

*Reinhard Mang und Hans-Horst Müller*

## **Untersuchungen zur Anwendbarkeit feuerverzinkter Bewehrung im Stahlbetonbau**

Bericht Nr. 90  
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.

---

Die Untersuchungen wurden von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V. aus Mitteln des BMWi gefördert.

---

# Untersuchungen zur Anwendbarkeit feuerverzinkter Bewehrung im Stahlbetonbau

Reinhard Mang und Hans-Horst Müller

**Zielsetzung.** Durch Karbonatisierung des Betons oder durch Eindringen aggressiver Substanzen kann der Korrosionsschutz für den Bewehrungsstahl beeinträchtigt werden. In solchen Fällen kann es zweckmäßig sein, die Bewehrung durch Verzinken zu schützen. Vor der Anwendung verzinkter Bewehrung im Stahlbetonbau war zu klären, inwieweit die Eigenschaften der Betonstähle durch eine Feuerverzinkung verändert werden.

**Zusammenfassung.** In umfangreichen Versuchen an feuerverzinkten, naturharten Betonrippenstählen wurde deren Eignung für die Anwendung im Stahlbetonbau untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß die Festigkeitskennwerte der Stähle durch eine Feuerverzinkung nur unwesentlich verändert werden, das Verformungsvermögen der Stähle nur bei einer Verzinkung mit langer Tauchzeit beeinflusst wird, mit einer Abnahme der Dauerschwingfestigkeit der Stähle jedoch immer gerechnet werden muß. Das Verbundverhalten der Stähle in Beton wird zwar beeinflusst, die Abminderungen sind jedoch zumindest bei kleinen und mittleren Stabdurchmessern unbedeutend. Problematisch erscheint dagegen noch das Haftvermögen der Zinkschichten auf der Stahloberfläche; die übliche Verarbeitung der Betonstähle führt nämlich zu extremen Beanspruchungen des Haftvermögens.

## Korrosionsschutz von Stahl in Beton

Im Stahlbetonbau waren Korrosionsprobleme wegen der korrosionsschützenden Wirkung des Betons gegenüber Stahl lange Zeit unbekannt. Vor allem Änderungen der Umweltbedingungen haben jedoch dazu geführt, daß inzwischen dem Korrosionsschutz der Stahleinlagen erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden muß.

Der Schutz, den die hohe Alkalität des unkarbonatisierten Betons dem Stahl gewährt, kann nämlich durchbrochen werden

- infolge Karbonatisierung des Betons, d. h. durch Neutralisierung der basischen Betonbestandteile durch Luftkohlenensäure,
- durch Einwirkung aggressiver Substanzen, z. B. von Halogenidionen, insbesondere von Chloridionen im alkalischen Beton, oder
- an größeren Rissen im Beton, vor allem wenn stark korrosionsfördernde Umwelteinflüsse vorliegen.

Unter nicht oder nur wenig aggressiven Bedingungen, bei ausreichender Betondeckung und guter Betonqualität ist die Bewehrung ausreichend gegen Korrosion geschützt. Eine Verzinkung der Betonstähle ist hier nicht erforderlich und wird schon aus wirtschaftlichen Gründen kaum angewandt werden.

Bei Anwendung einer feingliedrigen Bauweise mit geringer Betonüberdeckung der Bewehrung, in maritimer Umgebung oder für Bauteile, die Tausalzen ausgesetzt sind – um nur einige Beispiele zu nennen –, ist jedoch ein zusätzlicher, über die passivierende Wirkung des unkarbonatisierten Betons hinausgehender Korrosionsschutz von großem Interesse.

Erste über einen Zeitraum von zwei Jahren reichende

Versuche<sup>1)</sup> haben gezeigt, daß eine Verzinkung der Bewehrungsstähle einen Korrosionsschutz erwarten läßt, der auch unter ungünstigen Bedingungen über einen längeren Zeitraum anhält.

Vor der Anwendung einer verzinkten Bewehrung im Stahlbetonbau war grundsätzlich zu klären, welchen Einfluß eine Feuerverzinkung auf die mechanischen Eigenschaften des Bewehrungsstahls ausübt und inwieweit der Verbund zwischen dem Stahl und dem Beton durch die Zinkschicht verändert wird.

## Versuchsmaterial

Die Untersuchungen beschränken sich auf naturharte Betonrippenstähle der Festigkeitsklasse BSt 420/500. Als Stabdurchmesser wurden 6, 8, 16 und 28 mm gewählt [6 mm ist der kleinste, 28 mm der größte nach DIN 488 – Betonstahl –<sup>2)</sup> zulässige Stabdurchmesser]. Je Stabdurchmesser wurden zwei bis fünf Schmelzen mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung geprüft, wobei insbesondere auf unterschiedliche Siliciumgehalte geachtet wurde (Tafel 1).

Über Versuche an kaltumgeformten Betonrippenstählen wird in <sup>3)</sup> berichtet.

**Verzinken des Versuchsmaterials.** Das Versuchsmaterial wurde im sogenannten „Trockenverzinkungsverfahren“ feuerverzinkt. Dieses Verfahren bietet sich aus betrieblichen und wirtschaftlichen Gründen für das Verzinken von Betonstählen an. Das Versuchsmaterial wurde in Salzsäure gebeizt und in einer Zinkchlorid-Ammoniumchlorid-Mischung gefluxt. Die Zinkbadtemperatur betrug 448–450 °C. Die Abkühlung nach dem Zinkbad erfolgte an der Luft.

