



Tauchzeit von 18 bis 20 s bei 430 °C. Im Werk A enthielt das Zinkbad 0,05% Al, so daß hier dickere Eisen-Zink-Legierungsschichten auf der Blechoberfläche ausgebildet wurden. Der höhere Aluminiumgehalt von 0,13% des Zinkbades des Werkes C hemmte dagegen die Reaktion zwischen dem Stahl und der Zinkschmelze so stark, daß hier nur eine sehr dünne Legierungsschicht auf der Blechoberfläche entstand. Die Zinkauflagen der im Werk A verzinkten Bleche 1 und 2 betragen wegen der dickeren Legierungsschicht 447 und 428 g/m<sup>2</sup> doppelseitig. Das im Werk C verzinkte Blech 1 mit der sehr dünnen Legierungsschicht hat eine Zinkauflage von 375 g/m<sup>2</sup> doppelseitig.

### Schwingungsprüfung

Zur Ermittlung des Dauerschwingverhaltens der unverzinkten und verzinkten Bleche wurde als Versuchsart die Biegewechselbeanspruchung in Form des Hin- und Herbiegeversuches gewählt. Als Prüfmaschine wurde eine Biegewechsel-Prüfmaschine („Webi 3 kgm“, Bauart Schenck) verwendet, deren größtes Biegemoment  $\pm 150$  kgcm beträgt. Die mechanisch angetriebene Biegeschwingungsmaschine hat einen im Ruhestand einstellbaren, während des Dauerversuchs gleichbleibenden Verformungsausschlag<sup>2)</sup>. Sie besteht im wesentlichen aus dem Antriebsmotor mit Doppel-exzenter, der Pleuelstange mit der Antriebsschwinge und der Probe mit der Meßschwinge sowie einer Meßfeder mit den Meßuhren zum Bestimmen des Biegemomentes.

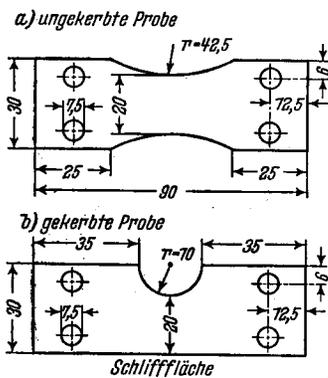


Bild 2  
Form und Maße der Proben

Probenmittels mit einem Halbmesser von 42,5 mm auf die endgültige Form gebracht (Bild 2a). Nach dem Anbringen der Bohrungen in den Einspannquerschnitten wurden die Probekanten in der Prüfstrecke leicht abgerundet, um eine Kerbwirkung von den scharfen Kanten her zu vermeiden. Die Oberflächen der Proben wurden nicht geschliffen und poliert, sondern mit der im Anlieferungszustand vorhandenen Oberfläche dem Dauerversuch unterworfen. Die Probenform mit einseitig eingearbeitetem Kerb und einer geschliffenen und polierten Gegenseite wurde zur metallographischen Untersuchung der Verformungsspuren und Anrißbildung im Zinküberzug und im Grundwerkstoff benutzt (Bild 2b). Die nach den Formeln von H. Neuber<sup>3)</sup> berechnete Formzahl  $\alpha_K$  dieser gekerbten Proben ergibt sich zu 2,0.

Die Zeitfestigkeit der nichtverzinkten und verzinkten Blechproben wurde in Anlehnung an das Wöhler-Verfahren<sup>4)</sup> bestimmt, und zwar wurden je vier Proben auf drei bis fünf Spannungsstufen mit jeweils gleichbleibendem Spannungsausschlag bis zum Bruch geprüft, um die Streuungen in den Bruchlastspielzahlen abschätzen zu können. Die Dauerschwingversuche wurden in Luft ohne zusätzliche Kühlung der Probenoberfläche mit der Mittelspannung Null und einer

Lastspielfrequenz von 1500/min ausgeführt; als Grenzlasterlastspielzahl wurde für die Ermittlung der Biegewechselfestigkeit die 20-Mill.-Grenze angewandt.

Zur genauen Ermittlung der Wechselfestigkeit selbst und ihres Streubereiches wurde das „Treppenstufen-Verfahren“ (staircase-method) mit elf Proben benutzt<sup>5)</sup>. Hierbei wird die erste Probe nahe oberhalb der geschätzten Wechselfestigkeit geprüft; die Beanspruchung der weiteren Proben erfolgt nach Erhöhen oder Verringern der Belastung in vorgegebener gleichbleibender Abstufung von 1,0 kg/mm<sup>2</sup>, je nachdem, ob die vorhergehende Probe nicht gebrochen oder gebrochen ist. Aus diesen Versuchsergebnissen werden dann der mittlere statistische Wechselfestigkeitswert für eine Bruchhäufigkeit von 50% und seine Streugrenzen berechnet.

### Metallographische Prüfung

Um Unterlagen über die Anzahl und Verteilung von Dauerbrüchanrissen in der Zinkschicht und im Grundwerkstoff zu gewinnen, wurden die im Schwingungsversuch gebrochenen und nicht gebrochenen Proben des verzinkten Bleches 1 (Probenform in Bild 2a) in Längsrichtung in fünf Abschnitte unterteilt; von diesen Abschnitten wurden Schliffe hergestellt und zum Sichtbarmachen des Gefüges und der Anrisse in einer Lösung von vier bis fünf Tropfen konzentrierter Salpetersäure in 50 ml Amylalkohol geätzt<sup>6)</sup>. In den Schliffen wurde die Anzahl der Anrisse ausgezählt, und zwar unterteilt nach Rissen, die nur in der Reinzinkschicht vorhanden waren, nach Rissen, die durch die Reinzinkschicht in die Eisen-Zink-Legierungsschicht bis zum Stahlblech reichten, und nach Rissen, die schon durch den Zinküberzug in das Stahlblech hineingelaufen waren. Zum Nachprüfen der Frage, ob die Zinkschicht die Rißverteilung im Grundwerkstoff in irgendeiner Weise beeinflußt, wurde die gleiche Untersuchung auf die nicht verzinkten Proben des Bleches 1 ausgedehnt.

Um die unter Wechselbelastung auf der Oberfläche der verzinkten Proben auftretenden Verformungsspuren und deren weitere Entwicklung bis zur Rißeinleitung und -ausbreitung besser sichtbar zu machen, wurde eine Oberfläche einiger Proben vor dem Dauerversuch vorsichtig anpoliert, so daß der Zinküberzug nicht merklich abgetragen wurde und der Hauptteil der Reinzinkschicht noch auf der Probe vorhanden war. In diesen Fällen wurde der Schwingungsversuch nach verschiedenen Laufzeiten unterbrochen und die Probe metallographisch auf Gleitlinien und Anrisse untersucht.

Ein Fortschreiten der Anrisse in das Innere der Probe wurde mit den einseitig gekerbten und auf der anderen Seite geschliffenen, polierten und angeätzten Proben (Probenform in Bild 2b) durch mikroskopische Betrachtung der Veränderung des Aussehens des Schliffes mit fortschreitender Laufzeit verfolgt; hier wurden Proben verwendet, deren Spannungsamplituden oberhalb und unterhalb der Wechselfestigkeit der Kerbprobe lagen.

### V Versuchsergebnisse

#### Verzinkung und Biegewechselfestigkeit

Die Dauerschwingversuche wurden an ungekerbten Proben (Bild 2a) der Bleche 1 und 2 ausgeführt. Bei den nicht verzinkten Blechen wurde die Biegespannung als Quotient aus dem mit Meßuhren bestimmten Biegemoment und dem durch die Probenabmessung bestimmten äquatorialen Widerstandsmoment berechnet. Bei den verzinkten Proben wurde die Biegespannung unter Zugrundelegung des Widerstandsmomentes  $W = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2$  der Gesamt-Probendicke (Grundwerkstoff + Zinkauflage) und

<sup>1)</sup> Erlinger, E.: Arch. Eisenhüttenwes. 11 (1937/38) S. 455/56 (Werkstoffaustsch. 406).

<sup>2)</sup> Kerbspannungslehre. 2. Aufl. Berlin 1958.

<sup>3)</sup> DIN 50100 — Werkstoffprüfung, Dauerschwingversuch. Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung — Januar 1953.

<sup>4)</sup> Bühler, H., u. W. Schreiber: Arch. Eisenhüttenwes. 28 (1957) S. 153/56.

<sup>5)</sup> Rowland, D. H.: Trans. Amer. Soc. Metals 40 (1948) S. 983/1011.

der Dicke des Grundwerkstoffes allein berechnet; hier bedeutet  $b$  die Breite und  $h$  die Dicke der Probe. Bei dieser Art der Spannungsberechnung wird eine lineare Verteilung der Spannung über den Probenquerschnitt vorausgesetzt. Während diese Annahme für die unverzinkten Stahlbleche, die mit Spannungsamplituden bis zur Streckgrenze belastet wurden, gerechtfertigt ist, trifft dies für den Fall der verzinkten Bleche nicht mehr zu; denn in der Zinkauflage,

deren Dicke etwa 3,0 und 1,5% der Dicke des Stahlbleches beträgt, wird wegen der wesentlich niedrigeren Streckgrenze und Zugfestigkeit des Werkstoffes Zink bereits der vollplastische Zustand erreicht.

Die Ergebnisse der Dauerschwingversuche an je 30 Proben des Bleches 1 mit dicker und dünner Zinkauflage (30 oder 15  $\mu\text{m}$ ) sowie des Bleches 2 (25  $\mu\text{m}$ ) sind in den Bildern 3 bis 5 in Form von Wöhler-Linien für die Wertpaare Spannungs-

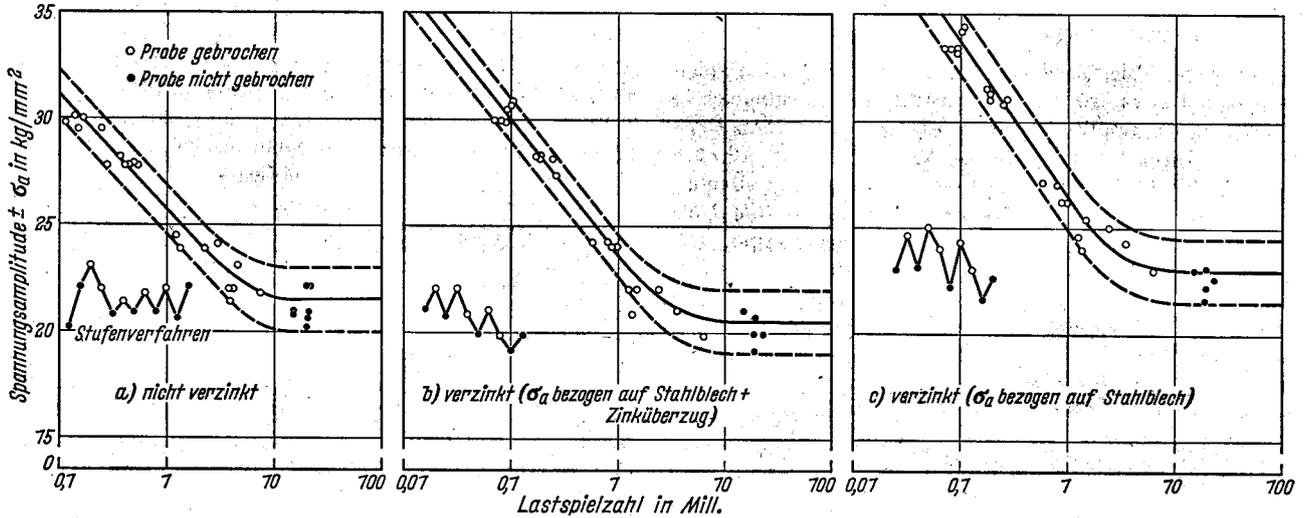


Bild 3. Wöhlerlinien des nicht verzinkten und des mit dickerer Legierungsschicht verzinkten Bleches 1

