

Einfluß des Feuerverzinkens auf die Dauerfestigkeit von Stahldrähten

Von Max Hempel und Dietrich Horstmann in Düsseldorf

Mitteilung aus dem Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Abhandlung 1228

[Bericht Nr. 164 des Ausschusses für Drahtverarbeitung des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute*)]

(Bericht Nr. 63 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V.)

Umlaufbiegeversuche an Stahldrähten ohne und mit Zinküberzug und mit Zugfestigkeiten von rd. 400 bis 2000 N/mm². Dauerschwingverhalten der Drähte im Zeit- und Wechselfestigkeitsbereich. Durchführung der Versuche nach dem erweiterten Wöhlerverfahren, Ermittlung der Überlebenswahrscheinlichkeit und der Lebensdauerstreuung sowie der Wechselfestigkeit unter Anwendung des Treppenstufenverfahrens. Abhängigkeit der Biege-wechselfestigkeit und des Wechselfestigkeitsverhältnisses von der Zugfestigkeit. Untersuchungen von Verformungserscheinungen, der Rißbildung im Zinküberzug, der Rißausbreitung in der Zinkschicht und im Grundwerkstoff mit dem Lichtmikroskop und dem Rasterelektronenmikroskop.

The effect of hot-dip galvanizing on the fatigue strength of steel wires. Rotating bending fatigue tests on steel wires without and with zinc coat and ultimate strength values of about 400 to 2,000 N/mm². Behaviour of the wires in the range of fatigue strength for finite life and to alternating stresses. Investigation a procedure according to the modified Wöhler test. Determination of the probability of survival and of the scatter of life as well as of the fatigue strength by making use of the staircase method. Dependence of the rotating bending fatigue strength and of the ratio of fatigue strength under alternating stresses on the tensile strength. Examinations concerning the deformation phenomena, the formation of cracks in the zinc coat, propagation of cracks in the zinc coat and in the base metal, by means of the optic and scanning electron microscope.

L'influence de la galvanisation par trempé sur la résistance à la fatigue des fils d'acier. Essais de flexion rotative sur des fils d'acier sans et avec une couche de zinc et montrant des résistances d'environ 400 à 2.000 N/mm². Comportement des fils dans le domaine de résistance à la fatigue pour une durée de vie finie et aux efforts alternés. Conduite des essais selon la méthode de Wöhler modifiée. Détermination de la probabilité de survie et de la variance de la durée de vie ainsi que de la résistance aux efforts alternés, en utilisant la méthode d'escalier. Variation de la résistance à la flexion alternée et du rapport de la résistance aux efforts alternés en fonction de la résistance à la traction. Etudes, à l'aide du microscope optique et du microscope électronique à balayage, des phénomènes de déformation, de la fissuration dans la couche de zinc et de la propagation des fissures dans la couche de zinc et dans le métal de base.

Eisen- und Stahldrähte werden in vielen Industriezweigen in den verschiedensten Formen und Abmessungen zu unterschiedlichen Bauelementen verwendet. In diesem Zusammenhang sei nur auf den Hoch- und Tiefbau, Straßen- und Brückenbau sowie auf den Fahrzeugbau und ferner auf die Anwendungen in Transport- und Förderanlagen hingewiesen. Insbesondere aus den an betriebsbeanspruchten Drahtseilen auftretenden Drahtbrüchen wurde schon früh die Folgerung gezogen, daß die mechanisch-technologischen Kurzprüfungen unter ruhender Belastung keine sicheren Aussagen für die Betriebsbewährung, das heißt über das Verhalten von Drahtfertigerzeugnissen unter Wechselbeanspruchungen zulassen, die durch äußere Kräfte mit unterschiedlicher Frequenz und Amplitude hervorgerufen werden.

Auf die Höhe der Dauerfestigkeit eines Stahldrahtes wirken neben der Art und Herstellung des Werkstoffes vor allem dessen Weiterverarbeitung zu Walzdraht sowie die Vor- und Nachbehandlung des Fertigdrahtes ein¹⁾. Diese Einflüsse erstrecken sich auf die chemische Zusammensetzung, auf den Ziehgrad, die Patentierungsart oder Vergütungsbehandlung sowie auf die Drahtdicke und das Drahtprofil. Von besonderem Einfluß auf die Dauerfestigkeit von Drähten ist deren Oberflächenbeschaffenheit. Hierunter fallen sowohl die Oberflächenausbildung, die durch äußere Kerben (Narben oder Riefen) sowie Abweichungen vom gewünschten Profil die Dauerfestigkeit beeinträchtigen, als

auch die Eigenschaften der oberflächennahen Schichten, die durch besonders ausgebildete Gefüge, Kaltverfestigung, Eigenspannungen und durch eine andere chemische Zusammensetzung die Dauerfestigkeit ebenfalls verändern.

