

Die Wirkung des Feuerverzinkens auf den Spannungszustand in Stahlteilen

Von Alexander Matting und Herbert Wolf in Hannover

Mitteilung aus dem Institut für Werkstoffkunde der Technischen Hochschule Hannover

[Bericht Nr. 41 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken*)]

Qualitative Bewertung des Spannungszustandes kalt verformter Stahlproben vor und nach dem Feuerverzinken. Eigenspannungsmessungen an geschweißten Stahlblechen vor und nach dem Verzinken sowie nach dem Spannungsfreiglühen. Beurteilung der Riß- und Sprödbruchgefahr durch Verzinken.

Zunehmend werden feuerverzinkte Stahlbauteile für tragfähige Konstruktionen eingesetzt. In den wenigen Fällen, bei denen Brüche auftraten, war man geneigt, dem Verzinken einen ungünstigen Einfluß auf die Verformungseigenschaften des Stahls zuzuschreiben. Aus Untersuchungen von W. Rädiker¹⁾ geht hervor, daß flüssiges Zink in Stahl eine zerstörende Wirkung ausüben kann, wenn der Werkstoff unter verhältnismäßig hohen Zugspannungen steht und ein Entspannen durch Kriechen verhindert wird. Dabei bilden sich interkristalline Risse, die ein Verspröden des Werkstoffes vortäuschen. Auch H. Wiegand und F. Nieth²⁾ stellten an zugbeanspruchten Stahlproben in flüssigem Zink vor allem einen Abfall der Bruchdehnung, an gekerbten Proben aber auch abnehmende Bruchfestigkeit fest. Der Umfang einer Schädigung des Werkstoffes hängt im wesentlichen von der Badtemperatur des Zinks und der Tauchzeit, aber auch von der Warmfestigkeit des Stahls und vom Spannungsverlauf innerhalb des beanspruchten Querschnitts ab.

Während des Tauchverzinkens sind die Stahlteile im allgemeinen keinen höheren äußeren Belastungen ausgesetzt. Die erwähnten Untersuchungen weisen somit zwar auf die Gefahr hin, die flüssiges Zink für unter Spannungen stehende Werkstücke darstellt, doch geben sie noch keinen Aufschluß über Werkstoffveränderungen durch Verzinken unter betriebsnahen Bedingungen. H. Wiegand und F. Nieth³⁾ verglichen die Ergebnisse von Kerbschlagbiegeversuchen an unverzinkten, verzinkten und an Luft angelassenen Proben miteinander. Danach war die Ursache einer Werkstoffversprödung nach dem Verzinken nicht der unmittelbare Einfluß des Zinks, sondern die durch das Erwärmen im Zinkbad beschleunigte Alterung des Werkstoffes.

Eine zerstörende Wirkung des Zinks während des Tauchens im Bad wäre ohne äußere Bauteilbelastung denkbar, wenn der Werkstoff unter hohen Eigenspannungen steht. Sie können sich in den Stahlteilen nach Kaltverformung, Wärmebehandlung mit ungleichmäßiger Abkühlung oder Schweißen einstellen. Zunächst erscheint nicht ausgeschlossen, daß flüssiges Zink in Gebieten von Zugeigenspannungen an der Werkstückoberfläche längs der Korngrenzen eindringt und zur Gefügetrennung führt. Andererseits ist durch die Badtemperatur mit einem thermischen Spannungsausgleich im Stahlteil zu rechnen, soweit die Einformung nicht behindert wird. Die Ausbildung eines verstärkten ungünstigen Eigenspannungszustandes ist möglich, in den meisten Fällen aber unwahrscheinlich. Zwar werden im Zinkbad die zum Spannungsfreiglühen von Stahl erforderlichen Temperaturen um 600 °C nicht erreicht, jedoch fällt nach den Beobachtungen von R. Mailänder⁴⁾ schon bei Temperaturen um 450 °C in

einem belasteten Stahlstab bei gleichbleibender Verlängerung die Spannung merklich ab. K. Wellinger⁵⁾ ermittelte die Temperatur, bei der ein stärkerer Spannungsabbau erfolgt, für Stahl C 15 zu 350 °C und für C 45 zu 450 °C. Die Spannung nach dem Anlassen ist hierbei von der Anfangsspannung sowie von der Glühdauer abhängig. Ob eine Werkstoffschädigung beim Verzinken mit Eigenspannungen behafteter Bauteile durch das flüssige Zink eintritt oder ob sie durch thermische Entspannung rechtzeitig verhindert wird, dürfte somit durch den zeitlichen Ablauf der beiden Vorgänge entschieden werden. Die nachfolgend beschriebenen Versuche sollen zur Klärung dieser Frage beitragen.

