Dr.-Ing. Andreas Burkert
Dr.-Ing. Jürgen Mietz
Dipl.-Ing. (FH) Jens Lehmann
Dipl.-Ing. (FH) Gerd Eich
Dipl.-Ing. Annette Burkert

# Verzinkte Bauteile in Kontakt mit Spanngliedern

**Forschungsbericht 282**

Berlin 2008

Impressum

Forschungsbericht 282:
**Verzinkte Bauteile in Kontakt mit Spanngliedern**

2008

Herausgeber:
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Telefon: +49 30 8104-0
Telefax: +49 30 8112029
E-Mail: info@bam.de
Internet: www.bam.de

Copyright © 2008 by Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Umschlag: Lutz Mittenzwei
Layout: BAM-Arbeitsgruppe Z.64

ISSN 0938-5533
ISBN 978-3-9812072-6-2

# Inhaltsverzeichnis


| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Einleitung** | 5 |
| **2** | **Durchgeführte Untersuchungen** | 6 |
| 2.1 | Verwendete Untersuchungsmaterialien und Messgeräte | 6 |
| 2.1.1 | Alkalische Lösungen | 6 |
| 2.1.2 | Beton | 6 |
| 2.1.3 | Spannstähle | 7 |
| 2.1.4 | Messgeräte | 7 |
| 2.2 | Laborversuche | 7 |
| 2.2.1 | Planparallele Versuchsanordnung | 7 |
| 2.2.2 | Praxisnahe Versuchsanordnung | 8 |
| 2.2.3 | Praxisnahe Versuchsanordnung mit feuerverzinkten Anbauteilen | 8 |
| 2.2.4 | Zeitstandversuche unter Vorspannung | 8 |
| 2.3 | Versuche an realen Stahlbetonfertigteilen | 10 |
| 2.3.1 | Stahlbetonbalken mit feuerverzinktem Flachstahl; St : Zn = 13 : 1 | 11 |
| 2.3.2 | Stahlbetonbalken mit massiven verzinkten Einbauteilen; St : Zn = 6 : 1 | 11 |
| 2.4 | Versuche an realen Spannbetonfertigteilen aus Stahlfaserbeton | 12 |
| 2.4.1 | Untersuchungen bei Fa. Max Bögl | 12 |
| 2.4.2 | Untersuchungen bei Fa. Rekers | 12 |
| **3** | **Ergebnisse** | 14 |
| 3.1 | Ergebnisse in Lösungen | 14 |
| 3.1.1 | Verhalten von Zink in verschiedenen alkalischen Lösungen | 14 |
| 3.1.2 | Planparalleler Versuchsaufbau | 14 |
| 3.1.3 | Praxisnahe Versuchsanordnung | 14 |
| 3.2 | Ergebnisse im Beton | 16 |
| 3.2.1 | Verhalten von Zink in verschiedenen Betonen | 16 |
| 3.2.2 | Planparalleler Versuchsaufbau | 16 |
| 3.2.3 | Praxisnahe Versuchsanordnung | 19 |
| 3.2.4 | Praxisnahe Versuchanordnung mit feuerverzinkten Anbauteilen | 20 |
| 3.3 | Ergebnisse der Zeitstandversuche unter Vorspannung | 21 |
| 3.4 | Ergebnisse an realen Stahlbetonfertigteilen | 24 |
| 3.5 | Ergebnisse an realen Spannbetonfertigteilen aus Stahlfaserbeton | 25 |
| 3.5.1 | Ergebnisse bei Fa. Max Bögl | 25 |
| 3.5.2 | Ergebnisse bei Fa.Rekers | 25 |
| **4** | **Diskussion** | 26 |
| **5** | **Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse** | 27 |
| Danksagung | | 27 |

# 1 Einleitung

In einer Vielzahl von Anwendungsfällen werden Elemente aus verzinktem Stahl in Spannbetonbauteile eingebaut. Dabei lässt es sich in der Praxis nur schwer vermeiden, dass nicht über Umwege eine metallisch leitende Verbindung zwischen verzinkten Einbauteilen und den Spanngliedern existiert. So werden häufig verzinkte Stahlschienen (z. B. Halfenschienen) in Spannbetonfertigteile eingebaut, die dann über angeschweißte oder angerödelte Bügel Kontakt zum Spannstahl haben. Ein weiteres Anwendungsgebiet besteht bei Konstruktionen aus Faserbeton, bei denen sich verzinkte Stahlfasern und Spannstähle berühren, bzw. verzinkte Einbauteile über die nicht verzinkten Stahlfasern indirekt kontaktiert werden können. Außerhalb Deutschlands sind für Bauteile mit nachträglichem Verbund z. T. auch Hüllrohre aus verzinktem Stahl erlaubt. Hierbei ist dann sogar ein direkter Kontakt zwischen Spannstahl und verzinktem Stahl möglich. In der DIN 1045-1,Teil 1, Ausgabe Juli 2001 [1] wird im Abschnitt 12.10.1 aber gefordert, dass zwischen Spanngliedern und verzinkten Einbauteilen oder verzinkter Bewehrung mindestens 2,0 cm Beton vorhanden sein muss und dass außerdem keine metallisch leitende Verbindung bestehen darf. Hintergrund für diese Forderungen ist, dass Zink bei Kontakt mit alkalischem Beton über eine begrenzte Zeit stark korrodiert und der dabei entstehende Wasserstoff zu einer Gefährdung des Spannstahles durch wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion führen kann [3, 4, 5]. Bei einem direkten Kontakt zwischen verzinkten Teilen und Spannstahl sind entsprechende Schäden in der Praxis auch beobachtet worden [2, 6]. Das reale Gefährdungspotential hängt aber von einer ganzen Reihe von Faktoren ab (u. a. Vorspannungsniveau, Empfindlichkeit des Spannstahls gegenüber Spannungsrisskorrosion, Temperatur). Bei exakter Auslegung des o. g. Abschnitts der DIN 1045-1 ist es also nicht zulässig, dass Spannglieder über einen nichtverzinkten Betonstahl elektrisch leitend mit einem Einbauteil aus verzinktem Stahl verbunden sind. Eine Aussage, ob dies auch bei beliebigen Entfernungen gilt, wird in der Norm nicht getroffen. Es stellt sich damit die Frage, ob solche Konstellationen in Bauteilen grundsätzlich gegen die Norm verstoßen oder ob hier eine Ungenauigkeit der Norm vorliegt, die durch entsprechende Untersuchungsergebnisse gegebenenfalls modifiziert bzw. konkretisiert werden muss. Um normkonforme Bauteile herzustellen und einzusetzen werden in der Praxis in der Regel Einbauteile aus nichtrostendem Stahl verwendet, die aber aus Kostengründen sowie Aspekten der Ressourcenschonung erheblich ungünstiger zu bewerten sind.

Es ist bekannt, dass sich an der Oberfläche von Zink bzw. verzinktem Stahl in frischem Beton anfangs ein Ruhepotential von etwa –1,2 V (gegen die Normalwasserstoffelektrode – NHE) einstellt [3, 4]. Bei diesem vergleichsweise negativen Potential geht Zink zunächst aktiv unter Wasserstoffentwicklung in Lösung. Nach wenigen Tagen, wobei dieser Zeitraum stark von den Austrocknungsbedingungen (z. B. den Ausschalungsfristen) abhängt, wird das Potential des Zinks infolge Deckschichtbildung wesentlich positiver und liegt dann mit etwa –0,8 bis –0,6 V (NHE) im passiven Bereich. Die Wasserstoffentwicklung kommt dadurch mit der Zeit zum Stillstand. Unverzinkter Stahl, d. h. auch Spannstahl, ist im alkalischen, chloridfreien Beton passiv und weist ein Ruhepotential von etwa 0 bis +0,1 V (NHE) auf.

Bei einem metallisch leitenden Kontakt zwischen unverzinkten und verzinkten Stählen findet wegen der genannten Potentialverhältnisse eine Elementbildung statt. Wegen der unterschiedlichen Polarisierbarkeit von Zink und Stahl wird sich das Potential der Kurzschlusszelle Zink/Stahl stets bei stark negativen Werten bewegen, d. h. dicht am Ruhepotential von Zink im nichtkurzgeschlossenen Zustand 3, 13]. Durch die Elementbildung wird das Zink außerdem verstärkt aufgelöst. In [13] wurde nachgewiesen, dass sich die im Kurzschlusselement einstellenden Potentiale und Kurzschlussströme auch vom Flächenverhältnis von Zink zu Stahl abhängen. Durch die Elementbildung wird der Stahl soweit kathodisch polarisiert, dass merklich schnelle kathodische Wasserstoffentwicklung am Stahl zu erwarten ist. Da die Wasserstoffabscheidung am Zink stark gehemmt ist, findet diese am Stahl statt. Versuche mit verschiedenen Zinkschichten (mit und ohne Reinzinkschicht) sowie unterschiedlichen Betonzusammensetzungen ergaben als maximale Dauer der Wasserstoffentwicklung Zeiten von bis zu 43 Stunden [14]. In Untersuchungen mit verzinktem Bewehrungsstahl und unterschiedlichen Betonmischungen (mit verschiedenen Wasser-Zement-Werten und unterschiedlichen pH-Werten) wurde festgestellt, dass bei höheren Alkaligehalten in der Matrix es länger bis zur Passivierung der Zinkschicht dauerte. Bei Feucht-Trocken-Wechseln zeigte sich, dass es bei Betonen mit hohem Alkaligehalt bis zu 50 Tagen dauerte, bis die Potentiale dauerhaft im passiven Bereich blieben [15].

Grundsätzlich muss bei einem direkten Kontakt zwischen verzinkten Teilen und Spannstahl – wenn auch nur über einen begrenzten Zeitraum – mit einer potentiellen Gefährdung durch wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion gerechnet werden. Entsprechende Schäden sind in der Praxis auch beobachtet worden [2]. Das reale Gefährdungspotential hängt aber von einer ganzen Reihe von Faktoren ab (u. a. Vorspannungsniveau, Empfindlichkeit des Spannstahls gegenüber Spannungsrisskorrosion, Temperatur). Notwendige Bedingung für wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion ist, dass eine entsprechende Menge an Wasserstoff in den Spannstahl absorbiert wird. Bevor sich Risse im Werkstoff bilden, was nur unter sehr ungünstigen Bedingungen vorkommt, macht sich eine Wasserstoffaufnahme aber bereits in einer Veränderung der mechanischen Kennwerte, insbesondere der Dehnung und der Einschnürung, bemerkbar.

Mit zunehmender Betonhärtung nimmt die Gefahr einer Wasserstoffabscheidung ab, da sich auf dem Zink Deckschichten bilden, das Korrosionspotential ansteigt und dabei den Bereich der Wasserzersetzung verlässt [6].

Untersuchungen zum Korrosionsverhalten von verzinkten Spannstählen haben gezeigt, dass die Wasserstoffdurchlässigkeit unversehrter Zinküberzüge vernachlässigbar gering ist und keinen wasserstoffinduzierten Sprödbruch ermöglicht. Zeitstandversuche in wässrigen alkalischen Lösungen ergaben, dass selbst bei einer großflächigen Verletzung der Zinkschicht sich die Spannstähle weitgehend unempfindlich gegenüber dem aufgenommenen Wasserstoff verhielten. Es wird allerdings auf einen Einfluss des Spannstahltyps sowie des Durchmessers hingewiesen [5]. In anderen Untersuchungen zum Sprödbruchverhalten einbetonierter Spann-

stahlproben im Kontakt mit Zink zeigte sich, dass für den vergüteten Spannstahl bereits Brüche durch wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion bei Belastungen von etwas mehr als 75 % der Streckgrenze auftraten, während patentiert gezogene Drähte auch bei Belastungen von 0,95 % der Streckgrenze nicht zu Bruch gingen. Versuche zur Potentialabhängigkeit der Standzeit in wässrigem Zementauszug ergaben für den vergüteten Stahl bei einer Zugspannung von 0,85 % der Streckgrenze einen drastischen Abfall der Standzeit bei Potentialen negativer als etwa –0,9 V (NHE) [4]. Inwieweit sich bei einem indirekten Kontakt (z. B. über einen Betonstahlbügel) zwischen verzinkten Bauteilen und Spannstahl eine Gefährdung ergeben kann, ist bisher nicht untersucht worden. Bei größeren Entfernungen ist sicher nicht mehr mit einem Risiko zu rechnen, da die kathodische Polarisation des Spannstahls mit zunehmender Entfernung abnimmt. Da wie oben beschrieben in der Praxis häufig nicht ausgeschlossen werden kann, dass verzinkte Einbauteile über angeschweißte oder angerödelte Bügel einen indirekten aber metallisch leitenden Kontakt zum Spannstahl haben, soll durch entsprechende Untersuchungen geklärt werden, unter welchen Bedingungen dies zu einer Gefährdung führen kann.

# 2 Durchgeführte Untersuchungen

Um zu klären unter welchen Umständen eine potentielle Gefährdung von Spannstählen beim Kontakt mit verzinkten Bauteilen gegeben ist, wurden Laborversuche in alkalischen Lösungen und Betonen sowie Zeitstandversuche an Spannbetonprobekörpern durchgeführt. Es wurden die Einflüsse von Zementart, Flächenverhältnis, Zeit und Abstand untersucht. Die Ergebnisse wurden durch Untersuchungen an realen Bauteilen verifiziert.

## 2.1 Verwendete Untersuchungsmaterialien und Messgeräte

### 2.1.1 Alkalische Lösungen

Zur Ermittlung der grundsätzlichen Verhältnisse wurden zunächst Potentialmessungen an Zinkproben (Zn 99,995) in drei verschiedenen alkalisch, wässrigen Lösungen durchgeführt.

| | |
|---|---|
| Kalziumhydroxidlösung; $Ca(OH)_2$; verdünnt | pH 11,4 |
| Kalziumhydroxidlösung; $Ca(OH)_2$; gesättigt | pH 12,6 |
| Betonporenlösung; $Ca(OH)_2$ + NaOH + KOH | pH 13,6 |

Dabei zeigte sich, dass Zink nur in Betonporenlösung pH = 13,6 dauerhaft kritische Potentialbereiche erreicht (siehe Ergebnisdarstellungen Abschnitt 3.1.1), daher kam bei den anschließenden Untersuchungen an ungespannten Stahlproben (Baustahl St-37) in Kontakt mit Zink, ausschließlich Betonporenlösung zum Einsatz.

### 2.1.2 Beton

Für die Versuche im Beton wurde eine übliche Mischungsrezeptur mit einem Größtkorn von 4 mm verwendet *(Tabelle 1)*.

Zunächst sind zur Variation des pH-Wertes zwei unterschiedliche Zementsorten verwendet worden. Hierbei kam ein handelsüblicher Portlandzement CEM I 32,5 R mit üblicher Alkalität, sowie ein handelsüblicher Hochofenzement CEM III/B 32,5 N /LH/NA/HS mit niedrigem wirksamem Alkaligehalt zum Einsatz. Um das Verhalten des Zinks und des Stahls in Verbindung mit Zink in hochalkalischen Betonen zu untersuchen, ist in späteren Versuchen zusätzlich ein Portlandzement mit einem sehr hohen $Na_2O$-Äquivalent-Wert mit in das Versuchsprogramm aufgenommen worden. Dieser Zement ist aufgrund seiner hohen Alkalität in Deutschland nicht

*Tabelle 1*
*Betonzusammensetzung/Mischanweisung*

| Stoffart | | Zusammesetzung | | Mischanweisung 1,5 l |
|---|---|---|---|---|
| | | kg/m³ | | kg |
| Zement | CEM I 32,5 R<br>CEM I 32,5 R, hoch-alkalisch<br>CEM III/B 32,5 N /LH/NA/HS | 360 | | 0,54 |
| Wasser (gesamt) | | 210 | | 0,32 |
| Zuschlag (gesamt) | | 1673 | % | 2,51 |
| 0 / 0,5 | Okrilla | 552 | 33 | 0,83 |
| 0,50 / 1,0 | Okrilla | 385 | 23 | 0,58 |
| 1,0 / 2,0 | Okrilla | 368 | 22 | 0,55 |
| 2,0 / 4,0 | Okrilla | 368 | 22 | 0,55 |
| Frischbeton | | 2243 | -- | 3,37 |

*Tabelle 2*
*verwendete Spannstahlsorten*

| Art | Hersteller | Durchmesser | Festigkeitsklasse | Werkstoffzustand |
|---|---|---|---|---|
| Draht | Sigma | ø 8 mm | St 1420/1570 | vergütet |
| Draht | Nedri | ø 5 mm | St 1770 | kaltgezogen |
| Litze* | Nedri | ø 6,4 mm | St 2060 | kaltgezogen |
| Draht** | Hennigsdorf | ø 12/5 mm oval | St 1370/1570 | vergütet |

* in dieser Festigkeitsklasse in Deutschland nicht zugelassen
** ohne Zulassung wegen erhöhter Empfindlichkeit für SpRK

zugelassen. Die verwendeten Zementsorten sind im Folgenden aufgelistet.