**Einflüsse auf Aufbau und Dicke der Zinkschichten.** Dicke und Aufbau der Zinkschichten beim Feuerverzinken werden im wesentlichen von der Zinkbadtemperatur, der Tauchdauer, dem Stabdurchmesser und der chemischen Zusammensetzung des Stahls beeinflusst.

Zusammenfassung des Untersuchungsberichts Nr. 1009 vom Januar 1980 des Instituts für Massivbau der Technischen Universität München, GAV Nr. FA 5, AIF-Nr. 3711.

Dipl.-Ing. Reinhard Mang, Akademischer Rat a. Z. am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München; Dipl.-Ing. Hans-Horst Müller, Leiter einer Forschungsgruppe am Institut für Massivbau der Technischen Universität München.

**Tafel 1. Chemische Analyse der Versuchsstähle und die bei unterschiedlichen Tauchdauern erhaltenen Zinkschichtdicken**

Stabdurchmesser mm	Bezeichnung	Chemische Analyse						mittlere Zinkschichtdicke bei einer Tauchzeit von				
		% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	2 min <sup>1)</sup>	2 min <sup>2)</sup>	4 min <sup>2)</sup>	6 min <sup>2)</sup>	12 min <sup>2)</sup>
6	A	0,35	0,79	0,33	0,031	0,034	0,26	–	–	–	–	310
	N	0,33	0,73	0,28	0,005	0,031	n.b.	270	90	150	200	–
8	A	0,20	0,86	0,05	0,045	0,010	n.b.	–	–	–	–	190
	B	0,37	0,91	0,26	0,037	0,034	0,38	170	–	–	–	310
	Z	0,32	0,97	0,47	0,038	0,037	n.b.	190	–	–	–	280
	W	0,42	1,02	0,34	0,010	0,028	n.b.	280	–	150	–	–
	N	0,37	0,92	0,32	0,044	0,038	0,34	120	110	200	300	–
16	A	0,35	0,74	0,22	0,040	0,032	0,30	235	–	–	–	245
	B	0,40	0,97	0,43	0,035	0,027	n.b.	–	200	–	–	310
	Z	0,33	1,02	0,54	0,022	0,029	n.b.	210	–	–	–	280
	R	0,39	1,12	0,38	0,026	0,035	0,22	270	200	–	–	–
	N	0,41	1,04	0,35	0,032	0,027	n.b.	170	130	220	300	–
28	A	0,36	1,17	0,26	0,040	0,014	n.b.	–	110	–	–	150
	B	0,39	0,99	0,40	0,045	0,045	n.b.	255	–	200	–	275
	Z	0,40	0,94	0,37	0,032	0,045	n.b.	230	–	–	–	260
	W	0,36	1,26	0,35	0,016	0,025	0,06	210	–	–	–	–

<sup>1)</sup> 6 m lange Betonstähle. – <sup>2)</sup> Die Verzinkung wurde an kurzen Stahlabschnitten (~0,5 m) durchgeführt; entsprechend kurz konnten die Ausziehzeiten gehalten werden. – <sup>3)</sup> Die von der Verzinkerei üblicherweise bei Baustählen angewandte Tauchzeit; 6 m lange Betonstähle.

Während aus der Sicht des Korrosionsschutzes eine möglichst dicke Zinkschicht vorteilhaft wäre, zeigen jedoch gerade hohe Zinkauflagen ein schlechtes Haftvermögen auf der Stahloberfläche. Dieses ist jedoch bei Betonstählen von besonderer Bedeutung, da Bewehrungsstähle in der Regel bei der Verarbeitung gebogen werden müssen.

Stähle, die mit der von der ausführenden Verzinkerei bei Baustählen üblicherweise angewandten Tauchzeit von 12 min verzinkt wurden, zeigten Zinkschichten bis über 300 µm Dicke. Daraufhin wurden die Tauchzeiten variiert. Die dabei erzielten Zinkschichtdicken sind aus **Tafel 1** ersichtlich. Die angestrebte Zinkauflage von ~100 µm konnte erst bei der nach Angabe der Verzinkerei unter üblichen Bedingungen kürzestmöglichen Tauchzeit von 2 min annähernd erreicht werden. Der Siliciumgehalt des Stahls spielte dabei nicht die von Baustählen her bekannte<sup>4)</sup>) entscheidende Rolle. Untersuchungen über optimale Verzinkungsbedingungen für Betonstähle wurden zwischenzeitlich in <sup>6)</sup> veröffentlicht. Die hier angegebenen Zinkschichtdicken wurden grundsätzlich an Schlibbildern bestimmt, da die Zinkablösemethode wegen der unregelmäßigen Stahloberfläche ungeeignet und die magnetische Schichtdickenmessung zu ungenau war.

### Änderung der mechanischen Eigenschaften

Die Anforderungen an Betonstähle sind in DIN 488<sup>2)</sup> festgelegt. Dort sind auch die Prüfverfahren genau gere-

