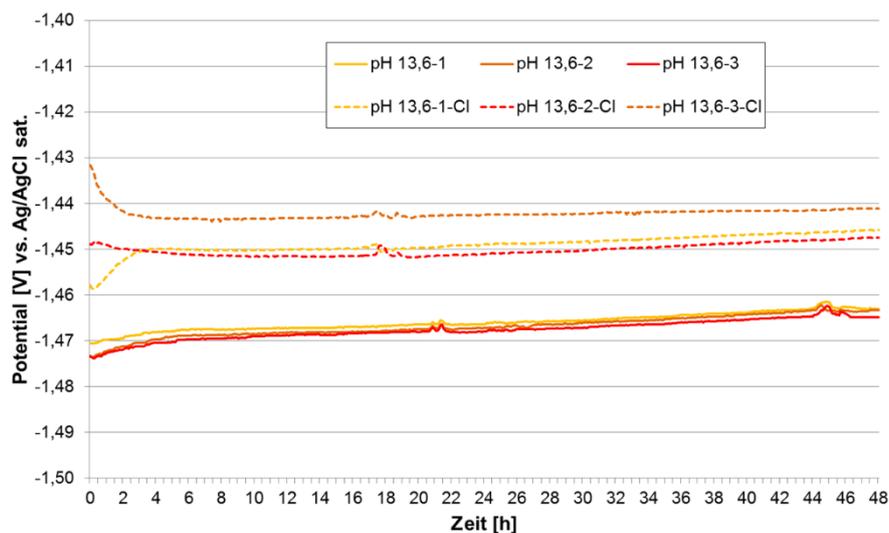


Bild 125: Lösungsversuch mit pH 13,6 chloridfrei und chloridhaltig

Die für die Lösungsversuche verwendeten Stähle wurden ohne weitere Potentialaufzeichnung bis zu einer signifikanten Rotrostbildung in der Lösung belassen. Dies erfolgte bei den Proben der Serien mit einem pH-Wert 13,6 mit und ohne Chlorid nach ca. 144 h. In Bild 126 bis Bild 128 sind die Proben aus den Lösungsversuchen abgebildet.

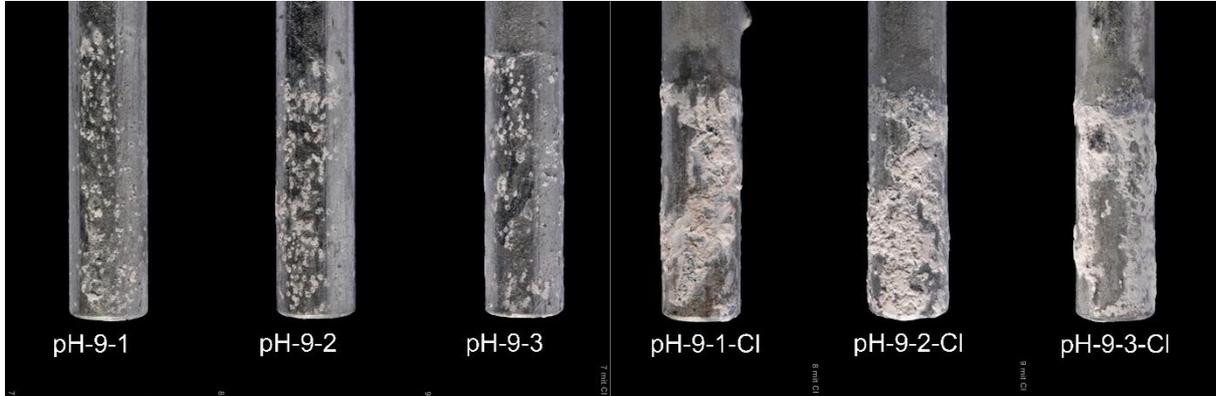


Bild 126: Glatte verzinkte Stähle aus Lösungsversuch mit pH 9 chloridfrei (links) und chloridhaltig (rechts)

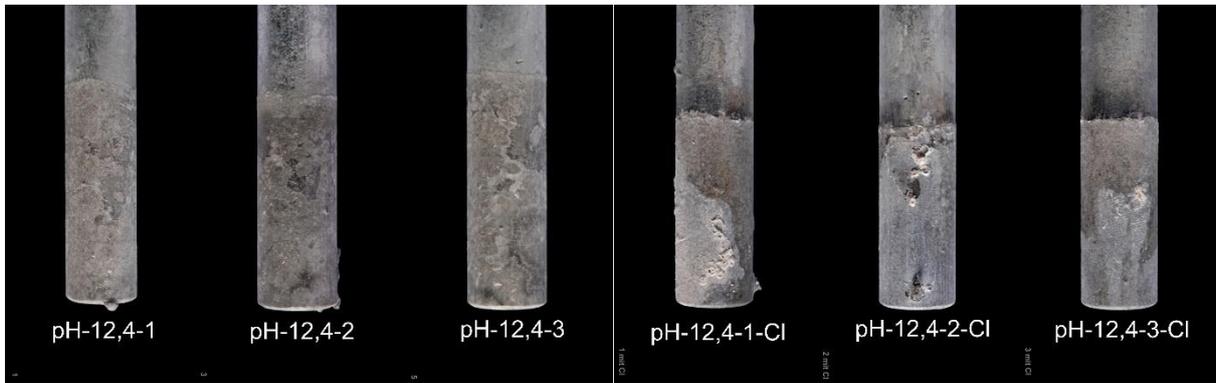


Bild 127: Glatte verzinkte Stähle aus Lösungsversuch mit pH 12,4 chloridfrei (links) und chloridhaltig (rechts)



Bild 128: Glatte verzinkte Stähle aus Lösungsversuch mit pH 13,6 chloridfrei (links) und chloridhaltig (rechts)

Zusammenfassend kann aus den Lösungsversuchen schlussgefolgert werden, dass die Zugabe von Chloriden bei einem pH-Werten von 9 und von 12,4 zu einer höheren Eigenkorrosionsrate (Ladungsumsatz) führt. Bei einem pH-Wert von 9 zeichnet sich die Zugabe der Chloride in negativeren Potentialen ab und bei pH 12,4 durch die deutlich beschleunigte Deckschichtbildung. In der Lösung mit pH-Wert 13,6 wird der maximale Ladungsumsatz infolge der bei diesem pH-Wertes ungehemmten Zinkauflösung erreicht, so dass die Zugabe von Chloriden keinen weiteren Einfluss auf die Korrosionsgeschwindigkeit hat. Aus den ermittelten Eigenkorrosionsraten (pH 13,6 ohne Chlorid) ergibt sich bei

einer 85 µm dicken Zinkschicht eine errechnete Dauer bis zum freiliegen des Substrats von 146 h. Dieses Ergebnis ist nahezu deckungsgleich mit den im Auslagerungsversuch ermittelten 144 h.

3.5.2.2 Untersuchungen des Einflusses von chloridhaltigem Mörtel auf Makroelement- und Eigenkorrosion

Die nachfolgenden Ergebnisse basieren auf Untersuchungen von Korrosionselementen, die aus feuerverzinktem Betonstahl in chloridhaltigen Mörteln und feuerverzinktem Betonstahl in chloridfreien Mörteln bestehen. Das Freie Korrosionspotential der Proben wurde über einen Zeitraum von 20 h aufgezeichnet. Zu Beginn der Messung lagen die Freien Korrosionspotentiale im Mittel bei ca. 700 mV. Nach 5 bis 20 h erfolgte bei fast allen Proben ein Potentialabfall in Bereiche in denen die kathodische Teilreaktion unter Entstehung von Wasserstoff erfolgt [30]. Nach der Messung des Freien Korrosionspotentials wurden die Proben kurzgeschlossen. Unabhängig von der Chloridbelastung zeigen alle Proben gleichartige Korrosionspotentiale zum Zeitpunkt T = 0 der Elementstrommessung. Diese liegen in einem Potentialbereich um ca. 700 mV (vs. Ag/AgCl sat.). Die Messungen der Korrosionspotentiale und –ströme wurden über einen Zeitraum von 1680 h durchgeführt (70 Tage).

In Bild 129 sind die Korrosionspotentiale und –ströme der kurzgeschlossenen Proben mit 0,2 M.-% Chlorid aufgezeigt.

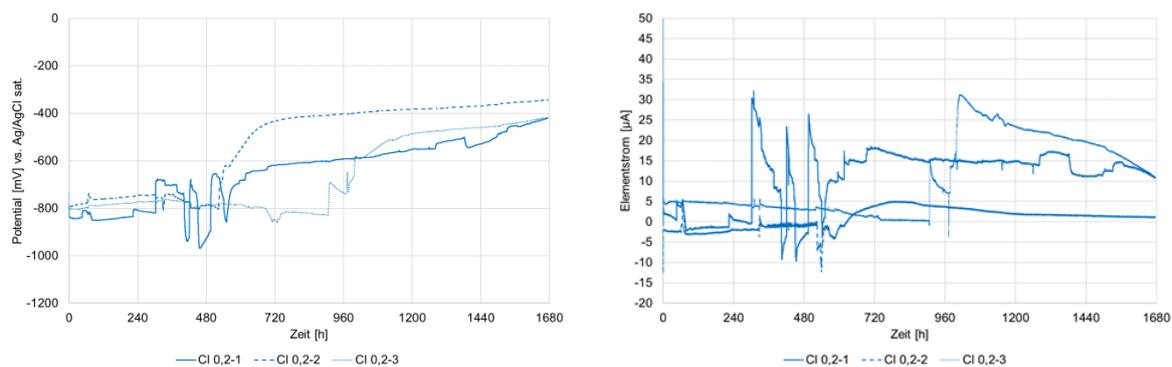


Bild 129: Korrosionspotential und Elementstrom (rechts) der Korrosionselemente mit Paarungen aus 0,2 M.-% Chlorid und chloridfreien Proben in Messzellen mit wässrigem Elektrolyten

Zwischen 300 und 500 h sind verschiedene sprunghafte Potentialänderungen zu erkennen, die mit deutlichen Änderungen im Elementstrom korrelieren. Nach ca. 500 h zeichnet sich bei zwei Elementen eine stetige Entwicklung hin zu positiveren Potentialen ab. Dies ist auf die langsame Ausbildung einer stabilen Deckschicht zurückzuführen. Das Potential der Elemente ist am Ende des Betrachtungszeitraumes mit -400 mV ca. 300 mV positiver als das Freie Korrosionspotential der Proben im aufgetrennten Zustand. Die gemessenen Elementströme zeigen nach ca. 900 h für alle Elemente einen positiver Stromwert. Dies bedeutet, dass die chloridhaltigen Proben die Anode des Makroelementes ausbilden und die chloridfreien Proben die Kathode. In Bild 131 sind die Korrosionspotentiale der Korrosionselemente mit 1 M.-% Chlorid dargestellt. Hier erfolgt der erste signifikante Potentialanstieg bei der Probe Cl 0,4-1 nach ca. 300 h, bei den Elementen 0,4-2 und 0,4-3 erfolgt dieser nach ca. 720 h (Bild 130).

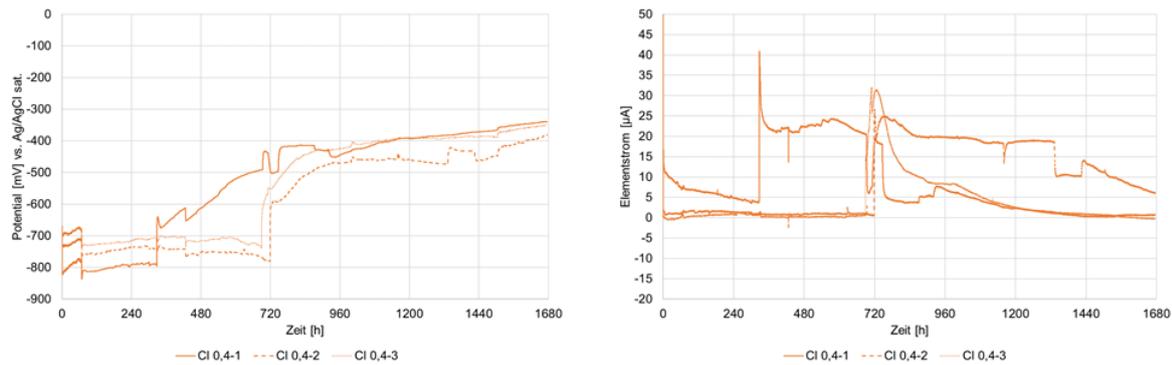


Bild 130: Korrosionspotential und Elementstrom (rechts) der Korrosionselemente mit Paarungen aus 0,4 M.-% Chlorid und chloridfreien Proben in Messzellen mit wässrigem Elektrolyten

Die Potentiale nach dem signifikanten Anstieg liegen im Bereich der Proben aus der Serie CI 0,2 mit ebenfalls ca. -400 mV und sind somit positiver als die zuvor gemessenen Freien Korrosionspotentiale. Die Elementströme zeigen über den gesamten Messzeitraum einen positiven Elementstrom (stärkere Auflösung der chloridhaltigen Proben), der zum Zeitpunkt des Potentialanstieges deutlich erhöht ist. Zum Ende der Messung ist deutlich zu erkennen, dass die Triebkraft des Korrosionselementes reduziert wird. Der gemessene Elementstrom tendiert bei zwei der drei Proben bereits gegen 0.