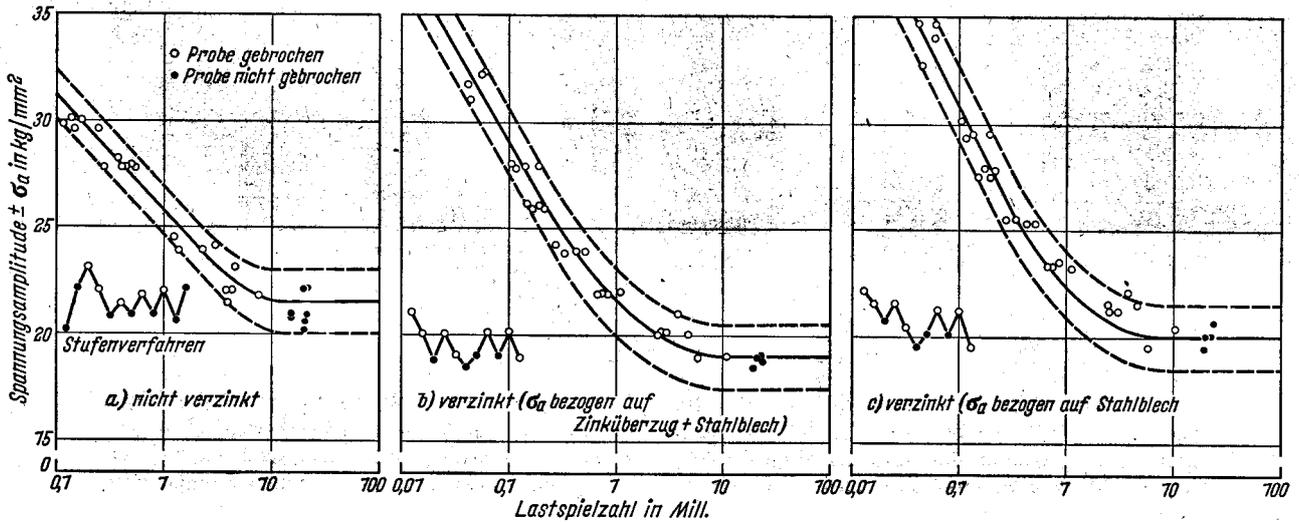


Bild 4. Wöhlerlinien des nicht verzinkten und des mit dünnerer Legierungsschicht verzinkten Bleches 1

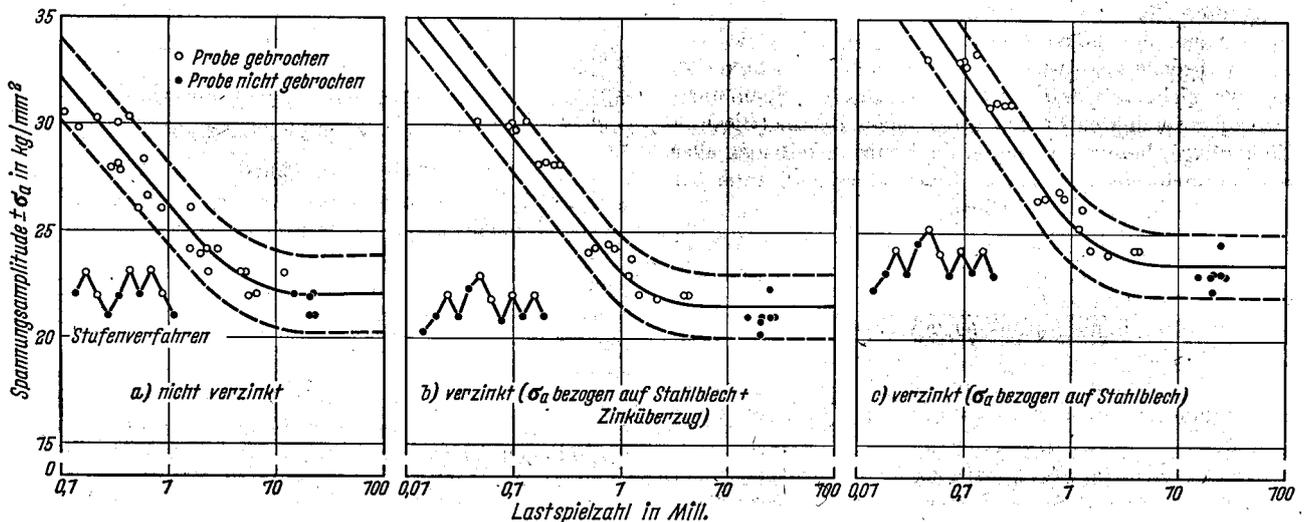


Bild 5. Wöhlerlinien des nicht verzinkten und des mit dickerer Legierungsschicht verzinkten Bleches 2

amplitude und Lastspielzahl – bei Kennzeichnung der Mittelwerte (ausgezogene Linien) und der Streugrenzen (gestrichelte Linien) – aufgetragen.

In diesen Bildern sind jeweils im linken Teilbild die Wöhler-Linien der nicht verzinkten Stahlbleche wiedergegeben. Die mittleren und rechten Teilbilder enthalten die Wöhler-Linien der verzinkten Bleche. Die Spannungsamplituden sind mit den auf die Gesamtdicke (mittleres Teilbild) und die Stahlblechdicke (rechtes Teilbild) der Proben bezogenen Widerstandsmomenten berechnet worden.

Im Bereich der Zeitfestigkeit, d. h. für Bruch-Lastspielzahlen von etwa  $10^5$  bis  $5 \cdot 10^6$ , beträgt der Streubereich in den Spannungsamplituden für die nicht verzinkten Proben von Blech 1 etwa 2,5 bis 3,0 kg/mm<sup>2</sup> und von Blech 2 etwa 3,5 bis 4,0 kg/mm<sup>2</sup>. Die Ursache hierfür sind offenbar die Unterschiede in der Gefügebildung die in Bild 1 als fein- und grobkörniger Zementit zu erkennen sind. Die Streubreite der Zeitfestigkeiten beträgt bei den verzinkten Proben des Bleches 1 mit dicker und dünner Zinkauflage etwa 3,0 bis 3,5 kg/mm<sup>2</sup> und bei den Proben des Bleches 2 mit dicker Zinkauflage etwa 3,0 bis 4,0 kg/mm<sup>2</sup>, wobei die

wertes für eine Bruchhäufigkeit von 50% erfolgte in Anlehnung an die bei der Auswertung von Dauerschwingversuchen bereits mehrfach benutzten Beziehungen<sup>5) 8)</sup>:

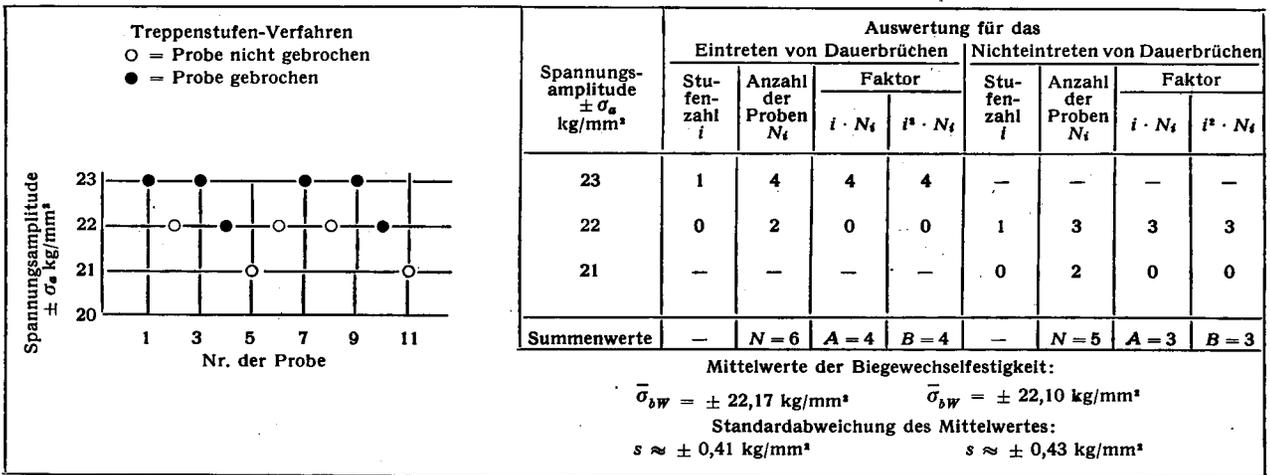
$$\bar{\sigma}_{bW} = \sigma_{a(0)} + d \cdot \left( \frac{A}{N} \pm 1/2 \right) \text{ mit } N = N_i \text{ und } A = \sum i \cdot N_i$$

Es bedeuten darin  $\bar{\sigma}_{bW}$  den Mittelwert der Biegewechselfestigkeit,  $\sigma_{a(0)}$  die niedrigste Spannungsamplitude, bei der ein Dauerbruch eingetreten oder nicht eingetreten ist,  $d$  den Stufenabstand der Spannungsamplitude,  $i$  die Nummer der Spannungsstufe (Stufenanzahl) und  $N_i$  die Anzahl der gebrochenen oder nicht gebrochenen Proben. Das Plus- oder Minuszeichen in dem Klammerausdruck wird verwendet, wenn bei der Berechnung die Anzahl der nicht gebrochenen oder gebrochenen Proben zugrunde gelegt wird. Für die Standard-Abweichung  $s$  des Mittelwertes gilt die Beziehung:

$$s = 1,620 \cdot d \cdot \left( \frac{N \cdot B - A^2}{N^2} + 0,029 \right)$$

mit  $B = \sum i^2 \cdot N_i$ ; diese Formel gilt mit ausreichender Genauigkeit, falls  $\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} > 0,3$  ist.

Tafel 2. Statistische Auswertung der nach dem Treppenstufen-Verfahren durchgeführten Dauerschwingversuche an nicht verzinkten Proben des Bleches 2



Spannungswerte mit der Dicke des Blechwerkstoffes berechnet wurden. Es ist ferner festzustellen, daß bei dieser Art der Spannungsberechnung die Zeitfestigkeiten des Bleches 1 mit dicker Zinkauflage um etwa 0,5 bis 1,5 kg/mm<sup>2</sup> oberhalb der Werte des nicht verzinkten Bleches liegen; bei Blech 2 fallen die Zeitfestigkeiten der nicht verzinkten und verzinkten Proben weitgehend zusammen und bei Blech 1 mit dünner Zinkauflage liegen die Zeitfestigkeiten der verzinkten Proben um etwa 0,5 bis 3,0 kg/mm<sup>2</sup> unter den Werten der nicht verzinkten Proben. Werden die Spannungswerte der verzinkten Proben auf die Gesamtdicke (Blech + Zinkauflage) bezogen, so liegen die Zeitfestigkeiten in allen drei Versuchsreihen um etwa 1,0 bis 4,0 kg/mm<sup>2</sup> unter den Werten der unverzinkten Proben.

Eine statistische Auswertung der Streubereiche für die Spannungsamplituden oder Bruch-Lastspielzahlen des Zeitfestigkeitsbereiches ist für die vorliegenden Versuchsreihen nicht möglich, da die Anzahl der je Laststufe geprüften vier Proben hierfür zu gering ist. Um z. B. die 10%- und 90%-Grenze der Überlebens-Wahrscheinlichkeit zu berechnen, ist die Prüfung von mindestens zehn Proben je Laststufe erforderlich.

Die Versuche im Wechselfestigkeitsbereich wurden nach dem Treppenstufen-Verfahren mit elf Proben durchgeführt; die Berechnung des mittleren Wechselfestigkeits-

Eine derartige statistische Auswertung der Wechselfestigkeit ist für die nicht verzinkten Proben des Bleches 2 in Tafel 2 wiedergegeben. Beim Rechnen mit der Zahl der gebrochenen oder nicht gebrochenen Proben wird fast der gleiche Wechselfestigkeitswert erhalten. Die berechnete Standardabweichung des mittleren Wechselfestigkeitswertes mit etwa  $\pm 0,40 \text{ kg/mm}^2$  kann nur als Näherungswert angesehen werden, da die Bedingung  $\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} > 0,3$  nicht erfüllt ist, denn im vorliegenden Fall ergibt sich dieser Wert zu 0,22 bzw. 0,24.