Das Drahtfertigerzeugnis muß vielfach mit einem Schutzüberzug versehen werden, um es vor dem Rosten durch atmosphärische Einwirkungen und Wasser zu schützen; hierzu dienen sowohl Öle oder Fette und Farben oder Lacke als auch metallische und nichtmetallische Überzüge. Zum Oberflächenschutz der Drähte nimmt das Feuerverzinken eine bevorzugte Stellung ein²⁾. Über den Einfluß des Feuerverzinkens auf die mechanischen Kennwerte, wie Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Brucheinschnürung, Biege- und Verwindzahl von Stahldrähten, liegen ausführliche Berichte vor³⁾. Ergebnisse über das Dauerschwingverhalten verzinkter Drähte werden nur vereinzelt mitgeteilt⁴⁾, die noch keine endgültige Aussage zulassen, ob und von welcher Festigkeitsstufe an die Feuerverzinkung zu einer Verminderung der Dauerfestigkeitswerte führt. Einen Beitrag zur Klärung dieser Frage soll die vorliegende Untersuchung liefern.

Versuchswerkstoffe

Angaben über die chemische Zusammensetzung, Behandlung, Dicke des Zinküberzuges sowie Zugfestigkeit und Bruchdehnung (δ_{10}) der untersuchten Drähte enthält *Tafel 1*. Zur Untersuchung gelangten vorwiegend Drähte

*) Vorgetragen in einer Sitzung des Unterausschusses Oberflächenschutz von Drähten am 23. Juni 1971 in Düsseldorf.

¹⁾ Hempel, M.: Draht 6 (1955) S. 119/29 u. 178/83.

²⁾ Pfützenreuter, A.: Draht-Weit 48 (1962) S. 167/74.

³⁾ Horstmann, D.: Stahl u. Eisen 86 (1966) S. 1481/86.

⁴⁾ Hempel, M., u. D. Horstmann: Stahl u. Eisen 82 (1962) S. 1769/81; s. bes. S. 1778, *Tafel 4*.

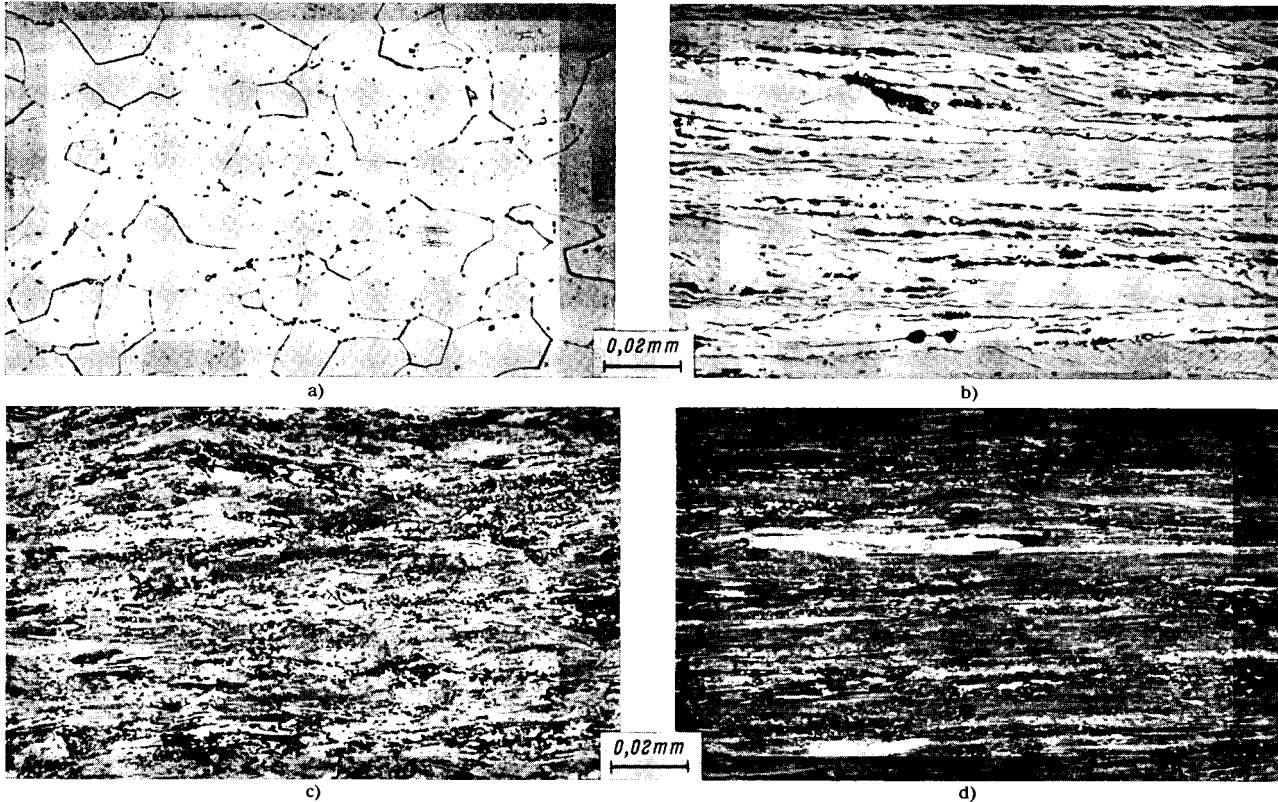
Tafel 1. Chemische Zusammensetzung, Behandlung und mechanische Kennwerte