Die Korrosionspotentiale der Korrosionselemente mit 1,0 M.-% Chlorid sind in Bild 131 dargestellt. Ein erster Anstieg der Korrosionspotentiale ist bereits nach ca. 300 h zu erkennen, das Potential ändert sich jedoch bei allen Proben sprunghaft zum Zeitpunkt $T = 400$ h hin zu negativen Potentialen. Dies basiert auf der Zugabe von neuem wässrigem Elektrolyten der auf die Probenoberseite gelangte und somit direkten Kontakt zum verzinkten Schweißdraht hatte. Nach einer kurzen Trocknungsphase steigen die Potentiale erneut an und erreichen positivere Werte als die zuvor gezeigten Serien.

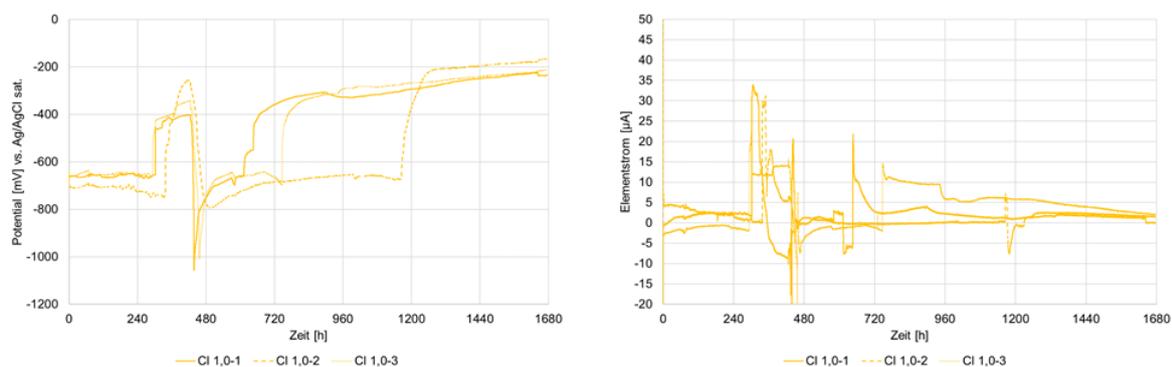


Bild 131: Korrosionspotential und Elementstrom (rechts) der Korrosionselemente mit Paarungen aus 1,0 M.-% Chlorid und chloridfreien Proben in Messzellen mit wässrigem Elektrolyten

Bei Betrachtung der Elementströme zeigt sich kein genereller Trend. Die Ströme sind wechselnd positiv oder negativ, betrachtet man die Ströme nach den signifikanten Potentialanstiegen so bilden die chloridhaltigen Proben die Anode aus. Langfristig jedoch geht auch hier die Tendenz der Elementströme gegen null.

Ebenso wie bei der Serie mit 1 M.-% Chlorid erfolgt ein erster signifikanter Potentialanstieg bei den Proben mit 2 M.-% nach noch kürzere Messdauer (Bild 132). Der Potentialeinbruch ist hier ebenso wie bei der Serie zuvor auf die Zugabe eines wässrigen Elektrolyten auf der Proben Oberseite zurückzuführen. Ein erneuter signifikanter Anstieg des Korrosionspotentials erfolgt hier bei allen Elementen nach ca. 150 h ab dem Potentialeinbruch. Auch hier werden Potentiale von bis zu -200 mV erreicht.

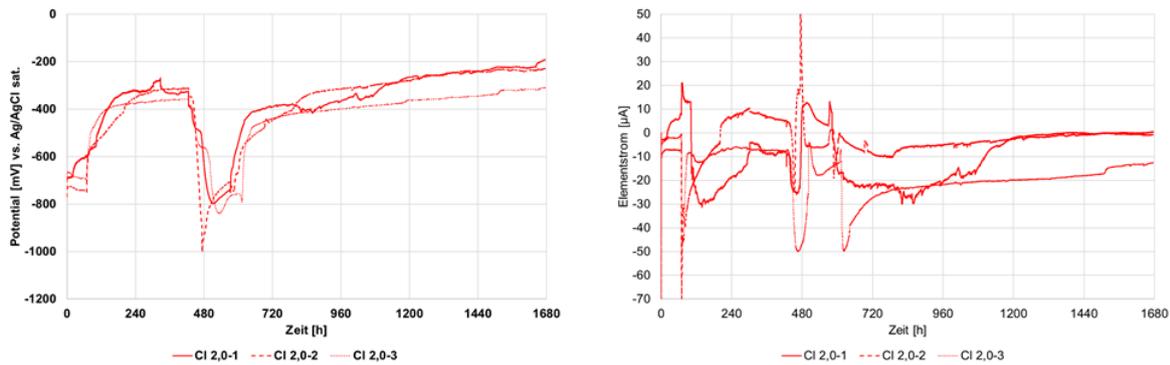


Bild 132: Korrosionspotential und Elementstrom (rechts) der Korrosionselemente mit Paarungen aus 2,0 M.-% Chlorid und chloridfreien Proben in Messzellen mit wässrigem Elektrolyten

Anders als bei allen vorherigen Proben ist bei den Elementen mit 2 M.-% Chlorid ein negativer Elementstrom nach den signifikanten Potentialanstiegen zu verzeichnen. Dies bedeutet, dass sich die aktiv korrodierende Anode hier erstmals im chloridfreien Beton ausgebildet hat. Die chloridhaltige Probe ist zu diesem Zeitpunkt die Kathode des Elements. Auch hier geht die Tendenz des Elementstromes gegen null.

Nachdem die Elementstrommessungen beendet wurden, wurde der Shuntwiderstand entfernt und erneut die Freien Korrosionspotentiale der Proben gemessen. Bei allen Serien ist über die Dauer von 1500 h von einer stabilen Deckschichtbildung auszugehen. Nachfolgend sind die Potentialverläufe über die Zeit der vier Serien in Bild 133 und Bild 134 dargestellt.

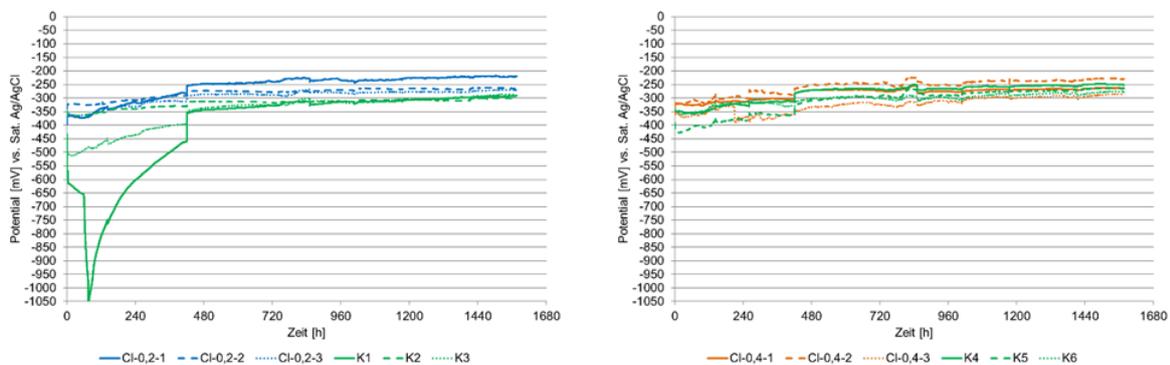


Bild 133: Freies Korrosionspotential der Mörtelproben mit 0,2 M.-% Chlorid (links) und 0,4 M.-% Chlorid (rechts) sowie den zugehörigen chloridfreien Proben in Messzellen mit wässrigem Elektrolyten nach der Elementstrommessung

Beim Vergleich der Serien kleiner und größer gleich 1 M.-% Chlorid fällt auf, dass die Freien Korrosionspotentiale bei den höheren Chloridgehalten positiver liegen. Dies gilt für die Freien Korrosionspotentiale der chloridhaltigen Proben ebenso wie für die chloridfreien, Proben.

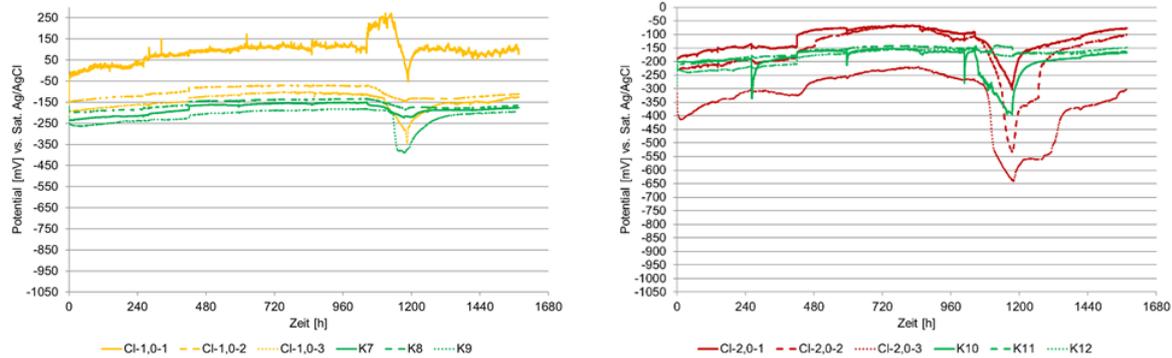


Bild 134: Freies Korrosionspotential der Mörtelproben mit 1,0 M.-% Chlorid (links) und 2,0 M.-% Chlorid (rechts) sowie den zugehörigen chloridfreien Proben in Messzellen mit wässrigem Elektrolyten nach der Elementstrommessung

3.5.2.3 Untersuchungen des Einflusses von karbonatisiertem Mörtel auf Makroelement- und Eigenkorrosion

Die nachfolgenden Ergebnisse basieren auf Untersuchungen von Korrosionselementen, die aus feuerverzinktem Betonstahl in karbonatisierten Mörteln und feuerverzinktem Betonstahl in alkalischen Mörteln bestanden. In Bild 135 ist exemplarisch der Karbonatisierungsfortschritt dargestellt.

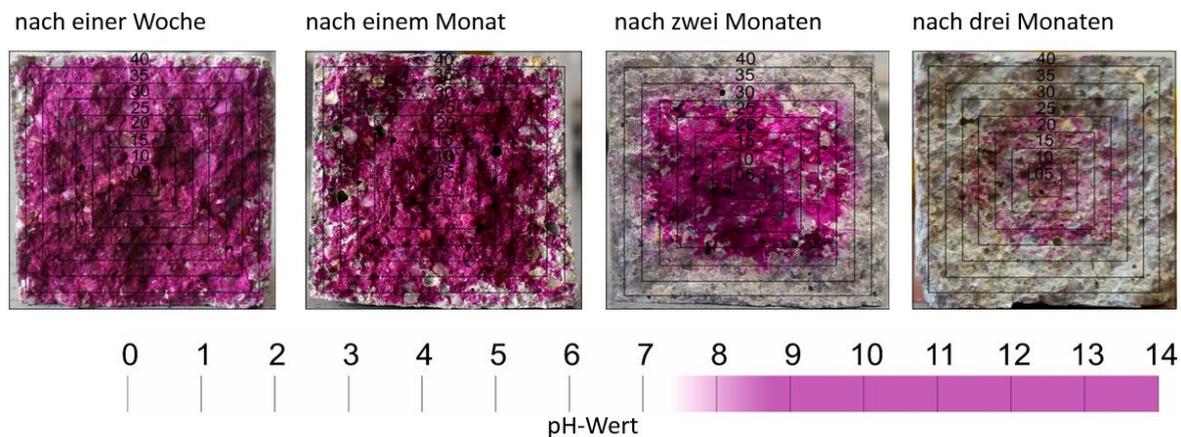


Bild 135: Karbonatisierungsfortschritt an Referenzproben

Bei den karbonatisierten Probenreihen erfolgte die Messung des freien Korrosionspotentials nur über 2 h, nach dieser Zeitspanne zeichnete sich ein asymptotischer Potentialverlauf ab und die Proben wurden je Paarung elektronenleitend verbunden. Es wurden zwei verschiedene elektrolytische Ankopplungsverfahren verwendet. Für die Simulation der Expositionsklasse XC1 (trocken) wurde ein Elektrolytgel verwendet, für die Expositionsklasse XC1 (nass) – XC4 eine Ankopplung mittels Wasser.