CEM I 32,5 R ; $Na_2O$-Äquivalent = 0,84 (übliche Alkalität)
CEM I 32,5 $R^{hh}$ ; $Na_2O$-Äquivalent = 1,2 (hoch alkalisch)
CEM III/B 32,5 N /LH/NA/HS ; (niedriger wirksamer Alkaligehalt)

Das $Na_2O$-Äquivalent beim CEM III/B ist nicht relevant, da Hüttensand als Hauptbestandteil des Zements nur in geringem Umfang zur Alkalität der Porenlösung beiträgt [7]. Die Alkalien sind dabei in den Glasphasen des Hüttensandes gebunden. Die $Na_2O$-Äquivalent Werte sind somit nicht mit denen des CEM I vergleichbar.

### 2.1.3 Spannstähle

Für die Versuchsdurchführungen unter Vorspannung wurden vier unterschiedliche Spannstähle verwendet. Diese sind in *Tabelle 2* aufgeführt.

### 2.1.4 Messgeräte

Alle Potentialmessungen sind mit gesättigten Silber/Silberchlorid-Elektroden (Ag/AgCl ges.), mit einem Bezugspotential von +199 mV gegen NHE, durchgeführt worden. Die Potentialangaben in den Ergebnisdarstellungen beziehen sich ausschließlich auf die gesättigte Silber/Silberchlorid-Elektrode.

Zur Messdatenerfassung bei den Laborversuchen kamen Datenlogger des Typs HP Agilent 34970 A zum Einsatz. Die Potentialmessungen an realen Bauteilen erfolgten mit einem hochohmigen Multimeter vom Typ Keithley 136.

Bei den Zeitstandversuchen wurden Potentiostaten des Typs BANK Wenking MP87 eingesetzt.

## 2.2 Laborversuche

### 2.2.1 Planparallele Versuchsanordnung

Die Versuche in den wässrigen, alkalischen Lösungen (*Abb. 1*, links) dienen dazu, örtliche und zeitliche Potentialverteilungen am Stahl und am Zink an gekoppelten Elementen mit unterschiedlichen Abständen zwischen Stahl und verzinktem Einbauteil zu messen. In diesen Lösungen können die Bedingungen im Beton nachgestellt werden. Man erreicht in den Lösungen eine weitgehend gleichmäßige Grenzfläche Metall/Elektrolyt, wie sie im Beton (durch Poren, Fehlstellen, Gesteinskörnung, etc.) nicht zu erreichen ist. Bei diesem Versuchsaufbau wurden nach DIN 50919 [10] zwei Bezugselektroden jeweils in direkter Nähe zum Stahl bzw. Zink positioniert, um die Polarisation des jeweiligen Kontaktpartners insbesondere bei größeren Abständen messen zu können. Da für die weiteren Untersuchungen nur das Stahlpotential von Bedeutung ist, wurde bei den darauf folgenden

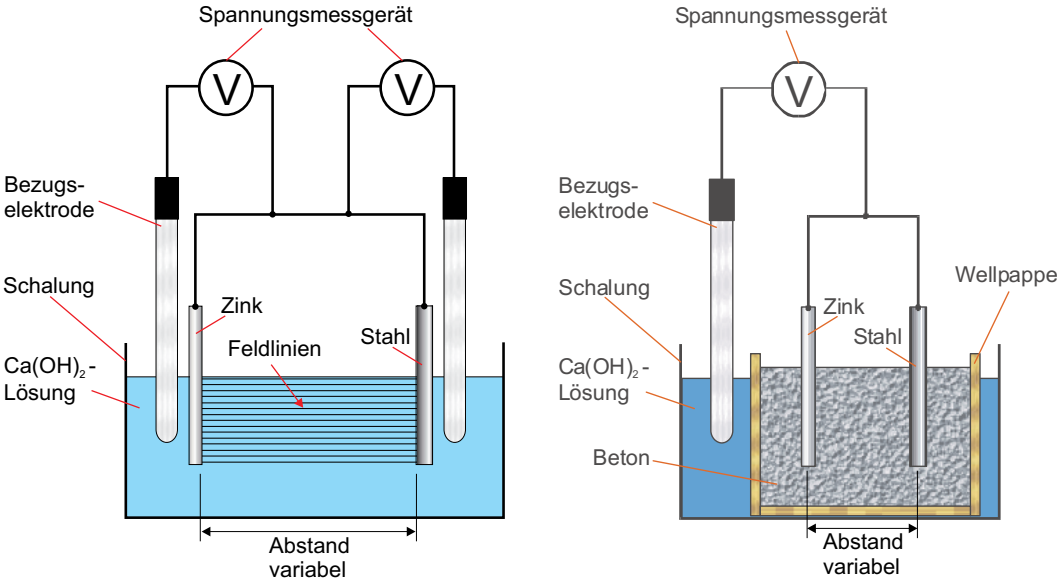


*Abb. 1*
*Skizzen der Versuchsaufbauten zur Messung des Mischpotentials Stahl/Zink links: in wässriger, alkalischer Lösung; rechts: im Beton*

*Tabelle 3*
*Parametermatrix der durchgeführten Untersuchungen (Werte in Klammern geben den Abstand zwischen Stahl und Zink an)*

| Elektrolyt | Zink | Flächenverhältnis Stahl : Zink | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 : 1 | 2 : 1 | 5 : 1 | 10 : 1 | 50 : 1 | 100 : 1 |
| Betonporenlösung pH 13,6 | ☑ * | - | ☑ (0 – 170 cm) | ☑ (0 – 170 cm) | ☑ (0 – 170 cm) | ☑ (0 – 170 cm) | ☑ (0 – 170 cm) |
| Beton mit CEM I 32,5 R $Na_2O$-Äq. = 0,84 | ☑ | ☑ (0 – 20 cm) | ☑ (0 – 75 cm) | ☑ (4 cm) | ☑ (4 cm) | - | - |
| Beton mit CEM I 32,5 R (h $Na_2O$-Äq. = 1,2 | ☑ | ☑ (4 cm) | ☑ (4 cm) | ☑ (4 cm) | ☑ (4 cm) | - | - |
| Beton mit CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA | ☑ | ☑ (0 – 20 cm) | ☑ (0 – 75 cm) | ☑ (4 cm) | ☑ (4 cm) | - | - |

*) in Einzelversuchen wurde der pH-Wert von 11,4 bis 12,6 variier
(h hoch alkalisch

Versuchen im Beton für die Messung des Mischpotentials nur noch eine Bezugselektrode in Stahlnähe eingesetzt (*Abb. 1*, rechts).

Bei den Untersuchungen im Beton stellte sich heraus, dass kritische Bedingungen nur in den ersten Stunden nach der Einbringung des Betons vorliegen. Aus diesem Grunde musste mit den Messungen unmittelbar nach der Herstellung der Proben begonnen werden. Für die notwendigen Untersuchungen im Frischbeton hat sich die Verwendung von Wellpappschalungen bewährt. Die Versuchsproben können so unmittelbar nach der Herstellung über den alkalischen Elektrolyten mit einer Bezugselektrode verbunden werden (*Abb. 1*, rechts). Bei diesen Versuchen wurde der Abstand zwischen Zink und Stahl in einem Bereich zwischen 0 und 170 cm variiert. Das Flächenverhältnis Stahl : Zink betrug hierbei 1 : 1 bis 100 : 1. Zink und Stahl waren dazu planparallel angeordnet. Zum Erreichen des Flächenverhältnisses sind mehrere Stahlproben kurzgeschlossen worden. In *Tabelle 3* ist die Parametermatrix der Untersuchungen dargestellt.

Aus den Untersuchungen kann direkt auf ein Gefährdungspotential geschlossen werden. Weiterhin liefern die Messungen Informationen über die Zeitdauer, während der eine Wasserstoffentwicklung stattfinden kann. Damit lassen sich die Kriterien für weiterführende Untersuchungen eingrenzen.

### 2.2.2 Praxisnahe Versuchsanordnung

In der Praxis liegt das Zink zum Teil als massives Einbauteil vor, d. h. ein gleichmäßiges Potentialfeld über die gesamte Bauteillänge, wie es sich bei der planparallelen Anordnung ausbilden kann, ist nicht immer gegeben. Weiterhin wird bei einer indirekten Verbindung von Spannstahl und verzinktem Stahl über den Betonstahl, zunächst der Betonstahl polarisiert, was unkritisch ist. Um diese Verhältnisse bei den Laborversuchen zu berücksichtigen, wurde die in *Abb. 2* dargestellte Versuchsanordnung entwickelt.

Durch die senkrechte Anordnung Stahl/Zink verlaufen die sich ausbildenden Feldlinien nicht mehr gerade, wie in *Abb. 1 links* zu sehen, sondern ellipsenförmig und die Feldstärke nimmt mit steigendem Abstand ab *(Abb. 2, oben)*. Dadurch kann eine örtlich verstärkte Polarisation am Stahl auftreten und es wird eine stärkere Ortsabhängigkeit erwartet. Alle Untersuchungen wurden bei einem festen Flächenverhältnis von 2 : 1 (Stahl : Zink) durchgeführt. Die am Stahl erreichte Polarisation wurde in Abhängigkeit vom Abstand und der Zeit untersucht.

### 2.2.3 Praxisnahe Versuchsanordnung mit feuerverzinkten Anbauteilen

Anbauteile aus feuerverzinktem Stahl, wie z. B. Winkel, Schienen o. ä., die nachträglich an bestehenden Betonbauteilen befestigt werden, können über die Befestigungsdübel einen indirekten Kontakt zum Spannstahl herstellen. Unter ungünstigen Bedingungen (z. B. Dauerfeuchte), bei denen das Zink nicht beständig ist, könnte somit der Spannstahl in kritische Bereiche polarisiert werden. Um dieses Szenario zu untersuchen, sind an den Probekörpern mit praxisnaher Versuchanordnung *(Abb. 2)* feuerverzinkte Flachstähle mittels Schraubzwingen an den Probekörper gepresst und mit dem im Probekörper liegenden Stahl verbunden worden *(Abb. 3* und *4)*. Hierbei wurde ein kritisches Flächenverhältnis Stahl : Zink von 2 : 1 gewählt, was baupraktisch fast nicht zu erreichen ist. Während der Versuchdauer wurde die Kontaktfläche Beton / verzinkter Stahl in regelmäßigen Abständen befeuchtet. Bei der Messung wurde zudem auch der Einfluss des Abstands von der Kontaktfläche des verzinkten Anbauteils untersucht.

### 2.2.4 Zeitstandversuche unter Vorspannung

Um die Bedingungen in Spannbetonbauteilen und eine mögliche Gefährdung durch wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion sicher beurteilen zu können, wurden Zeitstandversuche an Spannbetonprobekörpern durchgeführt. Das Vorspannungsniveau wurde bei allen Stählen auf 95 % der 0,2 %-Dehngrenze eingestellt. Die Spannstahlproben sind zusammen mit einem als Gegenelektrode fungierenden Titan-Mischoxidgitter und einer gesättigten Ag/AgCl-Bezugselektrode zum einen in Kalziumhydroxidlösung ($Ca(OH)_2$) und zum anderen in verschiedenen Betonen eingebaut worden *(Abb. 5)*. Der Versuchsstand für die Messungen an jeweils drei Vergleichsproben ist in *Abb. 6* dargestellt.

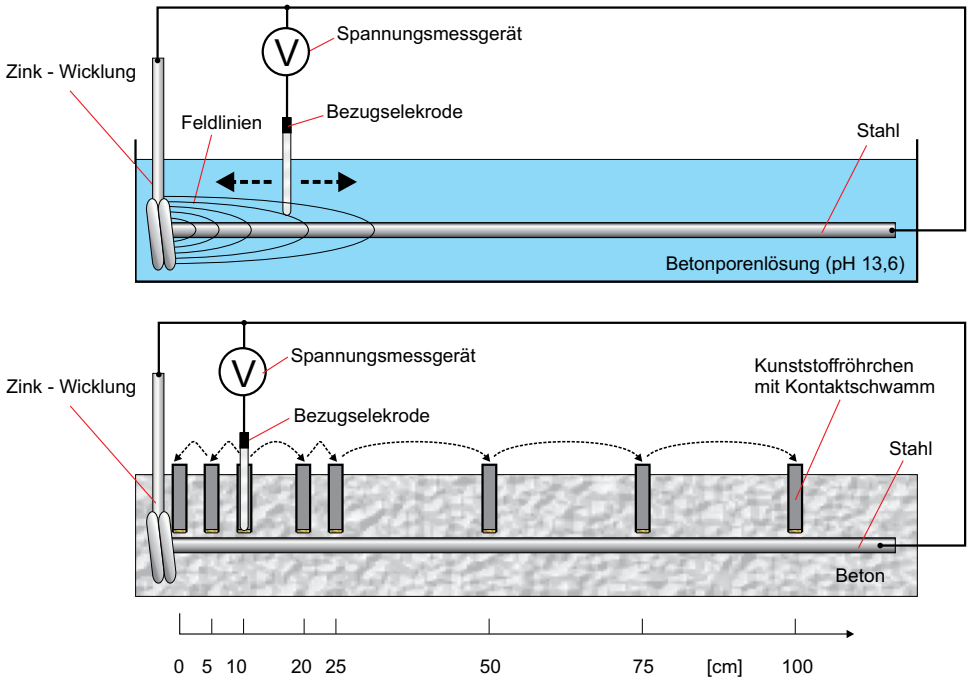


*Abb. 2*
*Versuchsanordnung für Potentialmessungen bei indirektem Kontakt über den Betonstahl; oben: in alkalischen Lösungen, unten: im Beton*

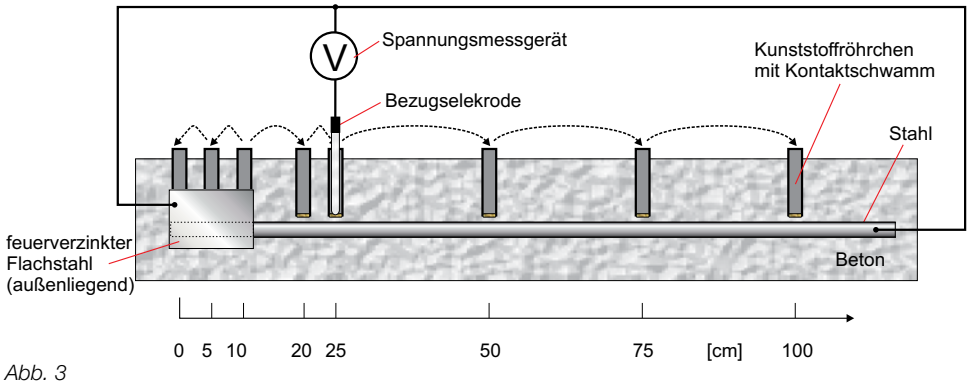


*Abb. 3*
*Versuchsanordnung für Potentialmessungen am Stahl in Beton mit Kontakt zu außen montierten feuerverzinkten Anbauteilen*

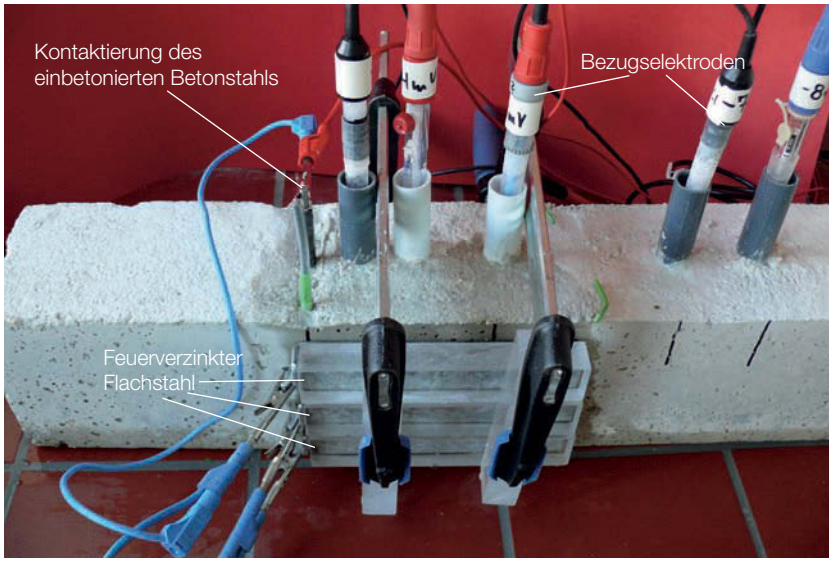


*Abb. 4*
*Potentialmessungen am Stahl im Kontakt mit außen montierten feuerverzinkten Anbauteilen*