Draht Nr.	Drahtsorte	Behandlung	Draht- dmr. ¹⁾ mm	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% N
1	Thomasstahl, unberuhigt, D 5-1	weichgeglüht (~ 700 °C)	1,95	0,04	< 0,01	0,40	0,040	0,026	0,010
2	Thomasstahl, unberuhigt, D 5-1	weichgeglüht	1,96	0,06	< 0,01	0,38	0,066	0,036	0,011
3	Thomasstahl, unberuhigt, D 5-1	weichgeglüht	1,96	0,06	< 0,01	0,38	0,066	0,036	0,011
4	Wetterfester Baustahl	weichgeglüht (~ 700 °C)	1,95	0,08	0,39	0,37	0,084	0,022	0,004
5	Siemens-Martin-Stahl, unberuhigt, D 6-2	hartgezogen (~ 70 %)	1,95	0,04	< 0,01	0,20	0,028	0,034	0,004
6	Siemens-Martin-Stahl, unberuhigt, D 6-2	hartgezogen (~ 70 %)	1,95	0,04	< 0,01	0,20	0,028	0,034	0,004
7	Thomasstahl, unberuhigt, D 5-1	hartgezogen (~ 70 %)	1,95	0,04	< 0,01	0,40	0,040	0,026	0,010
8	Thomasstahl, unberuhigt, D 5-1	hartgezogen (~ 70 %)	1,95	0,04	< 0,01	0,40	0,040	0,026	0,010
9	Wetterfester Baustahl	hartgezogen (~ 70 %)	1,95	0,08	0,39	0,37	0,084	0,022	0,004
10	Wetterfester Baustahl	hartgezogen (~ 70 %)	1,95	0,08	0,39	0,37	0,084	0,022	0,004
11	Unlegierter Stahl, D 20-2	hartgezogen	1,58	0,18	0,23	0,31	0,026	0,033	0,007
12	Unlegierter Stahl, D 35-2	hartgezogen	1,94	0,33	0,24	0,57	0,015	0,027	0,007
13	Unlegierter Stahl, D 35-2	hartgezogen	1,94	0,42	0,20	0,53	0,010	0,015	0,005
14	Unlegierter Stahl, D 45-2	hartgezogen	1,94	0,41	0,20	0,54	0,010	0,015	0,005
15	Unlegierter Stahl, D 45-2	patentiert-gezogen	1,95	0,46	0,17	0,54	0,026	0,023	0,005
16	Unlegierter Stahl, D 45-2	patentiert-gezogen	1,95	0,46	0,17	0,54	0,026	0,023	0,005
17	Unlegierter Stahl, D 55-2	patentiert-gezogen	1,95	0,51	0,17	0,61	0,012	0,026	0,006
18	Unlegierter Stahl, D 55-2	patentiert-gezogen	1,95	0,51	0,17	0,61	0,012	0,026	0,006
19	Unlegierter Stahl, D 55-2	hartgezogen	2,20	0,56	0,22	0,54	0,030	0,028	0,005
20	Unlegierter Stahl, D 55-2	hartgezogen	2,20	0,53	0,19	0,59	0,025	0,029	0,007
21	Unlegierter Stahl, D 55-2	hartgezogen	2,02	0,54	0,23	0,64	0,018	0,028	0,007
22	Unlegierter Stahl, D 55-2	hartgezogen	2,28	0,55	0,20	0,62	0,015	0,015	0,004
23	Unlegierter Stahl, D 65-2	patentiert-gezogen	1,95	0,59	0,15	0,59	0,021	0,028	0,005
24	Unlegierter Stahl, D 65-2	patentiert-gezogen	1,95	0,59	0,15	0,59	0,021	0,028	0,005
25	Unlegierter Stahl, D 65-2	hartgezogen	1,90	0,58	0,21	0,64	0,017	0,027	0,007
26	Unlegierter Stahl, D 65-2	hartgezogen	1,95	0,58	0,21	0,64	0,017	0,027	0,007
27	Unlegierter Stahl, D 75-2	patentiert-gezogen	1,95	0,68	0,30	0,54	0,021	0,026	0,007
28	Unlegierter Stahl, D 75-2	patentiert-gezogen	1,95	0,68	0,30	0,54	0,021	0,026	0,007
29	Unlegierter Stahl, D 75-2	patentiert-gezogen	1,95	0,59	0,25	0,62	0,025	0,022	0,004
30	Unlegierter Stahl, D 75-2	patentiert-gezogen	1,95	0,59	0,25	0,62	0,025	0,022	0,004
31	Unlegierter Stahl, D 75-2	ölschlußvergütet	2,42	0,68	0,26	0,75	0,025	0,029	—
32	Unlegierter Stahl, D 75-2	ölschlußvergütet	2,42	0,73	0,24	0,53	0,022	0,031	—
33	Unlegierter Stahl, D 75-2	ölschlußvergütet	2,40	0,42	1,56	0,75	0,022	0,026	—
33	Cr-Si-Stahl	patentiert-gezogen	2,40	0,72	1,32	0,55	0,026	0,006	—