Die Freien Korrosionspotentiale der Serie mit Elektrolytgel zeigen zu Beginn der Messung deutliche Potentialunterschiede, Bild 136. Die gemessenen Freien Korrosionspotentiale der karbonatisierten Proben sind bis zu 425 mV negativer als die der alkalischen Proben. Die Serie, die mittels Wasser elektrolytisch verbunden wurde, weist eine maximale Potentialdifferenz von 70 mV auf und liegt in einem Bereich, der vergleichbar mit den karbonatisierten Proben der Gel-Serie (Bild137) ist. Bei den karbonatisierten Probenreihen erfolgte die Messung des freien Korrosionspotentials nur über 2 h, nach dieser Zeitspanne zeichnete sich ein asymptotischer Potentialverlauf ab und die Proben wurden je Paarung elektronenleitend verbunden.

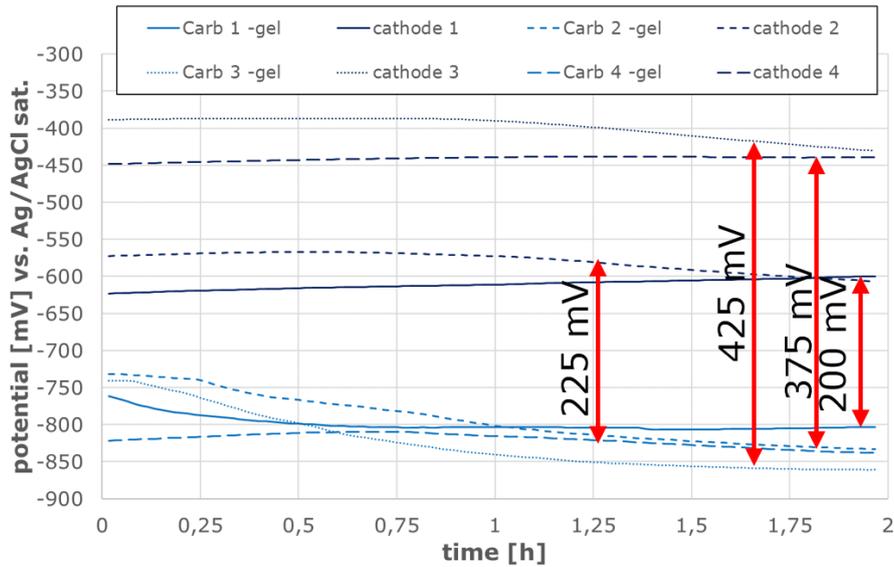


Bild 136: Freies Korrosionspotential der Karbonatisierten und alkalischen Probe der Serie mit Gelankopplung

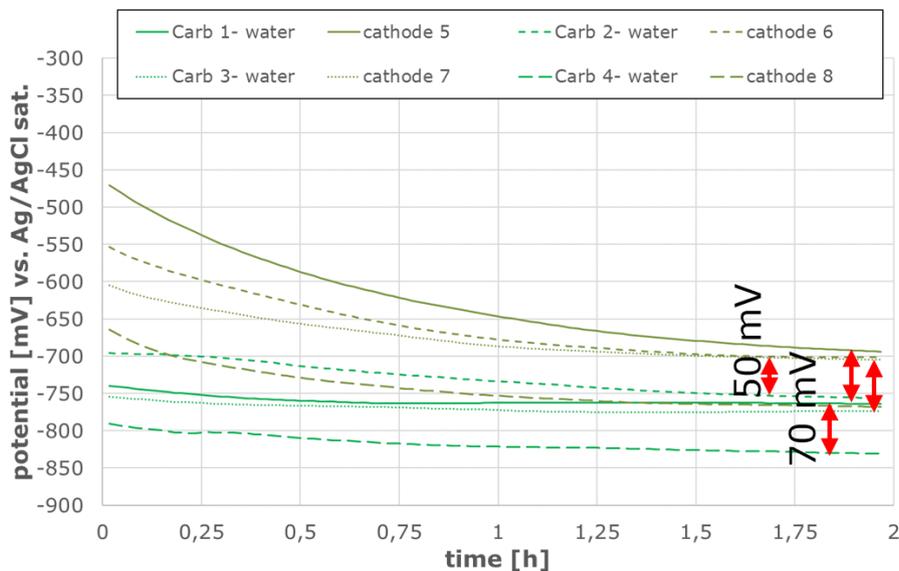


Bild137: Freies Korrosionspotential der Karbonatisierten und alkalischen Probe der Serie mit Wasserankopplung

Nach dem Herstellen der elektronenleitenden Verbindung wiesen beide Serien einen Potentialabfall bis in einen Potentialbereich auf, in dem die kathodische Teilreaktion unter Entwicklung von Wasserstoff erfolgt (Bild 138 links und Bild 139 links). Beim Vergleich der gemessenen Elementströme der Serien wird deutlich, dass bei der Gel-Serie anfänglich deutlich höhere Ströme gemessen wurden. Dies ist auf die größere Potentialdifferenz der Freien Korrosionspotentiale zurückzuführen. Nach ca. 500 h ist der Elementstrom bei beiden Serien 0 oder negativ. Daraus folgt, dass zwischen karbonatisiertem und nichtkarbonatisiertem Teil keine Elementbildung stattfindet bzw. der karbonatisierte Teil des Elementes aufgrund des geringeren pH-Wertes die Kathode des Elementes ausbildet.

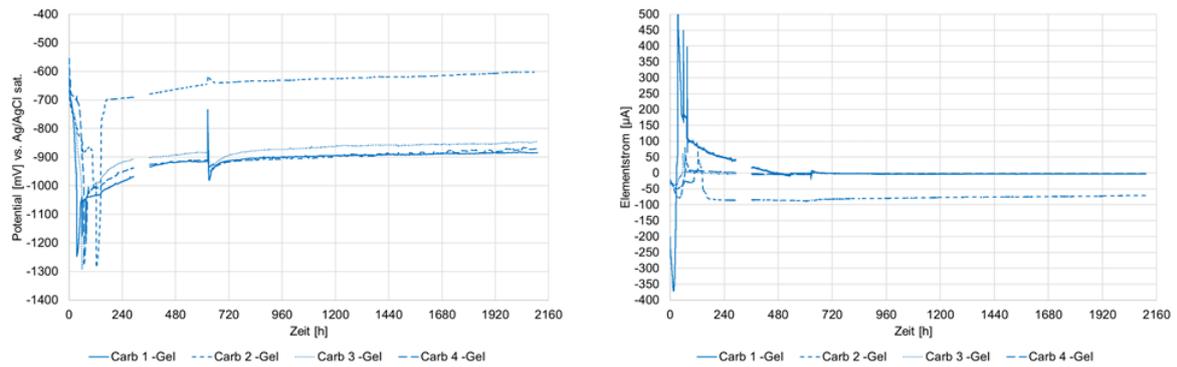


Bild 138: Gemessenes Korrosionspotential der gekoppelten Proben der Gel-Serie links und rechts die zugehörigen Elementströme

Beide Serien weisen eine Streuung der Korrosionspotentiale am Ende der Messreihe auf, die gemessenen Potentiale liegen zwischen -600 mV und -900 mV.

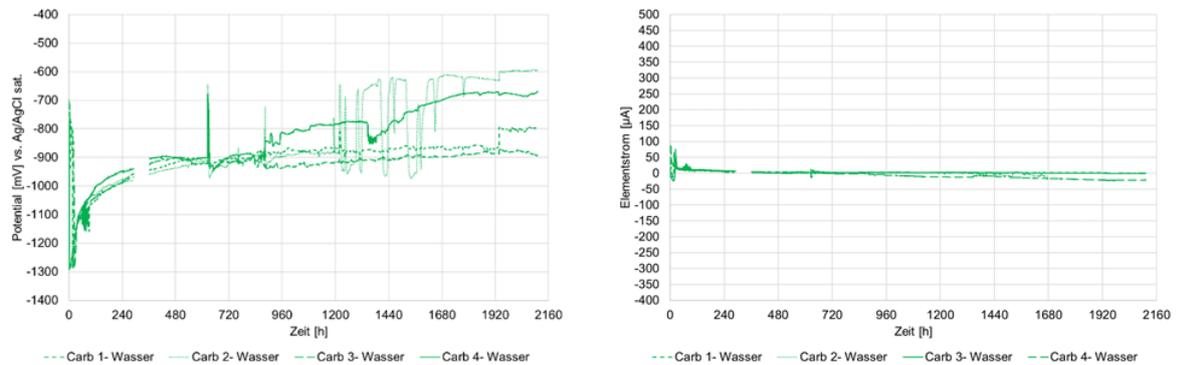


Bild 139: Gemessenes Korrosionspotential der gekoppelten Proben der Wasser-Serie links und rechts die zugehörigen Elementströme

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei den karbonatisierten Serien kein signifikanter Elementstrom über die Dauer der Messung zu verzeichnen ist. Die in Bild 139 dargestellten freien Korrosionspotentiale zeigen bei beiden Serien eine Depolarisation der karbonatisierten Proben hin zu negativeren Potentialen. Die Probenbezeichnung „Kathode“ steht für die alkalischen Proben. Die karbonatisierten Proben haben ein ausgesprochen negatives freies Korrosionspotential gegenüber den Kathoden. Bei der Serie, die mit der elektrolytischen Ankopplung mittels Wasser stellt sich nach 30 Minuten, bei zwei Elementpaarungen, eine Potentialdifferenz von ca. 300 mV ein. Trotz dieser deutlichen Potentialunterschiede ergaben sich keine signifikanten Elementströme und ist auf die in Kapitel 3.4.5.2 dargestellten hohen Polarisationswiderstände der karbonatisierten Proben zurückzuführen.

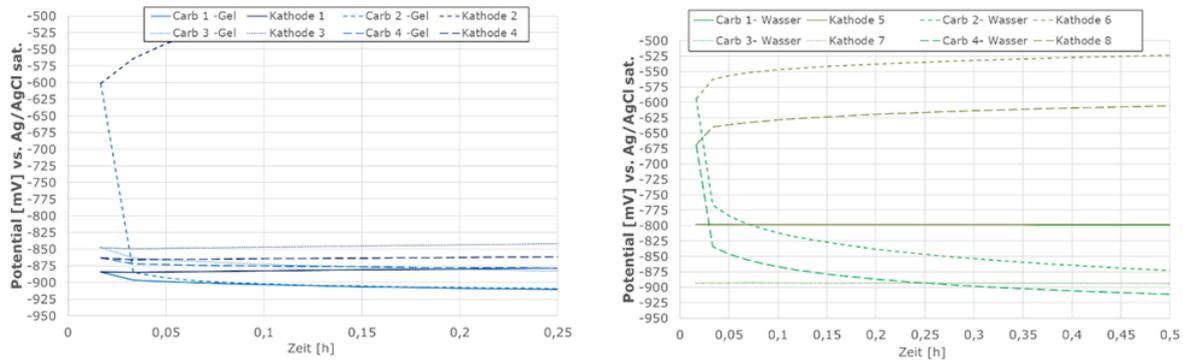


Bild 140: Messung des Freien Korrosionspotentials während der Depolarisation nach Trennen der elektronenleitenden Verbindung

3.5.3 Erfassung der Passivierungsreaktion beim Betonieren (Wasserstoffentwicklung) und von alternativen Passivierungsverfahren sowie der Wirkung von Inhibitoren im Beton zur Hemmung der Wasserstoffentwicklung

3.5.3.1 Untersuchungen zur Wasserstoffentwicklung im Frischbeton

Die Untersuchungen der Wasserstoffinitiiierung in der Frischbetonphase erfolgten in drei verschiedenen Zementen mit einem W/Z-Wert von 0,55. In Bild 141 sind die Ergebnisse der Messung der Freien Korrosionspotentiale dargestellt. Die Messung erfolgte über einen Zeitraum von 48 h, alle gemessenen Proben hatten über die Dauer der Frischbetonphase ($t = 0$ bis 8 h) ein Freies Korrosionspotential im Bereich der kathodischen Teilreaktion an Zink unter Entstehung von Wasserstoff (unterhalb des roten Balken in Bild 141). Wenn man die Verweildauer der Potentiale im Bereich der Wasserstoffentwicklung in Abhängigkeit der jeweiligen Zemente betrachtet, so wird deutlich, dass die Variante mit CEM I am kritischsten zu bewerten ist.