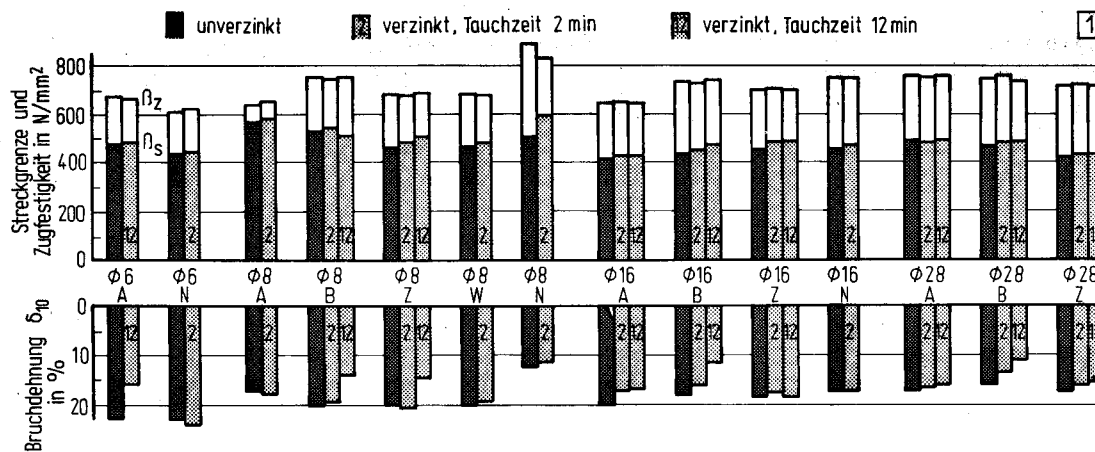
gelt. Es lag daher nahe, das Verhalten verzinkter Bewehrungsstähle im Vergleich zu nichtverzinkten Stählen anhand dieser Prüfverfahren zu ermitteln.

**Zugversuche.** In statischen Zugversuchen werden die Festigkeitskennwerte Streckgrenze ( $\beta_s$ ) und Bruchspannung ( $\beta_z$ ) sowie die Bruchdehnung ( $\delta_{10}$ ) ermittelt.

Betonrippenstähle besitzen in der Regel eine so große plastische Verformbarkeit, daß Oberflächeneinflüsse – im vorliegenden Fall die Geometrie und das Gefüge der Stahloberfläche – die Ergebnisse von statischen Zugversuchen nicht merklich verändern. Im Gegensatz dazu reagiert die im Dauerschwingversuch geprüfte dynamische Festigkeit sehr empfindlich auf Veränderungen der Oberfläche. Die Ergebnisse von statischen Zugversuchen zeigen dagegen Veränderungen im Grundmaterial an. Veränderungen der mechanischen Eigenschaften sind infolge der künstlichen Alterung bei der Wärmebehandlung beim Verzinken zu erwarten.

Bei der Auswertung der Ergebnisse wurden die Streckgrenzen- und die Bruchspannung auf den reinen Stahlquerschnitt unter Vernachlässigung der Zinkauflage bezogen, da die Zinkschicht wegen ihres geringen Elastizitätsmoduls und ihrer geringen Festigkeit kaum einen Beitrag zur Gesamtbruchlast der Stäbe liefert; zudem platzte die Zinkschicht bereits vor Erreichen der Bruchlast weitgehend ab.

**Bild 1** gibt eine zusammenfassende Darstellung der Versuchsergebnisse.



**Bild 1. Änderung der Streckgrenze, der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung infolge einer Feuerverzinkung**

Es läßt sich folgendes feststellen:

- Die Zugfestigkeit der Stähle wird durch das Verzinken nicht merklich beeinflusst.
- Die Streckgrenze der Stähle wird durch das Verzinken etwas angehoben; je kleiner der Durchmesser, um so deutlicher tritt dies in Erscheinung, je länger die Tauchdauer, um so größer der Anstieg.
- Bei Stählen, die vor dem Verzinken keine ausgeprägte Streckgrenze aufweisen, tritt diese nach dem Verzinken auf. Sie entspricht dann etwa dem vorherigen  $\beta_{0,2}$ -Wert.
- Die Bruchdehnung ändert sich bei kurzen Tauchzeiten kaum; bei langen Tauchzeiten ( $> 6$  min) kann zum Teil eine erhebliche Abnahme der Bruchdehnung festgestellt werden.

Diese Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß bei Einhaltung kurzer Tauchzeiten und der damit verbundenen geringen thermischen Belastung keine nennenswerten Änderungen der statischen Festigkeitswerte auftreten.

**Rückbiegeversuche.** Betonrippenstähle sind im Rückbiegeversuch auf ihr Verformungsvermögen hin zu untersuchen. Nach dem Biegen um  $90^\circ$  um den 5- bis 8fachen Stabdurchmesser und einer anschließenden künstlichen Alterung (30 min bei  $250^\circ\text{C}$ ) muß sich die Stahlprobe um mindestens  $20^\circ$  zurückbiegen lassen, ohne zu brechen oder einzureißen.

Alle Proben, ob sie vor dem Verzinken gebogen (62 Proben) oder gerade verzinkt und dann gebogen worden waren (52 Proben), ließen sich anrißfrei zurückbiegen. Eine Ausnahme bildete nur der Stahl  $\varnothing 28\text{B}$ , von dem alle vor dem Verzinken gebogenen Stäbe (8 Proben) beim Zurückbiegen bei Winkeln zwischen  $0$  und  $13^\circ$  spröde brachen.

Dieser Stahl hatte in den Zugversuchen eine relativ geringe Bruchdehnung gezeigt, die durch das Verzinken noch um ein Drittel verringert wurde.

Über das Verhalten der Zinkschicht beim Biegen wird später berichtet.