In Tafel 3 sind die so berechneten mittleren Wechselfestigkeitswerte für die drei untersuchten Bleche zusammengestellt. Danach ist die Wechselfestigkeit der nicht verzinkten Bleche 1 und 2 fast gleich und beträgt  $\pm 22,0 \text{ kg/mm}^2$ . Die unterschiedliche Gefügebildung beider Blechsarten (Bild 1) läßt also im Gegensatz zur Zeitfestigkeit keinen merklichen Einfluß auf die Höhe der Wechselfestigkeit erkennen, wie dies aus den annähernd gleichen Zugfestigkeitswerten der Bleche (Tafel 1) bereits zu erwarten war. Der Verhältniswert von Wechselfestigkeit zu Zugfestigkeit ist für Blech 1 etwa 0,545 und für Blech 2

<sup>7)</sup> Ransom, J. T.: A guide to statistica methods for use in fatigue testing. Amer. Soc. Test. Mater., Comm. E-9, 1955 (Sonderdruck).  
<sup>8)</sup> Gassner, E., u. O. Svenson: Stahl u. Eisen 82 (1962) S. 276/82.

etwa 0,565; er liegt also in dem für Stahl dieser Zugfestigkeit bekannten Bereich von 0,5 bis 0,6.

Eine Beurteilung der Wechselfestigkeit verzinkter Bleche ist nur sinnvoll, wenn die auf die Blechdicke bezogenen Spannungswerte herangezogen werden. Bei den mit

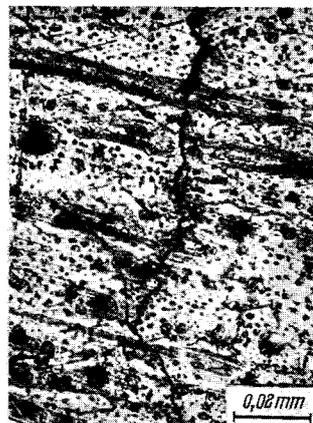
Tafel 3. Mittelwerte der Biegewechselfestigkeiten (Auswertung der nach dem Treppenstufen-Verfahren durchgeführten Dauerschwingversuche, vgl. Bilder 3 bis 5)

Werkstoff (Zink- auflage)	Biegewechselfestigkeit <sup>1)</sup> ± $\sigma_w$ kg/mm <sup>2</sup>					
	nicht verzinkt		verzinkt			
			W (gesamt) <sup>2)</sup>		W (Blech) <sup>2)</sup>	
	g. Pr. <sup>3)</sup>	n. g. Pr. <sup>3)</sup>	g. Pr. <sup>3)</sup>	n. g. Pr. <sup>3)</sup>	g. Pr. <sup>3)</sup>	n. g. Pr. <sup>3)</sup>
Blech 1 (30 $\mu$ m)	21,75 [21,5]	21,93	20,84 [20,5]	20,70	23,00 [23,0]	23,00
Blech 2 (25 $\mu$ m)	22,17 [22,0]	22,10	21,70 [21,5]	21,67	23,70 [23,5]	23,67
Blech 1 (15 $\mu$ m)	21,75 [21,5]	21,93	19,36 [19,0]	19,25	20,25 [20,0]	20,17

<sup>1)</sup> In [ ] sind die aus den Kurven der mittleren Wöhler-Linien (Bilder 3 bis 5) entnommenen Wechselfestigkeiten eingetragen. — <sup>2)</sup> Die Spannungswerte der verzinkten Bleche wurden auf das Widerstandsmoment der Proben unter Zugrundelegung der Gesamtdicke ( $W_{gesamt}$ ) und Blechdicke ( $W_{Blech}$ ) bezogen. — <sup>3)</sup> Auswertung für gebrochene (g. Pr.) und nicht gebrochene Proben (n. g. Pr.).



a



b



c



d

Bilder 6a bis d. Gleitlinien und Anrisse in der Oberfläche des Zinküberzuges des Bleches 1 (500:1)

dicker Legierungsschicht verzinkten Blechen 1 und 2 sind die Wechselfestigkeiten mit  $\pm 23,0$  bzw.  $\pm 23,5$  kg/mm<sup>2</sup> ebenfalls fast gleich, liegen jedoch um 1,5 kg/mm<sup>2</sup> über den Werten der nicht verzinkten Bleche. Blech 1 mit dünnerer Legierungsschicht liegt mit einem Wechselfestigkeitswert von  $\pm 20,0$  kg/mm<sup>2</sup> um 1,5 kg/mm<sup>2</sup> unter dem Wert des unverzinkten Bleches 1.

Zum Bestimmen der Kerbwirkungszahl verzinkter Bleche wurden Proben nach Bild 2b aus dem Blech 1 entnommen. Nach der für die Kerbproben bestimmten Wöhler-Linie ist der Wechselfestigkeitswert  $\pm 14,0$  kg/mm<sup>2</sup>. Die Wechselfestigkeit der verzinkten, ungekerbten Proben des Bleches 1 ist  $\pm 23,0$  kg/mm<sup>2</sup>; damit ist für diese Kerbform mit  $\alpha_K = 2,0$  die Kerbwirkungszahl  $\beta_K$  des verzinkten Bleches 1,65.

#### Rißeinleitung und -ausbreitung

Die Vorgänge, die zur Bildung von Anrissen und ihrer Ausbreitung führen, sind beim weichen unlegierten Stahl weitgehend bekannt<sup>9)</sup>. Dagegen weiß man bis heute noch nicht, wie ein auf der Stahloberfläche aufgebrachter Zinküberzug auf diese Vorgänge wirkt, wenn man auch annehmen kann, daß hier ähnliche Erscheinungen auftreten. Verhältnismäßig glatte Stellen der natürlichen Oberfläche verzinkter Proben nach einer Dauerbeanspruchung zeigen, ähnlich wie die Oberfläche des nicht verzinkten Stahles, neben dem Hauptriß, der zum Bruch der Probe geführt hat, Gleitlinien und feine Nebenrisse im Zinküberzug (Bilder 6a und b). Im

Gegensatz zum unverzinkten Stahl sind die Gleitlinien im Zinküberzug meistens weiter voneinander entfernt und wesentlich häufiger gekreuzt angeordnet, was auf die verschiedenen Kristallgitter des Stahles (kubisch raumzentriert) und des Zinks (hexagonal) zurückzuführen sein dürfte, die einen anderen Gleitmechanismus bedingen. Durch die im Vergleich zur Festigkeit des Zinks sehr hohe Belastung beim Biegewechselversuch sind diese Gleitlinien im Zinküberzug meist schon aufgerissen. Durch den Austritt von Wasserstoff während dem Erstarren der Reinzinkschicht entstandene Blasen und Verletzungen dieser Schicht durch Kratzer können die Gleitlinien und die Ribildung unter Umständen begünstigen, wie es die Bilder 6c und d zeigen; im allgemeinen sind aber derartige Fehlstellen ebenso wie die Korngrenzen der Zinkkristalle für die Einleitung dieser Vorgänge ohne wesentliche Bedeutung.

Diese an der Oberfläche erkennbaren Anrisse setzen sich in das Innere des Zinküberzuges und durch diesen hindurch in das Stahlblech hinein fort, wie man es an den Querschliffen durch den Zinküberzug erkennt (Bilder 7a bis e). Bei den meisten ist nur die Reinzinkschicht von der Ober-

fläche des Überzuges her zum Teil oder auch ganz angerissen (Bilder 7a und b), bei einigen ist auch schon die Eisen-Zink-Legierungsschicht mit aufgerissen (Bild 7c) und nur bei wenigen setzt sich der Anriß in das Stahlblech hinein fort, wobei er sich verzweigen oder in Form eines meist schon stärkeren Einzelrisses in das Blech hineinlaufen kann (Bilder 7d und e). Niemals treten jedoch Risse im Stahlblech oder in der Legierungsschicht allein auf, ohne daß auch die Reinzinkschicht ebenfalls mit aufgerissen ist. Auch das Fortschreiten des Anrisses an der Grenzfläche Legierungsschicht—Stahlblech, das bei umformenden Beanspruchungen zum Abblättern des Zinküberzuges führt, läßt sich nach einer Biegewechselbeanspruchung nicht beobachten. Ein Anriß im Zinküberzug tritt stets an der Stelle in das Stahlblech ein, an der er auf dieses auftrifft.

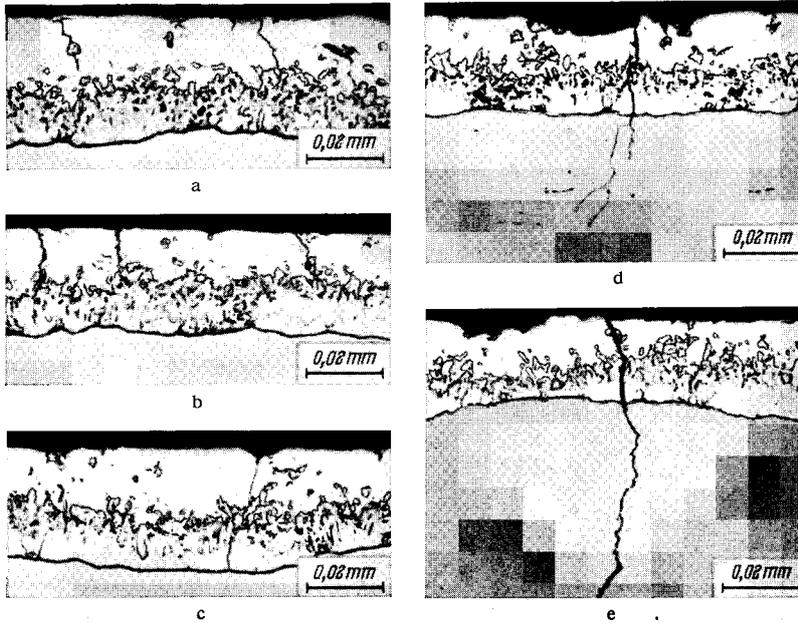
Wenn diese Oberflächenbeobachtungen und Gefügebefunde bereits schon darauf hindeuten, daß der Anriß an der Oberfläche des Zinküberzuges in der Reinzinkschicht entsteht und dann durch die Eisen-Zink-Legierungsschicht in das Stahlblech hinein fortschreitet, so lassen sich eindeutige Aussagen über die hier eintretenden Vorgänge nur durch eine fortlaufende Beobachtung der Gleitlinien- und Ribildung während des Dauerschwingversuches gewinnen. Die Bilder 8a und b zeigen die Veränderung des Aussehens leicht polierter Oberflächen einer nicht verzinkten und einer verzinkten Probe nach verschiedenen Laufzeiten. Bei der nicht verzinkten Probe erkennt man nach einer bestimmten Zeit, bei einer Spannungsamplitude von  $\sigma_a = \pm 27,1$  kg/mm<sup>2</sup> nach

<sup>9)</sup> Wever, F., M. Hempel u. A. Schrader: Arch. Eisenhüttenwes. 26 (1955) S. 739/54 (Mitt. Max-Planck-Inst. Eisenforsch., Abh. 650, Werkstoffaussch. 987).

etwa 5000 Lastspielen, die ersten Verformungsspuren, die sich in einzelnen Ferritkörnern als dunkle Streifen abheben (Bild 8a, links). Mit zunehmender Laufzeit breiten sich diese Gleitlinienbereiche nach und nach über das ganze Ferritkorn aus, und auch in den zunächst noch gleitungsfreien Körnern tritt eine allmählich fortschreitende Gleitverformung ein (Bild 8a, mittlere Bilder). Schließlich wird in diesen Gleitlinienfeldern ein Anriß ausgebildet, der sich mit weiterer Laufzeit langsam ausbreitet und zum Bruch der Probe führt (Bild 8a, rechts).