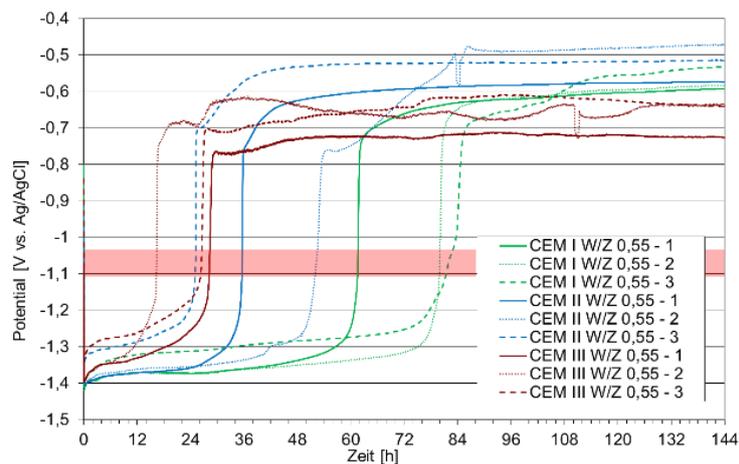


Bild 141: Messung des Freien Korrosionspotentials an verzinkten Betonstäben in Frischbeton mit variierenden Zementen und einem W/Z-Wert von 0,55

In Bild 142 sind die Korrosionspotentiale der kurzgeschlossenen Elemente im Frischbeton und die dazugehörigen Elementströme dargestellt. Die Korrosionspotentiale fallen nach Herstellung der Probekörper zunächst auf Werte von ca. 1250 mV, bei denen es zu einer Wasserstoffbildung am Stahl kommt. Nach 4-5 Stunden steigt das Korrosionspotential im Zuge der Deckschichtbildung am Zink und der Bereich der Wasserstoffentwicklung am Stahl wird verlassen.

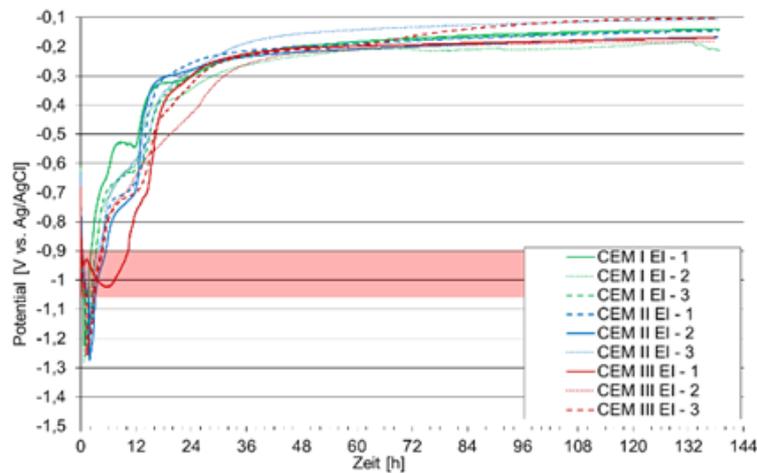


Bild 142: Messung des Korrosionspotentials im Frischbeton mit variierenden Zementen und einem W/Z-Wert von 0,55 bei Kurzschluss zwischen verzinktem und unverzinktem Betonstahl

Ein signifikanter Einfluss der Zementart auf die Potentialverläufe kann bei den kurzgeschlossenen Elementen nicht festgestellt werden, die Kurvenverläufe sind nahezu identisch. Die in Bild 143 dargestellten Elementströme variieren jedoch. CEM I hat einen maximalen Strompeak in Höhe von 6,4 mA, CEM II 7,1 mA und CEM III 5 mA.

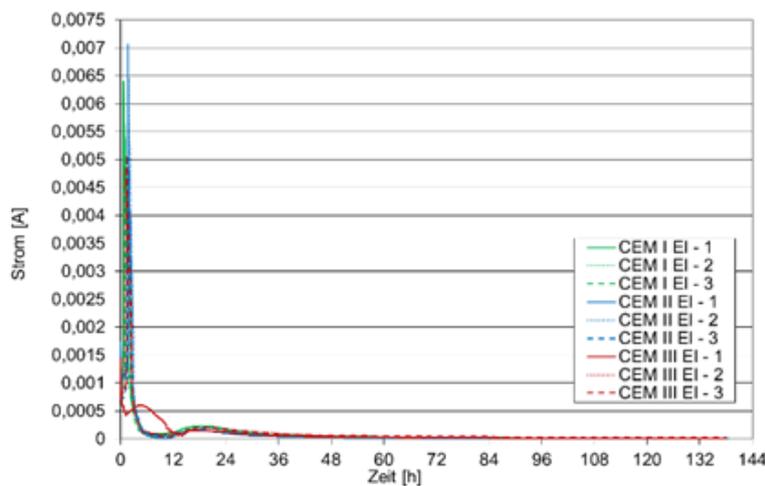


Bild 143: Messung des Elementstroms im Frischbeton mit variierenden Zementen und einem W/Z-Wert von 0,55 bei Kurzschluss zwischen verzinktem und unverzinktem Betonstahl

3.5.3.2 Passivierungsmethoden und Inhibitoren

Auf Basis der in Kapitel 3.4.2.1 gewonnenen Erkenntnisse, wurde für die nachfolgenden Untersuchungen ausschließlich CEM I als Bindemittel verwendet. Die in Bild 144 dargestellten Ergebnisse bilden die Referenzserie für die weitergehenden Untersuchungen zur Wirksamkeit von Inhibitoren und Passivierungsverfahren. Da sich aus den vorhergehenden Untersuchungen große Streuungen hinsichtlich der Verweildauer im Bereich der Wasserstoffentwicklung ergaben, sind für die nachfolgend aufgeführten Messungen 5 Vergleichsproben je Serie untersucht worden.

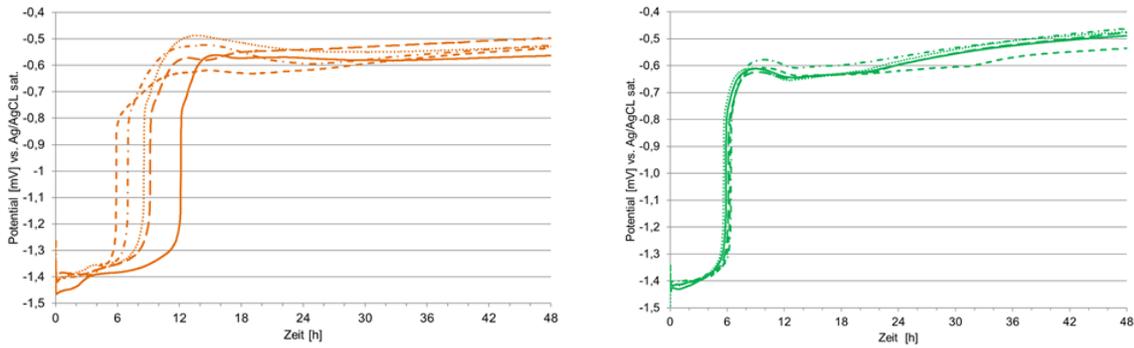


Bild 144: Potentialverlauf der Serie mit den Referenzproben in CEM I W/Z 0,45links und der Serie mit vorheriger 24 stündiger Auslagerung der Betonstähle in gesättigter Ca(OH)_2

Bild 144 rechts zeigt die Serie CaOH , die 24 h in gesättigter Calciumhydroxidlösung ausgelagert wurde und anschließend 24 h im Laborklima gelagert wurde. Die Auslagerung in der gesättigten Calciumhydroxidlösung zeigte keinerlei Einfluss auf die Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase. Im Vergleich zur Referenzserie zeigte sich jedoch eine sehr geringe Streuung bezogen auf die Zeit bis zur Deckschichtbildung (Potentialanstieg).

Neben einer durch Auslagerung in Calciumhydroxid gebildeten Deckschicht aus den zuvor gezeigten Ergebnissen ist auch der Einfluss einer Deckschichtbildung unter atmosphärischer Auslagerung untersucht worden. Der in Bild 145 gezeigte Betonstahl ist zu Beginn der Freibewitterung (links) und nach der vierwöchigen Freibewitterung aufgenommen worden. Die Farbänderung des Betonstahls basiert auf der unter atmosphärischen Bedingungen gebildeten Deckschicht des Zinks. Die in Bild 146 dargestellten Potentialverläufe zeigen, dass die gebildete Deckschicht zu Beginn der Messung einen Einfluss auf die Potentiallage hat. Die Deckschicht ist jedoch unter der alkalischen Exposition nicht stabil und das Potential fällt ca. 1,25 h in einen Bereich, in dem die kathodische Teilreaktion unter Entstehung von Wasserstoff erfolgt.



Bild 145: Verzinkter Betonstahl links: Ausgangszustand metallisch blank, rechts: nach 4-wöchiger Freibewitterung und ausgebildeter Deckschicht

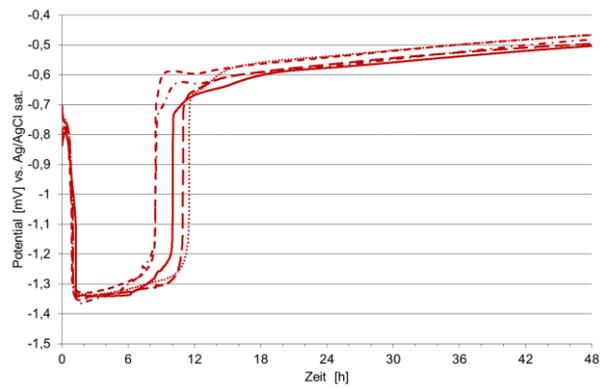


Bild 146: Potentialverlauf der freibewitterten Serie (vierwöchige atmosphärische Auslagerung)

Weiterhin wurden zwei Inhibitoren, die gemäß Hersteller sowohl anodisch als auch kathodisch wirksam sein sollen, auf ihre mögliche Wirksamkeit zur Unterbindung der Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase untersucht. Die in Bild 147 gezeigten Potentialverläufe über die Zeit zeigen jedoch keinerlei Beeinflussung durch die Zugabe der Inhibitoren auf die Potentialalage in der Frischbetonphase. Ähnlich wie bei der Serie CaOH ist eine geringe Streuung hinsichtlich des Potentialanstiegs zu verzeichnen.

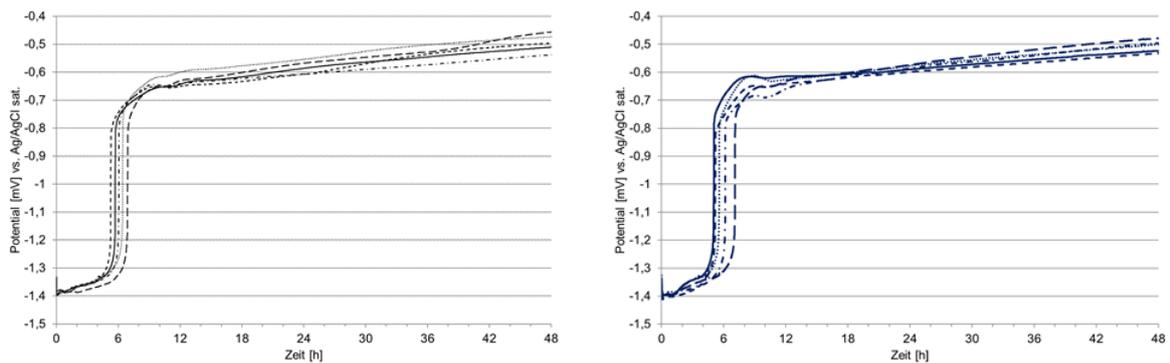


Bild 147: Potentialverlauf unter Zugabe von Inhibitor A $0,6 \text{ l/m}^3$ links und Inhibitor B $0,6 \text{ l/m}^3$ rechts

Bei allen getesteten Serien wurde nach 48 h ein Freies Korrosionspotential in einem Bereich um -500 mV gemessen.

Die Auswirkungen der Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase auf das Betonporengefüge sind in Bild 148 dargestellt. Die mit Poren durchsetzte Verbundzone ist bei allen Serien deutlich zu erkennen. Damit sind alle zuvor genannten Maßnahmen zur Vermeidung der Wasserstoffentwicklung als nicht zielführend einzuschätzen.

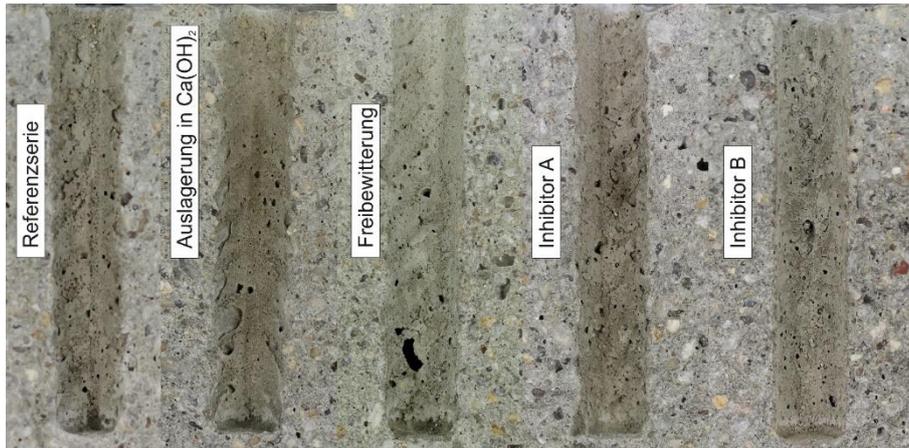


Bild 148: Aufnahmen der Verbundzone verzinkter Betonstahl – keine der angewandten Methoden zeigt einen Einfluss auf die H₂-Entwicklung und somit auf die Porenstruktur

3.5.3.3 Betonstahlpassivierung mittels Beschichtung

Ergänzend zu den in Kapitel 3.4.2.2 durchgeführten Untersuchungen wurde die Wirksamkeit von sehr dünnen organischen Beschichtungen zur Unterbindung der Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase untersucht. In Bild 149 sind die Potentialverläufe von vier verschiedenen Serien dargestellt, lediglich die Serie B hat einen kurzzeitigen Einfluss (ca. 10 Minuten) auf die Potentiallage. Eine signifikante Potentialverschiebung zur Unterbindung der Wasserstoffentwicklung in den ersten 8 Stunden konnte nicht beobachtet werden.