1) Angegeben ist der Drahtdurchmesser ohne Zinküberzug. — 2) v.: verzinkt; n. v.: nicht verzinkt. — 3) Mittelwert aus acht bis zehn Messungen.

im nicht verzinkten und verzinkten Zustand mit einem Durchmesser von rd. 2 mm; nur in einzelnen Fällen wurden Drähte mit einem Durchmesser von etwa 1,5 und 2,4 mm verwendet (Nr. 11 und Nr. 30 bis 33 in *Tafel 1*). Die Ver-

beruhigt vergossene Thomas- und Siemens-Martin-Stähle (0,04 und 0,06 % C), um einen wetterfesten Baustahl (0,08 % C mit Zusatz von Chrom und Nickel), ferner um beruhigt vergossene Stähle mit Kohlenstoffgehalten zwischen 0,18



Bilder 1 a bis d. Gefügebildung einiger Stahldrähte (Längsschliffe; geätzt in alkoholischer Salpetersäure oder Pikrinsäure; 500:1)

Teil- bild	Draht Nr. (nach <i>Tafel 1</i>)	Zug- festigkeit N/mm ²
a	1	453
b	8	855
c	16	1499
d	29	2000

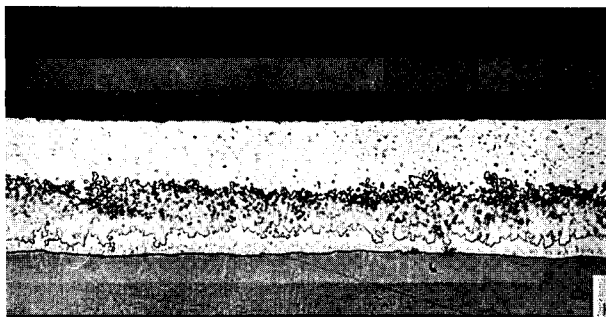
suchswerkstoffe umfassen 17 unlegierte Stähle und zwei Chrom-Silicium-Stähle, und zwar handelt es sich um un-