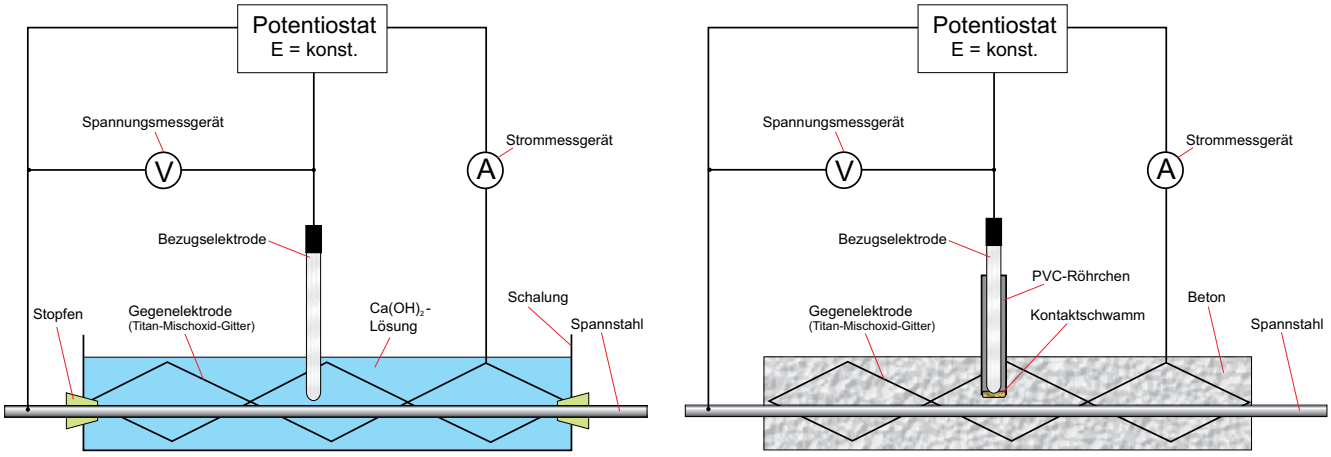


*Abb. 5*
*Skizzen von Versuchsaufbauten der Spannstahlversuche; links: in $Ca(OH)_2$-Lösung; rechts: in Beton*

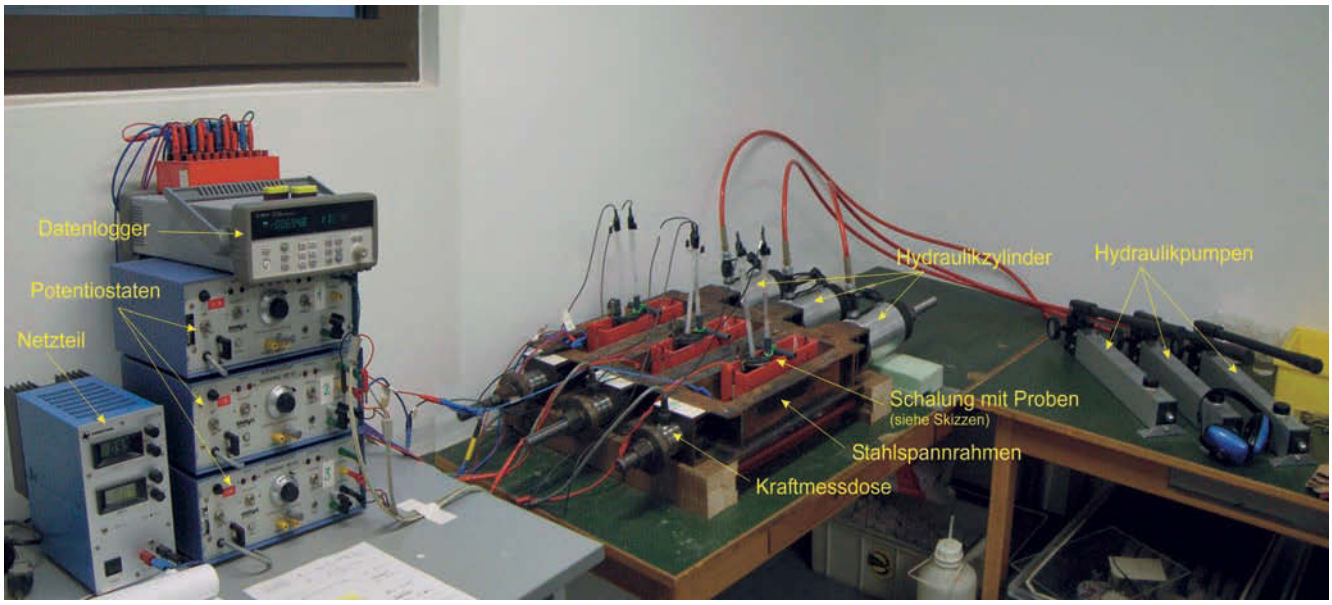


*Abb. 6*
*Versuchstand für Zeitstandversuche unter Vorspannung mit drei Vergleichsproben*

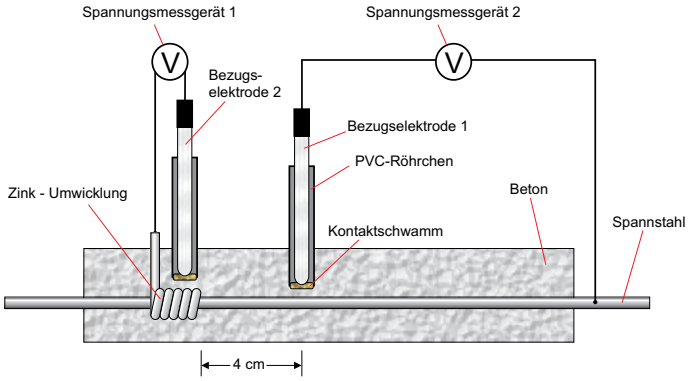


*Abb. 7*
*Skizze vom Versuchsaufbau Spannstahl mit Zinkumwicklung (direkter Kontakt); Flächenverhältnis Stahl : Zink 2 : 1*

Mittels eines Potentiostaten wurde am Spannstahl über einen Zeitraum von 48 Stunden ein Potential von –1200 mV eingestellt und der Stromverlauf mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Der Stromverlauf steht hierbei für die Intensität der Wasserstoffbeladung der Proben. Zusätzlich ist ein Dauerstandversuch über vier Wochen mit dem Sigma Draht im CEM I durchgeführt worden.

Nach Beendigung der Zeitstandversuche sind an ausgewählten Serien der Spannstahlproben standardisierte Zugversuche nach DIN EN 10002-1 [8] durchgeführt worden, um eventuelle Veränderungen der mechanischen Kennwerte feststellen zu können. Die übrigen Spannstahlproben wurden im Versuchsstand bis zum Bruch gezogen und hinsichtlich der Bruchfläche untersucht.

Um die Auswirkungen eines direkten Kontaktes von Zink und Spannstahl untersuchen zu können, wurde die in *Abb. 7* gezeigte Versuchsanordnung verwendet. Hierbei können sich undefinierbare Verhältnisse im Kontaktbereich einstellen, die möglicherweise ein erhöhtes Risiko darstellen.

Um möglichst kritische Bedingungen zu erreichen, wurde für die Untersuchungen ein konstantes Flächenverhältnis 2 : 1 (Stahl : Zink) eingestellt.

## 2.3 Versuche an realen Stahlbetonfertigteilen

Die in der Praxis auftretenden Bauteildimensionen und auch die verschiedenartigen Konstellationen von verzinkten Ein-

bauteilen und Stahlbewehrung können im Laborversuch nur schwer nachgestellt werden. Durch Versuche im Fertigteilwerk der *Fa. Rekers* wurden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zu den Flächenverhältnissen und möglichen Polarisationszeiten in den Bereich der Wasserstoffentwicklung überprüft. Hierzu wurden zwei Stahlbetonbalken mit unterschiedlichen Mengen feuerverzinkten Stahles ausgewählt, um die Polarisation der Betonstahlbewehrung bei bestimmten Flächenverhältnissen zu untersuchen.

### 2.3.1 Stahlbetonbalken mit feuerverzinktem Flachstahl; St : Zn = 13 : 1

Der eingebaute feuerverzinkte Flachstahl hatte die Maße 280 cm x 6 cm x 0,5 cm. Hieraus errechnet sich eine verzinkte Oberfläche von ca. 3800 cm², die Betonstahloberfläche betrug ca. 51000 cm². Das Flächenverhältnis von Stahl zu Zink entspricht folglich 13:1. Der Abstand des Flachstahls zur oberen Betonstahlbewehrung lag zwischen 4 cm und 6 cm. Eine elektrisch leitende Verbindung zwischen Bewehrung und verzinktem Flachstahl wurde durch Isolierungen vermieden und nachträglich über eine äußere Verbindung hergestellt. In *Abb. 8* ist eine Skizze des Balkens und in *Abb. 9* der Bewehrungskorb mit dem feuerverzinkten Flachstahl zu sehen.

Bei diesem Flächenverhältnis wird aus den Erfahrungen der Laborversuche keine Polarisation des Stahles in kritische Potentialbereiche negativer als –850 mV erwartet.

### 2.3.2 Stahlbetonbalken mit massiven verzinkten Einbauteilen; St : Zn = 6 : 1

Zur Variation des Flächenverhältnisses wurden Potentialmessungen an einem Stahlbetonbalken durchgeführt, in den an einem Ende und in der Mitte zwei massive verzinkte Knotenbleche eingebaut waren. Am anderen Ende befinden sich zusätzlich zwei verzinkte Wellhüllrohe mit 80 mm Durchmesser und je ca. 1,40 m Länge. Aus den Berechnungen ergibt sich eine Stahlfläche von 92600 cm² und eine verzinkte Fläche von 15800 cm². Das Flächenverhältnis Stahl : Zink liegt somit bei ca. 6 : 1. Aus den Erkenntnissen der Laborversuche wird bei diesem Flächenverhältnis eine Polarisation in den Bereich der Wasserstoffentwicklung erwartet. In *Abb. 10* ist der Bauplan des Stahlbetonbalkens und in *Abb. 11* der Bewehrungskorb mit den verzinkten Einbauteilen zu sehen.

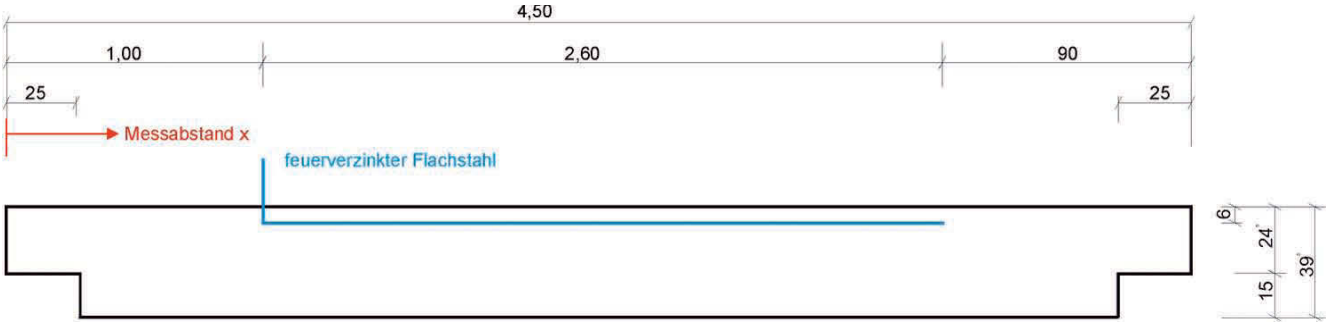


*Abb. 8*
*Skizze des Balkens mit feuerverzinktem Flachstahl; Flächenverhältnis St : Zn = 13 : 1*

*Abb. 9*
*Bewehrungskorb; links: Übersicht; rechts: mit feuerverzinktem Flachstahl; St : Zn = 13 : 1*

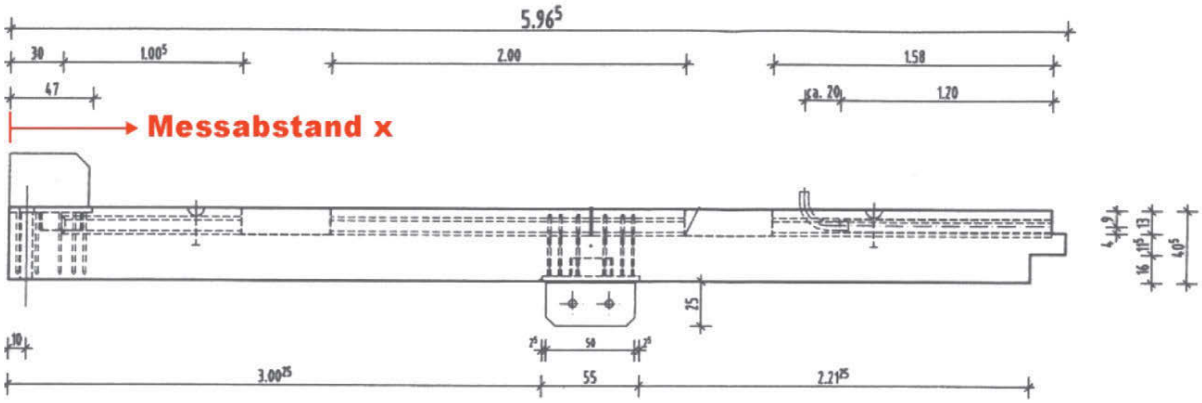


*Abb. 10*
*Bauplan des Balkens mit massiven verzinkten Einbauteilen; Flächenverhältnis St : Zn = 6 : 1*

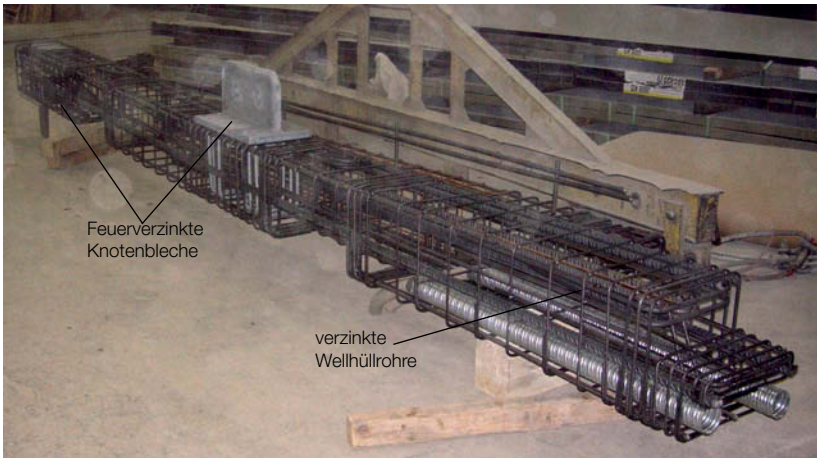


*Abb. 11*
*Bewehrungskorb und verzinkte Einbauteile; Flächenverhältnis St : Zn = 6 : 1*

## 2.4 Versuche an realen Spannbeton-fertigteilen aus Stahlfaserbeton

Nach DIN 1045 – Teil 1 [1] muss bei der Verwendung von verzinkten Einbauteilen bei Spannbetonbauteilen zum einen ein Mindestabstand zwischen Einbauteil und Spannstahl von 2 cm eingehalten, sowie ein indirekter metallischer Kontakt ausgeschlossen werden.

Beim Einsatz von Stahlfasern im Beton ist bisher nicht ausreichend geklärt, ob ein metallischer Kontakt zwischen verzinkten Einbauteilen und Spanngliedern durch die Stahlfasern gegeben ist. Dazu sind, in Zusammenarbeit mit den Firmen *Max Bögl* und *Rekers*, Versuche an realen Bauteilen durchgeführt worden, die Aufschluss über diesen Sachverhalt geben sollten.