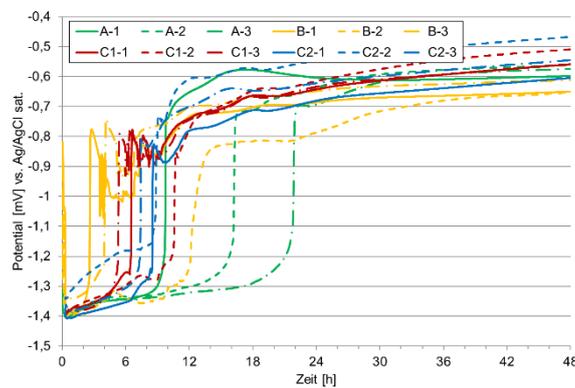


Bild 149: Potentialverlauf der Beschichtungsprüfung 1. Generation in Frischbeton mit CEM I, drei verschiedenen Hersteller, Hersteller C mit zwei verschiedenen Formulierungen C1 und C2

In der 2. Generation der Beschichtung wurden 8 Serien à 3 Probekörper untersucht. Die in Bild 150 dargestellten Potentialverläufe der Beschichtungen der 2. Generation weisen einen Datenverlust in dem eigentlichen Betrachtungszeitraum auf.

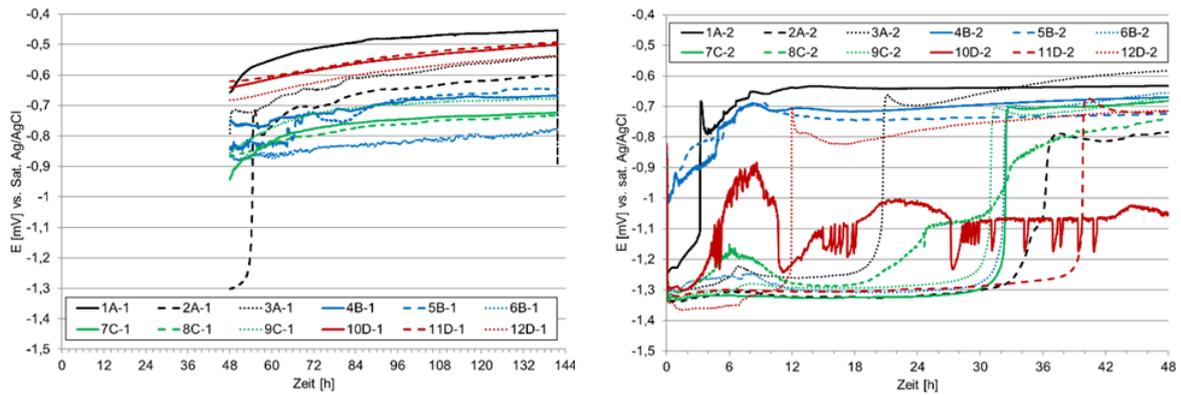


Bild 150: Potentialverlauf der Serie 1 der zweiten Beschichtungsgeneration in Frischbeton mit CEM I, zwei Hersteller (Hersteller 1 mit drei Formulierungen A-C, Hersteller 2 Formulierung D) Messdatenverlust zwischen 0 und 48 h(links) rechts ein Hersteller mit vier Formulierungen A-D

Die Wirksamkeit der Probe B der 1. Serie der 2. Generation konnte durch Zerstörung der Probekörper und Begutachtung der Verbundzone nachgewiesen werden. In Bild 151 ist bei den Serien A, C und D eine Porenbildung in der Verbundzone zu sehen, lediglich Serie B weist nur eine geringe Anzahl an Verdichtungsstellen auf. Bei der Auswertung der 2. Serie der 2. Generation wurden vereinzelt Beeinflussungen der Potentiallagen festgestellt, jedoch keine gesicherte Beeinflussung der jeweiligen Serie zur Vermeidung der Wasserstoffentwicklung.

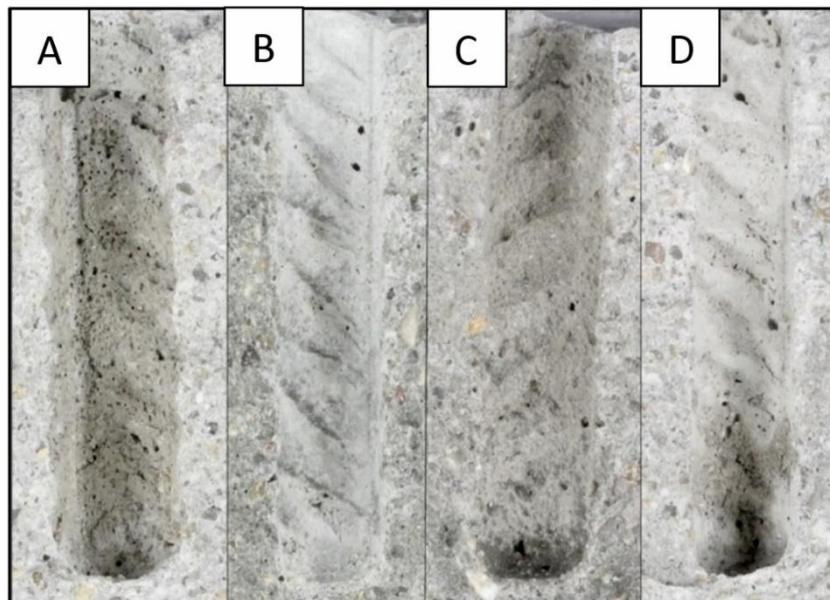


Bild 151. Aufnahmen der Verbundzone verzinkter Betonstahl - Mörtel, Probe B der Serie 1 - 2. Generation zeigt keine Porenbildung infolge Wasserstoffentwicklung

Die 3. Generation der Beschichtungen basiert auf der Serie B der 1. Staffel der 2. Generation. Bei der Weiterentwicklung der Beschichtungsmittel lagen die gemessenen Potentiale (Bild 152) über die gesamte Messdauer oberhalb der Potentialgrenze der Wasserstoffentwicklung an unverzinktem Betonstahl. Die Wirksamkeit der Beschichtung konnte auch anhand des Gefüges im Phasengrenzbereich in Bild 153 nachgewiesen werden.

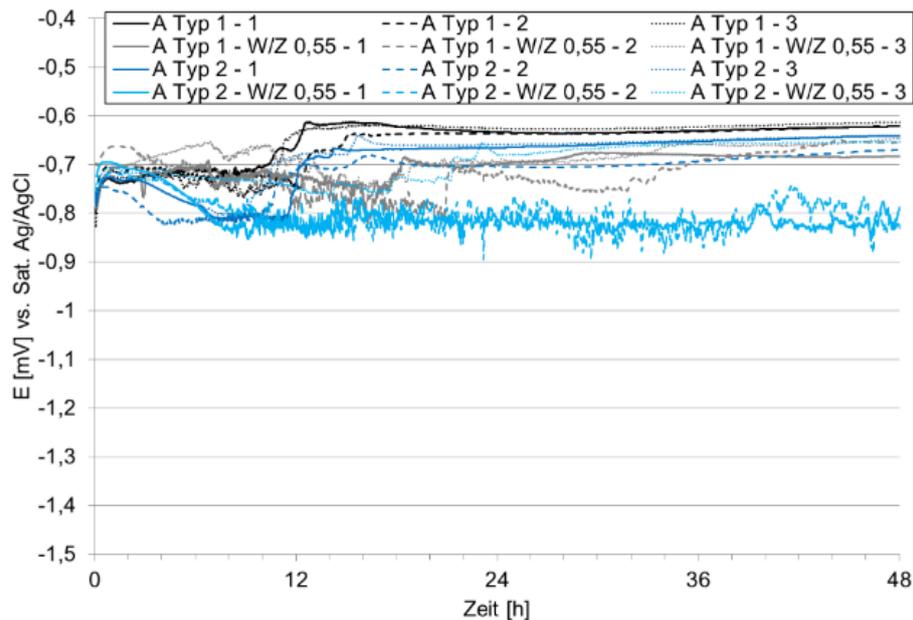


Bild 152: 3. Generation der Beschichtungen in Frischbeton mit CEM I, ein Hersteller zwei Varianten Typ 1 und Typ 2 geprüft mit W/Z Wert 0,45 und W/Z-Wert 0,55- Keine Wasserstoffentwicklung im Frischbeton



Bild 153: Gespaltene Probe mit einem verzinkten Betonstahl der mit der Beschichtung A Typ 1 der dritten Generation beschichtet wurde, keine Gefügestörung durch Wasserstoffentwicklung

3.5.4 Bezifferung des Korrosionsfortschritts in gerissenem Beton in Abhängigkeit von der Rissbreite

Um chloridinduzierte Korrosion in einem gerissenen Beton beschleunigt nachzustellen, wurden die dafür hergestellten Proben galvanostatisch vorgeschädigt. Hierbei wurde über einen Zeitraum von 72 h ein konstanter Strom in Höhe von 500 μA aufgeprägt. Es wurden gerissene Proben und zusätzlich partiell pigmentierte Proben, mit einem Chloridgehalt von 2 M.-%, verwendet. Die pigmentierten Proben dienen der Ermittlung der bevorzugten Ausbildung anodischer Teilbereiche infolge partieller Chloridkontamination. Vor Beginn der Polarisierung wurde in die Risse eine 1 molare Natriumchloridlösung mit einem pH-Wert von 6 injiziert. Nachfolgend sind in Bild 154 links die Potentialverläufe der Proben infolge Polarisierung dargestellt, rechts die Depolarisation der Proben nach Beendigung der Vorschädigung.

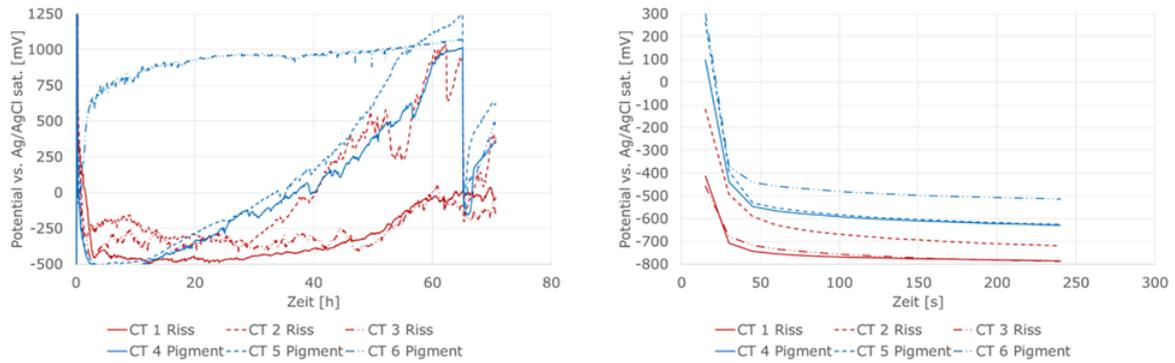


Bild 154: Potentialverlauf über die Dauer der Vorschädigung (links) und Depolarisation nach Beendigung der Vorschädigung (rechts)

Die Vorschädigung mit einem Strom in Höhe von $500 \mu\text{A}$ ergab bei 4 der sechs Proben einen signifikanten Potentialanstieg, Probe CT6 war von Beginn an passiv, so dass der Ladungsumsatz zu einem Großteil durch Entwicklung von Sauerstoff erfolgte. Die Proben CT2, CT 4 und CT5 wiesen einen quasi linearen Potentialanstieg ab ca. 15 bzw. 25 h auf, was auf eine kontinuierliche Deckschichtbildung zurückzuführen ist. Zum Ende der Polarisation waren auch diese Proben in einem Potentialbereich, in dem der Ladungsumsatz auf eine Sauerstoffentwicklung erfolgt. Diese Proben konnten für die weitere Betrachtung und Auswertung nicht mehr verwendet werden. In Bild 155 ist eine rekonstruierte 3D-Darstellung der vorgeschädigten Probe CT1 abgebildet. Aufgrund eines Defektes der CT-Anlage konnten die Messungen im Untersuchungszeitraum nicht fortgeführt werden. Die ausstehenden Ergebnisse der Proben CT 1 und CT 2 werden nach Beendigung der Untersuchungen nachträglich veröffentlicht.