entweder im weichgeglühten, hartgezogenen oder patentiert-

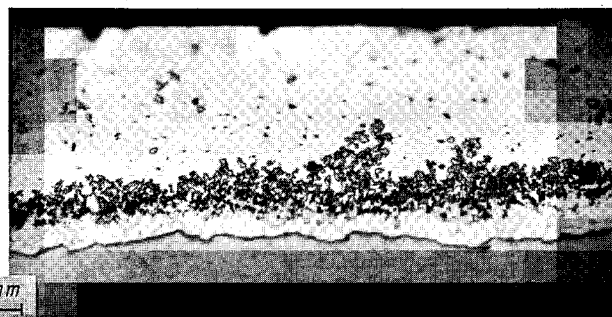
der untersuchten Drähte

% Al	% Cr	% Cu	% Ni	Ober- fläche ²⁾	Zink- auf- lage ³⁾ μm	Zug- festigkeit N/mm ²	Bruch- dehnung ($L_0 = 10d_0$) %
—	—	—	—	v.	37	453	19,2
—	—	—	—	v.	51	452	14,4
—	—	—	—	n. v.	—	399	28,2
0,022	0,54	0,39	0,33	v.	36	548	21,1
—	—	—	—	v.	49	727	10,0
—	—	—	—	n. v.	—	853	1,1
—	—	—	—	v.	42	785	9,8
—	—	—	—	n. v.	—	855	1,5
0,022	0,54	0,39	0,33	v.	38	1011	5,9
—	—	—	—	n. v.	—	1030	3,9
< 0,001	—	—	—	v.	49	1197	1,3
0,015	—	—	—	v.	39	1324	7,4
< 0,001	—	—	—	v.	48	1381	7,0
0,003	—	—	—	n. v.	—	1363	3,8
0,010	—	—	—	v.	38	1417	8,1
—	—	—	—	n. v.	—	1499	2,0
0,016	—	—	—	v.	36	1460	6,9
—	—	—	—	n. v.	—	1534	2,7
0,003	—	—	—	v.	39	1703	7,1
< 0,001	—	—	—	n. v.	—	1639	2,4
0,006	—	—	—	n. v.	—	1243	3,5
< 0,001	—	—	—	n. v.	—	1866	1,8
0,011	—	—	—	v.	40	1597	7,1
—	—	—	—	n. v.	—	1727	2,3
0,005	—	—	—	v.	47	1334	7,5
0,028	—	—	—	v.	37	1766	7,5
—	—	—	—	n. v.	—	1948	1,8
0,011	—	—	—	v.	40	1792	5,3
—	—	—	—	n. v.	—	2000	0,7
—	—	—	—	n. v.	—	1990	3,5
—	0,74	—	—	n. v.	—	1835	3,2
—	0,50	—	—	n. v.	—	1970	5,0
—	—	—	—	n. v.	—	2090	2,8

gezogenen Zustand vor. Die mittlere Dicke des Zinküberzuges der verschiedenen Drähte liegt zwischen 36 und 51 μm. Die Zugfestigkeit der untersuchten Drähte umfaßt einen Bereich von etwa 400 bis 2100 N/mm². Darauf hinzuweisen ist, daß die Zugfestigkeiten der weichgeglühten Drähte durch das Verzinken infolge der einsetzenden künstlichen Alterung geringfügig erhöht werden (Nr. 2 und 3 in *Tafel 1*). Bei den hartgezogenen Drähten (Nr. 5 bis 10) sowie bei



a)



b)

Bilder 2a und b. Aufbau des Zinküberzuges von zwei Stahldrähten (Längsschliffe; Ätzmittel nach Rowland — R 6: 5 Tropfen konz. HNO₃ auf 50 cm³ Amylalkohol; 500:1)

a) Draht Nr. 11: Unlegierter Stahl, D 20-2, hartgezogen; $\sigma_B = 1197$ N/mm²

b) Draht Nr. 25: Unlegierter Stahl, D 65-2, hartgezogen; $\sigma_B = 1334$ N/mm²

den patentiert-gezogenen Drähten (Nr. 15 bis 18, 23 und 24, 26 bis 29) werden die Werte der Zugfestigkeit durch das Feuerverzinken infolge einer Anlaßwirkung vermindert. Bei den Drähten Nr. 13 und 14 sowie 19 und 20 handelt es sich um solche verschiedener Herkunft; daher ist in diesen Fällen zufälligerweise die Zugfestigkeit der verzinkten Drähte etwas höher als die der nicht verzinkten. Bei den zum Vergleich mit untersuchten blanken Drähten eines unlegierten und eines Chrom-Silicium-Stahles (Nr. 30 bis 33 in *Tafel 1*) wurde die hohe Zugfestigkeit von rd. 1800 bis 2100 N/mm² durch eine Ölvergütung oder eine Patentier- und Ziehbehandlung erreicht.