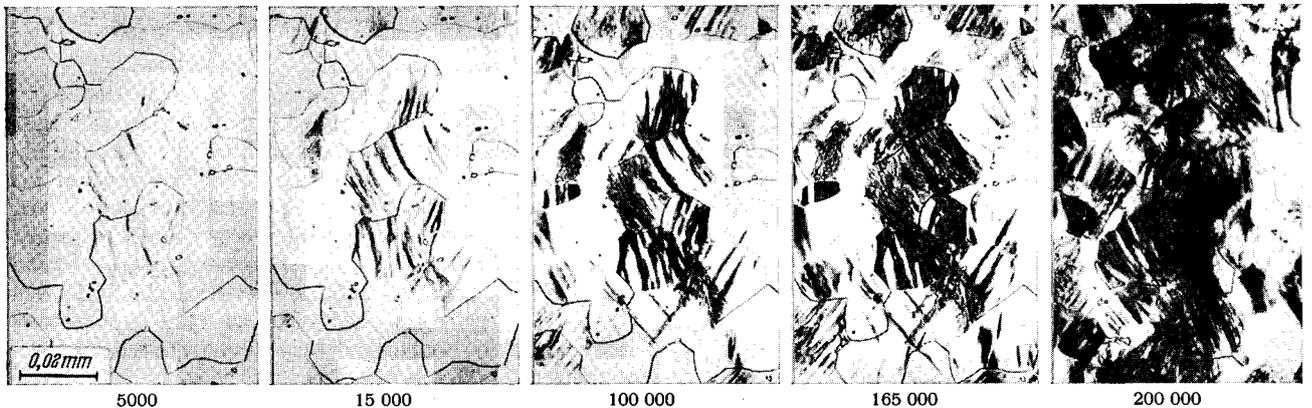
Im Gegensatz zur nicht verzinkten Oberfläche werden die Gleitlinien im Zinküberzug schon nach wenigen Lastspielen in voller Größe ausgebildet, wie es das linke Teilbild des Bildes 8b zeigt. Diese Gleitlinien sind zunächst nur als schwach ausgeprägte dunkle Striche zu erkennen, die im Bild in diagonaler Richtung verlaufen. Die im Bild waagrecht angeordneten dunklen Bereiche rühren von leichten Vertiefungen in der Zinkoberfläche her, die nicht geglättet werden konnten, da sonst die Reinzinkschicht restlos beseitigt worden wäre. Mit fortschreitender Laufzeit werden die Gleitlinien deutlicher sichtbar und beginnen aufzureißen (Bild 8b, zweites Teilbild). Von diesen Gleitlinien ausgehend entstehen dann kleine Risse, die von Gleitlinie zu Gleitlinie springen (Bild 8b, Mitte, rechts), wobei an den Rissen teilweise neue, aber wesentlich kleinere Gleitlinien entstehen. Nach weiter zunehmender Laufzeit breiten sich diese zunächst nur kleinen Anrisse weiter aus und werden breiter, so daß der Anriß auch in das Innere der Probe eindringen und diese zum Bruch bringen kann.

Einen Einblick über das Eindringen eines Anrisses in das Innere der Probe und über die Vorgänge in der Probe selbst liefert die Betrachtung eines Längsschliffes während des Dauerschwingversuches (Probenform b in Bild 2). In den Bildern 9a bis c ist das Aussehen solcher Anschliffe nach verschiedenen Lastspielzahlen für verschiedene Spannungsamplituden wiedergegeben, und zwar für Amplituden  $\sigma_a$  von  $\pm 10,0$ ,  $\pm 18,3$  und  $\pm 22,6$  kg/mm<sup>2</sup>. Dabei liegt die erste weit

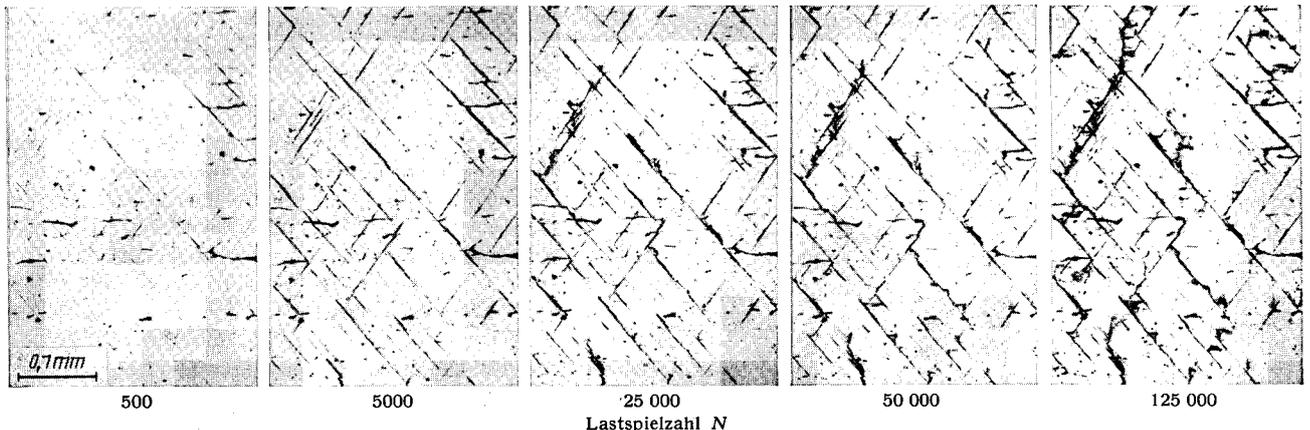


Bilder 7a bis e. Anrisse im Zinküberzug und im Stahlblech (500:1)  
(Blech 1:  $\sigma_a = \pm 28,1$  kg/mm<sup>2</sup>,  $N_{Br} = 0,183 \times 10^6$ )

a) nicht verzinktes Blech 1: Eisenoberfläche ( $\sigma_a = \pm 27,1$  kg/mm<sup>2</sup>; 500:1)



b) verzinktes Blech 1: Zinküberzug ( $\sigma_a = \pm 28,6$  kg/mm<sup>2</sup>; 100:1)

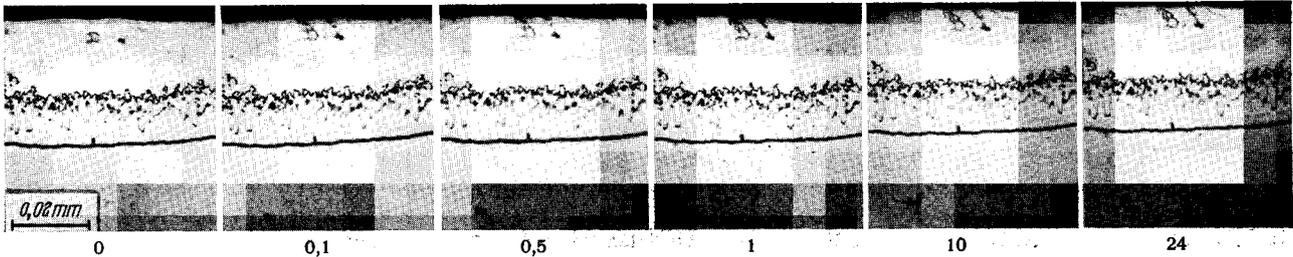


Bilder 8a und b. Entwicklung von Gleitlinien und Anrissen in Abhängigkeit von der Beanspruchungszeit (Oberfläche leicht poliert)

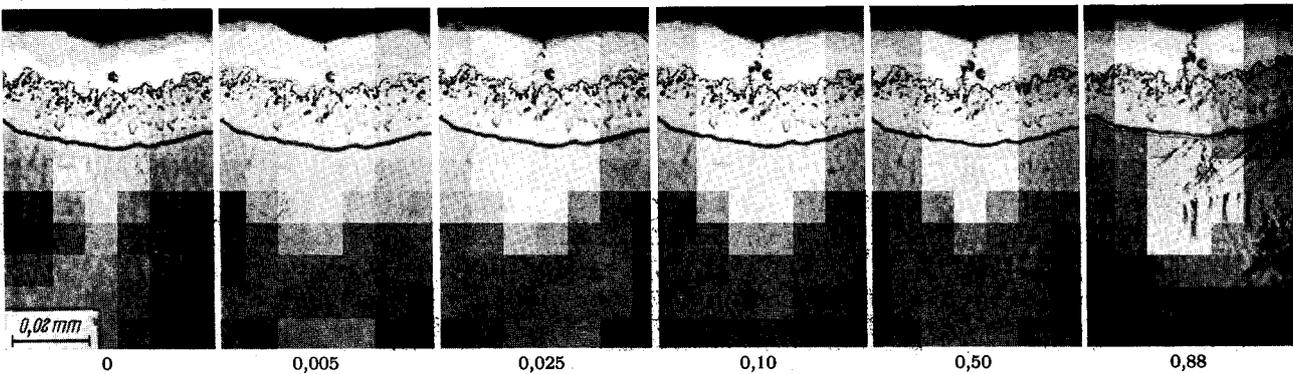
unterhalb, die zweite nahe unterhalb und die dritte oberhalb der Biegewechselfestigkeit des Bleches. Man sieht, daß bei sehr niedriger Belastung der Anriß an der Oberfläche des Zinküberzuges gebildet wird und langsam in die Reinzinkschicht hinein fortschreitet (Bild 9a). Im Stahlblech selbst tritt auch nach sehr langen Laufzeiten keine Veränderung ein. Bei einer etwas höheren Spannungsamplitude, die aber noch unterhalb der Wechselfestigkeit des Bleches liegt, wird

zu, wie die Auszählung in fünf Längsschliffen ergibt (Bild 10). Die Abhängigkeit der Rißzahl von der Spannungsamplitude ermöglicht eine Abschätzung der Biegewechselfestigkeit der Reinzinkschicht; denn unterhalb der Biegewechselfestigkeit dürften sich keine makroskopischen Anrisse mehr bilden, die zu einem Dauerbruch führen. Durch die Extrapolation auf die Rißzahl Null erhält man auf diese Weise für die Biegewechselfestigkeit der Reinzinkschicht einen Wert von etwa

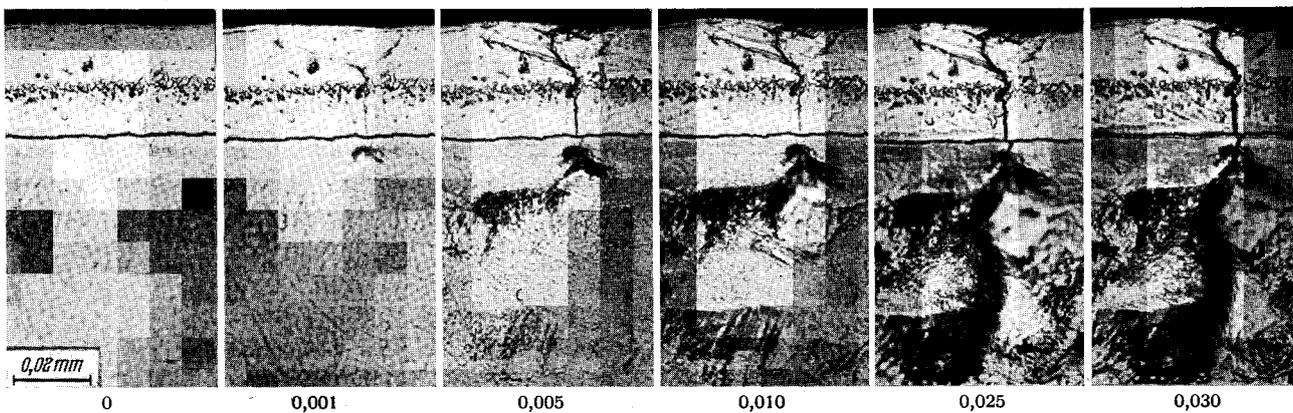
a)  $\sigma_a = \pm 10,0 \text{ kg/mm}^2$



b)  $\sigma_a = \pm 18,3 \text{ kg/mm}^2$



c)  $\sigma_a = \pm 22,6 \text{ kg/mm}^2$



Lastspielzahl in Mill.

Bilder 9a bis c. Entwicklung von Gleitlinien und Anrissen in Abhängigkeit von der Beanspruchungszeit bei verschiedenen Spannungsamplituden (Blech 1 mit dicker Legierungsschicht)

der Anriß an der Oberfläche der verzinkten Probe gebildet und breitet sich von hier aus in die Reinzinkschicht hinein aus und kann unter Umständen auch in die Eisen-Zink-Legierungsschicht hineinlaufen, was in diesem Fall aber nicht zu beobachten ist. Im Stahlblech selbst werden hier nach längerer Laufzeit Gleitlinien gebildet; der Anriß tritt aber noch nicht in das Blech über (Bild 9b). Erst wenn die Biegewechselfestigkeit des Bleches auch überschritten wird, können die in der Reinzinkschicht gebildeten Anrisse in das Stahlblech hinein weiterlaufen, wobei vorher meistens an diesen Stellen eine sehr starke Gleitlinienbildung auftritt (Bild 9c).