**Dauerschwingversuche.** Die Dauerschwingversuche wurden an Stählen mit 16 mm Durchmesser durchgeführt.

Nach DIN 488 ist die Dauerfestigkeit von Betonstählen an gebogen einbetonierten Proben zu ermitteln. Vor Durchführung dieser Versuche wurde jedoch eine größere Anzahl von Proben der Schmelzen A, B, Z und N im freien Zustand geprüft. Diese Versuche dienen der Auswahl des Versuchsmaterials und der Ermittlung eines geeigneten Belastungsniveaus für die relativ aufwendigen Versuche nach DIN 488 sowie dem Vergleich mit dem unverzinkten Versuchsmaterial. Wie aus **Bild 2** hervorgeht, liegt die Dauerfestigkeit der verzinkten Proben im Mittel um ca. 15% niedriger als die der unverzinkten Proben, was mit den aus dem Schrifttum<sup>7)</sup> bekannten, an Stählen vergleichbarer Festigkeit ermittelten Ergebnissen übereinstimmt. Ein Einfluß der Tauchdauer (bei Stahl A, B, Z ca. 12 min, bei Stahl N 2 min) war nicht erkennbar. Auffallend war, daß an den Bruchflächen der verzinkten Stähle A, B und Z immer eine Vielzahl von Bruchausgängen erkennbar war, die sich dann im Restbruch vereinigten (**Bild 3**), wohingegen der Bruch der unverzinkten Stähle immer nur von einer Stelle ausging.

Die Dauerschwingversuche an einbetonierten Proben wurden entsprechend DIN 488 Blatt 3 durchgeführt: Die 2 m langen Prüfstäbe wurden um einen Durchmesser von  $15 d_s (= 240 \text{ mm})$  um  $45^\circ$  so gebogen, daß auf der Innen-

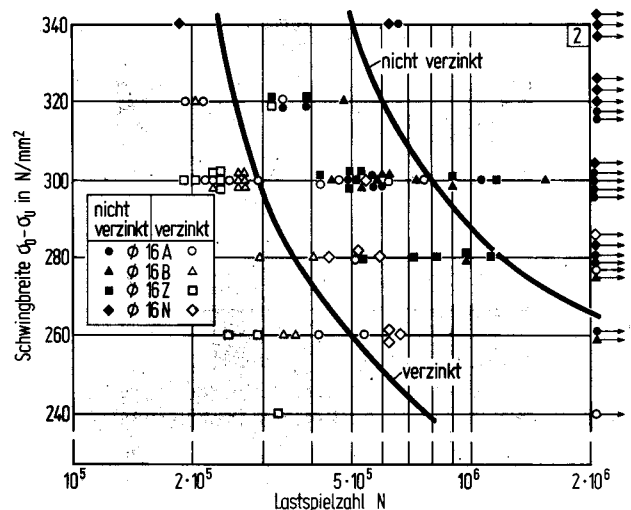


Bild 2. Ergebnis der Dauerschwingversuche an freien Proben mit 16 mm Durchmesser

seite der Krümmung Schrägrippen lagen, und in den auf **Bild 4** dargestellten Prüfkörper einbetoniert.

Versuche wurden mit den Stählen A und N durchgeführt, wobei verglichen wurden:

- unverzinkte, gealterte Proben,
- Proben vor dem Verzinken gebogen,
- Proben nach dem Verzinken gebogen. Die Zinkschicht wies dabei nach dem Biegen erhebliche Beschädigungen auf.

Die Ergebnisse der Versuche gehen aus **Bild 5** hervor. Die Dauerschwingfestigkeit der einbetonierten Stähle nimmt durch das Verzinken in vergleichbarer Weise wie im freien Zustand ab, wobei die verzinkten Proben des Stahls  $\varnothing 16 \text{ A}$  den Anforderungen nach DIN 488 nicht mehr genügen.

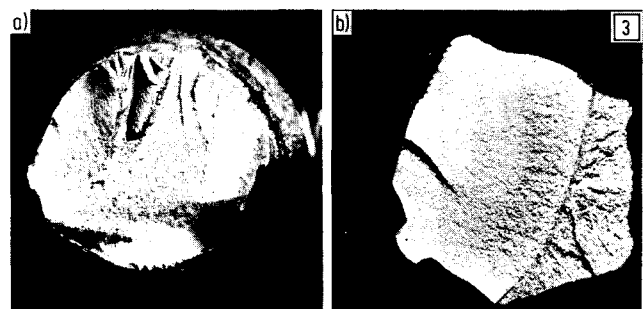


Bild 3. Charakteristisches Aussehen der Dauerbruchflächen eines verzinkten (a) und eines nichtverzinkten (b) Stahls (in beiden Fällen  $2\Delta\sigma = 300 \text{ N/mm}^2$ )

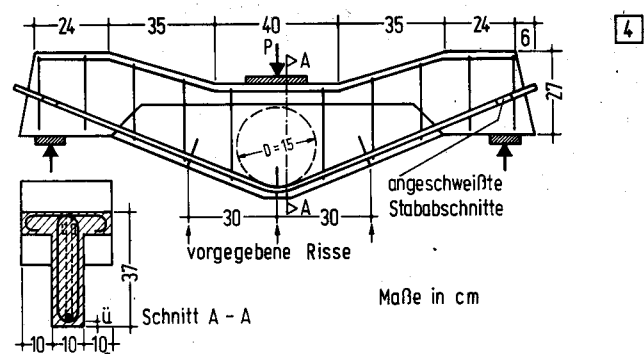


Bild 4. Prüfkörper für Dauerschwingversuche an einbetonierten Stählen nach DIN 488 (für Stähle bis 18 mm Durchmesser)