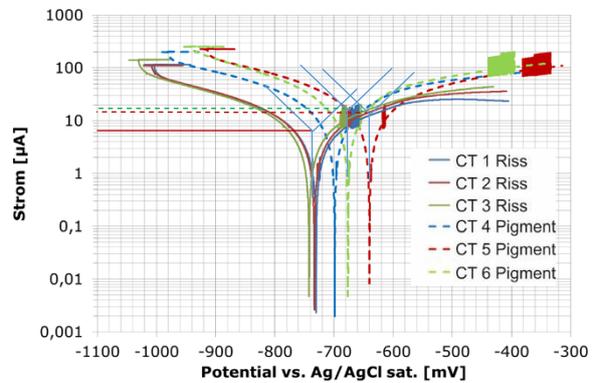


Bild 155: Rekonstruierter 3D-CT-Datenstanz der geschädigten Probe CT1(links,) rechts Strompotentialkurven aller Proben nach der 1. Vorschädigung

Die potentiodynamischen Messungen in Bild 155 rechts zeigen höhere Eigenkorrosionsströme an den pigmentierten Proben als an den gerissenen Proben, jedoch positivere freie Korrosionspotentiale. Dies kann auf dem Einfluss der korrodierenden Fläche zurückzuführen sein. Es ist anzunehmen, dass die aktiv korrodierende Fläche in den gerissenen Proben wesentlich kleiner ist als in den pigmentierten Proben. Im Umkehrschluss würde sich daraus eine höhere Stromdichte ergeben und somit auch eine höhere Korrosionsrate. Ohne die Ermittlung der korrodierenden Flächen mittels CT sind diese Ergebnisse nicht auszuwerten.

3.5.5 Beurteilung von Beschädigungen an feuerverzinktem Betonstahl (ungeschützte Schnittkanten, Risse in der Zinkschicht an nachträglich gebogenen Betonstählen) in Abhängigkeit des Werkstoffzustandes (Biegen, Stahlsorten, etc.) im Hinblick auf eine mögliche wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion am Betonstahl

Im Rahmen der PA-Sitzung zu Beginn des Vorhabens, wurde eine wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion an Betonstählen mit handelsüblichen Zugfestigkeiten als unrealistisch erachtet. Es wurde festgelegt, diese Untersuchungen nicht durchzuführen. Im Ausgleich hierfür wurde die Parametermatrix für die Untersuchungen der Beschichtungen, hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Unterbindung der Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase, erweitert.

3.5.6 Auswirkung der Verwendung feuerverzinkter Betonstähle auf die Nutzungsdauer von Stahlbetonbauteilen

Aus den in Kapitel 3.4.1 durchgeführten Untersuchungen und den daraus ermittelten Elementströmen können Ladungen über die Zeit errechnet werden, aus denen wiederum unter Verwendung des Faraday'schen Gesetzes ein Masseverlust in Abhängigkeit des untersuchten Werkstoffes ermittelt werden kann. Im Falle einer homogenen Korrosionserscheinung, wie der Korrosion von verzinktem Betonstahl in Mörtel oder Betonen, kann daraus eine Abtragsrate in μm pro Jahr errechnet werden. Die dafür benötigten Formeln sind nachfolgend aufgeführt.

$$\Delta m = \frac{M}{(z \cdot F)} * \int I_{corr} * dt \quad \text{Formel 4}$$

mit

Δm	Masse	[g/cm ² a]
M	Molare Masse	[g/mol]
I_{corr}	Stromdichte	[A/cm ²]
t	Zeit	[s]
z	Ladungszahl des Metalls	[-]
F	Faraday'sche Konstante	[C/mol]
M	65,38	[g/mol]
t	31.536.000	[s/a]
z	2	[-]
F	96485	[C/mol]

$$\text{Abtragsrate} = \frac{\Delta m}{\rho * 10000} \quad \text{Formel 5}$$

mit

Δm	Masse	[g/cm ² a]
ρ	Dichte von Zink	[g/cm ³]
10000	Umrechnungsfaktorfaktor cm in μm	

Da neben den Elementströmen auch die Eigenkorrosion der Proben einen maßgebenden Einfluss haben kann, wurden die Korrosionsströme für die Berechnung der Eigenkorrosionsraten anhand von Strom-Potentialkurven ermittelt.

3.5.6.1 Polarisationsmessungen an Kombinationen aus chloridhaltigen – chloridfreien Mörtelprismen

Die galvanostatischen und potentiodynamischen Messungen der chloridhaltigen Proben aus den Elementstrommessungen werden in nachfolgendem Kapitel dargestellt. Die in Bild 156 dargestellten Polarisationswiderstände wurden mittels galvanostatischem Puls, mit einer Pulsdauer $t = 20$ Sek., ermittelt. Die chloridhaltigen Proben sind mit der Probennummer und dem Chloridgehalt dargestellt. Es wurden jeweils der anodische und kathodische Polarisationswiderstand ermittelt. Der Abbildung ist zu entnehmen dass die Polarisationswiderstände ab der chloridhaltigen Probe Cl 3-1,0 signifikant niedriger sind als die Proben bis 0,4 M.-% Chloridgehalt.

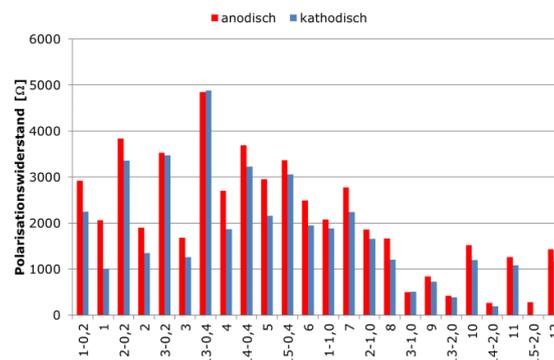


Bild 156: Darstellung der anodischen und kathodischen Polarisationswiderstände der Einzelproben aus der Serie der chloridhaltigen Korrosionselemente / Pulsdauer $t = 20$ Sek.

In Bild 157 und Bild 158 sind die Strom-Potentialkurven der chloridhaltigen Probekörper dargestellt. Durch Anlegen der Tafelgeraden kann der Eigenkorrosionsstrom zeichnerisch ermittelt werden. Der Eigenkorrosionsanteil der Serie Cl 0,2 M.-% Chloridgehalt beträgt maximal $4,5 \mu\text{A}$ das entspricht einer Stromdichte in Höhe von $1,36 \text{ mA/m}^2$.

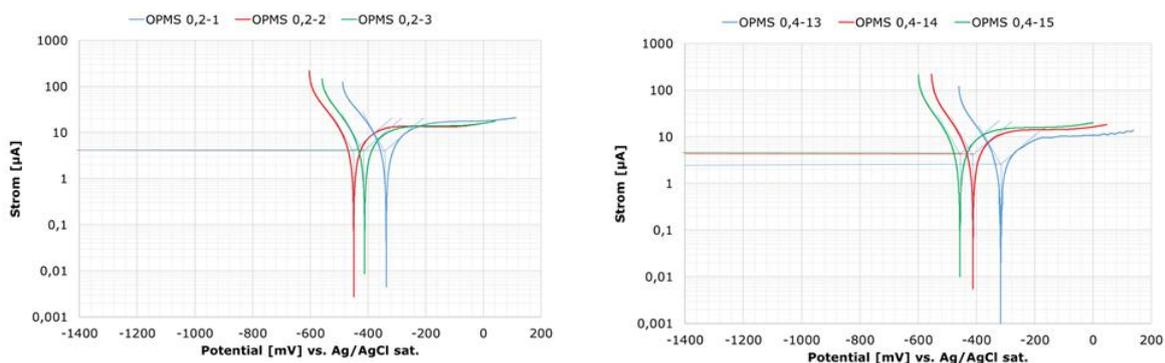


Bild 157: Strom-Potentialkurve der Proben mit 0,2 M.-% Chloridgehalt (links) und 0,4 M.-% Chloridgehalt (rechts)

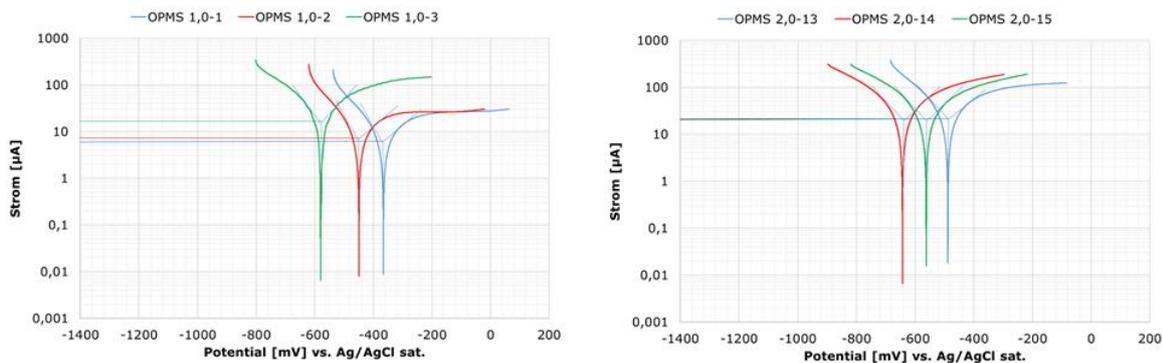


Bild 158: Strom-Potentialkurve der Proben mit 1,0 M.-% Chloridgehalt (links) und 2,0 M.-% Chloridgehalt (rechts)

Die ermittelten maximalen Korrosionsströme der weiteren Serien sind ebenfalls aus den Strom-Potential-Kurven ermittelt worden und in Tabelle 29 dargestellt. Dieser sind auch die berechneten Korrosionsstromdichten und die daraus resultierenden Abtragsraten zu entnehmen.

Tabelle 29: Eigenkorrosionsraten der chloridhaltigen Serien

Probe	Eigenkorrosionsstrom [µA]	Stromdichte [mA/m ²]	Korrosionsrate aus Eigenkorrosion [µm/a]
Cl 0,2	4,5	1,36	2,04
Cl 0,4	4,6	1,39	2,09
Cl 1,0	15,0	4,55	6,80
Cl 2,0	20,0	6,06	9,07

In Tabelle 30 sind die Korrosionsströme aus Eigenkorrosion und Elementstrom aufgeführt, so dass die tatsächlich zu erwartende Abtragsrate berechnet werden konnten.

Tabelle 30: Korrosionsrate aus Eigen- und Elementkorrosion der chloridhaltigen Serien

Probe	Eigenkorrosionsstrom und Elementstrom [µA]	Stromdichte [mA/m ²]	Korrosionsrate aus Eigenkorrosion und Korrosionselement [µm/a]
Cl 0,2	4,5 + 0,5	1,51	2,27
Cl 0,4	4,6 + 0,1	1,42	2,14
Cl 1,0	15,0 + 0,5	4,70	7,02
Cl 2,0	20,0 + 0,0	6,06	9,07

Unter Betrachtung der ermittelten Korrosionsraten und einer Mindestzinkschichtdicke von 85 µm würde sich im Falle von 1,0 M.-% Chlorid und dauerfeuchten Bedingungen ein Zeitraum von ca. 12 Jahren bis zum vollständigen Korrosionsabtrag des Zinks ergeben. In Abhängigkeit vom Diffusions-Migrationswiderstand des Betons kann bei Erreichen des Chloridgehaltes von 1 M.-% jedoch von einer bereits reduzierten Zinkschichtdicke ausgegangen werden, so dass der effektive Nutzungsdauerzugewinn weitaus geringer ausfällt. Beispielhaft kann nach Erreichen des Chloridgehaltes von ca.

1 M.-% nach 25 Jahren Nutzungsdauer eine Restzinkschichtdicke ca. 35 μm gegeben sein, die zu einem Nutzungsdauerzugewinn von dann 5 Jahren beiträgt. Der Nutzungsdauerzugewinn bezieht sich hierbei auf die Initiierung einer möglichen Lochkorrosionserscheinung. Untersuchungen in [31] haben ergeben, dass es bei einem ein Chloridgehalt von 0,4 M.-% Chlorid nicht zwangsläufig zu Lochkorrosion an unverzinkten Betonstählen kommen muss. Daher wird hier für das exemplarische Einsetzen der Lochkorrosion ein Chloridgehalt von 1,0 M.-% angesetzt.

3.5.6.2 Polarisationsmessungen an Kombinationen aus karbonatisierten und alkalischen Mörtelprismen

Die galvanostatischen und potentiodynamischen Messungen der karbonatisierten und alkalischen Proben aus den Elementstrommessungen werden in nachfolgendem Kapitel dargestellt. Die in Bild 159 dargestellten Polarisationswiderstände wurden mittels galvanostatischem Puls, mit einer Pulsdauer $t = 20$ Sek., ermittelt. Als Kathode werden die alkalischen Proben bezeichnet. Es wurden jeweils der anodische und kathodische Polarisationswiderstand ermittelt. Die Polarisationswiderstände wurden nach Beendigung der Elementstrommessungen durchgeführt. Die gemessenen Polarisationswiderstände der Kathoden in der Serie Wasser sind deutlich niedriger als die der Kathoden der Serie Gel mit Ausnahme der Probe Kathode 1. Beim Vergleich mit den chloridhaltigen Serien kann die anders geartete Deckschichtbildung der Kathoden bzw. chloridfreien Proben der Cl-Serien auf das in diesen Serien wesentlich niedrigere Potential zurückzuführen sein. Die niedrigen Potentiale der karbonatisierten Proben können auf den Karbonatisierungsprozess zurückzuführen sein.