Versuche an kalt verformten Proben

Nach dem Kaltverformen von Bauteilen bleiben Eigenspannungen im Werkstoff zurück. Ein ungünstiger Einfluß des Verzinkens ist lediglich zu erwarten, wenn Zugeigenspannungen nahe der Streckgrenze an der Oberfläche auftreten. Bei den meisten Verformungsverfahren, wie Biegen, Walzen oder Recken, treten jedoch in der Außenzone hohe Druckeigenspannungen oder geringe Zugeigenspannungen auf. Lediglich nach dem Kaltziehen von Stangen wird man genügend hohe Zugeigenspannungen finden. Deshalb ist die Gefahr einer nachteiligen Wirkung des Verzinkens auf kalt verformte Bauteile gering. Damit bestand auch wenig Aussicht, eine geeignete Probe für entsprechende Versuche zu finden. In Vorversuchen an Flachstäben mit einer Querbohrung in der Stabmitte, die nach dem Recken Zugeigenspannungen am Rand hinterlassen, konnte die gewünschte Spannungshöhe nicht erzielt werden. So wurde vom Erzeugen eines reinen Eigenspannungszustandes abgesehen und eine Ringprobe durch einen eingepreßten Stahldorn unter Spannung gesetzt. Der mit Übermaß versehene Dorn weitete den Ring auf und verursachte tangentielle Zugspannungen, die an der Berührungsstelle beider Teile am größten waren und nach außen hin abnahmen. Durch Berechnungen ließ sich das erforderliche Übermaß ermitteln, das zu einer Dorn- und Ringgestaltung nach *Bild 1* führte. Bei gleichen Dornabmessungen wurden zwei verschiedene Ringbreiten verwendet, um den Einfluß eines unterschiedlichen Spannungsverlaufes kennenzulernen. Unter Berücksichtigung der Fertigungstoleranzen für Dorn und Ring ist der Spannungsverlauf über der Ringbreite berechnet und in *Bild 2* aufgezeichnet worden. Oberhalb der Streckgrenze gelten die elastizitätstheoretisch berechneten Werte nicht mehr. Man sieht aber, daß die Streckgrenze auch im ungünstigsten Fall der Paarung von Ring und Dorn an deren Berührungsstelle überschritten wird.

Mit den festgelegten Toleranzen wurden 18 Dorne und 9 Ringe jeder Breite hergestellt, entsprechend den Ist-Maßen geeignete Paare ausgesucht und die Dorne eingepreßt. Die

*) Gemeinschaftsausschuß des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, der Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung e. V. und der Fachvereinigung Draht e. V.

¹⁾ Stahl u. Eisen 73 (1953) S. 654/58.

²⁾ Metalloberfläche 13 (1959) S. 346/50.

³⁾ Metalloberfläche 13 (1959) S. 254/59.

⁴⁾ Stahl u. Eisen 51 (1931) S. 662/70 (Werkstoffausseh. 172).

⁵⁾ Schweißen u. Schneiden 5 (1953) Sonderrn., S. 157/62.

tatsächliche Einpreßkraft stimmte dabei gut mit der vorausgerechneten überein. Die Dorne bestanden aus St 60, die Ringe waren aus T St 33 gefertigt. Je drei Proben mit schmalen und breitem Ring wurden 1 min und je drei Proben

An Proben mit breiten Ringen wurden weder vor noch nach dem Verzinken Spannungsrisse beobachtet. Die größere Ringbreite dürfte sich hierbei merklich auf eine Verminderung des Spannungsgradienten und der Mehrachsigkeit des

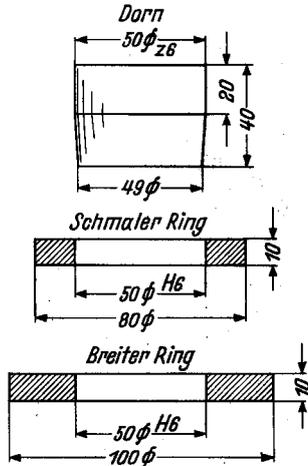


Bild 1. Probenformen und -abmessungen für die Versuche an kaltverformten Proben

5 min lang bei einer Badtemperatur von 435 °C verzinkt. Je drei Proben blieben unverzinkt. Der Spannungszustand in den verschiedenen Proben wurde anschließend lediglich qualitativ durch Kochen in einer 60prozentigen Kalzium-