#### Rißhäufigkeit und -verteilung

Die Rißhäufigkeit und -verteilung wurden an den Proben des mit dicker Legierungsschicht verzinkten Bleches 1 bestimmt. In der Reinzinkschicht entstehen auch bei sehr niedrigen Spannungsamplituden von etwa  $\pm 5 \text{ kg/mm}^2$  Anrisse. Ihre Zahl nimmt mit steigender Belastung geradlinig

$\pm 2$  bis  $\pm 5 \text{ kg/mm}^2$ , der gut mit den im Schrifttum angegebenen Werten von etwa  $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$  für Feinzink<sup>10)</sup> bis <sup>12)</sup> und etwa  $\pm 5 \text{ kg/mm}^2$  für Zinklegierungen mit geringem Kupfer- und Aluminiumgehalt<sup>12)</sup><sup>13)</sup> übereinstimmt. Die beiden zuletzt genannten Werte sind als Abschätzungen in Bild 10 mit angegeben.

Die Zahl der Risse, die durch die Reinzinkschicht in die Eisen-Zink-Legierungsschicht und auch durch diese in das Stahlblech hinein weiterlaufen, ist wesentlich geringer. Bei hohen Spannungsamplituden von etwa  $\pm 30 \text{ kg/mm}^2$  läuft nur etwa jeder zehnte Anriß in die Legierungsschicht und nur jeder fünfzehnte noch in das Stahlblech hinein (Bild 11).

<sup>10)</sup> Ludwik, P.: VDI-Z. 73 (1929) S. 1801/10.

<sup>11)</sup> Yamamoto, M., u. J. Watanabe: J. Phys. Soc. Japan 15 (1960) Nov., S. 2099.

<sup>12)</sup> Properties of Materials. Non ferrous Metals. In: Mater. Design. Engng. 46 (1957) Nr. 4, S. 92/93, 102/05.

<sup>13)</sup> Metals Handbook 1961. The American Society for Metals. Cleveland 1961. S. 1169/72.

Auch hier steigt die Zahl der Risse mit zunehmender Belastung an, und die Zahl der in das Stahlblech eingedrungenen Anrisse steigt ebenfalls geradlinig mit wachsender Amplitude, während die Kurve für die nur in der Legierungsschicht auftretenden Risse bei einer Spannungsamplitude, die etwa der Wechselfestigkeit des Bleches entspricht, gekrümmt ist. Dieser andersartige Verlauf der Abhängigkeit der Reißzahl von der Spannungsamplitude dürfte darauf zurückzuführen sein, daß in dieser Zwischenschicht je nach der Höhe der Belastung mehrere Vorgänge die Reißbildung ein-

Säurelösungen zu schützen. Zu den korrosionshemmenden metallischen Überzügen auf Stahlteilen gehören unter anderem Zinkschichten unterschiedlicher Dicke, die nach verschiedenen Verfahren, wie Feuerverzinken, elektrolytisches Verzinken und Sherardisieren, aufgebracht werden.

Der Einfluß dieser Verzinkungsarten auf die Dauerfestigkeit von Stahlteilen hängt sowohl von der Festigkeit des Grundwerkstoffes, von der Form und vom Oberflächenzustand der Teile als auch von der Dicke, dem Legierungsaufbau und den Eigenschaften des Zinküberzuges ab. So

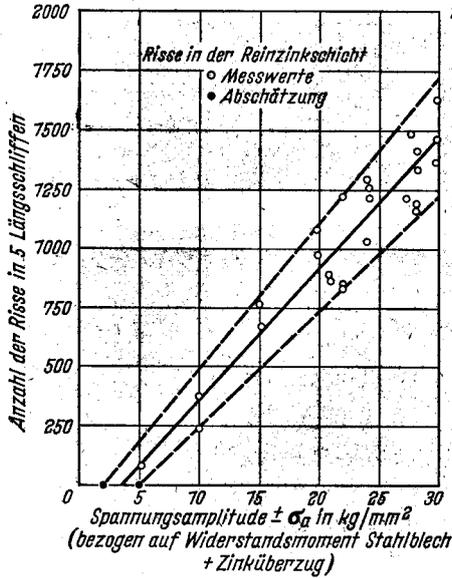


Bild 10. Häufigkeit der Anrisse in der Reinzinkschicht in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude (Blech 1 mit dicker Legierungsschicht)

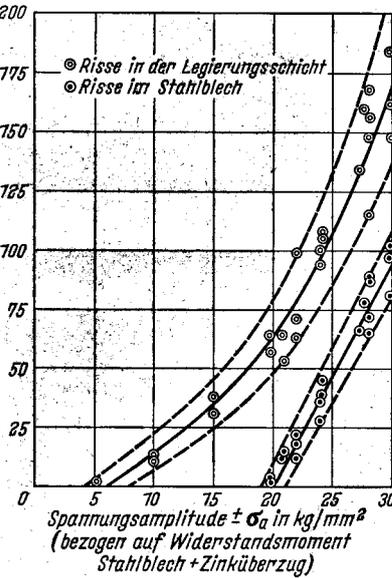


Bild 11. Häufigkeit der Anrisse in der Legierungsschicht und im Stahlblech in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude (Blech 1 mit dicker Legierungsschicht)

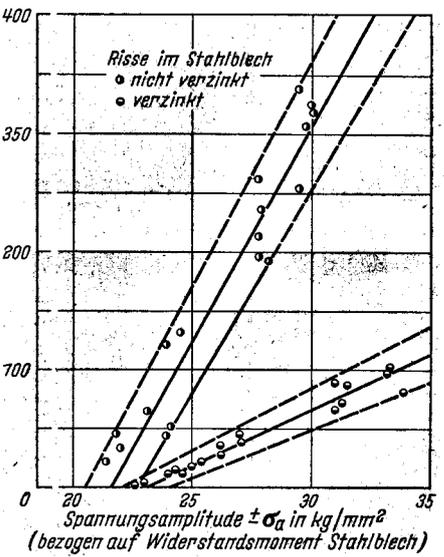


Bild 12. Häufigkeit der Anrisse im nicht verzinkten und verzinkten Stahlblech (Blech 1)

leiten. So liegt die Vermutung nahe, daß der Anriß bei Spannungsamplituden unterhalb der Biege-wechselfestigkeit des Bleches nur von der Reinzinkschicht ausgehend langsam in die Legierungsschicht hinein fortschreitet, während bei höheren Spannungen, die oberhalb der Wechselfestigkeit des Bleches liegen, durch Gleitvorgänge im Grundwerkstoff ein leichteres und schnelleres Einreißen der Legierungsschicht möglich wird. Die Biege-wechselfestigkeit der Eisen-Zink-Legierungsschicht läßt sich in ähnlicher Weise wie die der Reinzinkschicht aus dem Verlauf dieser Kurven abschätzen. Auf diese Weise ergibt sich die Biege-wechselfestigkeit der Legierungsschicht zu etwa  $\pm 5$  bis  $\pm 8$  kg/mm<sup>2</sup>. Die Biege-wechselfestigkeit des Stahlbleches mit etwa  $\pm 19$  bis  $\pm 21$  kg/mm<sup>2</sup> stimmt gut mit dem im Schwingungsversuch gefundenen Wert von  $20,5 \pm 1,5$  kg/mm<sup>2</sup> (vgl. Bild 3b) überein, der umgekehrt durch die metallographische Untersuchung bestätigt wird.

Die Zahl der Anrisse ist im nicht verzinkten Blech bei gleicher Spannungsamplitude deutlich größer als im verzinkten (Bild 12). Auch hier stimmen die aus dem Verlauf der Abhängigkeit der Zahl der Anrisse von der Spannungsamplitude ermittelten Biege-wechselfestigkeiten des nicht verzinkten Bleches mit  $\pm 20,5$  bis  $\pm 22,5$  kg/mm<sup>2</sup> und der Biege-wechselfestigkeit des verzinkten Bleches mit  $\pm 22,0$  bis  $\pm 24,0$  kg/mm<sup>2</sup> mit den im Schwingungsversuch erhaltenen Werten gut überein.

### Erörterung

#### Auswertung des Schrifttums

In verschiedenen Industriezweigen wird vielfach das Fertigerzeugnis mit einem Schutzüberzug versehen, um die Teile vor dem Rosten durch Wasser, Säuredämpfe oder verdünnte

lieferiert das elektrolytische Verfahren Überzüge aus reinem Zink mit meist feinkörnigem und einheitlichem Gefüge. Beim Feuerverzinken, das vorwiegend bei Temperaturen zwischen 430 und 460 °C ausgeführt wird, bildet sich auf der Stahloberfläche dagegen eine Eisen-Zink-Legierungsschicht, über die sich beim Herausziehen aus dem Zinkbad die Reinzinkschicht legt. Beim Sherardisieren besteht der Überzug ausschließlich aus den Eisen-Zink-Legierungsschichten. Als weitere Ursachen für die Beeinflussung der Dauerfestigkeit verzinkter Teile können ferner die folgenden in Betracht kommen: Kerbwirkung durch feine Haarrisse im metallischen Überzug, Versprödung durch Wasserstoffaufnahme beim Beizen, die Wirkung von Zug- oder Druckeigenstressungen und Alterungsvorgänge.

In zahlreichen Arbeiten wird über den Einfluß des Verzinkens auf die Dauerfestigkeit von Stählen berichtet. Die an unverzinkten und verzinkten Drähten<sup>14) bis 28)</sup> und Fe-

<sup>14)</sup> Greis, F., u. H. Ruppik: Arch. Eisenhüttenwes. 10 (1936/37) S. 69/71.  
<sup>15)</sup> Fatigue-Testing Machine for Wire. In: Engineering 138 (1934) S. 139/40; vgl. Wire W. Prod. 10 (1935) S. 272/74, 284/85.  
<sup>16)</sup> Swanger, W. H., u. G. F. Wohlgenuth: Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 36 (1936) II, S. 21/84; vgl. Stahl u. Eisen 57 (1937) S. 874/77.  
<sup>17)</sup> Wampler, C. P., u. N. J. Alleman: Bull. Amer. Soc. Test. Mater. 101 (1939) S. 13/18; vgl. Stahl u. Eisen 61 (1941) S. 521/22.  
<sup>18)</sup> Shelton, S. M.: Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 31 (1931) II, S. 204/20.  
<sup>19)</sup> Watt, D. G.: Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 40 (1940) S. 717/32.  
<sup>20)</sup> Godfrey, H. J.: Trans. Amer. Soc. Met. 29 (1941) S. 133/68; vgl. Stahl u. Eisen 63 (1943) S. 98/100.  
<sup>21)</sup> Nichols, R. W.: Wire Ind. 23 (1956), Nr. 270, S. 517, 519/20 u. 522; Nr. 271, S. 609, 612/14 u. 616; vgl. Iron & Steel 29 (1956) Nr. 6, S. 253/56, 285/86; J. Iron Steel Inst. 182 (1956) Nr. 4, S. 337/47.  
<sup>22)</sup> Püngel, W.: Metalloberfläche 13 (1959) S. 351/54.  
<sup>23)</sup> Kenyon, J. N.: Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 40 (1940) S. 705/16.  
<sup>24)</sup> Kenyon, J. N.: Wire W. Prod. 18 (1943) S. 449/50, 471.  
<sup>25)</sup> Little, J. C., D. G. McMillan u. J. V. Majereak: Trans. Amer. Inst. Electrical Engrs. 69 (1950) II, S. 1473/79.  
<sup>26)</sup> Allsop, R. T.: Coil Spring J. (1953) Nr. 32, S. 5/10 u. (1954) Nr. 34, S. 5/9.  
<sup>27)</sup> Shelton, S. M., u. W. H. Swanger: Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 33 (1933) II, S. 348/63.  
<sup>28)</sup> Shelton, S. M., u. W. H. Swanger: J. Res. Nat. Bur. Stand. 14 (1935) S. 17/32.