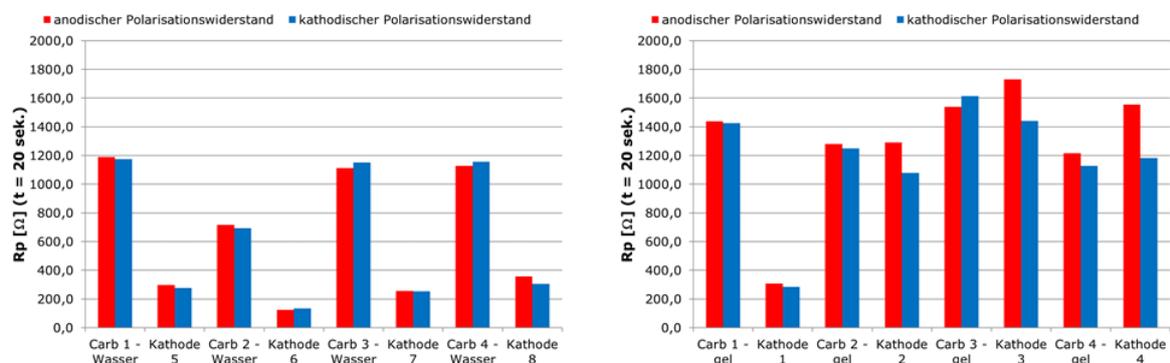


Bild 159: Darstellung der anodischen und kathodischen Polarisationswiderstände der Einzelproben aus den Serien der karbonatisierten Proben in Wasser und Gel / Pulsdauer $t = 20$ Sek.

Auch bei diesen Serien wurde mittels Strom-Potentialkurven die Eigenkorrosionsrate ermittelt, die gemessenen SPK sind in Bild 160 dargestellt.

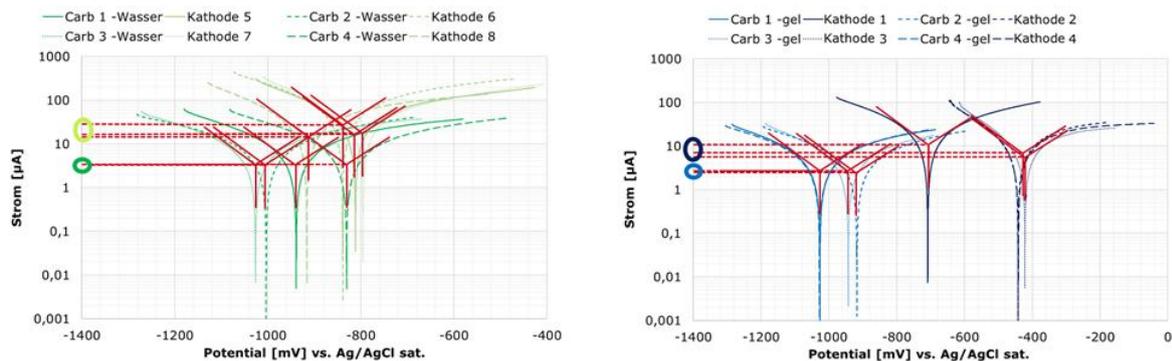


Bild 160: Strom-Potentialkurve der Serie karbonatisiert - Wasser (links) und karbonatisiert - Gel (rechts)

Die Eigenkorrosionsraten der karbonatisierten Serien sind Tabelle 31 zu entnehmen. Bei Betrachtung der ermittelten Ergebnisse für karbonatisierte, wassergesättigte Proben und einer Mindestzinkschichtdicke von 85 µm ergibt sich ein Zeitraum von ca. 49 Jahren bis zum vollständigen Korrosionsabtrag des Zinks. Da auch hier eine Betrachtung bis zur Initiierung der Korrosion infolge Karbonatisierung erfolgen muss, ist dieser Zeitraum zu berücksichtigen. Eine Betondeckungsreduktion auf ein Maß von 15 mm und ein Erreichen der Karbonatisierungsfront nach ca. 15 Jahren, würde eine Restzinkschichtdicke von ca. 55 µm ergeben. Dabei wird eine Korrosionsrate gemäß [32] im passiven alkalischen Beton von ca. 2,0 µm/a angenommen. Daraus resultiert eine Nutzungsdauer von ca. 45 bis 55 Jahren (wassergesättigt bzw. feucht-Gel). Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Eigenkorrosionsrate im alkalischen Beton innerhalb des Zeitraumes bis zum Erreichen des pH-Wertes von ca. 8,6 weiter reduziert wird. Dies liegt zum einen am Fortschreiten der Deckschichtbildung, zum anderen an der pH-Wertabsenkung auf Werte kleiner 12,4 die ein Herabsetzen der Eigenkorrosionsrate zur Folge haben. Dies lässt sich jedoch innerhalb des Forschungszeitraumes nicht darstellen.

Tabelle 31: Eigenkorrosionsraten der karbonatisierten Serien

Probe	Eigenkorrosionsstrom [µA]	Stromdichte [mA]/m ²	Korrosionsrate aus Eigenkorrosion [µm/a]
Carb.- Gel	2,7	0,82	1,23
Carb.- Wasser	3,8	1,15	1,72
Alka.- Gel	8,0	2,43	3,63
Alka.- Wasser	25,0	7,59	11,37

Die Elementströme müssen bei den karbonatisierten Serien nicht berücksichtigt werden, da diese Null oder negativ sind.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass eine Betondeckungsreduktion bei einer Exposition der XC-Klassen möglich ist. Im Falle eine Belastung der Bauteile durch die Expositionen XS oder XD kann durch die Feuerverzinkung kein signifikanter Nutzungsdauerzugewinn erzielt werden. Im Falle eines gerissenen Bauteils und einer Kontaminierung des Risses mit einem chloridhaltigen Elektrolyten ist jedoch von einer deutlich verzögerten Initiierung der Lochkorrosion am Substrat (Betonstahl unterhalb der Zinkschicht) auszugehen. Setzt man hier die ermittelten Eigenkorrosionsraten aus den chloridhaltigen Serien an, so kommt man auf ca. 9 Jahre. Im Falle des gerissenen Betons kann es jedoch zu erhöhten Korrosionsraten kommen, da die physische Barriere hinsichtlich der Migration der Korrosionsprodukte nicht gegeben ist. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse in [33] ist davon auszugehen, dass ein Zeitraum von ca. 4,8 Jahren bis zur Initiierung der Lochkorrosion am Substrat vergeht.

3.5.7 Empfehlungen aus den Untersuchungen zur Korrosion und zum Korrosionsschutz

Auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse kann empfohlen werden, nachfolgende Hinweise und sinnngemäße Formulierungen in die Regelwerke (Eurocode, nationaler Anhang, bauaufsichtliche Zulassungen) aufzunehmen.

Bei der Verwendung von feuerverzinktem Betonstahl kann eine Reduktion der Betondeckung in den Expositionsklassen XC nach Tabelle 32 durchgeführt werden.

Tabelle 32: Betondeckung für die Expositionsklasse XC und Abminderungswerte bei Verwendung feuerverzinkter Betonstähle

Expositionsklasse	Umgebung		Indikative Mindestfestigkeitsklasse	$C_{min,dur}$	$\Delta C_{dur,Zn}$
XC1	Trocken oder ständig nass	Beton in Gebäuden mit geringer Luftfeuchte Beton, der ständig in Wasser getaucht ist	0	10	10
XC2	Nass, selten trocken	Langzeitig wasserbenetzte Oberflächen; vielfach bei Gründungen	C25/30	20	10
XC3	Mäßige Feuchte	Beton in Gebäuden mit mäßiger oder hoher Luftfeuchte; vor Regen geschützter Beton im Freien	C30/37	20	10
XC4	Wechselnd nass und trocken	wasserbenetzte Oberflächen, die nicht der Klasse XC2 zuzuordnen sind	C35/45	25	10

In den Expositionsklassen XD und XS kann es bei der Verwendung unverzinkter Betonstähle und auftretenden Ungängen in der Bauteilausführung zu einer vorzeitigen Initiierung von Lochkorrosion durch Chloride kommen. Infolge der Lochkorrosionserscheinung kommt es zu einer Ausbildung von Makroelementen mit erhöhten Korrosionsraten. Bei der Verwendung feuerverzinkter Betonstähle zeigten die in den elektrochemischen Untersuchungen gemachten Beobachtungen, dass die Ausbildung von Makroelementen nicht erfolgt und somit ein Nutzungsdauerzugewinn zu erwarten ist. Dennoch kann eine Abminderung der Betondeckung für die Expositionsklassen XD und XS nicht empfohlen werden, da der Nutzungsdauerzugewinn für diese Art der Schädigung nicht normativ erfasst wird.

3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der vorliegende Schlussbericht enthält die zusammenfassende Darstellung der im Rahmen des Forschungsprojekts „Technologie- und Sicherheitszuwachs bei der Anwendung von feuerverzinktem Betonstahl zum Ausbau einer nachhaltigen Marktposition im Stahlbetonbau“ (Kurztitel „Feuerverzinken von Betonstahl“) in der Zeit vom 01.10.2013 - 31.08.2016 bearbeiteten Fragestellungen, der an den beteiligten Forschungsstellen durchgeführten Untersuchungen sowie eine Darstellung der Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen.

Die im Rahmen der Untersuchungen eingesetzten Untersuchungsmethoden und Prüfverfahren gestatteten eine zuverlässige Beurteilung der nach dem Biegen unverzinkter und verzinkter Betonstähle verbleibenden Gebrauchseigenschaften, des mit einem Verzinken nach vorangegangenem Biegen verbundenen Risikos der flüssigmetallindizierten Rissbildung (LMAC) sowie der Korrosionseigenschaften feuerverzinkter Betonstähle und des mit dem Einsatz dieser Stähle verbundenen Nutzens für den Anwender.

Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen konnten begründete Aussagen für die Verfahrensparameter bei der Verarbeitung unverzinkter und verzinkter Stähle bei tiefen Temperaturen bis -20 °C , dem Rückbiegen unter Baustellenbedingungen sowie dem Biegen im Bereich der Schweißstelle bei der Herstellung von Mattenkörben getroffen werden.

Darüber hinaus konnten Empfehlungen für die im Rahmen der Bemessung und Prüfung feuerverzinkter Betonstähle anzusetzende Dauerschwingfestigkeit sowie den im Rahmen der Konformitätsprüfung erforderlichen Prüfumfang ausgesprochen werden.

Um die Übertragung der experimentellen Erkenntnisse auf andere Stabdurchmesser und Bieegeradien abzubilden, wurden an der Forschungsstelle 2 numerische Berechnungen mittels der Finite Elemente Methode durchgeführt. Unter Berücksichtigung der experimentellen Randbedingungen zeigten die Ergebnisse gute Übereinstimmung miteinander.

Mit Hilfe makroskopischer und mikroskopischer Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die mit dem Biegen bereits verzinkter Betonstähle (Verfahrensweg A Verzinken - Biegen) einhergehenden Risse in Abhängigkeit vom Verzinkungsprozess in der Zinkschicht im Extremfall bis auf den Grundwerkstoff reichen und ggf. nach Maßgabe der in der Zulassung beschriebenen Verfahrensweise ausgebessert werden müssen.

Auf der Grundlage der an der Forschungsstelle 1 durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Verarbeitungstemperatur unverzinkter und verzinkter Stähle auf -20 °C abgesenkt werden kann, ohne die mechanischen Eigenschaften nachteilig zu beeinflussen, so dass eine entsprechende Anpassung des einschlägigen Regelwerks empfohlen werden kann.

Weiterhin konnten im Hinblick auf das Rückbiegen unter Baustellenbedingungen bei den untersuchten Werkstoffen bestehende Reserven aufgezeigt und Empfehlungen ausgesprochen werden. Während vor dem Biegen verzinkte Betonstähle (Verfahrensweg A Verzinken – Biegen) wie unverzinkte zurückgebogen werden können, kann ein Rückbiegen von vor dem Verzinken gebogenen Betonstählen (Verfahrensweg B Biegen – Verzinken) nicht empfohlen werden.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass ein Biegen unmittelbar an der Schweißstelle, wie es bei der Herstellung von Mattenkörben wünschenswert ist, bei allen drei untersuchten Verfahrenswegen - unverzinkte Betonstähle, Verfahrensweg A (Verzinken-Biegen) und Verfahrensweg B (Biegen-Verzinken) - mit einem Biegerollendurchmesser von $4 \cdot d_{st}$ (bei Betonstahlmatten der Duktilitätsklasse A und einem Stabdurchmesser von 10 mm) grundsätzlich ohne Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit möglich ist.