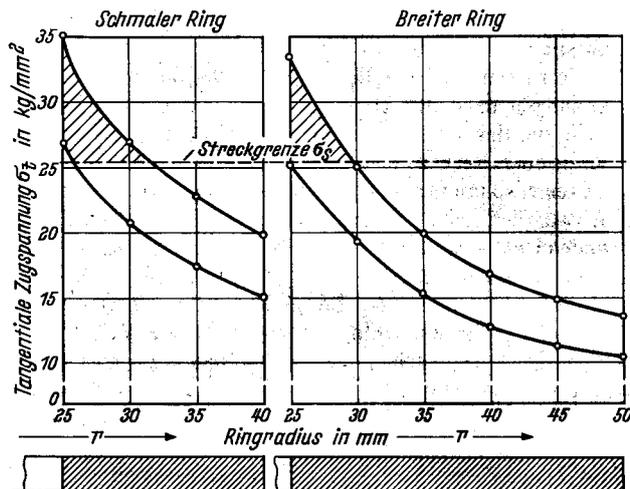


Bild 2: Spannungsverteilung (theoretisch) in den Ringen bei kleinstem und größtem Haftmaß

ammoniumnitrat-Lösung nachgewiesen, die sich gut zum Auslösen von Spannungsrissen eignet⁶⁾. Gekocht wurde so lange, bis an den Proben Risse als Folge hoher Zugspannungen auftraten. Die verzinkten Proben waren vor dem Kochen in Salzsäure mit Sparbeizezusatz entzinkt worden. Ein Einfluß auf den Spannungszustand durch diese Behandlung ist nicht zu erwarten.

Versuchsergebnisse

Alle Proben wurden nach dem Kochversuch magnetisch durchflutet und auf Risse untersucht. Eine klare Ribbildung entsprechend Bild 3 ließ sich auf dem gesamten Ringumfang in radialer Richtung nur an zwei Proben mit schmalen Ring erkennen, die unverzinkt geblieben waren. Bei der dritten Probe dieser Art waren die Spannungen offensichtlich nicht groß genug. Die verzinkten Proben mit schmalen Ring sind in keinem Fall gerissen. Es ist anzunehmen, daß die Spannungen bereits während kurzer Verzinkungsdauer abgebaut wurden.

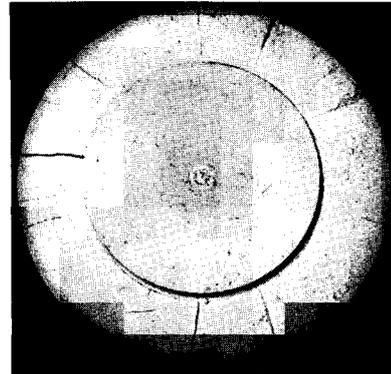


Bild 3. Ribbild einer verzinkten Probe mit schmalen Ring nach dem Kochversuch, magnetisch durchflutet (Aufnahme im UV-Licht)

Spannungszustandes auswirken, die außer der Spannungshöhe für eine Ribbildung maßgebend sind. Eine Neigung zur Spannungsrißanfälligkeit kalt verformter Stahlproben durch das Einwirken flüssigen Zinks war aus diesen Versuchen nicht abzuleiten.

Versuche an geschweißten Proben

Hohe Zugeigenspannungen in der Bauteiloberfläche werden durch Schweißen hervorgerufen. Weitere Versuche wurden daher mit stumpfgeschweißten Blechproben durchgeführt, deren Eigenspannungen in der Nähe der Schweißnaht vor und nach verschiedenen Behandlungen bestimmt wurden. Probenform und -abmessungen sind Bild 4 zu entnehmen. Zum Bestimmen der Längseigenspannungen wurden die Proben nach den in Bild 4 angegebenen Schnitten I bis VI