dern<sup>29)</sup> <sup>30)</sup> sowie an Rund- und Flachproben<sup>31)</sup> bis<sup>44)</sup> bei Raumtemperatur-Schwingungsversuchen ohne Korrosionseinwirkung erhaltenen Ergebnisse sind in den *Tafeln 4 und 5* unter Kennzeichnung des Werkstoffes, der Probenform und

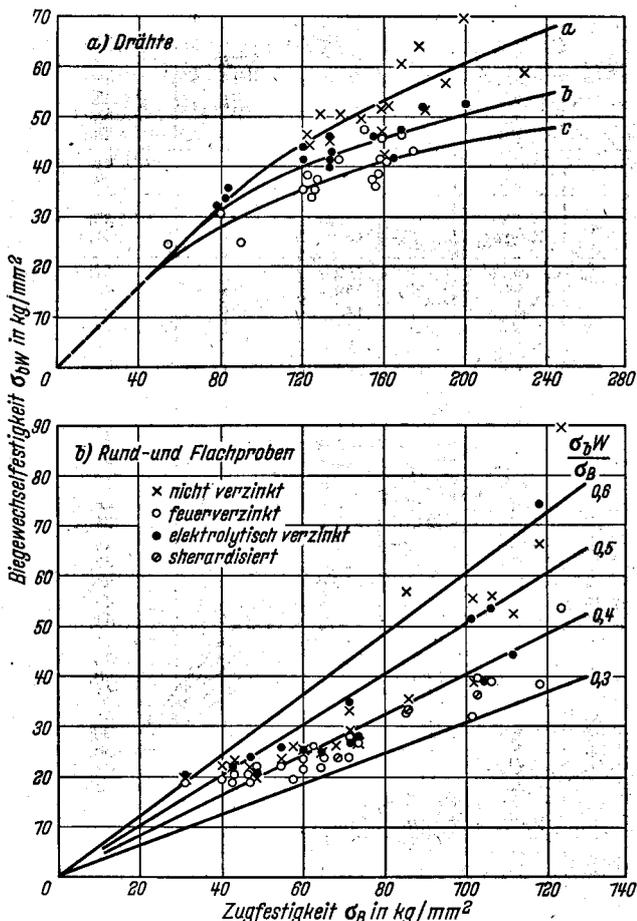


Bild 13. Biege-wechselfestigkeit und Zugfestigkeit nicht verzinkter und verzinkter Proben

der Prüfbedingungen zusammengestellt. Die Dauerschwingversuche wurden zumeist unter Biege-wechselbelastung mit der Mittelspannung Null in Luft oder unter Kühlung der Probenoberfläche mit säurefreiem Öl durchgeführt. Nur vereinzelt werden Ergebnisse mit von Null verschiedener Mittelspannung unter Zug-<sup>27)</sup> und Verdreh-Schwellbelastungen<sup>29)</sup> mitgeteilt.

Zu den Dauerschwingversuchen an Drähten wurden Drahtproben aus unlegierten Stählen verwendet, deren Durchmesser im Bereich von rd. 1 bis 5 mm liegen und deren Zugfestigkeiten sich von rd. 50 bis 230 kg/mm<sup>2</sup> erstrecken. Aus *Bild 13a* geht der Einfluß der Zugfestigkeit und der Ver-

zinkungsart auf die Biege-wechselfestigkeit von Drahtproben hervor. Unterhalb der Zugfestigkeit von 80 kg/mm<sup>2</sup> wirkt die Verzinkung nur geringfügig auf die Wechselfestigkeit von Drähten ein; mit wachsender Zugfestigkeit tritt dann jedoch der Einfluß der Verzinkungsart auf die Wechselfestigkeit deutlich hervor, und zwar wird sie durch das Feuerverzinken in stärkerem Maße vermindert (Kurve c) als durch das Verzinken in einem Elektrolyten (Kurve b). Zur leichteren Abschätzung des Einflusses auf die Dauerfestigkeit von Drähten sind in *Bild 14a* die Wechselfestigkeiten der verzinkten Prüfkörper in Abhängigkeit von den Werten der nicht verzinkten Drahtproben dargestellt, wobei ebenfalls die Verzinkungsart – feuerverzinkt und elektrolytisch verzinkt – besonders gekennzeichnet wurde. Danach liegt die Abnahme der Wechselfestigkeit elektrolytisch verzinkter Drähte im Bereich von 0 bis 10%, während die Wechselfestigkeitsabnahme der feuerverzinkten Drähte den Bereich von 0 bis 30% umfaßt.

Zur weiteren Klärung der Wirkung des Verzinkens auf die Wechselfestigkeit wurde in einigen Fällen (Nr. 16, 17, 18 und 19 in *Tafel 4*) die Zinkschicht in verdünnten Säuren abgelöst und die so vorbereiteten Drahtproben dem Dauerschwingversuch unterworfen; dabei wurde eine deutliche Verbesserung der Wechselfestigkeit erzielt, ohne daß jedoch die Wechselfestigkeit der unverzinkten Proben wieder voll erreicht wurde. Das Aufbringen einer Plattierungsschicht aus Kupfer vor dem Verzinken führt zu keiner wesentlichen Beeinflussung der Wechselfestigkeit von Drähten (Nr. 23 und 24 in *Tafel 4*); die Abweichungen liegen im Bereich von rd. + 1,0 bis - 4,5%.

Über den Einfluß der Schichtdicke auf die Wechselfestigkeit elektrolytisch verzinkter Drahtproben aus unlegiertem Stahl mit 0,63% C berichtet R. T. Allsop<sup>26)</sup> in zwei Versuchsreihen (*Tafel 4*). Werden die Drahtproben nach dem Kaltziehen vor dem Verzinken 1/2 h bei 375° C spannungsfrei geglüht, so wird bei einer Schichtdicke von 13 µm die Wechselfestigkeit um 13,5% erhöht; bei einer Dicke der Zinkschicht von 25, 51 und 76 µm wird dann die Wechselfestigkeit um 9,5, 16,5 und 23,0% vermindert. Ein Spannungsfreiglühen (1/2 h bei 375° C) der Drahtproben nach dem Verzinken ergibt für die Schichtdicken von 13, 25 und 51 µm eine stetige Abnahme der Wechselfestigkeit, und zwar um 4,0, 20,5 und 22,0%. Aus den unterschiedlichen Änderungen der Wechselfestigkeiten bei gleicher Schichtdicke kann gefolgert werden, daß durch ein nachträgliches Spannungsfreiglühen der elektrolytisch verzinkten Drähte die die Wechselfestigkeit günstig beeinflussenden Druckeigenstressen vermindert oder beseitigt werden. In welchem Umfang sich bei dieser Wärmebehandlung bereits eine Legierungsschicht gebildet hat, die die Wechselfestigkeit herabsetzt, kann aus den Angaben der Arbeit<sup>26)</sup> nicht entnommen werden.

Das Verhalten verzinkter Drahtproben unter Zug-schwellbeanspruchung wurde nur in zwei Versuchsreihen geprüft (Nr. 27 und 28 in *Tafel 4*); hieraus geht gleichfalls hervor, daß sich elektrolytisch verzinkte Drähte unter Zug-schwellbelastung etwas günstiger als feuerverzinkte verhalten.

Über die Prüfung verzinkter Federn wird von J. R. Gustafson<sup>29)</sup> und H. J. Steele<sup>30)</sup> berichtet (*Tafel 4*). Während nach der erstgenannten Arbeit die Dauerfestigkeit der mit 8 µm Dicke elektrolytisch verzinkten Federn um 46,5% verringert wird, zeigen die von Steele untersuchten, mit 13 µm Dicke elektrolytisch verzinkten Federn nur eine Dauerfestigkeitsabnahme von 10%. Das elektrolytische Aufbringen einer Bleischicht von 5 µm und nachfolgendes Verzinken mit 13 µm erhöht die Dauerfestigkeit der Federn um 10%. Ob die Ursache für diese widersprechenden Ergebnisse

<sup>29)</sup> Gustafson, J. R.: Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 47 (1947) S. 782/802.  
<sup>30)</sup> Steele, H. J.: Coil Spring J. (1952) Nr. 29, S. 12/15.  
<sup>31)</sup> Barklie, R. H. D., u. H. J. Davies: Proc. Instn. mech. Eng. 118 (1930) I, S. 731/50.  
<sup>32)</sup> Swanger, W. H., u. R. D. France: Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 32 (1932) II, S. 430/52.  
<sup>33)</sup> Mailänder, R.: VDI-Z. 77 (1933) S. 271/74.  
<sup>34)</sup> Koch, W.: Dr.-Ing. Diss. Techn. Hochschule Karlsruhe, Juli 1933, 1934.  
<sup>35)</sup> Sopwith, D. G., u. H. J. Gough: J. Iron Steel Inst. 135 (1937) S. 315/51; vgl. Stahl u. Eisen 57 (1937) S. 689/90.  
<sup>36)</sup> Cazaud, R.: Journées de la Lutte contre la Corrosion. Paris 1939, S. 381/84; vgl. Stahl u. Eisen 59 (1939) S. 849.  
<sup>37)</sup> Füngel, W.: Stahl u. Eisen 64 (1944) S. 101/05 (Werkstoffaussch. 639).  
<sup>38)</sup> Forsman, O., u. E. Lundin: Proc. First World Metall. Congr., Amer. Soc. Metals 1951, Cleveland, Ohio 1952, S. 606/12.  
<sup>39)</sup> Hammond, R. A. F., u. C. Williams: Metallurg. Rev. 5 (1960) S. 165/223.  
<sup>40)</sup> Rjabtschenkow, A. W.: In: Akimow, G. W.: Korrosion und Verschleiß von Stählen und ihre Bekämpfung in Dampferzeugungsanlagen sowie im Maschinen- und Fahrzeugbau. Berlin 1956, S. 13/38.  
<sup>41)</sup> Tauscher, H.: Draht 10 (1959) S. 511/16, 571/77.  
<sup>42)</sup> Tauscher, H.: In: Ermüdungsfestigkeit von Werkstoffen und Bauelementen. Vorträge der Warschauer Tagung, 12.-14. Mai 1960. Hrsrg. A. Buch. Wydawnictwo Instytutu Mechaniki Precyzyjnej. Warszawa 1961, S. 30/39.  
<sup>43)</sup> Wiegand, H.: Proc. 6th Internat. Conference on Hot Dip Galvanizing - Interlaken, June 1961. Zinc Development Assoc., London 1962, S. 69/77.  
<sup>44)</sup> Harris, W. J.: Metallic fatigue. Pergamon Press Inc., London 1961, S. 297/300.