Auf der Grundlage der an Forschungsstelle 2 durchgeführten Untersuchungen war eine Beurteilung des mit einem Verzinken nach vorangegangenem Biegen (Verfahrensweg B) verbundenen Risikos der flüssigmetallinduzierten Spannungsrissbildung möglich. In Verbindung mit den an Forschungsstelle 1 durchgeführten Untersuchungen konnten so Mindestbiegerollendurchmesser angegeben werden, die auch unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten eine ausreichende Sicherheit gegen Rissbildungen bieten.

Aus baupraktischen Gründen wird empfohlen, für Stabdurchmesser ≤ 14 mm einheitlich einen Mindestbiegerollendurchmesser von $6 \cdot d_{St}$ und für Stabdurchmesser ≥ 16 mm einheitlich einen Mindestbiegerollendurchmesser von $8 \cdot d_{St}$ vorzugeben.

Grundsätzlich lassen die Ergebnisse aber auch die Möglichkeit offen, die Funktionsfähigkeit kleinerer Biegerollendurchmesser unter Beachtung der in diesem Bericht zugrunde gelegten Prüfverfahren und Kriterien im Einzelfall vor der Bauausführung nachzuweisen.

Darüber hinaus konnten die verformungs- bzw. verzinkungsbedingten Randdefekte charakterisiert und ihre Auswirkung auf die Dauerschwingfestigkeitseigenschaften angegeben werden.

Im Hinblick auf die Dauerschwingfestigkeit wird empfohlen, die bereits bestehende Abminderung der Dauerschwingfestigkeit bei 75 % zu belassen. In diesem Fall kann auf die Durchführung von Dauerschwingversuchen im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle verzichtet werden.

Die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen an Werkstoff QT 10 gewonnenen Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass eine Abminderung nicht in jedem Fall vorgenommen werden muss, so dass empfohlen wird, die Ausnutzung der nicht reduzierten Dauerschwingfestigkeit in die Zulassung aufzunehmen, wenn die Voraussetzungen hierfür vor der Verwendung im Rahmen einer Verfahrensprüfung nachgewiesen werden.

Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen konnten schließlich Empfehlungen für den im Rahmen der Konformitätskontrolle vorzusehenden Prüfumfang ausgesprochen werden.

Im Rahmen der an der Forschungsstelle 3 durchgeführten Untersuchungen wurde unter Verwendung elektrochemischer Untersuchungsmethoden sowohl das Korrosionsverhalten feuerverzinkter Betonstähle in korrosiven Expositionen als auch das Passivierungsverhalten und die Wirkung von Inhibitoren, Passivierungsverfahren und Beschichtungsstoffen auf die Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase untersucht.

Bei Untersuchungen in karbonatisiertem Beton konnte ein deutlicher Vorteil des feuerverzinkten Betonstahls gegenüber unverzinkten Betonstählen bestätigt werden. Hier konnte ein Rückgang der Korrosionsrate des Zinks infolge Karbonatisierung festgestellt werden. Ausgehend von einer Mindestzinkschichtdicke von $85 \mu\text{m}$ ergibt sich unabhängig von der Betondeckung eine Nutzungsdauer von 45 – 55 Jahren. Bei Berücksichtigung der an den verwendeten gerippten Betonstählen ermittelten Zinkschichtdicken, von $140 \mu\text{m}$ bis $160 \mu\text{m}$, ergeben sich sogar Nutzungsdauern von 70 bis 90 Jahren. In den Expositionsklassen XC ist eine Reduktion der Betondeckung um 10 mm bei der Verwendung von feuerverzinktem Betonstahl mit einer Mindestzinkschichtdicke von $85 \mu\text{m}$ unter Aufrechterhaltung einer typischen Nutzungsdauer von 45 – 55 Jahren möglich.

Im Falle einer Beanspruchung der Bauteile durch die Expositionsklassen XS oder XD bietet eine Feuerverzinkung ebenfalls einen zusätzlichen Schutz. Anders als bei der Verwendung von unverzinktem Betonstahl treten bei verzinkten Betonstählen keine Lochkorrosionserscheinungen infolge Chlorideinwirkung auf. Bei den Untersuchungen in chloridhaltigem Mörtel konnte erst ab 1 M.-% Chloridgehalt, bezogen auf den Zementgehalt, ein signifikanter Anstieg der Eigenkorrosionsrate des Zinküberzugs festgestellt werden. Bei 0,2 und 0,4 M.-% konnten keine chloridbedingten Korrosionserscheinungen am feuerverzinkten Betonstahl festgestellt werden. Somit kann bei ausreichender

Zinkschichtdicke und einem im Beton befindlichen Chloridgehalt der $< 1 \text{ M. } \%$ ist, ein Nutzungsdauerzugewinn von einigen Jahren erreicht werden. An nicht gerissenen chloridhaltigen Betonproben wurde im Gegensatz zu unverzinkten Betonstählen mit aktiven Korrosionsbereichen, bei Verwendung feuerverzinkten Betonstählen keine Makroelementbildung festgestellt.

Das Verhalten im Rissbereich wurde nicht untersucht. Im Falle eines gerissenen Bauteils und einer Kontaminierung des Risses mit einem chloridhaltigen Elektrolyten ist jedoch von einer verzögerten Initiierung von Lochkorrosion am Substrat (Betonstahl unterhalb der Zinkschicht) auszugehen.

Im Rahmen der PA-Sitzung zu Beginn des Vorhabens, wurde eine wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion an Betonstählen mit handelsüblichen Zugfestigkeiten als unrealistisch erachtet. Die Fragestellung der wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion wurden nach Beschluss des PA daher nicht weiter verfolgt.

Im Projekt konnte ein Beschichtungsstoff identifiziert werden, der eine Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase unterdrückt. Die Beschichtungsdicke beträgt nur wenige μm . Der Beschichtungsstoff wurde vom Hersteller fortlaufend während des Projektes weiterentwickelt. Die Wirksamkeit des Beschichtungsstoffes zur Unterdrückung der Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase konnte durch elektrochemische Messungen und anschließende Zerstörung der Probekörper und Begutachtung der Verbundzone eindeutig nachgewiesen werden. Gefügestörungen durch Wasserstoffentwicklung konnte bei Verwendung der Beschichtung nicht festgestellt werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

4. Literaturverzeichnis

- [1] www.galvanizedrebar.com
- [2] Deutsches Institut für Bautechnik, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-1.4-165, Feuerverzinkte Betonstähle, Berlin, 2014
- [3] AIF (Hrsg.): Entwicklung eines praxisgeeigneten Prüfverfahrens zur Untersuchung der Einflussgrößen bei der Rissbildung von Bauteilen aus Stahl in Zinkschmelzen, Abschlussbericht, Forschungsvorhaben Nr. 15081 N/1, 2009.
- [4] AIF (Hrsg.): Technologie- und Sicherheitsgewinn bei Feuerverzinken zum Ausbau der Marktposition des verzinkten Stahlbaus, Abschlussbericht, AIF Vorhaben Nr. 265, 2010.
- [5] Maas P. u. Peißker P. (Hrsg.): Handbuch Feuerverzinken. 3. Auflage, Wiley-VCH Verlag Weinheim, 2008.
- [6] DAfStb - Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 318 "Eigenschaften von feuerverzinkten Überzügen auf kaltumgeformten Betonrippenstählen und Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl. Technologische Eigenschaften von kaltgeformten Betonrippenstahl nach einer Feuerverzinkung. (Gleichzeitig GAV-Bericht Nr. 82 und Nr. 83), Wilhelm Ernst Sohn, Berlin 1981
- [7] Naseband, K., Martin, E., Helms, R.: Einfluss der Probenform auf das Ergebnis des Kerbschlagbiegeversuches. Auswertung der Fachliteratur, Westdt. Verl., Köln 1968.
- [8] Nikolau, J.; Papadimitriou, G.: Impact toughness of reinforcing steel produced by (i) the Tempcore process and (ii) microalloying with vanadium, in: International Journal of Impact engineering 31, 2005, S. 1065–1080
- [9] Körber, D.: Einflussgrößen auf die flüssigmetallinduzierte Spannungsrisskorrosion beim Feuerverzinken, Dissertation, 2013, TU Darmstadt 2013.
- [10] Bergmann, W. Werkstofftechnik, Teil 2 Anwendung, Hanser, München, Wien, 2. Aufl. 1987
- [11] ASTM A 767 „Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Bars for Concrete Reinforcement“, 2009
- [12] BAM: Bericht Einflüsse auf die Duktilitätskennwerte von Bewehrungsstahl, BAM-Forschungsvorhaben 7332, 2005
- [13] Martin, H.; Schießl, P.; Schwarzkopf, M.: Untersuchungen zur Rückbiegefähigkeit von Betonstählen, IBS 02.12.1982
- [14] Pohl M., Luthle A.: Flüssigmetallinduzierte Spannungsrisskorrosion- Schadensmechanismen und ihre Auswirkungen, in: Tagung Werkstoffprüfung 2007, Bad Neuenahr.
- [15] VDI-Richtlinie VDI 3822, Schadensanalyse - Flüssigmetallinduzierte Rissbildung beim Stückverzinken 11/2010.
- [16] Feldmann M., Ulbrich D., Breitschaft G.: Aktuelle Forschungsergebnisse zur Rissbildung in feuerverzinkten Stahlkonstruktionen, in: DIBt- Mitteilungen, Heft 3, 2009, S. 78-84.
- [17] DASt-Ri.022: Konstruktionsgerechtes Verzinken - Verzinkungsgerechtes Konstruieren. Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Düsseldorf 2009.
- [18] Landgrebe R., Adelman J., Körber D., Berger C.: Wasserstoff- und flüssigmetallinduzierte Rissbildungen - Zwei diffusionsgesteuerte Schädigungsmechanismen im Vergleich, in: GAV Kolloquium Hannover 2010.

- [19] Engell H. J., Speidel M. O.: Ursachen und Mechanismen der Spannungsrissskorrosion. *Werkstoffe und Konstruktion* 20 1969, S. 281-300.
- [20] Kaur I., Mishin Y., Gust W.: *Fundamentals of grain and interphase boundary diffusion*, Wiley 1995.
- [21] Schuster J.: Risse in feuerverzinkten Konstruktionen - Neue Überlegungen zum Bildungsmechanismus. *Die Verbindungsspezialisten, DVS 258 2009*, S. 368-375.
- [22] Gordon P., Henry H.: The Mechanism of Crack Initiation and Crack Propagation in metal-induced Embrittlement of Metals. *American Society for Metals and the Metallurgical, Society of AIME, 13A, No. 3 1982*, p. 457-472.
- [23] Stoloff N. S., Johnston T. L.: Crack Propagation in a Liquid Metal Environment. *Acta Metallurgica* 4 1963 No. 11, p. 251-256.
- [24] Westwood A. R. C., Kamdar M. H.: Concerning Liquid Metal Embrittlement, particularly of Zinc Monocrystals by Mercury, *Philosophical Magazine* 89, 1963, No. 8, p. 787-804.
- [25] VDI-Richtlinie VDI 2230, Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubverbindungen, VDI, Düsseldorf, 12/2014.
- [26] Simonsen F.: Der Einfluss von zinkbasierten Korrosionsschutzsystemen auf die zyklische Beanspruchbarkeit von Bauteilen aus Stahl. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2015, Aachen, Shaker, 2015.
- [27] Weber J.O.: Beitrag zur betriebsfesten Auslegung von Schraubenverbindungen auf Grundlage moderner Betriebsfestigkeitskonzepte, Aachen, Shaker, 2010.
- [28] Kloos K.-H., Thomala W.: *Schraubenverbindungen: Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung*, 5. Aufl., Berlin, Springer, 2007.
- [29] Ungermann D., Rademacher D., Oechsner M., Simonsen F., Friedrich S., Lebelt P.: *Feuerverzinken im Brückenbau, Stahlbau*, 2015, Nr. 1, S. 2–9.
- [30] Burkert, A., Ebell, G. und Lehmann, J.: "Einfluss chromatreduzierter Zemente auf die Ausbildung der Verbundzone Stahl/Beton bei Verwendung feuerverzinkter Bauteile," 52. DAfStb-Forschungskolloquium. p. pp. 272-282.
- [31] Beck, M.: "Zur Entwicklung der Eigenkorrosion von Stahl in Beton," RWTH-Aachen, Aachen, 2010
- [32] Rauen, H. Martin und A.: *Untersuchungen ueber das Verhalten verzinkter Bewehrung in Beton*, Bericht 68 GAV, 1974.
- [33] David Darwin, JoAnn Browning, Matthew O'Reilly, Lihua Xing, and Jianxin Ji: "Critical Chloride Corrosion Threshold of Galvanized Reinforcing Bars," 2009, pp. 176-183.