### 2.4.1 Untersuchungen bei Fa. Max Bögl

Für die Untersuchungen bei der Firma *Max Bögl* wurden zwei typische Schalungen von je 4,00 m Länge verwendet. Es handelte sich zum einen um eine Stahlschalung mit Holzboden und zum anderen um eine komplette Holzschalung *(Abb. 12)*.

In die Schalung wurden Einbauteile mit üblichen Größen und Mengen, sowie sieben Spannlitzen montiert. Der verwendete selbstverdichtende Stahlfaserbeton mit einem Faseranteil von 40 kg/m³ ist anschließend in die Schalung eingebracht worden.

Zur Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit wurde nach der Betonage der Ohmsche Widerstand zwischen allen Einbauteilen mit einem Multimeter ermittelt. Anschließend wurde das Freie Korrosionspotential der Spannlitzen und Einbauteile mit einem hochohmigen Multimeter gegen eine Bezugselektrode (Ag/AgCl; gesättigt) gemessen *(Abb. 13)*.

### 2.4.2 Untersuchungen bei Fa. Rekers

Zur Variation verschiedener Parameter (Schalungsform, Faseranteil, Faserlänge, Einbauteile) wurden zusätzlich bei der *Firma Rekers* Versuche an Spannbetonbindern aus Stahlfaserbeton durchgeführt. Auch hier kamen zwei typische Schalungen (Stahlschalung/ Holzschalung) zum Einsatz, die in je 4,00 m Länge ausgeführt waren *(Abb. 14)*.

Zur Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit wurde nach der Betonage wieder der Ohmsche Widerstand zwischen allen Einbauteilen mit einem Multimeter ermittelt.

Anschließend wurde das Freie Korrosionspotential der Spannlitzen und Einbauteile mit einem hochohmigen Multimeter gegen eine Bezugselektrode (Ag/AgCl; gesättigt) gemessen. Um die Messung möglichst nahe an den unteren Spannlitzen durchführen zu können und somit Einflüsse der oben liegenden verzinkten Einbauteile zu vermeiden, wurden drei Kunstoffrohre an ausgewählten Stellen bis zu den unten liegenden Spannlitzen geführt (*Abb. 14*, grün). Die Bezugselektrode wurde in diesen Rohren bis auf den Beton herabgelassen.

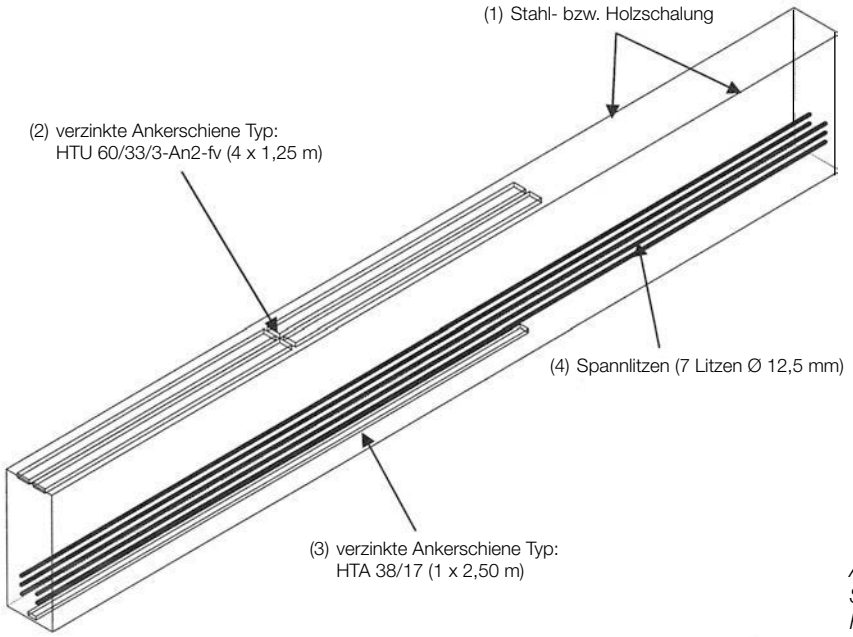


*Abb. 12*
*Skizze Spannbetonfertigteil aus Stahlfaserbeton Fa. Max Bögl*

*Abb. 13*
*Potentialmessung am Probekörper mittels Aufsatzelektrode (Ag/AgCl; gesättigt)*

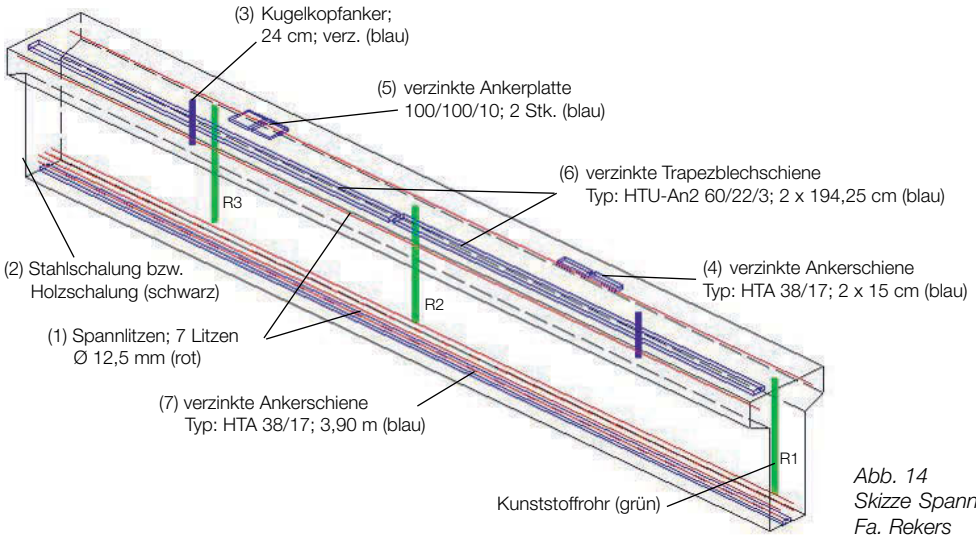


*Abb. 14*
*Skizze Spannbetonbinder aus Stahlfaserbeton Fa. Rekers*

# 3 Ergebnisse

In den folgenden Ergebnisdarstellungen werden Potentiale, die negativer als –850 mV gegen Ag/AgCl sind, als „kritisch“ bezeichnet, da ab dieser Grenze unter den gegebenen Bedingungen Wasserstoffbildung am Stahl auftreten kann [9]. In den Diagrammen ist ein kritischer Bereich von –850 mV bis –900 mV rötlich hinterlegt, der die Streubreiten durch den pH-Wert abdeckt. Je negativer das Potential wird, desto mehr Wasserstoff entsteht an der Stahloberfläche und das Risiko für wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion steigt.

## 3.1 Ergebnisse in Lösungen

### 3.1.1 Verhalten von Zink in verschiedenen alkalischen Lösungen

Die Auslagerungsversuche in wässrigen Lösungen mit pH-Werten von 11,4; 12,6 und 13,6 ergaben die in *Abb. 15* gezeigten typischen Verläufe der Freien Korrosionspotentiale am Zink.

Die Zinkpotentiale liegen nur in den Lösungen mit pH-Werten von 12,6 und 13,6 in kritischen Potentialbereichen, bei denen in Kontakt mit Spannstählen eine Wasserstoffentwicklung am Stahl möglich ist. In der Lösung mit pH 13,6 tritt auch nach längeren Zeiten keine Deckschichtbildung ein. Das Potential liegt stabil um –1450 mV. Dagegen wird bei der Lösung mit pH-Wert 12,6 nach ca. 14 h eine Deckschichtbildung beobachtet, welche die Potentiale in Bereiche um –600 mV ansteigen lässt. Beim pH-Wert 11,4 erreichen die Potentiale keine negativeren Werte als –900 mV. Da eine Wasserstoffentwicklung am Stahl erst bei Mischpotentialwerten negativer als –850 mV stattfindet (*Abb. 15*, rot schraffierter Bereich) und diese erst bei Werten des Zinkpotentials um –1000 mV sicher erreicht werden, wurden die weiteren Versuche ausschließlich bei pH-Werten von 13,6 durchgeführt.

### 3.1.2 Planparalleler Versuchsaufbau

Potentialmessungen an Kontaktelementen Stahl/Zink erfolgten zunächst unter Variation des Abstandes zwischen den Kontaktpartnern. Die Messungen hierzu erfolgten mit zwei Bezugselektroden, die in unmittelbarer Nähe der Kontaktpartner positioniert wurden. Ein exemplarisches Ergebnis hierfür wird im Bild 16 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass in dem gewählten Versuchselektrolyten nur eine geringe Abhängigkeit der Polarisation des Stahles vom Abstand zum Zink vorliegt. Bestimmt wird das Potential wesentlich durch die Potentiallage des Zinks. Die Polarisation der Stahloberfläche ist im Abstandsbereich bis 20 cm mit Potentialwerten zwischen –1400 mV und –1350 mV am stärksten. Aber auch in größeren Entfernungen über 1,50 m werden noch Potentiale von ca. –1250 mV erreicht. Ein unkritischer Abstand, bei dem der Stahl nicht mehr in den Bereich der Wasserstoffentwicklung polarisiert wird, kann somit nicht angegeben werden.

Im Verlauf dieser Untersuchungen zeigte sich, dass das Verhältnis zwischen Stahl- und Zinkoberfläche einen wichtigen Einflussparameter darstellt. Ausgewählte Ergebnisse dieser Versuchsreihe werden in *Abb. 17* gezeigt. Bei Flächenverhältnissen St : Zn ab 10 : 1 erreicht die Polarisation des Stahles nur Werte positiver als –850 mV, so dass eine Wasserstoffentwicklung am Stahl nicht stattfinden kann.

### 3.1.3 Praxisnahe Versuchsanordnung

Auch die Ergebnisse der praxisnahen Versuchsanordnung zeigen, dass kein unkritischer Abstand definiert werden kann, bei dem am Stahl keine Wasserstoffentwicklung stattfindet (Bild 18). Die Potentiale liegen auch bei einem Abstand von 1,50 m mit ca. –1200 mV noch deutlich im Bereich der Wasserstoffentwicklung. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Potentiallagen im Versuchselektrolyten zeitlich sehr stabil sind. Auch nach etwa 18 Stunden (1100 min) ist keine signifikante Änderung des Potentials zu erkennen.

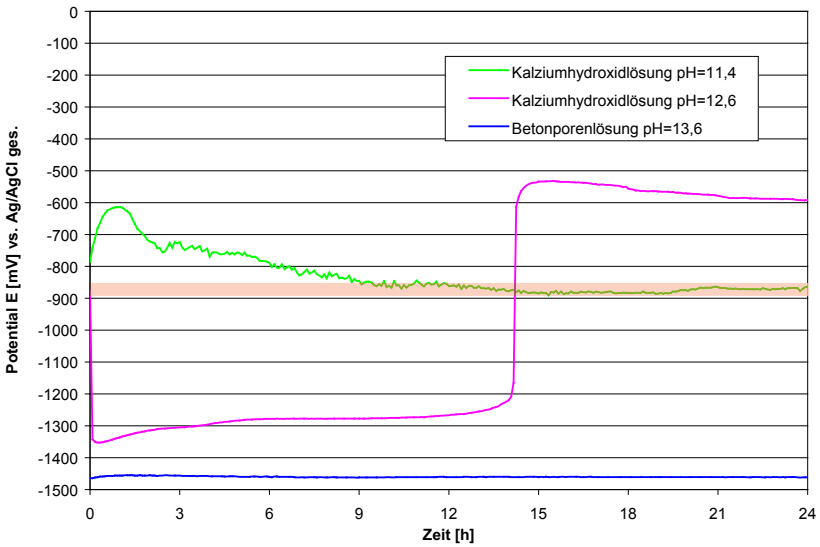


*Abb. 15*
*Freie Korrosionspotentiale am Zink (Zn 99,995) in verschiedenen alkalischen Lösungen*

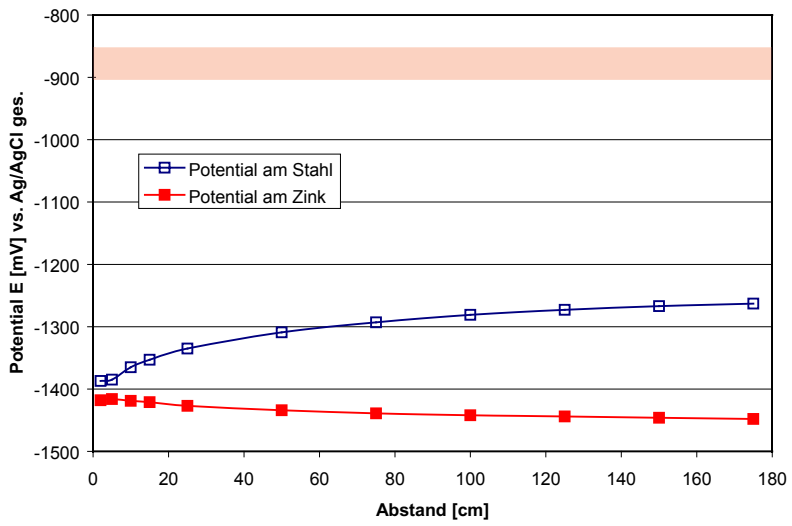


*Abb. 16*
*Potential am Stahl sowie am Zink in Abhängigkeit vom Abstand Stahl/Zink bei planparalleler Anordnung; Betonporenlösung pH=13,6 ; Flächenverhältnis St : Zn = 2 : 1*

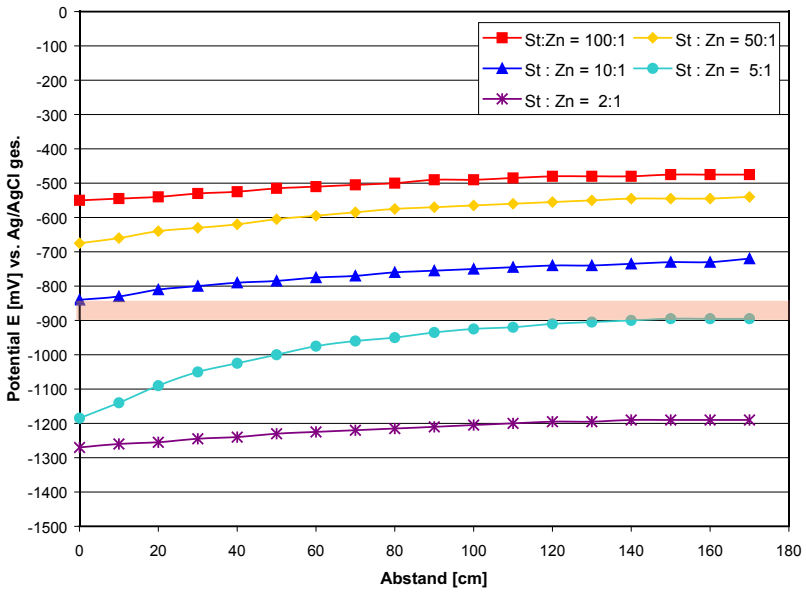


*Abb. 17*
*Potential am Stahl im Kontakt mit Zink mit unterschiedlichen Flächenverhältnissen St : Zn und Abständen zw. Stahl und Zink, planparallele Versuchsanordnung, Betonporenlösung pH 13,6*

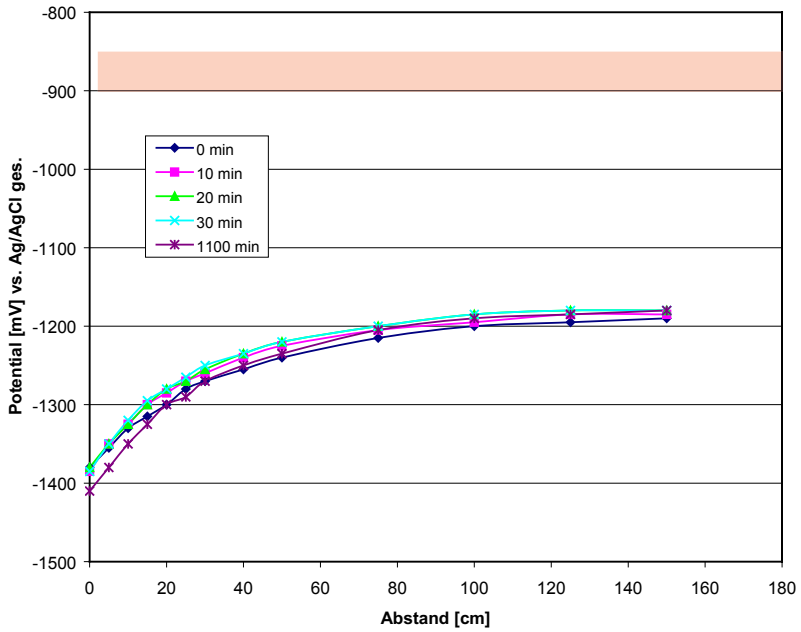


*Abb. 18*
*Potential am Stahl im Kontakt mit Zink in Abhängigkeit vom Abstand Stahl/Zink; praxisnahe Versuchsanordnung; Betonporenlösung pH=13,6 ; Flächenverhältnis St : Zn = 2 : 1*

## 3.2 Ergebnisse im Beton

### 3.2.1 Verhalten von Zink in verschiedenen Betonen

In *Abb. 19* ist der zeitliche Verlauf des Freien Korrosionspotentials an zwei verschiedenen Zinkoberflächen in Beton CEM I dargestellt. Bei einer Probe wurde die an der Luft gebildete Deckschicht durch Schleifen entfernt. Die zweite Probe blieb unbehandelt, wurde also mit der vorhandenen Deckschicht eingesetzt. Es ist zu erkennen, dass zu Beginn des Versuchs beide Zinkproben aktive Korrosion zeigen und bei relativ ähnlichen Potentialwerten von ca. –1300 mV liegen. Die Passivierung der nicht angeschliffenen Zinkoberfläche tritt wesentlich schneller ein, als bei der angeschliffenen Oberfläche. Bereits nach 10 Stunden hat die nicht angeschliffene Oberfläche im Beton eine Deckschicht gebildet, die das Zink vor weiterer Auflösung schützt. Bei der frisch geschliffenen Oberfläche tritt dieser Effekt erst nach ca. 36 Stunden ein. Die Potentiale steigen hierbei von –1300 mV auf Werte positiver als –600 mV an.