Tafel 4. Einfluß der Verzinkungsart auf die Dauerschwingfestigkeit von Drähten und Federn

Forscher <sup>1)</sup>	Werkstoff	chemische Zusammensetzung			Werkstoffzustand	Draht-Dmr. mm	Verzinkungsverfahren <sup>2)</sup>	Schichtdicke $\mu\text{m}$ (g/m <sup>2</sup> )	Zugfestigkeit $\sigma_B$ kg/mm <sup>2</sup>	Wechselfestigkeit <sup>3)</sup>	
		% C	% Si	% Mn						n/min (N in Mill.)	$\pm \sigma_{bw}$ kg/mm <sup>2</sup>
Greis-Ruppick (14)	0,50 % C	0,49	0,23	0,54	gezogen	2,70	ohne FV	0 (172)	139,0 138,0	— (—)	50,0 41,0
	0,60 % C	0,62	0,23	0,56			ohne FV	0 (172)	159,0 159,0		51,0 45,0
	0,70 % C	0,70	0,24	0,87			ohne FV	0 (172)	149,0 151,0		49,0 47,0
	0,80 % C	0,80	0,23	0,54			ohne FV	0 (172)	169,0 169,0		60,0 46,0
N. N. (15)	Seildraht	—	—	—	gezogen	—	ohne FV	0	—	14 000 (30)	41,0 38,5
Swanger-Wohlgemuth (16, 17, 18)	basischer SM-Stahl (Brückendraht)	—	—	—	ölvorgütet	4,80	FV Zn-abg.	— 0	156,0 160,0	2000 (10)	35,5 41,5
Watt (19)	0,60 % C	0,60	—	0,98	—	2,08	ohne FV	0 (27)	162,0 159,5	6000/7000 (10)	51,5 41,0
						2,62	ohne FV	0 (285)	180,5 174,5		51,0 42,5
	0,75 % C	0,75	—	1,10		3,12	ohne FV	0 (314)	159,5 157,5		46,5 38,0
						2,03	EV	(281)	180,0		51,0
	0,70 % C	0,73	—	0,67		2,56	EV	(287)	169,0		46,5
						2,56	FV	(330)	161,5		40,5
	0,50 % C	0,50	—	1,06		3,10	EV	(275)	165,0		41,0
						2,03	ohne FV	0 (270)	129,5 127,5		50,0 37,0
	0,50 % C	0,51	—	1,07		2,56	ohne FV	0 (275)	122,5 120,0		46,0 35,0
						2,97	ohne FV	0 (280)	123,5 124,5		44,0 33,5
	0,50 % C	0,61	—	0,78		2,54	EV	(275)	133,5		39,5
						2,49	EV	(620)	134,5		42,5
	0,60 % C	0,62	—	0,87		2,41	EV	(700)	133,5		41,0
						2,03	EV	(320)	133,5		45,5
	0,60 % C	0,62	—	0,87		2,56	EV	(266)	120,5		43,5
						2,56	FV	(336)	123,0		38,0
0,20 % C	0,61	—	0,92	3,10	EV	(314)	120,5	41,0			
				2,03	EV	(290)	83,0	35,5			
0,20 % C	0,21	—	0,46	2,56	EV	(320)	82,0	33,5			
				0,19	FV	(308)	79,5	30,5			
0,20 % C	0,17	—	0,50	3,10	EV	(287)	77,5	32,0			
				0,20	—	—	—	—			
Godfrey (20)	0,70 % C	0,73	0,18	0,60	patentiert gezogen (entkohlte Zone, 0,10 bis 0,30 mm)	2,50	ohne EV	0 40	142,0 130,0	5000 (10)	32,5 33,0
						2,10	ohne EV	0 25	151,0 149,5		36,5 35,0
Nichols (21)	0,70 % C	0,73	0,18	0,60	patentiert gezogen	1,80	ohne EV	0 25	160,0 166,0	14 000/18 000 (10)	38,0 38,0
						1,50	ohne EV	0 20	169,0 171,0		42,0 41,0
Püngel (22)	Stahldraht	—	—	—	—	2,18	ohne FV	0 (250)	—	4000 (2)	40,0 41,0
							—	—	—	—	—
Kenyon (23,24)	Stahldraht für Reifen-einlagen	—	—	—	gezogen	0,94	ohne Cu + Zn (EV + FV)	0 —	229,5 197,5	6000 (10)	58,0 57,5
						0,94	ohne Cu + Zn (EV + FV)	0 —	199,0 193,5		58,5 66,5
Little-McMillan-Majercak (25)	C-Stahl	Handelsgüte, weich SM-Güte hochfester Stahl extra-hochf. Stahl	—	—	—	—	FV	—	53,5	(—)	24,5
							FV	—	89,5		24,5
Allsop (26)	C-Stahl	0,63	—	—	kalt gezogen; vor dem Verzinken spannungsfrei gegläht (1/2 h/375 °C) nach dem Verzinkenspannungsfrei gegläht (1/2 h/375 °C)	4,1	ohne EV	0 13 25 51 76	178,0 — — — —	— (3)	63,5 72,0 57,5 53,0 49,0
						4,1	ohne EV	0 13 25 51	178,0 — — —		63,5 61,0 50,5 49,5
Shelton-Swanger (27, 28)	Brückendraht	—	—	—	patentiert gez. ölvorgütet	4,8	FV FV	50 25	— —	2400 (10)	$\sigma_D = 35,0 \pm 21,0$ $\sigma_D = 34,5 \pm 19,0$
						4,8	FV EV	50 90	161,5 173,0		$\sigma_D = 35,0 \pm 21,0$ $\sigma_D = 35,0 \pm 26,0$
Gustafson (29)	0,70 % C	0,66	0,23	0,71	ölvorg. Draht	Feder <sup>4)</sup>	ohne EV	0 8	— —	1200 (10)	$\tau_D = 40,0 \pm 34,5$ $\tau_D = 30,0 \pm 18,5$
Steele (30)	C-Stahl	—	—	—	—	Feder <sup>4)</sup>	ohne EV Pb + Zn (EV + EV)	0 13 5 + 13	198,5 — —	(—)	$\pm 0\%$ $-10\%$ $+10\%$

<sup>1)</sup> Zahlen in ( ) geben die lfd. Nummern des Schrifttumshinweises an. — <sup>2)</sup> Es bedeuten: EV = elektrolytisch verzinkt; FV = feuerverzinkt; Zn-abg. = Zinkschicht abgelöst. — <sup>3)</sup> Dauerschwingversuche bei Raumtemperatur in Luft oder mit Ölkühlung; angegeben ist die Prüffrequenz n und die Grenzlastspielzahl N. Es bedeutet  $\sigma_{bw}$  = Biege-wechselfestigkeit ( $\sigma_m = 0$ );  $\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_a$  bzw.  $\tau_D = \tau_m \pm \tau_a$  Zug- bzw. Verdreh-Dauerschwingfestigkeit bei erhöhter Mittelspannung. — <sup>4)</sup> Federn nach dem Wickeln kugelgestrahlt; Abmessungen:  $d = 4,1$  mm,  $D_a = 33,0$  mm,  $L_w = 33,0$  mm. — <sup>5)</sup> Federabmessungen:  $d = 1,2$  mm,  $D_a = 9,5$  mm,  $L_w = 57,0$  mm.

auf den in beiden Untersuchungen verwendeten unterschiedlichen Federabmessungen beruht, kann nicht angegeben werden.

Die Dauerschwingversuche an unverzinkten und verzinkten Rund- und Flachproben wurden zumeist unter Biegewechselbelastung mit der Mittelspannung Null ausgeführt; nur in einem Falle wurde die Verdrehwechselfestigkeit bestimmt (Nr. 41, 42 in *Tafel 5*). Für die Flachproben wurden Bleche mit 2 und 12 mm Dicke verwendet; in einigen wenigen Fällen wurden sie vor dem Verzinken gestrahlt und

### Deutung der Versuchsergebnisse

Aus den metallographischen Beobachtungen über die Bildung und Ausbreitung von Gleitlinien und Anrissen in der Oberfläche feuerverzinkter Proben bei verschiedenen Spannungsamplituden und Lastspielzahlen geht hervor, daß dem Auftreten eines Dauerbruchanrisses in der Zinkschicht stets die Bildung von Gleitlinien vorausgeht (*Bild 8*).

Die Beobachtungen über die Zahl der Anrisse in der Reinzink- und Legierungsschicht sowie im Grundwerkstoff zeigen in den *Bildern 10 bis 12*, daß ein Teil der in der Rein-

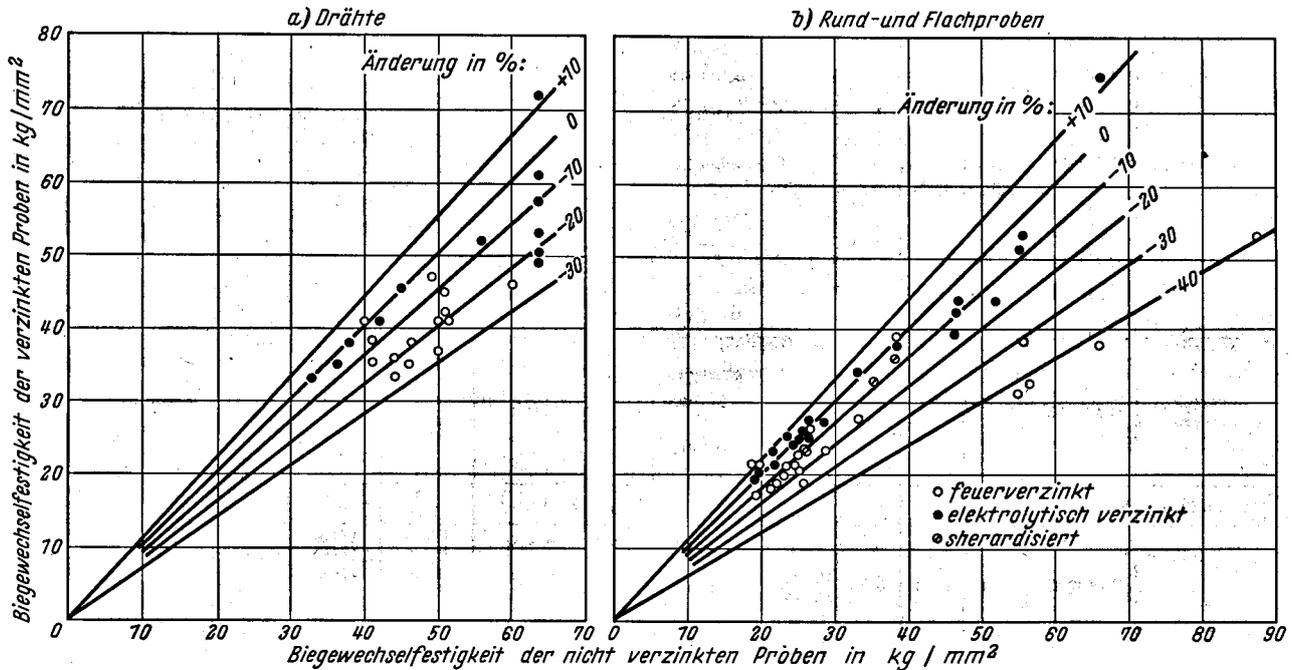


Bild 14. Änderung der Biegewechselfestigkeit durch das Verzinken

geglüht (Nr. 37 in *Tafel 5*) und in einem Falle in Salzsäure gebeizt (Nr. 43 in *Tafel 5*). Die Rundproben wurden mit Durchmessern von 5,0 bis 7,5 mm geprüft, wobei die Prüfstrecke vor dem Verzinken geschliffen oder poliert wurde. Eine Anlaßbehandlung (2 h bei 160 °C) der Proben nach dem Verzinken ergab fast die gleichen Biege- oder Verdrehwechselfestigkeiten wie die der nicht angelassenen verzinkten Proben (Nr. 41, 42 in *Tafel 5*).

In *Bild 13b* sind die Biegewechselfestigkeiten unverzinkter und verzinkter Rund- und Flachproben in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit aufgetragen. Für Zugfestigkeiten von 30 bis 50 kg/mm<sup>2</sup> umfassen die Versuchswerte einen Bereich des Wechselfestigkeitsverhältnisses  $\sigma_{bw}/\sigma_B$  von 0,6 bis 0,4, wobei die Wechselfestigkeiten der feuerverzinkten Proben an der unteren Grenze liegen. Die meisten Versuchswerte der nicht verzinkten und elektrolytisch verzinkten Proben lassen sich für Zugfestigkeiten von 50 bis 120 kg/mm<sup>2</sup> dem  $\sigma_{bw}/\sigma_B$ -Bereich von 0,5 bis 0,4 zuordnen; die Wechselfestigkeiten der feuerverzinkten Proben erstrecken sich dagegen bei den gleichen Zugfestigkeiten über einen Bereich des Wechselfestigkeits-Verhältnisses von 0,4 bis 0,3.

Nach *Bild 14b* betragen die Änderungen der Wechselfestigkeiten elektrolytisch verzinkter und sherardisierter Proben etwa  $\pm 10\%$  der Werte unverzinkter Proben. Im Bereich der Wechselfestigkeiten nicht verzinkter Proben von rd. 20 bis 40 kg/mm<sup>2</sup> vermindern sich die Wechselfestigkeiten feuerverzinkter Proben im Mittel um 10% und in dem Bereich von rd. 55 bis 90 kg/mm<sup>2</sup> dagegen um 30 bis 40%. Danach ist der Einfluß des Verzinkens auf die Wechselfestigkeit geglühter Baustähle gering, dagegen besonders ausgeprägt bei den auf höhere Zugfestigkeit vergüteten, unlegierten und legierten Stählen.

zinkschicht gebildeten Anrisse nach dem Auftreffen auf die Legierungsschicht in dieser festgehalten wird. Da diese Legierungsschicht eine wesentlich geringere Plastizität besitzt als die Reinzinkschicht, kann sich die Spannungserhöhung im Rißkerbgrund stärker auswirken, wobei das plastische Verformungsvermögen des Grundwerkstoffs dann die weitere Ausbreitung des Anrisses bestimmt und damit die Höhe der Wechselfestigkeit beeinflusst.