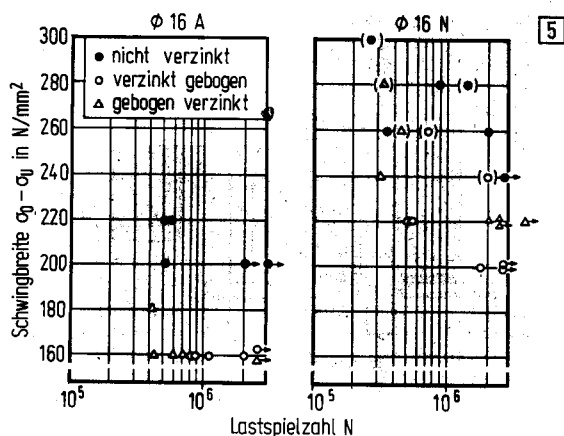


Bild 5. Ergebnis der Dauerschwingversuche an gekrümmt einbetonierten Stählen mit 16 mm Durchmesser. Die in ( ) angegebenen Versuchspunkte wurden an Prüfkörpern ermittelt, deren Belastung nach 2 Millionen Lastwechseln erhöht wurde

Die Ursache für das schlechtere Abschneiden der verzinkten Stähle gegenüber den unverzinkten Stählen ist noch nicht hinreichend geklärt. Der Einfluß einer Versprödung infolge des beim Beizen entstehenden Wasserstoffs ist wegen der geringen Wasserstoffempfindlichkeit von Stählen dieser relativ niedrigen Festigkeit unwahrscheinlich. Dies war auch bei den Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop nicht erkennbar. Eine Ursache könnte in der durch das Beizen verursachten erhöhten Rauigkeit der Stahloberfläche, am ehesten aber in einer Kerbwirkung infolge vorzeitiger Ribbildung in der vergleichsweise spröden Eisen-Zink-Schicht liegen.

#### Haftvermögen der Zinkschicht

Das unterschiedliche elastische und plastische Verhalten der einzelnen Schichten der dreischichtigen Randzone (Fe-FeZn-Zn) führt bei Verformungen zu Scherspannungen, die größer sein können als die Haftfestigkeit<sup>8)</sup>.

Beim Herstellen von Bewehrungskörben muß der Betonstahl gebogen und damit plastisch verformt werden. Werden die Stähle vor dem Biegen verzinkt, so darf beim anschließenden Verformen die Zinkschicht nicht wesentlich beschädigt werden oder gar abplatzen [kleine Risse in der Zinkschicht beeinträchtigen nach <sup>9)</sup> die Korrosionsschutzwirkung der Verzinkung nicht]. Doch selbst wenn die Bewehrungsstähle vor dem Verzinken gebogen werden, sind sie im rauen Baustellenbetrieb so starken mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt, daß ein sehr gutes Haftvermögen der Zinkschichten auf dem Stahluntergrund gefordert werden muß.

Nach <sup>10)</sup> soll die Zinkschicht nicht dicker sein als 80 µm, um ein ausreichendes Haftvermögen der Zinkschicht zu gewährleisten. Eine wichtige Rolle spielt aber nicht nur die Dicke, sondern auch der Aufbau der Zinkschicht, genauer gesagt, das Verhältnis der Dicken von Legierungsschicht und Reinzinkschicht. Die spröden Legierungsschichten reißen schon bei kleinen Verformungen ein; liegt über der Legierungsschicht eine ausgeprägte Reinzinkschicht, kann diese die Risse in den unteren Schichten überdecken.

Beim Biegen der Stähle um die nach DIN 1045<sup>11)</sup> zugelassenen Biegerollendurchmesser treten Randdehnungen bzw. -stauchungen von 13–17% auf. Diese führten sowohl am gezogenen wie am gedrückten Rand zu mehr oder weniger ausgeprägten Rissen (Bild 6a) oder gar zu Abplatzungen.

Nur Stähle mit dünnen Zinkschichten (~ 100 µm) blieben augenscheinlich unbeschädigt. In metallographischen Schliffen konnten jedoch auch hier Risse festgestellt werden (Bild 6b), die jedoch so fein waren, daß eine Beeinträchtigung der Korrosionsschutzwirkung des Zinks nicht zu befürchten ist. War eine ausgeprägte Reinzinkschicht vorhanden, drangen diese feinen Risse nicht bis zur Oberfläche durch.

#### Verbundverhalten

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung verzinkter Bewehrung im Stahlbetonbau ist, daß der Verbund zwischen Stahl und Beton durch die Zinkschicht nicht negativ beeinflusst wird. Die aus dem Schrifttum bekannten Untersuchungen<sup>12)</sup> führten zu den unterschiedlichsten Ergebnissen, die sich jedoch aufgrund der nichtvermittelten Versuchsbedingungen nicht interpretieren lassen.

Zwei wesentliche Umstände können eine Veränderung des Verbundverhaltens durch eine Verzinkung der Bewehrung bewirken:

- die Veränderung der Oberfläche (Rauigkeit, Profilierung) durch das Verzinken und
- die Beeinflussung der Grenzschicht zwischen Stahl und Beton durch eine chemische Reaktion des Zinks mit dem Calciumhydroxid des Frischbetons.

*Rauigkeitsmessungen* wurden an allen im Versuchsprogramm verwendeten Stählen durchgeführt. Ein Vergleich der Messungen der Rauhtiefe, des arithmetischen Mittelrauhwertes und der Glättungstiefe an verzinkten und unverzinkten Stählen machte deutlich, daß die Größe der Rauhtiefe sowie die Charakteristik des Rauigkeitsprofils nur sehr geringe Unterschiede aufwiesen.