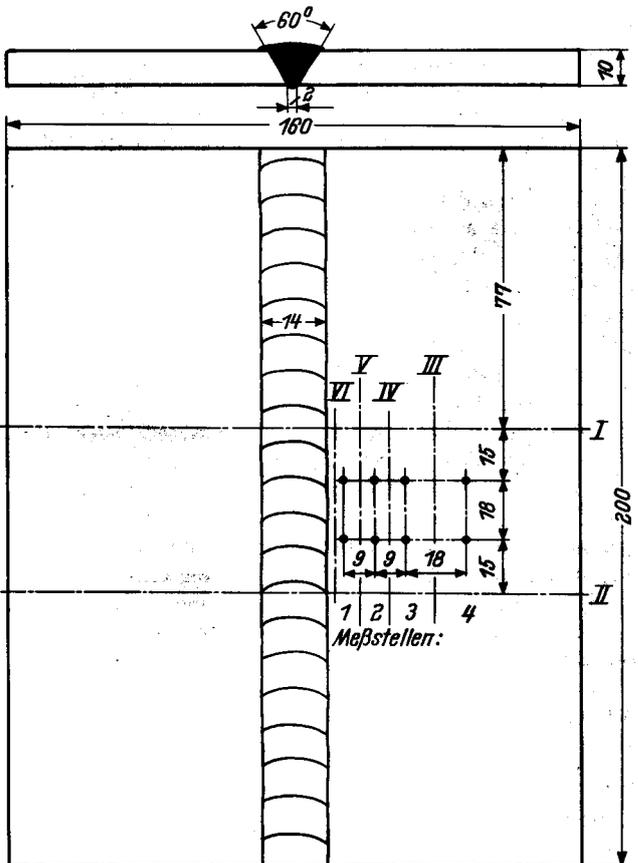


Bild 4. Form und Abmessungen der Schweißproben sowie Anordnung der Meßpunkte

⁶⁾ Rädcker, W.: Schweißen u. Schneiden 10 (1958) S. 351/58.

zerteilt und die Änderungen der Meßstrecken an den Meßstellen 1 bis 4 mit einem Setzdehnungsmesser ermittelt. Die Meßlänge betrug 18 mm, so daß bei einem geschätzten Meßfehler von $\pm 3 \mu$ eine Unsicherheit in der Spannungsangabe von $\pm 3,5 \text{ kg/mm}^2$ zu erwarten war. Die Spannungen wurden unter der Annahme rein elastischer Verformung im Sinne des Hookschen Gesetzes bestimmt.

Für die Probenherstellung standen je eine Tafel Grobblech St 33 in Thomas- und Siemens-Martin-Güte zur Verfügung. Die im Zugversuch ermittelten mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe sind in *Tafel 1* angegeben. Von

Tafel 1. Mechanische Eigenschaften der Versuchswerkstoffe

Werkstoff	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Streckgrenze σ_s kg/mm ²	Bruchdehnung δ_5 %	Brucheinschnürung ψ %
Stahl T St 33	38,8	25,3	34,7	64,9
Stahl M St 33	49,6	31,7	30,4	35,0

jeder Blechsorte wurden 15 Schweißproben hergestellt und auf die verschiedenen Versuchsreihen aufgeteilt. Die Versuchsplanung sah Messen der Eigenspannungen vor

1. nach dem Schweißen, vier Proben,
2. nach dem Verzinken, Tauchzeit 1 min, drei Proben,
3. nach dem Verzinken, Tauchzeit 5 min, drei Proben,
4. nach Spannungsfreiglühen, 1 h bei 610 °C, drei Proben.

Die restlichen zwei Proben wurden unverzinkt sowie verzinkt dem Kochversuch unterworfen. Der aus der ersten Versuchsreihe ermittelte Eigenspannungszustand der Proben mußte als ähnlich dem aller anderen Proben vor ihrer weiteren Behandlung angesehen werden. Da alle Proben unter gleichen Bedingungen geschweißt wurden, waren außer der üblichen Streuung erhebliche Abweichungen nicht zu erwarten. Durch die Mittelwertbildung der Ergebnisse von mehreren Proben einer Versuchsreihe konnte die Tendenz und Streubreite der Verzinkungs- und Glühwirkung ausreichend genau erfaßt werden.