Um zum einen gleiche Ausgangsbedingungen für die nachfolgenden Versuche zu schaffen und zum anderen möglichst kritische Bedingungen zu erreichen, wurden künftig alle Zinkproben vor den Versuchen frisch angeschliffen. Das Verhalten des Zinks in den unterschiedlichen Betonen ist in *Abb. 20* dargestellt.

Das Zink im normal-alkalischen Beton (mit CEM I, $Na_2O$-Äq. =0,84) zeigt eine spontane Deckschichtbildung und verlässt nach ca. 24 Stunden den Bereich, in dem Wasserstoff am Stahl entstehen kann. Im hochalkalischen Beton (mit CEM I, $Na_2O$-Äq.=1,2), werden unkritische Bereiche erst nach ca. 120 Stunden erreicht. Es kann eine instabile und verzögerte Deckschichtbildung des Zinks beobachtet werden. Im CEM III/B verlässt das Zink nach ca. 36 Stunden den kritischen Bereich. Die Deckschichtbildung der Zinkoberfläche läuft hierbei ebenfalls verzögert ab.

### 3.2.2 Planparalleler Versuchsaufbau

Bei Versuchen von Zink im Kontakt mit Stahl in Beton mit CEM I sind die Potentialverläufe erwartungsgemäß vergleichbar mit den Untersuchungen am Zink (vgl. *Abb. 19*). Allerdings ist der Zeitraum, in dem eine Polarisation in den Bereich der Wasserstoffbildung auftritt, mit Zeiten bis etwa 150 min, wesentlich kürzer. Dies wird in *Abb. 21* deutlich. Das Zink bildet sehr schnell eine Deckschicht. Die Geschwindigkeit dieser Deckschichtbildung nimmt mit steigendem Abstand von Anode (Zink) und Kathode (Stahl) ab.

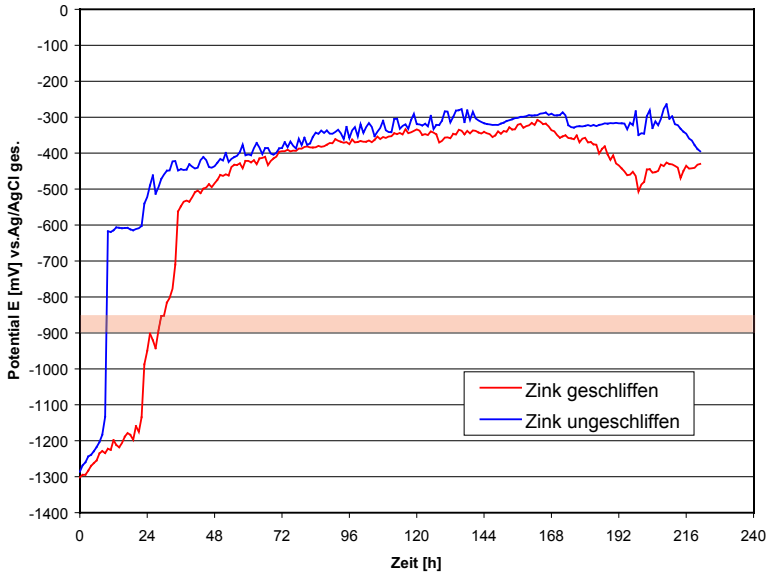


*Abb. 19*
*Zeitlicher Verlauf des Freien Korrosionspotentials am Zink mit unterschiedlichen Oberflächen im Beton CEM I*

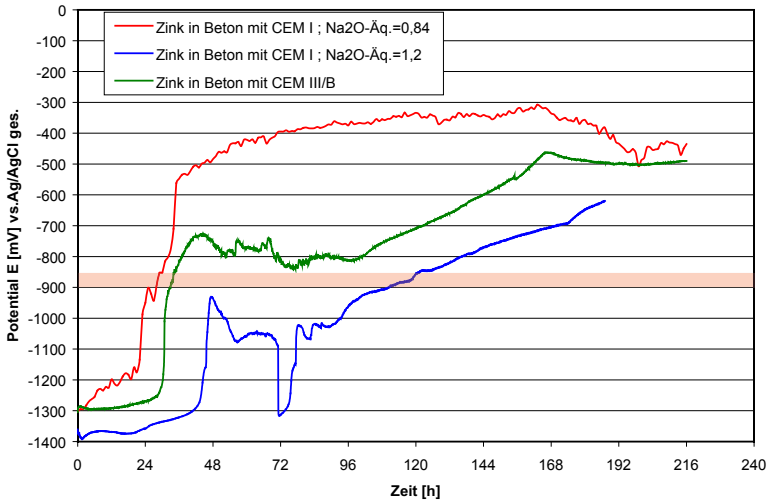


*Abb. 20*
*Zeitlicher Verlauf des Freien Korrosionspotentials am Zink in verschiedenen Betonen*

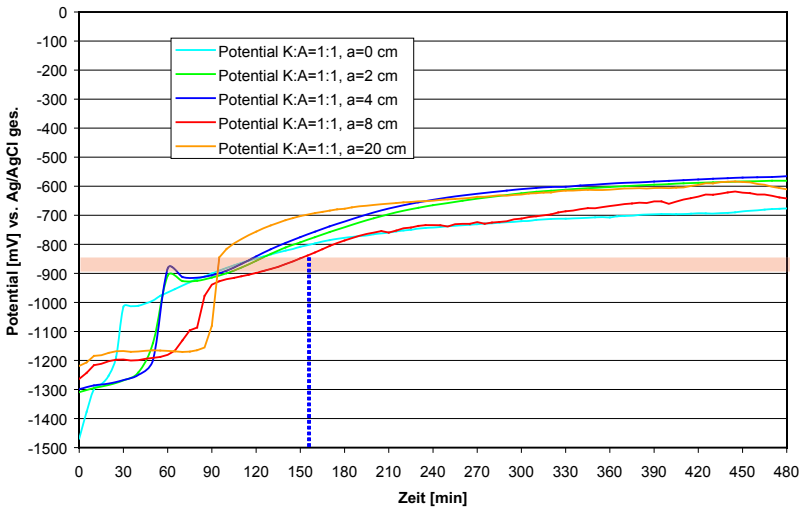


*Abb. 21*
*Abhängigkeit des Mischpotentials vom Abstand Stahl : Zink, Beton CEM I, Flächenverhältnis 1 : 1, planparallele Versuchsanordnung*

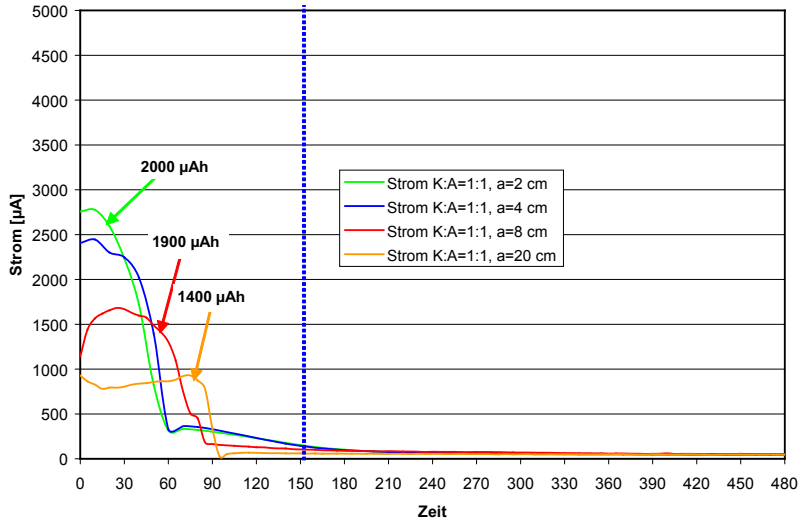


*Abb. 22*
*Abhängigkeit des Stroms vom Abstand Stahl : Zink, Beton CEM I, Flächenverhältnis 1 : 1; planparallele Versuchsanordnung*

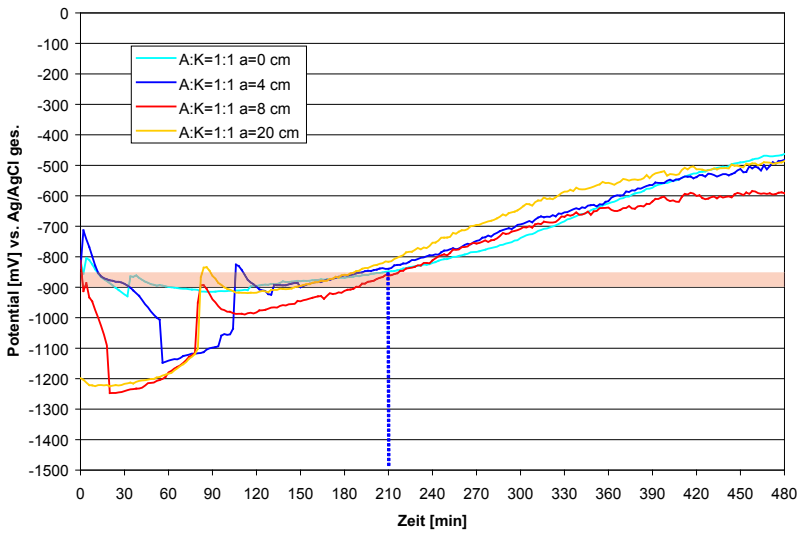


*Abb. 23*
*Abhängigkeit des Mischpotentials vom Abstand Stahl : Zink, Beton CEM III/B, Flächenverhältnis 1 : 1, planparallele Versuchsanordnung*

Die zugehörigen Elementströme sind in *Abb. 22* dargestellt. Die Elementströme werden mit steigendem Abstand deutlich kleiner. Es ist zu erkennen, dass die Potentialwerte bei geringem Abstand schneller den Bereich der Wasserstoffentwicklung verlassen, der fließende Elementstrom aber während dieser Zeit signifikant größer ist. Die Berechnung der Ladungsmengen führt dann zu vergleichbaren Größenordnungen. Die Deckschichtbildung ist erwartungsgemäß mit einem gewissen Ladungsumsatz verbunden.

Ein vergleichbares Verhalten wird auch bei der Variation der Zementart (CEM III/B) gefunden, wobei hier die Zeiten bis zur Deckschichtbildung mit ca. 210 min etwas länger sind *(Abb. 23)*, die maximalen Ströme und Ladungsmengen dafür geringer *(Abb. 24)*.

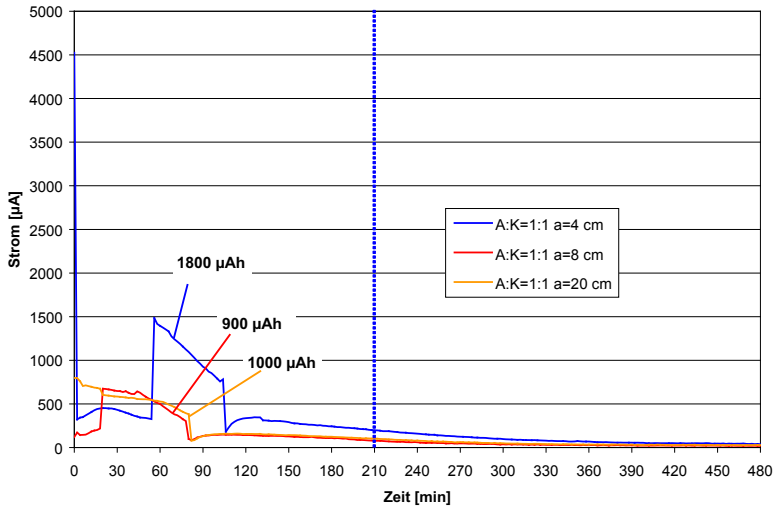


*Abb. 24*
*Abhängigkeit des Stroms vom Abstand Stahl : Zink, Beton CEM III/B, Flächenverhältnis 1 : 1; planparallele Versuchsanordnung*

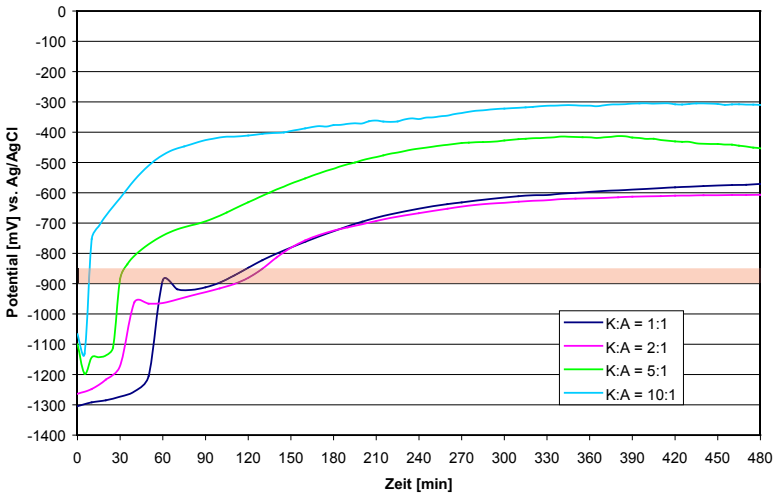


*Abb. 25*
*Abhängigkeit des Mischpotentials vom Flächenverhältnis Stahl : Zink, Abstand a = 4 cm, Beton CEM I mit $Na_2O$-Äq.=0,84; planparallele Versuchsanordnung*

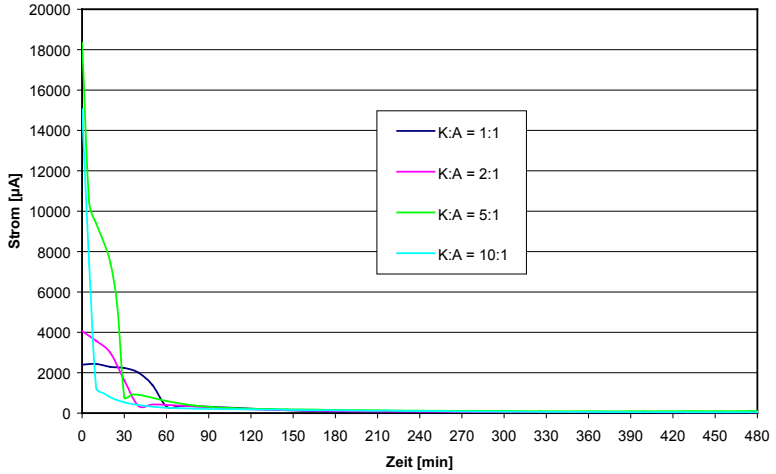


*Abb. 26*
*Abhängigkeit des Stroms vom Flächenverhältnis Stahl : Zink, Abstand a = 4 cm, Beton CEM I mit $Na_2O$-Äq.=0,84; planparallele Versuchsanordnung*

In weiterführenden Versuchen wurde bei einem konstanten Abstand von 4 cm das Flächenverhältnis Stahl : Zink schrittweise von 1 : 1 bis zu 10 : 1 variiert. Der planparallele Versuchsaufbau blieb identisch, nur sind zum Erreichen des Flächenverhältnisses mehrere Stahl- und/oder Zinkproben eingebaut und kurzgeschlossen worden. Die Ergebnisse im Beton mit CEM I üblicher Alkalität ($Na_2O$-Äq.=0,84) sind in *Abb. 25* und *Abb. 26* dargestellt.