*Mittels Rippenmessungen* wurde untersucht, ob durch die Zinkschicht die Oberflächenprofilierung der Rippenstähle verändert wird. Es ist bekannt, daß sowohl an konkaven wie an konvexen Oberflächen infolge des Schichtenwachstums eine verstärkte Anlagerung von Zink erfolgt. Wie an zahlreichen metallographischen Schliffen jedoch festgestellt wurde, sind die üblichen Krümmungsradien an den Rippen zu groß, um eine erkennbar stärkere Anlagerung von Zink zu bewirken. Lediglich an Längsrippen, an denen die Übergänge mit kleinen Radien ausgebildet werden, konnte vereinzelt eine verstärkte Zinkanlagerung beobachtet werden; an dieser Stelle ist sie jedoch für das Verbundverhalten ohne Bedeutung. Diese Feststellungen gelten aber nur für den Fall, daß die Stähle beim Verzinken langsam aus dem Zinkbad ausgezogen werden. Bei schnellem Ausziehen der Stähle aus

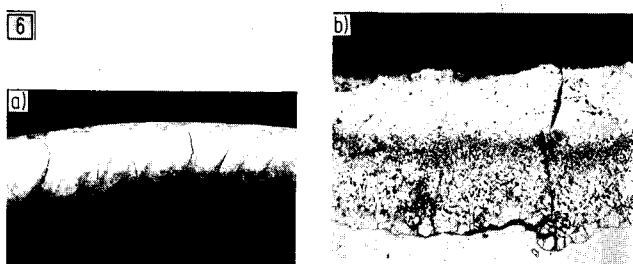


Bild 6. a) Gebogen verzinkter Stahl Ø 8.Z, um 32° zurückgebogen; ausgeprägte Risse in der Zinkschicht auf der gezogenen Seite; b) Metallographischer Schliff; Risse in der Zinkschicht, V = 200×, Zinkschichtdicke 110 µm

dem Zinkbad kann nämlich das flüssige Zink nicht genügend ablaufen und sammelt sich dann vorwiegend an den Rippen der Stähle an. Darüber wird in <sup>6)</sup> berichtet.

Die Rippenmessungen bestätigen, daß durch Aufbringen einer Zinkschicht die bezogene Rippenfläche  $f_R$  – ein für die Verbundeigenschaften charakteristischer Wert – nur wenig verändert wurde. Die größten Veränderungen wurden mit 11,1 bzw. 4,9% Abnahme der bezogenen Rippenfläche erwartungsgemäß an den Stählen  $\varnothing 6$  bzw.  $\varnothing 8$  mm beobachtet, da sich hier absolut kleine Änderungen relativ stark auswirken. Eine Änderung der Verbundspannungen infolge der Veränderung der Profilierung wäre rechnerisch nach <sup>13)</sup> mit maximal 3% zu erwarten gewesen.

**Grenzschicht Stahl/Beton.** In Frischbeton wird Zink von Calciumhydroxid wegen dessen hoher Alkalität angegriffen; Calciumhydroxid und Zink verbinden sich zu Calciumhydroxozinkat ( $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), wobei Wasserstoff frei wird<sup>12)</sup>.

Diese chemische Reaktion kann einerseits zu einer Verbesserung der Verzahnung zwischen Stahloberfläche und Beton führen, andererseits wird das Betongefüge in der unmittelbaren Umgebung des Bewehrungsstahls durch die Wasserstoffentwicklung erheblich gestört (Bild 7). Es ist bekannt, daß die Reaktion des Zinks mit dem Frischbeton nicht bei allen Zementen gleich ist. Für die Verbundversuche wurden daher zwei unterschiedliche Portlandzemente (M und S) gewählt, deren Verhalten gegenüber dem Zink aus früheren Versuchen bekannt war<sup>1)</sup>.



Bild 7. Unterschiede im Verbundbett: links Verbundbett eines nichtverzinkten, rechts eines verzinkten Stahls  $\varnothing 16$  mm

Während beim Zement S die Zinkabtragung – als ein Maß für die Heftigkeit der Reaktion – nach 7 Tagen weitgehend abgeschlossen war, lief sie beim Zement M weniger intensiv ab, dauerte dafür aber länger an.

Aus dieser Erfahrung wurde der Zeitpunkt der Versuchsdurchführung, nämlich 7 Tage und 2 Monate nach Herstellung der Versuchskörper, abgeleitet.

**Durchführung der Verbundversuche.** Das Verbundverhalten verzinkter Stähle in Beton wurde dem nichtverzinkter Stähle in „Pull-Out-Tests“ gegenübergestellt.

Für die Prüfkörper wurde die übliche Form gewählt: Die Stähle wurden in Würfel mit einer Kantenlänge von 10 Stabdurchmessern einbetoniert, wobei der Stahl nur auf eine Länge von 5 Stabdurchmessern mit dem Beton Verbund hatte; um den Einfluß der Störzone nahe dem Auflager auszuschalten, wurde der Stahl auf eine Länge von 5  $d_s$  auf der belasteten Seite verbundfrei geführt. Die Stäbe wurden mittig in die Prüfkörper einbetoniert; sie lagen beim Betonieren horizontal.

Die Versuchsanordnung ist in Bild 8 dargestellt. Folgende Einflußparameter wurden untersucht:

- Stabdurchmesser (8, 16, 28 mm),
- Zement (M, S),
- Betonalter (7 Tage, 60 Tage).