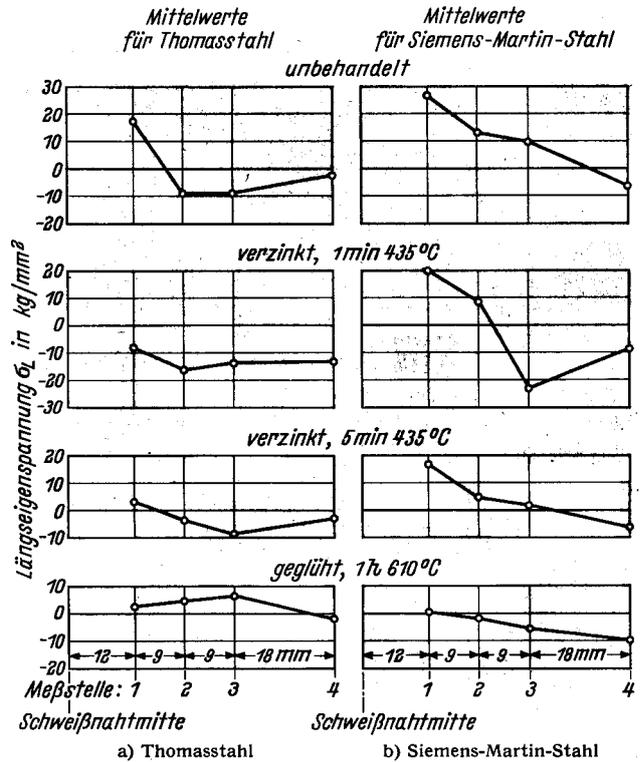
Die geschweißten Proben wurden nach dem Entzundern in das Zinkbad von 435 °C eingetaucht. Die Meßkugeln waren vor dem Verzinken eingeschlagen worden, um eine Veränderung des Eigenspannungszustandes nach dem Verzinken durch mechanische Beanspruchung zu vermeiden. Sie mußten vor dem Messen durch örtliches Einwirken von Salzsäure mit Sparbeizezusatz von der Zinkschicht befreit werden.

Versuchsergebnisse

Die Mittelwerte der gemessenen Eigenspannungen unverzinkter, verzinkter und geglühter Schweißproben sind in den *Bildern 5 a und b* für die beiden Stahlsorten aufgetragen. Den Ergebnissen nach läßt sich folgendes aussagen:

1. Unverzinkte Proben. Die Zugeigenspannungen in Nahrichtung sind erwartungsgemäß in der Nähe der Schweißnaht am größten. Sie nehmen nach dem Blechrand hin ab und gehen in einiger Entfernung in Druckspannungen über. An der Meßstelle 1 wurden im Mittel Spannungen bei Thomasstahl von 20 kg/mm², bei Siemens-Martin-Stahl von 27 kg/mm² gemessen. Diese Werte liegen um etwa 5 kg/mm² unterhalb der Streckgrenzen der beiden Werkstoffe. Die ansteigende Tendenz nach der Schweißnaht hin wird aus dem Spannungsverlauf in Richtung der Probenbreite deutlich. Für den unterschiedlichen Spannungsgradienten dürfte das Verformungsvermögen der beiden Stahlsorten verantwortlich sein. Im Siemens-Martin-Stahl mit dem geringen Brucheinschnürungswert besteht der Zugeigenspannungszustand über einen größeren Bereich.

2. Proben verzinkt, 1 min Tauchzeit. Bereits nach dieser kurzen Verzinkungszeit ist allgemein eine Verminderung der Zugeigenspannungen festzustellen. An den Proben aus Thomasstahl wurden sogar ausschließlich Druckeigen-



Bilder 5 a und b. Mittelwerte der Längseigenspannungen nach verschiedenen Behandlungszuständen

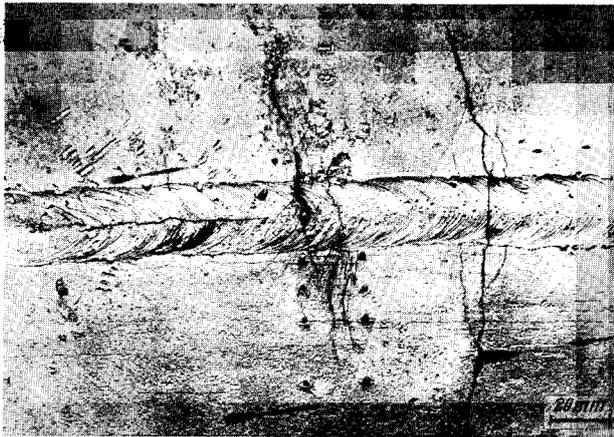
spannungen gemessen, doch darf dies nicht als Regel aufgefaßt werden. Der Siemens-Martin-Stahl läßt ebenfalls eine völlige Veränderung des Spannungsverlaufes erkennen.