Je größer das Flächenverhältnis Stahl : Zink, desto kürzer ist der Zeitraum der Wasserstoffentwicklung. Die Elementströme sind entsprechend größer *(Abb. 26)*. Es kommt zu einer beschleunigten Deckschichtbildung am Zink, wenn die Kathodenfläche (Stahl) vergrößert wird. Die in der Praxis auftretenden Flächenverhältnisse von St : Zn sind selbst bei sehr massiven verzinkten Einbauteilen in der Regel nicht kleiner als 5 : 1. Die kritischen Polarisationszeiten sind bei diesen Flächenverhältnissen mit ca. 30 min sehr kurz. Für diesen Versuch sind die geflossenen Ladungsmengen berechnet worden *(Tabelle 4)*, um bei den später durchgeführten Zeitstandversuchen mit Polarisation unter Vorspan-

*Tabelle 4*
*Ladungsmengen bei unterschiedlichen Flächenverhältnissen Stahl : Zink, Abstand a = 4 cm, Beton CEM I mit $Na_2O$-Äq.=0,84; planparallele Versuchsanordnung*

| Flächenverhältnis<br><br>Stahl : Zink | Kontaktfläche Stahl / Elektrolyt<br><br>[cm²] | Ladungsmenge<br><br>[µAh] | Flächenbezogene Ladungsmenge am Stahl<br>[µAh/cm²] |
|---|---|---|---|
| 1 : 1 | 22 | 4.396 | 200 |
| 2 : 1 | 22 | 4.523 | 206 |
| 5 : 1 | 110 | 15.118 | 137 |
| 10 : 1 | 110 | 8.460 | 77 |

nung (Abschnitt 2.2.4 und 3.3) einen Maßstab für die Polarisationsdauer zu erhalten.

Bei identischen Versuchen mit CEM III/B wird bei Flächenverhältnissen St : Zn von größer 5 : 1 der Bereich der Wasserstoffentwicklung nicht mehr erreicht *(Abb. 27)*. Die Deckschichtbildung läuft im Vergleich zum vorher gezeigten CEM I deutlich verzögert ab. Unkritische Potentialbereiche werden bei kleineren Flächenverhältnissen nach maximal 240 min erreicht. Die Ströme sind im Vergleich zum Versuch im CEM I kleiner (vgl. *Abb. 26* und *28*).

Im Vergleich zu den vorher untersuchten, handelsüblichen Betonen, sind im hoch alkalischen Beton mit CEM I ($Na_2O$-Äq.=1,2) die kritischen Zeiten in denen Wasserstoff am Stahl entstehen kann, mit bis zu 130 Stunden signifikant länger *(Abb. 29)*. In den ersten Stunden bildet sich zwar spontan eine Deckschicht an der Zinkoberfläche aus, diese ist zunächst aber instabil und löst sich offensichtlich wieder auf. Der Stahl wird dann erneut bis in den Bereich der Wasserstoffentwicklung polarisiert.

Bei praxisrelevanten Flächenverhältnissen St : Zn von größer 5 : 1 wird nach ca. 48 Stunden der kritische Potentialbereich verlassen.

### 3.2.3 Praxisnahe Versuchsanordnung

Für die praxisnahe Messanordnung sind die Potentialverläufe in *Abb. 30* für einen Beton mit CEM I üblicher Alkalität dar-

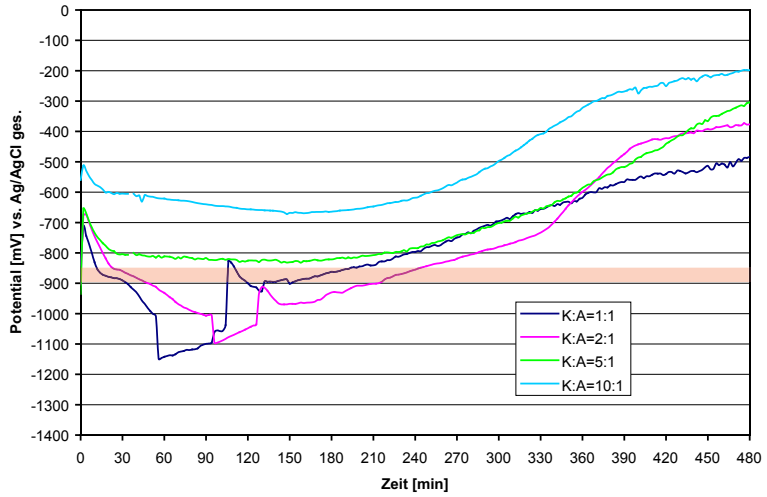


*Abb. 27*
*Abhängigkeit des Mischpotentials vom Flächenverhältnis Stahl : Zink, Beton CEM III/B, Abstand a = 4 cm, planparallele Versuchsanordnung*

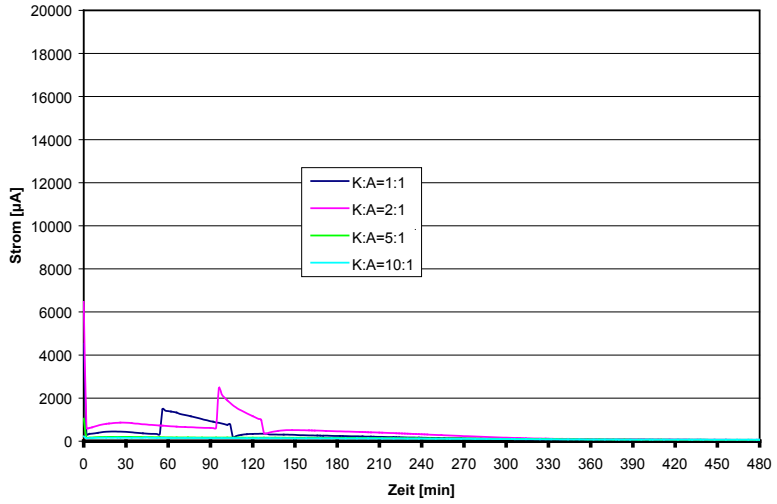


*Abb. 28*
*Abhängigkeit des Stroms vom Flächenverhältnis Stahl : Zink, Beton CEM III/B, Abstand a = 4 cm, planparallele Versuchsanordnung*

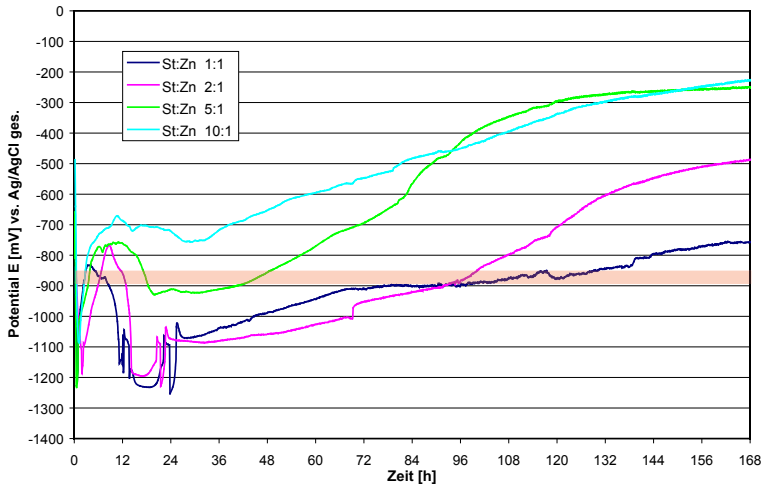


*Abb. 29*
*Abhängigkeit des Mischpotentials vom Flächenverhältnis Stahl : Zink, Abstand a = 4 cm, Beton CEM I mit $Na_2O$-Äq.=1,2, planparallele Versuchsanordnung*

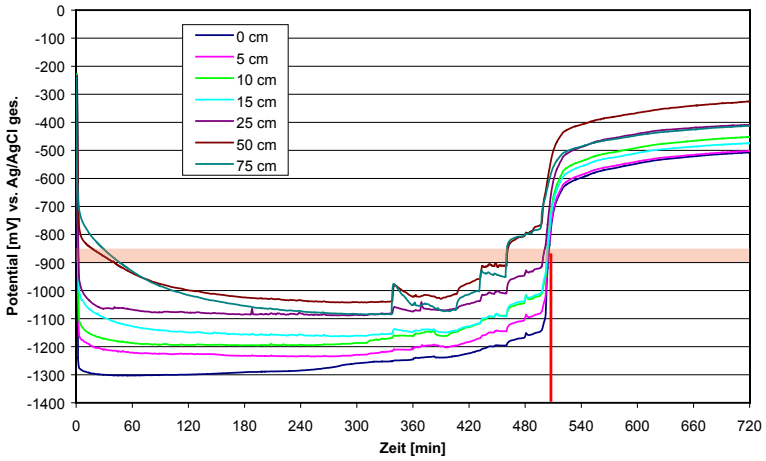


*Abb. 30*
*Zeitlicher Verlauf des Mischpotentials Stahl-Zink, Flächenverhältnis = 2 : 1 bei verschiedenen Abständen, Beton CEM I, praxisnahe Messanordnung*

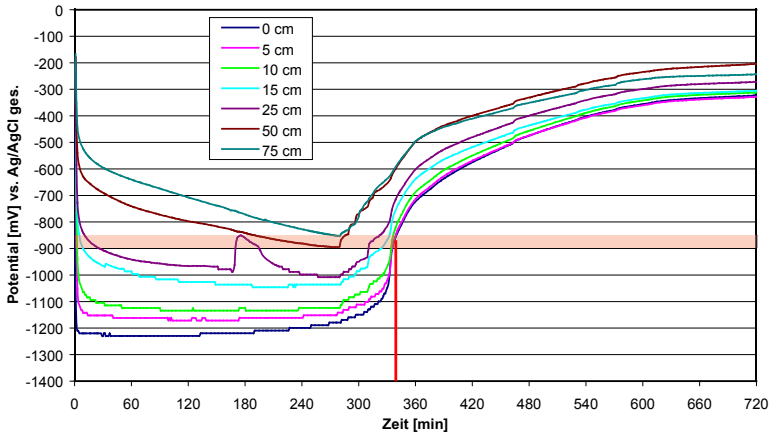


*Abb. 31*
*Zeitlicher Verlauf des Mischpotentials Stahl-Zink, Flächenverhältnis = 2 : 1 bei verschiedenen Abständen, Beton CEM III/B, praxisnahe Messanordnung*

gestellt. Diese Messungen ergaben, dass punktuell eingebautes Zink den Stahl im Frischbeton bei einem Flächenverhältnis von Stahl : Zink = 2 : 1 über eine Zeit von ca. 500 Minuten in kritische Potentialbereiche polarisieren kann. Bei dieser Versuchsanordnung wird bis zu einem Abstand 75 cm am Stahl eine Polarisation in den Bereich der Wasserstoffentwicklung erreicht. Somit kann auch für die praxisnahe, wie schon bei der planparallelen Versuchsanordnung festgestellt, kein praxisrelevanter unkritischer Abstand zwischen Zink und Stahl angegeben werden.

Die Messergebnisse der gleichen Versuchsreihe mit CEM III/B zeigten einen ähnlichen Verlauf *(Abb. 31)*. Jedoch waren die Verweilzeiten im Bereich der Wasserstoffentwicklung mit rund 340 Minuten signifikant kürzer.

### 3.2.4 Praxisnahe Versuchanordnung mit feuerverzinkten Anbauteilen

Die Versuche mit feuerverzinkten Anbauteilen an Betonprobekörpern ergaben sowohl für den CEM I *(Abb. 32)* als auch für den CEM III/B *(Abb. 33)*, dass eine Polarisation des Stahles in kritische Bereiche nicht möglich ist. Während der Befeuchtungszeiten sanken die Potentiale höchstens auf Werte von ca. –850 mV und stiegen danach sofort wieder

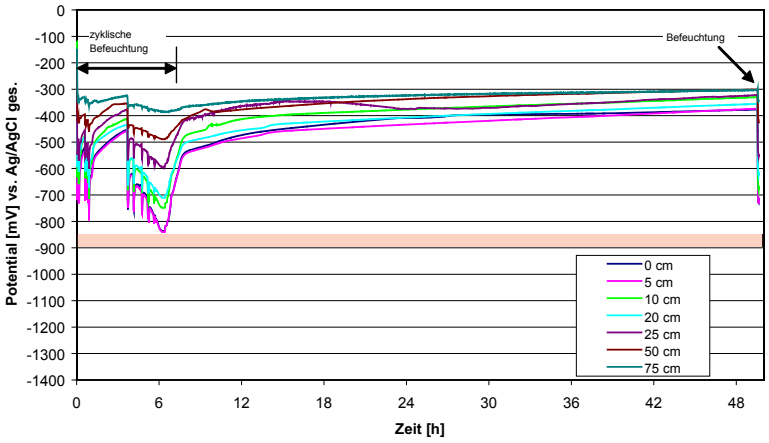


*Abb. 32*
*Zeitlicher Verlauf des Mischpotentials von Stahl in CEM I im Kontakt mit feuerverzinkten Anbauteilen bei unterschiedlichen Abständen; Flächenverhältnis St : Zn = 2 : 1; cmin = 4 cm*

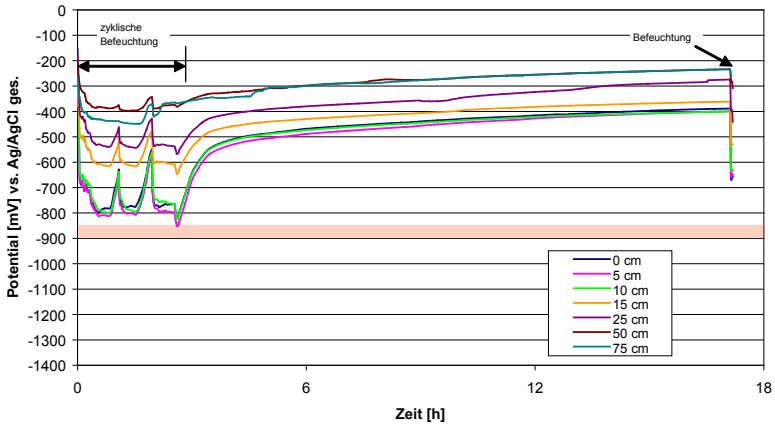


*Abb. 33*
*Zeitlicher Verlauf des Mischpotentials von Stahl in CEM III/B im Kontakt mit feuerverzinkten Anbauteilen bei unterschiedlichen Abständen; Flächenverhältnis St : Zn = 2 : 1; cmin = 4 cm*

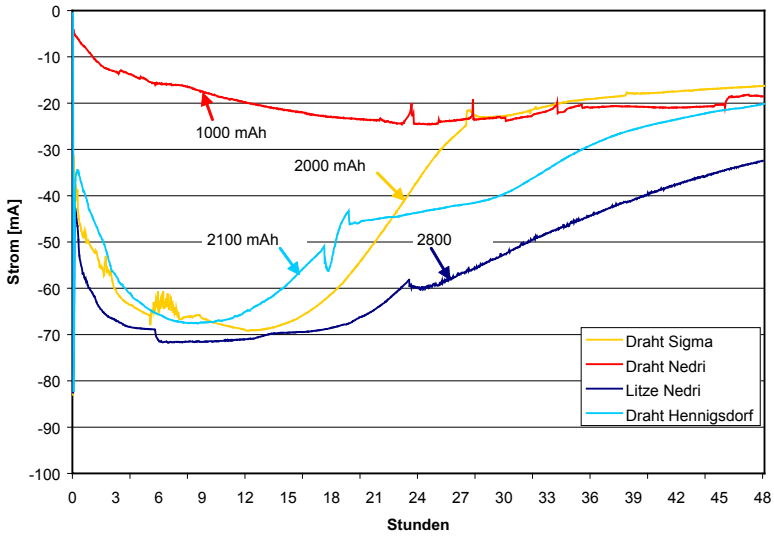


*Abb. 34*
*Stromverläufe der verschiedenen Spannstahlproben bei den 48 h Beladungsversuchen unter Vorspannung im Beton mit CEM I*

an. Dieses Verhalten konnte beim CEM I zwar auch noch nach ca. 50 Stunden beobachtet werden, stellt aber baupraktisch keine Gefährdung dar. Es ist eine Abhängigkeit vom Abstand zwischen verzinktem Anbauteil und Messpunkt am Stahl festzustellen, die aber aufgrund der unkritischen Potentialwerte nicht relevant ist.