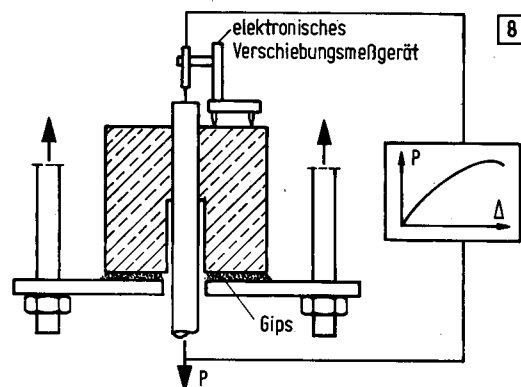


Bild 8. „Pull-Out-Test“, Versuchsanordnung

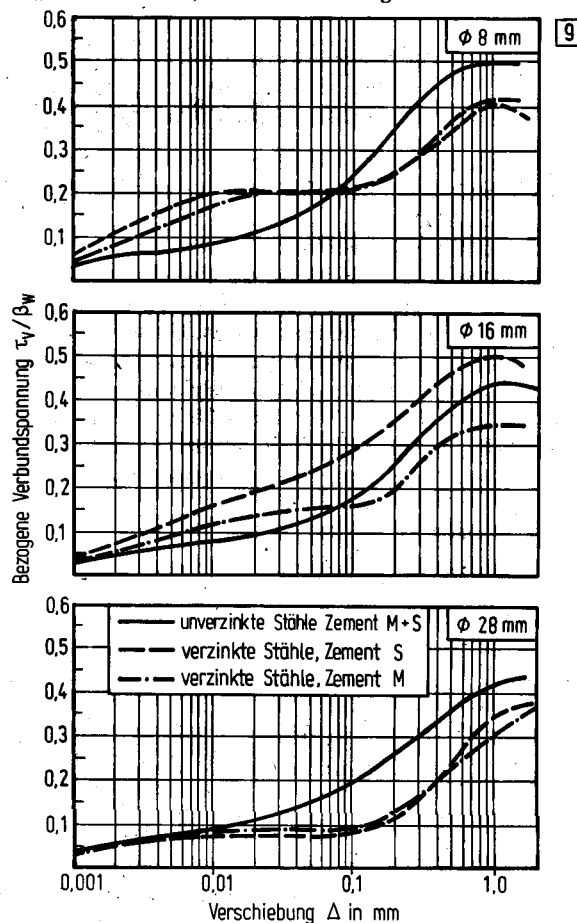


Bild 9. Ergebnis der Verbundversuche an 60 Tage alten Prüfkörpern

**Ergebnisse der Verbundversuche.** Die aus den Verbundversuchen an 60 Tagen alten Prüfkörpern gewonnenen Beziehungen zwischen dem Verschiebungsweg  $\Delta$  und der auf die Betonwürfel Festigkeit bezogenen Verbundspannung  $\tau_v/\beta_w$  sind in Bild 9 im halblogarithmischen Maßstab dargestellt.

Um den Unterschied im Verbundverhalten der verzinkten und der nichtverzinkten Bewehrung deutlich zu machen, wird in Bild 10 am Beispiel des Stabdurchmessers 8 mm das Verhältnis der gemessenen Verbundspannungen aufgetragen. Die Verbundversuche zeigen, daß Änderungen im Verbundverhalten im wesentlichen auf die Reaktion des Zinks mit dem Calciumhydroxid des Betons und der damit verbundenen Wasserstoffentwicklung zurückzuführen sind: Bei kleinen Verschiebungen ( $\Delta < 0,01$  mm) spielt die Haftung des Stahls am Beton eine entscheidende Rolle; diese Haftung wird durch die

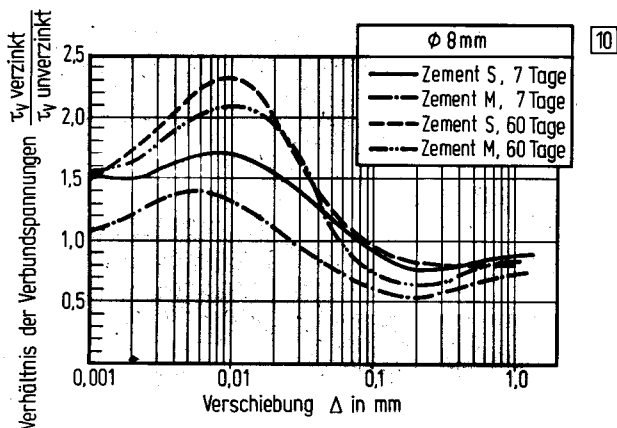


Bild 10. Verhältnis der Verbundspannungen verzinkter und nicht-verzinkter Betonrippenstäbe Ø 8 mm

angesprochene Reaktion erhöht, folglich sind auch die an verzinkten Stählen gemessenen Verbundspannungen höher als an nichtverzinkten Stählen.

Bei mittleren Verschiebungen ( $\Delta = 0,01-0,15$  mm) führt das Zusammenbrechen der in der unmittelbaren Umgebung des verzinkten Stahls aufgelockerten Betonstruktur dazu, daß die Verbundspannungen nur noch geringfügig zunehmen. Am Ende dieses Verschiebungsbereiches sind sie in der Regel geringer als bei nichtverzinkten Stählen.

Der anschließende Anstieg der Verbundkurven zeigt, daß die Rippentragwirkung noch vorhanden ist, wenn sie auch erst bei größeren Verschiebungen als bei den nichtverzinkten Rippenstäben einsetzt. Die Störung des Betongefüges läßt jedoch den Maximalwert der Verbundspannungen bei verzinkten Stählen nicht mehr so hoch ansteigen wie bei den nichtverzinkten Stählen. Da die Maximalwerte aber erst bei Verschiebungen von  $\sim 1$  mm auftreten, sind sie ohnehin nicht mehr von baupraktischer Bedeutung.

Die Änderungen im Verbundverhalten sind nach 7 Tagen beim Zement S wegen der größeren Reaktionsfreudigkeit stärker ausgeprägt als beim Zement M. Nach 60 Tagen sind zwischen den Ergebnissen mit den beiden Zementen keine gravierenden Unterschiede mehr vorhanden.