3. Proben verzinkt, 5 min Tauchzeit. Durch längeres Verweilen der Proben im Zinkbad wurden die besonders hohen Spannungen nach beiden Richtungen vermindert; ein Einebnen des gesamten Spannungszustandes ist zu erkennen. Gegenüber den unbehandelten Proben sind die Eigenspannungen in der Nähe der Schweißnaht bei Thomasstahl um 65% und bei Siemens-Martin-Stahl um 52% gesunken. Der etwas trägere Spannungsabbau im Siemens-Martin-Stahl dürfte auf eine höhere Warmfestigkeit dieses Werkstoffes zurückzuführen sein.

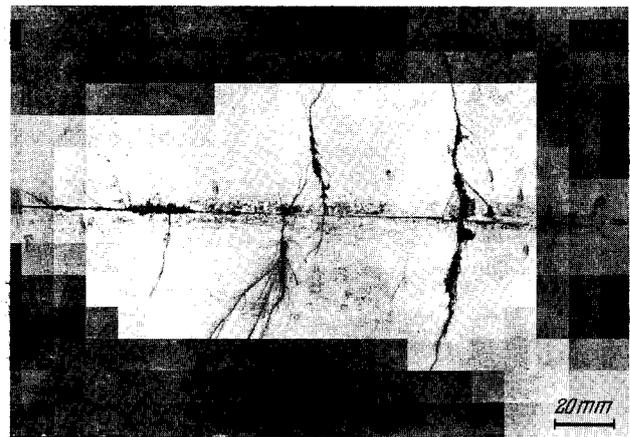
4. Proben 1 h bei 610 °C geglüht. Das Spannungsfreiglühen hat zu einem nahezu vollständigen Abbau der Eigenspannungen geführt. Dieser Zustand wird zwar durch die Behandlung im Zinkbad nicht erreicht, doch kann man sehen, daß eine wesentliche Verminderung der Spannungen bereits bei niedrigeren Temperaturen und erheblich kürzeren Behandlungszeiten eintritt. Die prozentuale Änderung des Spannungszustandes durch das Spannungsfreiglühen ist gegenüber der Anlaßwirkung des Zinkbades nicht mehr groß.

Somit wurde aus der quantitativen Bestimmung des Eigenspannungszustandes von Blechproben nach dem Verzinken deutlich, daß eine derartige Behandlung einen Spannungsabbau bewirkt, der mit längerer Tauchzeit zunimmt. Die Eigenspannungen gehen auf weniger als 50% ihres ursprünglichen Wertes zurück, so daß nach dem Verzinken mit großer Sicherheit keine Spannungen vorhanden sind, die Anlaß zur Rißbildung im Werkstoff geben können.

Als qualitativer Nachweis für den Spannungsabbau schien der Kochversuch geeignet. Von den zwei restlichen Proben wurde eine nach dem Schweißen unverzinkt, die