## 3.3 Ergebnisse der Zeitstandversuche unter Vorspannung

Ausgehend von den Ergebnissen der Versuche mit Bewehrungsstahl, sind die Messbedingungen für die Zeitstandversuche unter Vorspannung festgelegt worden. Die Versuche erfolgten unter Potentialkontrolle, wobei ein Potential von –1200 mV (gegen Ag/AgCl, ges.) eingestellt wurde. Die Polarisationsdauer wurde mit 48 h deutlich länger gewählt, als die maximal beobachteten Polarisationszeiten in den Bereich der Wasserstoffentwicklung aus den vorhergehenden Untersuchungen in handelsüblichen Betonen (vgl. Abschnitt 3.1; 3.2). Auch die Polarisationszeiten im hochalkalischen Beton werden bei typischen Flächenverhältnissen mit der gewählten Polarisationsdauer abgedeckt. In *Abb. 34* ist exemplarisch der Stromverlauf der verschiedenen Spannstahlproben im Beton mit CEM I dargestellt. Der Strom der identischen Versuche im CEM III/B zeigten ähnliche Verläufe und Beladungsmengen.

*Tabelle 5*
*Ladungsmengen bei Zeitstandversuchen*

| **Spannstahl** | **Kontaktfläche Stahl/ Elektrolyt [cm²]** | **Ladungsmenge [µAh]** | **Flächenbezogene Ladungsmenge [µAh/cm²]** |
|---|---|---|---|
| Draht Sigma | 63 | 1.944.278 | 30.862 |
| Draht Nedri | 39 | 980.612 | 25.144 |
| Litze Nedri | 70 | 2.726.336 | 38.948 |
| Draht Hennigsdorf | 67 | 2.130.274 | 31.795 |
| **Dauerstandversuch 4 Wochen** | | | |
| Draht Sigma | 63 | 6.667.919 | 105.840 |

*Tabelle 6*
*Ergebnis nach 48 h Beladungsversuchen*

| | **Lösung pH 12,6; E= -1200 mV** | **CEM I 32,5 R; E= -1200mV** | **CEM III/B 32,5 N /LH/HS/NA E= -1200 mV** | **CEM I +Zn Wicklung** | **CEM III/B +Zn Wicklung** |
|---|---|---|---|---|---|
| | $R_{p0,2}$ = 95 % | $R_{p0,2}$ = 95 % | $R_{p0,2}$ = 95 % | $R_{p0,2}$ = 95 % | $R_{p0,2}$ = 95 % |
| Draht, Sigma | ● ● ● ● | ● ● ● [● ● ●] | ● ● ● | ● ● ● | ● ● ● |
| Draht, Nedri | ● ● ● | ● ● ● | ● ● ● | - | - |
| Litze, Nedri | ● ● ● ● ● ● | ● ● ● | ● ● ● | - | - |
| Draht, Hennigsdorf | ● ● ● | ● ● ● ● ● ● | ● ● ● | - | - |

● kein Bruch ● Bruch innerhalb Prüflänge [ ] Dauerstandversuch 4 Wochen

*Tabelle 7*
*Ergebnis aus den Zugversuchen der Proben nach den 48 h Beladungsversuchen*

| | **Zugfestigkeit $R_m$** | **0,2 – Dehngrenze $R_{p0,2}$** | **Gleichmaßdehnung $A_{gt}$** | **Maximal Dehnung $A_g$** |
|---|---|---|---|---|
| | [N/mm²] | [N/mm²] | [%] | [%] |
| Draht, Sigma in $Ca(OH)_2$ | 1684<br>1685 Soll: 1662<br>1682 | 1581<br>1564 Soll: 1544<br>1561 | 4,5<br>4,5 Soll: >2,0<br>4,0 | 8,0<br>9,0 Soll: >3,5<br>7,5 |
| Draht, Nedri in $Ca(OH)_2$ | 1882<br>1847 Soll: 1862<br>1870 | 1731<br>1695 Soll: 1699<br>1707 | 3,5<br>2,5 Soll: >2,0<br>4,0 | 5,5<br>3,5 Soll: >3,5<br>5,5 |
| Litze, Nedri in $Ca(OH)_2$ | 2093<br>2107 Soll: 2108<br>2101 | 1933<br>1934 Soll: 1945<br>1924 | 4,0<br>4,5 Soll: >2,0<br>4,4 | 4,6<br>5,6 Soll: >3,5<br>5,8 |
| Draht, Hennigsdorf in $Ca(OH)_2$ | -*<br>1716 Soll: 1696<br>1719 | -*<br>1593 Soll: 1528<br>1572 | -*<br>2,5 Soll: >2,0<br>2,5 | -*<br>-** Soll: >3,5<br>5,0 |
| Draht, Sigma in CEM I | 1660<br>1657 Soll: 1662<br>1678 | 1541<br>1523 Soll: 1544<br>1572 | 3,0<br>3,5 Soll: >2,0<br>3,5 | 8,0<br>8,0 Soll: >3,5<br>8,0 |
| Draht, Sigma in CEM I + Zn | 1651<br>1667 Soll: 1662<br>1673 | 1532<br>1544 Soll: 1544<br>1550 | 3,5<br>3,5 Soll: >2,0<br>3,5 | 8,0<br>9,0 Soll: >3,5<br>9,5 |

*) während des $H_2$-Beladungsversuches innerhalb der Prüflänge gerissen
**) Probenbruch in Einspannung

Über die gleichzeitig gemessenen Ströme wurden hierbei flächenbezogene Ladungsmengen erreicht, die mindestens 100-fach über den tatsächlich zu erwartenden Werten liegen (vgl. *Tabelle 4* und *5*).

Zusätzlich wurde ein Dauerstandversuch über 4 Wochen mit Sigma-Draht in CEM I bei –1200 mV durchgeführt, der auch nach dieser sehr langen Zeit zu keinem Bruch führte. Die flächenbezogene Ladungsmenge lag bei diesem Versuch mindestens 500-fach über den in der Praxis zu erwartenden Werten.

Die Tabellen *6, 7* und *8* zeigen zusammenfassend die Ergebnisse der Zeitstandversuche.

Die Zugversuche nach DIN EN 10002-1 [1] zeigten keine veränderten Festigkeits- und Dehnkennwerte der geprüften Spannstähle. Eine Beeinflussung durch die Wasserstoffbeladung kann daher ausgeschlossen werden. In der *Tabelle 7* sind die Ergebnisse der standardisierten Zugversuche dargestellt, die an ausgewählten Versuchsserien durchgeführt wurden.

Alle anderen Versuchsreihen wurden, ohne die mechanischen Kennwerte zu ermitteln, im Wasserstoffbeladungs-Versuchsstand bis zum Bruch gezogen und die Bruchfläche hinsichtlich Einschnürung begutachtet *(Abb. 35)*. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 8* dargestellt.

Bis auf zwei Proben (Draht, Hennigsdorf), die Sprödbrüche innerhalb der Prüflänge zeigten, konnte bei allen Proben eine deutliche Einschnürung der Bruchbereiche beobachtet werden. Der Spannstahl aus Hennigsdorf ist aufgrund seiner erhöhten Empfindlichkeit gegenüber wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion in Deutschland nicht zugelassen.

Der überwiegende Teil der Proben riss außerhalb der Prüflänge. Auf eine genauere Untersuchung der Bruchflächen (z. B. mittels REM) wurde verzichtet, da sich makroskopisch keine Hinweise für wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion ergaben.

Bei den Versuchen mit direktem Kontakt zwischen Stahl und Zink *(Abb. 7)* konnte während der Versuchsdauer kein Bruch festgestellt werden. Beim Zugversuch im Prüfstand rissen 5 von 6 Proben außerhalb der Prüflänge und eine Probe innerhalb der Prüflänge, jedoch nicht im Bereich der Zink-Wicklung. Ein Sprödbruch konnte nicht festgestellt werden, da eine deutliche Einschnürung vorhanden war. Die Potentiale am Spannstahl lagen zu keiner Zeit in kritischen Bereichen, sodass keine Wasserstoffentwicklung stattfinden konnte *(Abb. 36)*.

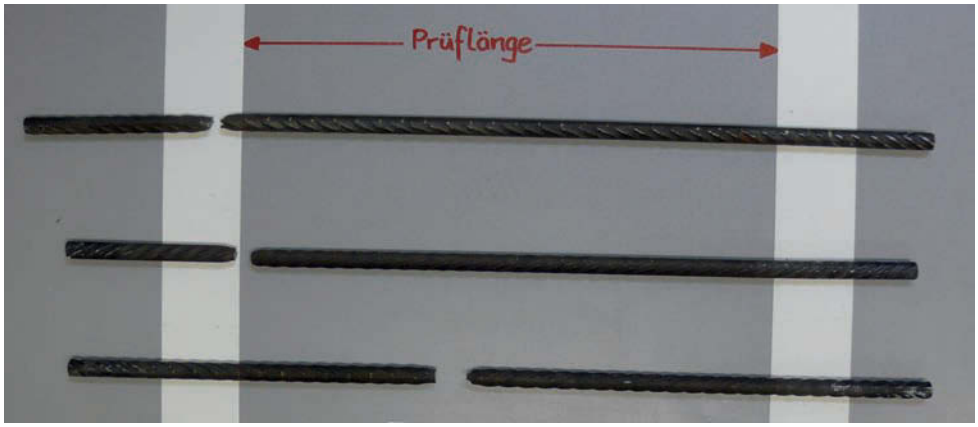


*Abb. 35*
*Sigma Spannstähle aus 48 h Beladungsversuchen in Lösung nach Zugversuch mit deutlichen Einschnürungen*

*Tabelle 8*
*Ergebnis nach Zugversuchen der Proben im Versuchsstand der 48 h Beladungsversuche*

| | Lösung pH 12,6<br>E= -1200 mV | CEM I 32,5 R;<br>E= -1200 mV | CEM III/B 32,5 N /LH/HS/NA<br>E= -1200 mV | CEM I<br>+Zn Wicklung | CEM III/B<br>+Zn Wicklung |
|---|---|---|---|---|---|
| | $R_{p0,2}$ = 95 % | $R_{p0,2}$ = 95 % | $R_{p0,2}$ = 95 % | $R_{p0,2}$ = 95 % | $R_{p0,2}$ = 95 % |
| Draht, Sigma | ● ● ● ● | ● ● ● [● ● ●] | ● ● ● | ● ● ● | ● ● ● |
| Draht, Nedri | ● ● ● | ● ● ● | ● ● ● | - | - |
| Litze, Nedri | ● ● ● | ● ● ● | ● ● ● | - | - |
| Draht, Hennigsdorf | ○ ● ● | ● ● ● ● ○ ● | ● ● ● | - | - |

● Bruch außerhalb Prüflänge ● Bruch innerhalb Prüflänge ○ Bruch während Beladungsversuch [ ] Dauerstandversuch 4 Wochen

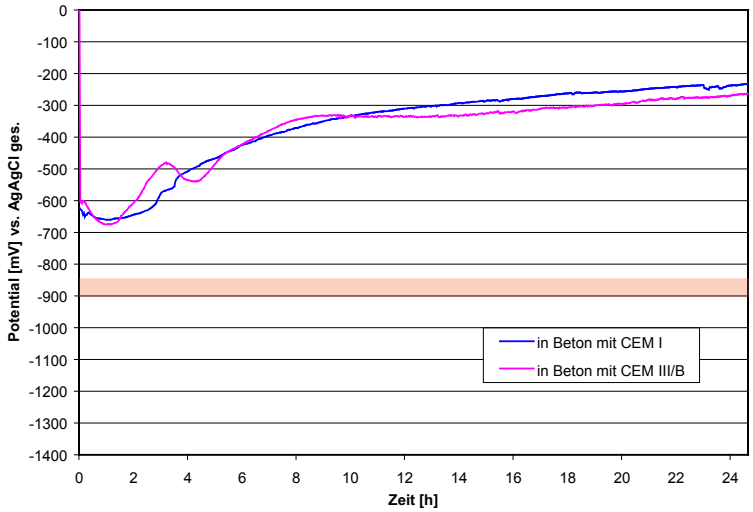


*Abb. 36*
*Mischpotentiale am Sigma-Spannstahl mit Zinkumwicklung (direkter Kontakt) in verschiedenen Betonen; Flächenverhältnis St : Zn = 2 : 1*

## 3.4 Ergebnisse an realen Stahlbetonfertigteilen

Die Mischpotentiale, die zwischen Bewehrung und Flachstahl an der Betonoberfläche mit der Aufsatzelektrode gemessen wurden, sind in den *Abb. 37* und *38* für die unterschiedlichen Flächenverhältnisse dargestellt. Sie wurden in Abhängigkeit von Zeit und Ort aufgenommen. Die gemessenen Potentiale beim Flächenverhältnis 13 : 1 liegen zu keiner Zeit negativer als –810 mV.

Bei den in *Abb. 38* dargestellten Ergebnissen mit einem Flächenverhältnis von 6 : 1 wurde je nach Position der Stahl über einen Zeitraum von bis zu sechs Stunden in den Bereich der Wasserstoffentwicklung polarisiert.

Damit konnten die Laborergebnisse, die mit der praxisnahen Versuchanordnung gewonnen wurden, bestätigt werden. Die beobachteten Zeiten, in denen Wasserstoff am Spannstahl entstanden ist, liegen weit unter den innerhalb der Zeitstandversuche gewählten Zeiten.

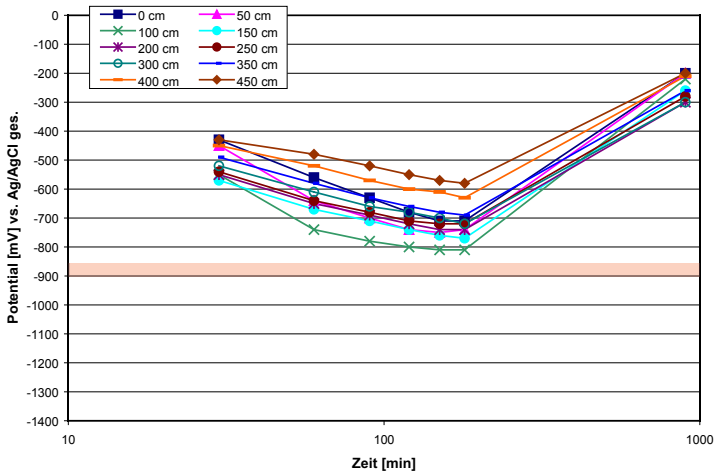


*Abb. 37*
*Mischpotentiale an der Betonoberfläche in Abhängigkeit von Zeit und Abstand, CEM I, Flächenverhältnis 13 : 1 (St : Zn)*

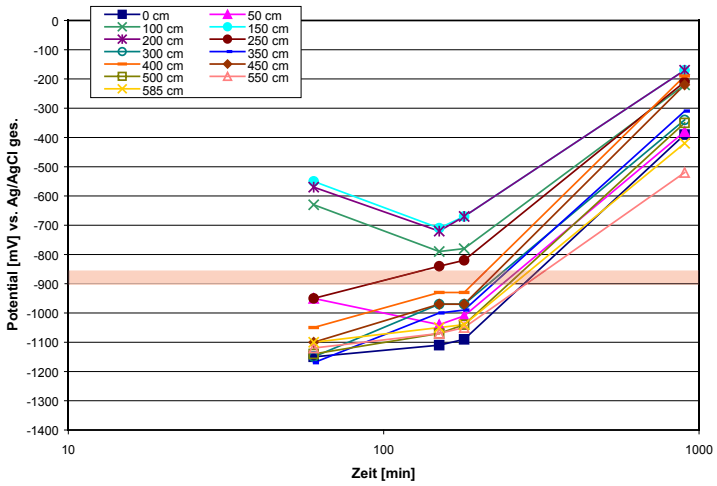


*Abb. 38*
*Mischpotentiale an der Betonober-fläche in Abhängigkeit von Zeit und Position, CEM I, Flächenverhältnis 6 : 1 (St : Zn)*

## 3.5 Ergebnisse an realen Spannbetonfertigteilen aus Stahlfaserbeton

Die grundsätzliche Fragestellung, ob Stahlfasern im Beton eine elektrische Verbindung zwischen den metallischen Einbauteilen herstellen können, wurde an vier unterschiedlichen Spannbetonfertigteilen untersucht.