Bei metallischen Überzügen hoher Plastizität, wie Blei, Zinn, Zink und Kadmium, verhindert diese eine merkliche Spannungserhöhung im Kerbgrund des Anrisses. Daher sollten derartige Überzüge keinen wesentlichen Einfluß auf die Wechselfestigkeit des Stahles ausüben. Die in den *Tafeln 4 und 5* zusammengestellten Versuchsergebnisse lassen deutlich erkennen, daß die Wechselfestigkeit elektrolytisch verzinkter Stahlproben, bei denen der Überzug also nur aus einer weichen Reinzinkschicht besteht, gegenüber unverzinkten Proben im allgemeinen wenig beeinflusst wird.

Bei den feuerverzinkten Proben tritt im Gegensatz zu den elektrolytisch verzinkten Proben neben der Reinzinkschicht noch die härtere Legierungsschicht hinzu, deren geringe Plastizität hier einen vollständigen Abbau der Spannungsspitzen im Rißgrund nicht mehr zuläßt und damit stärker auf die Wechselfestigkeit einwirken kann. Die hohe Plastizität weicher Baustähle mit niedrigen Zugfestigkeiten von etwa 30 bis 50 kg/mm<sup>2</sup> lassen die in der Legierungsschicht enthaltenen Anrisse mit ihrer Spannungserhöhung im Grundwerkstoff nicht voll zur Wirkung kommen. Daher wird die Wechselfestigkeit bei derartigen Stählen durch das Feuerverzinken nur unwesentlich beeinflusst (*Tafel 3 und 5*). Die beim Feuerverzinken durch künstliche Alterung hervorgerufenen Eigenschaftsänderungen, wie z. B. die Erhöhung

Forscher <sup>1)</sup>	Werkstoff	Chemische Zusammensetzung				Werkstoff-zustand	Probenform und -abmessung mm	Verzinkungs-verfahren <sup>2)</sup>	Schicht-dicke $\mu\text{m}$ (g/m <sup>2</sup> )	Zug-festig-keit $\sigma_B$ kg/mm <sup>2</sup>	Wechselfestigkeit <sup>3)</sup>				
		% C	% Si	% Mn	Sonstiges %						n/min (N in Mill.)	$\pm \sigma_w$ kg/mm <sup>2</sup>			
Barklie-Davies (31)	0,14 % C	0,14	—	—	—	vergütet	Stab: 7 Dmr.	ohne EV	0	—	1400 (10 bis 30)	25,5 26,0			
Swanger-France (32)	0,02 % C	0,02	Sp.	0,03	—	warm gewalzt	Stab: 5,0 bis 6,5 Dmr.	ohne FV	0	31,0	1750 (10)	19,0 18,5 19,5 25,5 19,0 56,5 32,5 33,0 28,0 34,5 24,5 21,5 24,5 87,5 53,0 66,0 38,0 74,0			
						geglüht		ohne FV	43 bis 89	—					
	0,45 % C	0,45	0,18	0,60	—	abgeschreckt		ohne FV	0	57,5					
						vergütet		ohne FV	43 bis 89	—					
	0,72 % C	0,72	0,24	0,31	—	abgeschreckt		ohne FV	0	85,5					
						vergütet		ohne FV	43 bis 89	—					
Mailänder (33)	0,70 % C	0,70	—	—	—	geglüht	Stab: 7,5 Dmr.	ohne SH <sup>4)</sup>	0	86,0	3000 (10)	35,0 33,0			
Koch (34)	St 37	0,18	Sp.	0,52	—	—	Stab: 7,5 Dmr.	ohne FV	0	43,0	3000 (3)	23,0 20,0 23,0 20,0 25,0 23,0 21,0 25,0			
	St 42	0,22	Sp.	0,54	—	—		ohne FV	0	46,5					
	St 50	0,30	0,17	1,01	—	—		ohne FV-1 min FV-2 min EV	0 — 2	60,0 — —					
Sopwith-Gough (35)	0,50 % C	0,50	0,11	0,54	—	gezogen	Stab: 7 Dmr.	ohne FV	0	102,5	2200 (10)	38,5 39,0 38,5 36,0 26,0 23,5 25,5 23,5			
						geglüht		EV	48	103,0			SH	13	103,0
Cazaud (36)	Weichstahl	—	—	—	—	—	Stab	ohne FV	0	40,0	— (100)	22,0 18,5 (19,0) <sup>5)</sup>			
Püngel (37)	0,06 % C	0,06	0,01	0,26	0,10Cu 0,04Cr	geglüht	Blech: 2 mm	FV-n	(710)	—	1500 (10)	14,0 15,0 18,0 14,0 17,0 16,0 19,0 20,0 26,0 23,0 19,0 20,5			
						geglüht	gesandstrahlt	FV-t	(710)	—					
	0,74 % C	0,74	0,09	0,95	0,25Cu 0,07Cr	geglüht	gesandstrahlt und 1 h/750 °C gegl. u.	FV-n	(755)	—					
						geglüht	Blech: 2 mm	FV-t	(755)	—					
Forsman-Lundin (38, 39)	St 42	0,20	0,14	0,54	—	Anlieferung	Blech: 2 mm	ohne FV	0	48,5	900 (15)	19,5 21,5 20,5 26,5 26,5 27,5			
	Cr-Mo	0,25	0,18	0,59	1,13Cr 0,23Mo	geglüht		EV	30 bis 60 5 bis 10	—					
	St 37	0,13	0,24	0,28	—	geglüht	Rundstab	ohne FV	0	42,1	3000 (15)	21,5 18,5 21,5 21,5 18,5 23,5 23,5 21,5 25,5 28,5 23,5 27,5 55,5 38,5 53,0 55,0 31,5 51,0			
	St 44	0,22	0,22	0,31	—	geglüht		EV	30 bis 60 5 bis 10	—					
	St 50	0,34	0,27	0,37	—	geglüht		ohne FV	0	47,0					
	St 60	0,48	0,25	0,50	—	geglüht		EV	30 bis 60 5 bis 10	—					
								EV	30 bis 60 5 bis 10	—					
	Cr-Mn	0,42	0,70	1,09	1,23Cr	vergütet		ohne FV	0	54,8					
	Ni-Cr	0,33	0,26	0,46	3,46Ni 0,71Cr	vergütet		EV	30 bis 60 5 bis 10	—					
	Rjabtschenkow (40, 41)	0,26 % C	0,26	—	—	—		geglüht	Stab	ohne —			0	—	— (—)
Tauscher (41, 42)	Cr-Si-Mn	0,30	1,02	1,00	0,97Cr 0,10Ni	vergütet		Stab: 7,5 Dmr.	ohne EV	0			112,0	(10)	52,0 44,0 44,0
									EV +	15			111,0		
Wiegand (43)	St 37	—	—	—	—	gewalzt	Blech: 12 mm (Walzhaut)	ohne Zn-abg.	0	—	(10)	19,0 21,5 21,5 22,0			
								Zn-abg. + pol.	—	—					
Harris (44)	Ni-Cr	—	—	—	2,5 Ni	vergütet	Stab	ohne EV-D <sup>6)</sup> EV-Z <sup>6)</sup> EV-S <sup>6)</sup>	0 — —	— — —	(10)	46,5 44,0 42,5 39,5			

<sup>1)</sup> Zahlen in ( ) geben die lfd. Nummern des Schrifttumshinweises an. — <sup>2)</sup> Es bedeuten: EV = elektrolytisch verzinkt; FV = feuerverzinkt; FV-n = nach feuerverzinkt (unmittelbar nach dem Beizen); FV-t = trocken feuerverzinkt (nach dem Beizen getrocknet); SH = sherardisiert; Zn-abg. = Zinkschicht abgelöst. — <sup>3)</sup> Dauerschwingversuche bei Raumtemperatur in Luft oder mit Ölkühlung; angegeben ist die Prüffrequenz n und die Grenzlastspielzahl N. Es bedeuten:  $\sigma_w$  = Biege-wechselfestigkeit ( $\sigma_m = 0$ );  $\tau_w$  = Verdreh-Wechselfestigkeit ( $\tau_m = 0$ ). — <sup>4)</sup> Sherardisiert; 6 h/380 °C. — <sup>5)</sup> In ( ) ist der Spannungswert ohne Berücksichtigung der Schichtdicke angegeben. — <sup>6)</sup> Es bedeuten: EV-D = elektrolytisch verzinkt nach dem Dalio-Verfahren; EV-Z = verzinkt im Zyanid-Zinkbad; EV-S = verzinkt im Säure-Zinkbad.

des Streckgrenzenverhältnisses von etwa 78,5 auf 85,5% (Tafel 1), können unter Umständen sogar die Wechselfestigkeit gegenüber dem unverzinkten Zustand erhöhen (Tafeln 3 und 5). Werden dagegen Werkstoffe mit höherer Zugfestigkeit und geringerem plastischem Verformungsvermögen feuerverzinkt, so kann sich die Spannungserhöhung im Kerbgrund eines in der Legierungsschicht vorhandenen Anrisses an der Oberfläche des Grundwerkstoffes immer stärker auswirken und die Wechselfestigkeit wird mit steigender Zugfestigkeit zunehmend vermindert (Tafeln 4 und 5).

#### Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung befaßt sich mit dem Einfluß des Feuerverzinkens auf das Dauerschwingverhalten kalt gewalzter Feinbleche aus unberuhigtem Thomasstahl.

Die Dauerschwingversuche wurden an unverzinkten und verzinkten Blechen mit 1 mm Dicke und Zugfestigkeiten von etwa 40 kg/mm<sup>2</sup> unter Biegewechselbelastung ausgeführt. Die Wechselfestigkeit dieser Stähle mit hohem plastischem Verformungsvermögen und niedriger Zugfestigkeit wird durch das Feuerverzinken kaum beeinflusst; die mittlere Wechselfestigkeit der unverzinkten und verzinkten Bleche beträgt etwa  $\pm 21,5$  kg/mm<sup>2</sup> mit einer Streuung von  $\pm 1,5$  kg/mm<sup>2</sup>.

Die durchgeführte metallographische Untersuchung der unverzinkten und verzinkten Bleche sollte zur Klärung der

Frage nach der Bildung von Gleitspuren und Anrissen sowie deren Ausbreitung im Überzug und im Grundwerkstoff beitragen. Die Bildung der ersten Gleitlinien und Anrisse erfolgt bereits nach wenigen Lastspielen, und zwar stets in der Reinzinkschicht, wobei Anzahl und Größe mit steigender Versuchsdauer und Spannungsamplitude zunehmen.

Eine Extrapolation der Abhängigkeit der Reißanzahl von der Höhe der Wechselbelastung auf den Reißwert Null führt für die Reinzinkschicht zu einer Wechselfestigkeit von  $\pm 2$  bis  $\pm 5$  kg/mm<sup>2</sup>, für die Legierungsschicht zu einer solchen von  $\pm 5$  bis  $\pm 8$  kg/mm<sup>2</sup> und für den Grundwerkstoff zu einem Wert von  $\pm 19$  bis  $\pm 21$  kg/mm<sup>2</sup> (bezogen auf das Widerstandsmoment des Gesamtquerschnittes). Die so extrapolierten Werte für die Reinzinkschicht und den geprüften Stahl stimmen mit den in Schwingungsversuchen ermittelten Werten gut überein, so daß anzunehmen ist, daß auch der nur auf diese Weise für die Legierungsschicht zu ermittelnde Wechselfestigkeitswert den wirklichen Verhältnissen nahekommt.

In Verbindung mit der vorliegenden Untersuchung wurde eine umfassende Auswertung des Schrifttums über den Einfluß des Feuer- und elektrolytischen Verzinkens auf die Wechselfestigkeit bei Raumtemperatur und ohne Korrosionseinwirkung von Drähten und Federn sowie Rund- und Flachproben verschiedener Stähle vorgenommen.