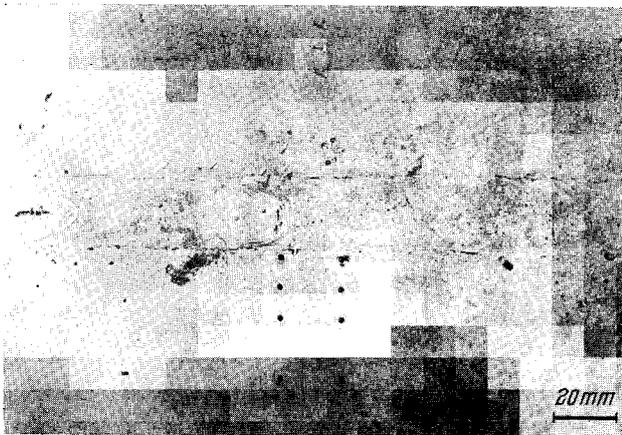


a) Vorderseite

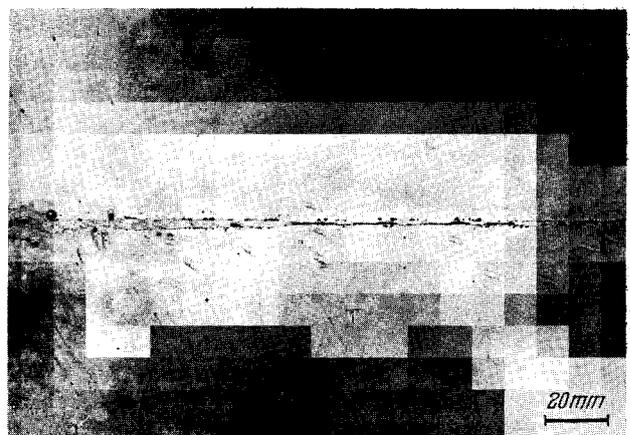


b) Rückseite

Bilder 6a und b. Verschweißte Thomasstahlproben, unverzinkt, nach dem Kochversuch (1 : rd. 1,6, Original 1 : 2)



a) Vorderseite



b) Rückseite

Bilder 7a und b. Verschweißte Thomasstahlproben, 5 min verzinkt und entzinkt nach dem Kochversuch (1 : 1,6, Original 1 : 2)

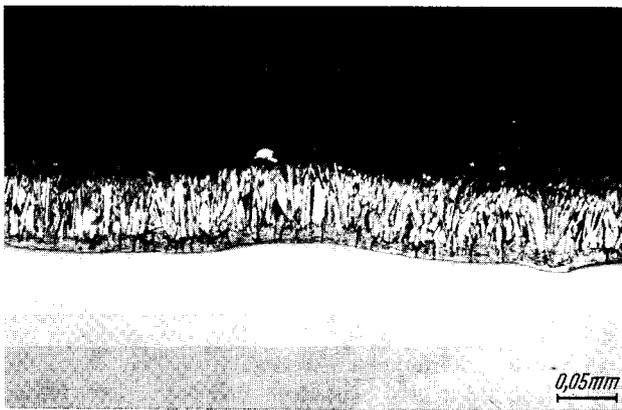


Bild 8. Siemens-Martin-Stahl-Probe, 1 min verzinkt, geätzt mit alkoholischer Salpetersäure (rd. 160 : 1, Original 200 : 1)

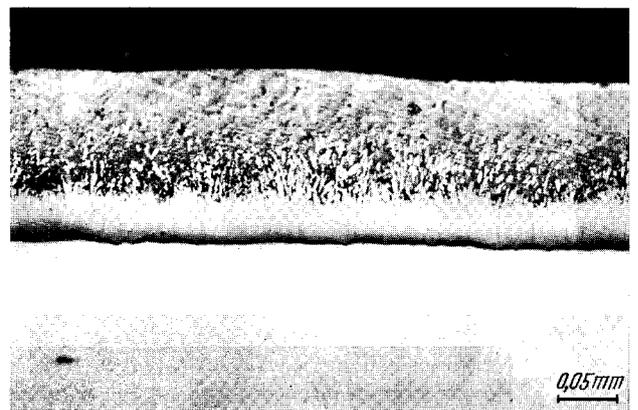


Bild 9. Thomasstahl-Probe, 5 min verzinkt, ungeätzt (rd. 160 : 1, Original 200 : 1)

andere nach 5 min Tauchzeit im Zinkbad und anschließendem Entzinken 200 h in einer Kalziumammoniumnitrat-Lösung gekocht. Vorder- und Rückseite der unverzinkten Probe aus Thomasstahl sind in *Bild 6* wiedergegeben. Die durchgehenden Risse quer zur Schweißnaht veranschaulichen die Wirkung erheblicher Zugspannungen in Längsrichtung. Im Auslauf der Schweißnaht ist außerdem das Auftreten von Querspannungen zu erkennen. Die verzinkte Probe des gleichen Stahls nach dem Kochen ist in *Bild 7* zu sehen. Da keinerlei Rißbildung auftritt, kann auf weitgehenden Abbau der Eigenspannungen durch Verzinken geschlossen werden.

An den Proben aus Siemens-Martin-Stahl waren auch im unverzinkten Zustand trotz des durch die Messungen nach-

gewiesenen hohen Eigenspannungszustandes keine Risse im Kochversuch zu erzeugen. Der Werkstoff enthielt 0,038 % Al; es handelte sich demnach um einen Stahl, der als weitgehend laugenrißbeständig angesprochen werden kann. Bei einem solchen Werkstoff können Risse durch den Kochversuch nur erzeugt werden, wenn er vor dem Schweißen durch Erhitzen auf Temperaturen über 1050 °C rißanfällig gemacht wird⁷⁾.