Bei den Stählen mit 28 mm Durchmesser waren die Eisen-Zink-Legierungsschichten durchgewachsen, d. h., es war keine Reinzinkschicht vorhanden. Dies führt, auch nach den Beobachtungen in <sup>1)</sup>, zu einer verstärkten Reaktion mit dem  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  des Betons. Die Gegenüberstellung in Bild 11 zeigt deutlich, daß der Beton in der Umgebung des verzinkten Stahls ganz erheblich gestört war, offensichtlich so stark, daß die bei den anderen Durchmessern beobachteten erhöhten Verbundspannungen bei

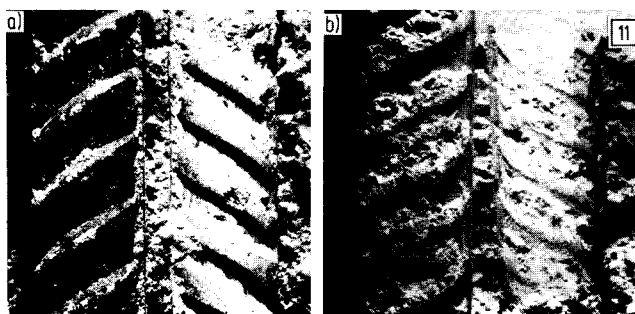


Bild 11. Verbundbett und zugehöriger Bewehrungsstahl Ø 28 mm; links ein nichtverzinkter, rechts ein verzinkter Stahl

kleinen Verschiebungen hier kaum in Erscheinung traten.

In dem im Stahlbetonbau interessierenden Verschiebungsbereich bis etwa 0,2 mm wiesen die verzinkten Stähle mit 8 und 16 mm Durchmesser höhere Verbundspannungen auf als die nichtverzinkten Stähle, was hinsichtlich der Rißbildung im Beton zugbeanspruchter Querschnitte oder Querschnittsteile und hinsichtlich der Verankerungslängen der Bewehrung im Beton positiv zu beurteilen ist. Bei den Stählen mit 28 mm Durchmesser wurden auch in diesem Verschiebungsbereich zum Teil geringere Verbundspannungen gemessen, was zu breiteren Rissen im Beton und zu größeren Verankerungslängen führt.

Von einigen verzinkten Versuchsstäben wurden metallographische Schliffe angefertigt. Diese zeigten, daß die Zinkschichten der Stähle mit 8 mm Durchmesser im Ausziehversuch nicht beschädigt worden waren, wohingegen bei den Durchmessern 16 und 28 mm trotz äußerlicher Unversehrtheit örtliche Ablösungen des Zinks vom Stahluntergrund stattgefunden hatten. Eine Beeinträchtigung der Korrosionsschutzwirkung ist daraus aber nicht zu befürchten.

### Schlußbemerkung

Vor kurzem wurde für verzinkte Bewehrungsstäbe für den Stahlbetonbau eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erteilt – nicht zuletzt aufgrund der hier vorgestellten Untersuchungen.

Der zuständige Sachverständigenausschuß konnte sich jedoch nicht dazu entschließen, bei Anwendung einer verzinkten Bewehrung Zugeständnisse hinsichtlich der erforderlichen Mindestbetondeckung zu machen. Er sah die zu erwartende Korrosionsschutzwirkung durch die Verzinkung quantitativ noch nicht hinreichend belegt. Diese Frage soll in einem noch längere Zeit andauernden Forschungsvorhaben mit ausgelagerten Stahlbetonbalken, das parallel zu den hier beschriebenen Versuchen begonnen wurde, geklärt werden.

Die Untersuchungen wurden vom Gemeinschaftsausschuß Verzinken über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) vom Bundesministerium für Wirtschaft finanziert, wofür auch an dieser Stelle gedankt sei. (S 24668)

### Schrifttum

- <sup>1)</sup> Martin, H.; Rauen, A.: In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton H. 242, 1974, S. 61/77.
- <sup>2)</sup> DIN 488. Aug. April 1972.
- <sup>3)</sup> Nürnberger, U.: In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton H. 318, 1981, S. 31/50.
- <sup>4)</sup> Sandelin, R. W.: Wire & W. Prod. 15 (1940) S. 655/76 u. 721/49; 16 (1941) S. 28/35, 55 u. 58; s. bes. S. 721/48.
- <sup>5)</sup> Horstmann, D.: Das Feuerverzinken siliziumhaltiger Stähle. 3. Vortrags- und Diskussionsveranstaltung des Gemeinschaftsausschusses Verzinken, 1974.
- <sup>6)</sup> Nürnberger, U.: In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton H. 318, 1981, S. 1/30.
- <sup>7)</sup> Hempel, M.; Horstmann, D.: Stahl u. Eisen 82 (1962) S. 1769/81.
- <sup>8)</sup> Horstmann, D.: Grundlagen und Möglichkeiten beim Feuerverzinken von allgemeinen Baustählen. Opladen 1971. (Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. Nr. 2207.)
- <sup>9)</sup> Deutekom, C.: Verzinken 2 (1973) Nr. 2, S. 14/16.
- <sup>10)</sup> Bablik, H.: Das Feuerverzinken. Wien 1941.
- <sup>11)</sup> DIN 1045. Aug. Dez. 1978.
- <sup>12)</sup> Rehm, G.; Lämmke, A.: In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton H. 242, 1974, S. 45/60.
- <sup>13)</sup> Martin, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstäben unter Kurzzeitbelastung. Berlin 1973. (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton.)