Die Stahlschalung und die Spannglieder waren aufgrund der Spannvorrichtung bei allen Versuchen elektrisch leitend miteinander verbunden. Die verzinkten Befestigungsschienen in den oberen Bereichen hatten mit 1,5 cm bis 2,0 cm nur einen sehr geringen Abstand zueinander. Die Länge der Stahlfasern betrug zum einen 40 mm (Fa. Max Bögl) und zum anderen 60 mm (Fa. Rekers). Bei den zunächst durchgeführten Widerstandsmessungen konnte zwischen den verschiedenen Einbauteilen keine elektrische Verbindung festgestellt werden. Auch die anschließenden Potentialmessungen belegen, dass die Stahlfasern keinen Kontakt zwischen den Einbauteilen herstellen können.

### 3.5.1 Ergebnisse bei Fa. Max Bögl

Bei den Untersuchungen an Probekörpern der Fa. Max Bögl konnten die in *Tabelle 9* dargestellten Potentiale gemessen werden.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die verzinkten Einbauteile bei Potentialwerten zwischen ca. –900 mV und –1300 mV aktiv sind. Die Spannlitzen liegen mit Potentialen von ca. –350 mV deutlich positiver. Ein indirekter Kontakt zu verzinkten Einbauteilen über die Stahlfasern kann daher für diesen Fall ausgeschlossen werden. Bei gezielter Herstellung einer elektronenleitenden Verbindung zwischen den verzinkten Einbauteilen und den Spannlitzen werden am Spannstahl Potentialwerte von ca. –1200 mV erreicht.

### 3.5.2 Ergebnisse bei Fa. Rekers

Die Ergebnisse der Potentialmessungen bei Fa. Rekers sind für die Stahlschalung in *Tabelle 10* dargestellt. Die Versuche in der Holzschalung lieferten vergleichbare Ergebnisse.

Die verzinkten Einbauteile waren auch bei diesen Versuchen mit Potentialwerten von ca. –1300 mV aktiv. Der Spannstahl wurde durch die fehlende elektronenleitende Verbindung zum verzinkten Einbauteil nicht polarisiert. Eine Schädigung des Spannstahls infolge wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion kann daher auch für diesen Fall ausgeschlossen werden. Durch die gezielte Herstellung einer elektronenleitenden Verbindung zwischen den verzinkten Einbauteilen und den Spannlitzen, wurden an den Spannstahllitzen maximale Mischpotentialwerte von ca. -1050 mV erreicht. Nach ca. zwei Stunden wurden die Mischpotentiale, infolge der Deckschichtbildung am Zink, positiver.

*Tabelle 9*
*Potentialmessung an Probekörper Fa. Max Bögl (Abb. 12), 15 min nach Betonage, gegen Ag/AgCl ges.*

| **Bauteil** | **Stahlschalung** | **Holzschalung** |
|---|---|---|
| verzinkte Ankerschiene (oben) | –1310 mV | –1250 mV |
| verzinkte Ankerschiene (unten) | –1050 mV | –910 mV |
| Spannlitzen | –365 mV | –310 mV |

*Tabelle 10*
*Potentialmessung an Probekörper Fa.Rekers (Abb. 14), 20 min nach Betonage in Stahlschalung, gegen Ag/AgCl ges.*

| **Messpunkt** | Spannlitzen(unten) | verzinkte Ankerschiene (unten) | verzinkte Trapezblechschiene (oben) |
|---|---|---|---|
| Rohr (R1) | –255 mV | –1270 mV | –1300 mV (an der Betonoberfläche gemessen) |
| Rohr (R2) | –255 mV | –1260 mV | |
| Rohr (R3) | –250 mV | –1240 mV | |

# 4 Diskussion

Mit den innerhalb des Vorhabens gewonnenen Erkenntnissen lässt sich das Verhalten von Zink bzw. verzinkten Bauteilen im direkten und indirekten Kontakt mit Stahl im Beton sehr gut beschreiben. Es wurden die Einflüsse von Zementart, Flächenverhältnis, Zeit und Abstand untersucht und ausgewertet.

Mit den durchgeführten Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass Abstandsvariationen im Nahbereich nur einen geringen Einfluss auf die Polarisation des Stahles haben. Auch bei Abständen von 20 cm und darüber kann der Stahl noch deutlich in den Bereich der Wasserstoffentwicklung polarisiert werden. Ein praxisrelevanter, unkritischer Abstand kann daher nicht definiert werden. Ursache dafür ist die gute Leitfähigkeit des Frischbetons. Noch bevor der Elektrolytwiderstand nach der Erhärtung des Betons langsam ansteigt, wodurch der Abstand eine größere Bedeutung gewinnen würde, ist eine Deckschichtbildung am Zink erfolgt, so dass eine Polarisation in den Bereich der Wasserstoffentwicklung nicht mehr möglich ist.

Ein sehr großer Einfluss auf die Polarisation des Stahles wurde bei der Variation des Flächenverhältnisses Stahl/Zink festgestellt. Durch den Kontakt zu größeren Stahloberflächen wird die Korrosion am Zink anfänglich stark beschleunigt, was aber zu einer beschleunigten Deckschichtbildung am Zink führt. Bei Flächenverhältnissen von 10 : 1 zeigte das Zinkpotential bereits nach 10 Minuten eine weitgehend abgeschlossene Deckschichtbildung an. Noch größere Flächenverhältnisse führen nicht mehr zu einer Polarisation des Stahles in den Bereich der Wasserstoffentwicklung.

Bei den durchgeführten Zeitstandversuchen mit potentiostatischer Polarisation wurde die Beladung deutlich erhöht. Damit ist die Aussage der Zeitstandversuche auch dann noch zutreffend, wenn zufällige Schwankungen oder bisher unberücksichtigte Einflussgrößen in der Praxis zu einer stärkeren Beladung führen würden. Sowohl bei den hierbei im Rahmen des Vorhabens untersuchten, heute in Deutschland zugelassenen Spannstählen, als auch bei der hier geprüften Nedri-Litze (Festigkeitsniveau in Deutschland nicht zugelassen), hat sich unter der gewählten Wasserstoffbeladung kein Bruch während der Versuchszeit ergeben. Ebenso zeigten sich keine Hinweise auf signifikant veränderte mechanische Eigenschaften.

Die im Labor gewonnenen Ergebnisse wurden durch Untersuchungen an Bauteilen bestätigt. Mit Hilfe der ermittelten Daten konnte die Dauer und Intensität der Wasserstoffbeladung des Stahls durch eine Polarisation infolge des Kontaktes zu verzinkten Einbauteilen festgestellt werden.

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieses Vorhabens konnte durch einen indirekten Kontakt zwischen verzinktem Stahl und Spannstahl keine Gefährdung für wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion an den zugelassenen Spannstählen festgestellt werden. Eine Änderung der Norm mit dem Ziel der Aufhebung des Verbotes eines indirekten Kontaktes zu verzinkten Bauteil kann deshalb in Erwägung gezogen werden. Die hierzu notwendigen Schritte sollen im Rahmen der turnusgemäßen Überarbeitung der DIN 1045-1 im Jahr 2008 eingeleitet werden.

Auch wenn sich beim direkten Kontakt von verzinktem Stahl mit Spannstahl keine Auffälligkeiten gezeigt haben, muss der in der Norm geforderte Mindestabstand von 2 cm weiterhin eingehalten werden, um einen direkten Kontakt in der Praxis sicher zu vermeiden. Bei einem direkten Kontakt können sich zufällige Verhältnisse einstellen, die versuchstechnisch nicht sicher erfasst werden können und deren Grenzbedingungen sich nicht klar definieren lassen. Deshalb kann ein solcher Zustand nicht toleriert werden. Aus diesem Grund ist auch der Einsatz verzinkter Hüllrohre nicht unproblematisch, da der direkte Kontakt nicht sicher auszuschließen ist. Verzinkte Stahlfasern stellen hingegen keine Gefährdung dar, da diese komplett mit Zementleim umschlossen sind und daher weder untereinander, noch mit anderen Einbauteilen in direktem Kontakt stehen.

Gleichzeitig sei darauf verwiesen, dass die Erkenntnisse aus den Untersuchungen nicht auf verzinkte Spannstähle anwendbar sind. Kleine Beschädigungen der Verzinkungsschicht bis auf das Grundmaterial führen zu Flächenverhältnissen von Stahl/Zink, die nicht Gegenstand dieser Untersuchungen waren. Unter diesen Bedingungen mit örtlichen Beladungsintensitäten zu rechnen, die durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen nicht abgedeckt wurden.

Die erzielten Ergebnisse wurden potentiellen Anwendern unmittelbar zur Verfügung gestellt und dort bereits umgesetzt. Weiterhin erfolgte eine Veröffentlichung der Ergebnisse [11, 12].

# 5 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse

Um zu klären unter welchen Umständen eine Gefährdung von Spannstählen beim Kontakt mit verzinkten Bauteilen gegeben ist, wurden umfangreiche Laborversuche in alkalischen Lösungen und verschiedenen Betonen sowie Zeitstandversuche an Spannbetonprobekörpern durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass Abstandsvariationen im Nahbereich nur einen geringen Einfluss auf die Polarisation des Stahles haben. Ein praxisrelevanter, unkritischer Abstand für den indirekten Kontakt des Spannstahls, z. B. über die Bewehrung, konnte daher nicht definiert werden.

Aus den Versuchsreihen wurde deutlich, dass ein wesentlicher Einfluss durch das Flächenverhältnisses Stahl : Zink gegeben ist. Hier konnte eine praxisrelevante Grenze ermittelt werden. Danach führen Flächenverhältnisse größer 10 : 1 nicht zu einer Polarisation des Spannstahls in den Bereich der Wasserstoffentwicklung. Die im Labor gewonnen Ergebnisse konnten durch Untersuchungen zunächst an realen Betonfertigteilen, später auch an Spannbetonfertigteilen bei der Fa. Rekers verifiziert werden. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen wurde für eine spezielle Spannbetonbinderausführung, bei der die Flächenverhältnisse in unkritischen Breichen lagen, für die Verwendung von verzinkten Einbauteilen im indirekten Kontakt mit Spannstählen eine Zustimmung im Einzelfall gegeben.

Während der Vorhabensbearbeitung wurde von den beteiligten Firmen eine weitere Problematik angesprochen. Dabei ging es um den Einsatz von verzinkten Einbauteilen in Spannbetonfertigteilen aus Stahlfaserbeton. Auch hier war die Frage, ob eine Gefährdung der Spannstähle durch indirekten Kontakt über die nicht verzinkten Stahlfasern möglich ist. Durch Untersuchungen an realen Fertigteilabschnitten bei den Firmen Rekers und Max Bögl konnte gezeigt werden, dass ein Kontakt über die Stahlfasern selbst über sehr kurze Entfernungen nicht vorliegt. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurden für derartige Fertigteile beim Deutschen Institut für Bautechnik entsprechende bauaufsichtliche Zulassungen unter Verwendung verzinkter Einbauteile beantragt.

Um eine sichere Gefährdungsabschätzung bei indirektem Kontakt für Flächenverhältnisse vornehmen zu können, bei denen eine Polarisation der Spannstähle in den Bereich der Wasserstoffentwicklung erfolgt, wurden Zeitstandversuchsreihen unter Wasserstoffbeladung durchgeführt. Diese führten an zugelassenen Spannstählen nicht zu Brüchen während der Versuchszeit. Die anschließend ermittelten mechanischen Kennwerte zeigten keine signifikanten Änderungen. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen, die bezüglich der Beladungsmenge, der Beladungszeiten und der gewählten Vorspannung sehr konservativ ausgelegt wurden, ist ein indirekter Kontakt von Spannstählen zu verzinkten Einbauteilen als unkritisch zu bewerten. Eine entsprechende Änderung der Norm ist anzustreben. Aus grundsätzlichen Gründen ist der direkte Kontakt durch Einhaltung des in der DIN 1045-1 geforderten Mindestabstandes von 2 cm aber weiterhin sicher auszuschließen. Dies stellt für die Anwender aus praktischer Sicht kein Problem dar.

Durch die in enger Zusammenarbeit mit der Industrie durchgeführten Forschungsarbeiten wird es den Anwendern ermöglicht, zukünftig verzinkte Einbauteile in Spannbetonfertigteilen einzusetzen. Teilweise konnte der Einsatz durch Zustimmungen im Einzelfall bzw. durch bauaufsichtliche Zulassungen bereits unmittelbar in der Praxis umgesetzt werden. Damit wurde das Ziel des Vorhabens erreicht.

# Danksagung

Das Vorhaben mit dem Förderkennzeichen 14218 N wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungseinrichtungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert und von der Gesellschaft für Korrosionsschutz e. V. (GfKORR e. V.) sowie von den Industriemitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses: Rekers-Betonwerk GmbH Co. KG, Spelle; NEDRI Spanstaal BV, Venlo/NL; Westfälische Drahtindustrie GmbH, Hamm; SIGMA Spannstahl GmbH, Duisburg; Grillo Werke AG, Duisburg unterstützt. Für die finanzielle Förderung und die umfangreiche Unterstützung des Vorhabens möchten wir uns bedanken.

# Literatur


[1] Norm DIN 1045-1 Juli 2001.
Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion

[2] U. Nürnberger:
Analyse und Auswertung von Schadensfällen an Spannstählen, Heft 308, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, hrsg. vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980

[3] H. Kaesche:
Zum Elektrodenverhalten des Zinks und des Eisens in Calciumhydroxidlösung und in Mörtel, Werkstoffe und Korrosion 20 (1969) S. 119-124

[4] P. Heiligenstaedt, K. Bohnenkamp:
Untersuchungen zum wasserstoffinduzierten Sprödbruch verzinkter Spannstähle im Beton, Arch. Eisenhüttenw. 47 (1976) S. 107-112

[5] E. Riecke:
Untersuchungen über den Einfluss des Zinks auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen, Werkstoffe und Korrosion 30 (1979) S. 619-631

[6] U. Nürnberger:
Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1995

[7] E. Schäfer:
Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins, Dissertation TU Clausthal (2004)

[8] Norm DIN EN 10002-1 Dezember 2001.
Metallische Werkstoffe – Zugversuch.
Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur

[9] Norm DIN EN 12696-Anhang A Juni 2000.
Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton

[10] Norm DIN 50019 Februar 1984.
Korrosion der Metalle – Korrosionsuntersuchungen der Kontaktkorrosion in Elektrolytlösungen

[11] A. Burkert, J. Lehmann, A. Burkert, J. Mietz, G. Eich,:
Verzinkte Bauteile im Kontakt mit Spanngliedern, Beitrag zu einem Sammelwerk: Forschung für die Praxis: Nachhaltige Oberflächenschutzkonzepte (2007), 12-25; GfKORR; Hrsg.: Kuratorium Korrosionsforschung ISBN 978-3-935406-34-5

[12] Dr. A. Burkert, A. Burkert, G. Eich, J. Lehmann, Dr. J. Mietz:
Galvanized constructional elements in contact with prestressing steel, Werkstoffe und Korrosion (voraussichtlich 02/2008)

[13] T. Bellezze, R. Fratesi, G. A. Plizzari, F. Titarelli:
Corrosion behaviour of galvanized steel rebars in the presence of coating discontinuities, EUROCORR 2001, Riva del Garda, Italy, paper no. 157

[14] T.-G. Vinka, M. Becker:
Corrosion of zinc coated steel in chromate reduced concrete, Proceedings of European COST 521 Workshop, Belfast, 28-31 August 2000, Project SE3, S.33-36

[15] R. Fratesi, G. Moriconi, T. Bellezze, F. Titarelli:
Influence of cement alkalinity on corrosion of galvanized steel bars in concrete, Proceedings of European COST 521 Workshop, Belfast, 28-31 August 2000, Project I2, S 45-52