Schließlich sollte festgestellt werden, ob während des Tauchens flüssiges Zink in die mit Eigenspannungen behaftete Probenoberfläche eingedrungen war und zu einer makroskopisch nicht sichtbaren Rißbildung geführt hat. Das

⁷⁾ Rädcker, W.: Persönliche Mitteilung.

Schliffbild einer Siemens-Martin-Stahlprobe nach dem Verzinken mit 1 min Tauchzeit läßt eine klare Abgrenzung zwischen Stahl und Zink erkennen. Die untere Schicht einer Eisen-Zink-Legierung ist zwar nach *Bild 8* mit zahlreichen Rissen senkrecht zur Blechoberfläche durchsetzt, doch dringt das Zink an keiner Stelle in das Stahlgefüge ein. Auch nach 5 min Verzinkungsdauer war keine Wirkung des Zinks auf den Grundwerkstoff aus Thomasstahl zu beobachten, wie *Bild 9* zeigt.

Nach diesen Ergebnissen ist anzunehmen, daß der Spannungsabbau durch die thermische Wirkung des Zinkbades schneller erfolgt, als Zink in das unter örtlich hohen Zugeigenspannungen stehende Stahlgefüge eindringt. Eine Schädigung des Werkstoffes beim Verzinken durch interkristalline Risse oder Aufbau eines ungünstigen Spannungszustandes ist daher nicht zu erwarten.

* * *

Die Untersuchung wurde im Auftrage des Gemeinschaftsausschusses Verzinken durchgeführt. Für die wertvolle Unterstützung sei auch an dieser Stelle gedankt. Weiterhin danken die Verfasser Herrn Dr.-Ing. habil. W. Rädiker, Mülheim, für Versuchsbeiträge und Beratungen.

Zusammenfassung

Durch Versuche wurde der Einfluß des Verzinkens auf den Eigenspannungszustand in Stahlproben ermittelt. Eine mögliche Werkstoffschädigung durch flüssiges Zink setzt hohe Zugeigenspannungen an der Oberfläche voraus. Da diese in kalt verformten Bauteilen kaum auftreten, ist dort eine Rißbildung durch das Verzinken bereits unwahrschein-

lich. Ringproben mit eingepreßten Dornen ließen qualitativ erkennen, daß der Spannungszustand nach dem Verzinken gemildert war. Während unverzinkte Probenkörper mit den höchsten Spannungen nach einem Kochversuch zur Bestimmung der Spannungsrißempfindlichkeit Rißbildung aufwiesen, blieben verzinkte Proben nach 1 und 5 min Tauchzeit rißfrei.

Eigenspannungsmessungen an geschweißten Stahlproben mit hohen Zugspannungen in Nahrichtung führten zu dem Ergebnis, daß 1 min Tauchzeit bei 435 °C bereits die Spitzen der Zugspannungen abbaut. Die Einwirkung des Zinkbades über 5 min setzt die ursprünglichen Höchstwerte der Eigenspannungen um 50 bis 60% herab. Die Spannungsverminderung geht bei Thomasstahl und Siemens-Martin-Stahl in gleicher Weise vor sich. Für die Verteilung der Spannungen ist das Formänderungsvermögen der Werkstoffe sowie ihr Festigkeitsabfall bei erhöhten Temperaturen verantwortlich. Kochversuche führten bei unverzinkten Proben aus Thomasstahl zu starker Rißbildung, während verzinkte und anschließend entzinkte Proben rißfrei blieben. Im Mikroschliffbild war an geschweißten und verzinkten Proben weder ein Eindringen von Zink in den Grundwerkstoff noch Rißbildung zu erkennen.

Die Versuche ergaben, daß Stahlteile, die unter hohen, durch Schweißen oder Kaltverformung hervorgerufenen Zugspannungen stehen, nach dem Verzinken mit im Betrieb üblichen Tauchzeiten nicht zur Rißbildung neigen. Die thermische Wirkung des Zinkbades setzt vielmehr die Zugeigenspannungen herab. Sie dürfte damit größere Sicherheit gegenüber Rissen und Trennbrüchen bewirken, sofern sie nicht Werkstoffveränderungen durch Alterung auslöst.