In den *Bildern 1a bis d* sind Beispiele für den Gefügebau verschiedener Drähte wiedergegeben. Das Gefüge der kohlenstoffarmen, weichgeglühten Drähte besteht aus Ferrit mit mehr oder weniger rundlich eingeformten Carbiden (*Bild 1a*). Im hartgezogenen Zustand ist eine deutliche

Kornstreckung zu erkennen (*Bild 1b*). Die gleichen gestreckten Körner erkennt man auch in den patentiert-gezogenen Drähten mit höheren Kohlenstoffgehalten und einem feinlamellaren Perlit (*Bilder 1c und d*). Die ölschlußvergüteten Drähte (Nr. 30 und 32 in *Tafel 1*) weisen ein feines Vergütungsgefüge auf. Die Oberflächenrauheit liegt in den für diese Drähte üblichen Grenzen.

Aufbau, Ausbildung und Dicke des Zinküberzuges werden durch die Zinkbadtemperatur, die Tauchdauer und die Ausziehgeschwindigkeit beeinflusst. Ein Beispiel für den Aufbau der Zinküberzüge ist in *Bild 2a* wiedergegeben, das zeigt, daß die Legierungsschichten und die äußere Zinkschicht im allgemeinen ziemlich gleichmäßig ausgebildet sind. Nur in wenigen Fällen findet man auch Stellen mit ungleichmäßiger Ausbildung der Legierungsschicht, und zwar dadurch verursacht, daß sich im Zinkbad aus dieser Schicht einzelne Kristalle lösen, teilweise mit dem Draht ausgezogen und in die Zinkschicht eingelagert werden (*Bild 2b*).

Versuchsv erfahren und Prüf vorrichtung

Zur Ermittlung der Zeit- und Wechselfestigkeitswerte der nicht verzinkten und verzinkten Drähte wurde das Wöhlerverfahren angewandt. Die Schwingungsbelastung der Drahtproben erfolgte in Luft, das heißt ohne Kühlung der Drahtoberfläche bei der Mittelspannung Null; die Prüffrequenz lag im Bereich von rd. 2000 bis 6000 Schwingungen je min. Die Zahl der Laststufen im Zeitfestigkeitsbereich war vom Werkstoffzustand und von der Zugfestigkeit der Drähte abhängig; bei den weichgeglühten Drähten wurden jeweils 5 Drahtproben auf 3 bis 4 Laststufen geprüft, und bei den hart- oder patentiert-gezogenen Drähten konnten die Versuche im Zeitfestigkeitsbereich ebenfalls mit je 5 Proben auf 4 bis 8 Laststufen ausgeführt werden. Beim Vorliegen einer größeren Anzahl von Einzel-

drähten des gleichen Werkstoffs wurden zwecks genauerer Bestimmung der Streugrenzen in den Wöhlerlinien und der Überlebenswahrscheinlichkeiten P_u von 90, 50 und 10% die Versuche mit je 9, 10 oder 14 Proben auf 4 oder 5 Laststufen im Zeitfestigkeitsbereich ausgeführt. Im Bereich der Wechselfestigkeit wurden die Versuche mit um 15, 20 oder 25 N/mm² abgestuften Spannungen unter Verwendung von etwa 15 bis 40 Proben durchgeführt, um den mittleren Wechselstabilitätswert und die mittlere Standardabweichung unter Zugrundelegung des Treppenstufenverfahrens⁷⁾ zu berechnen. Bei den verzinkten Drahtproben wurden die Spannungen jeweils auf den Durchmesser des nicht verzinkten Drahtes bezogen.

Zur Durchführung der Schwingungsversuche an den Drahtproben wurde eine Umlaufbiegemaschine für Drähte⁸⁾ benutzt, bei der diese durch eine Druckvorspannung in

5) Erlinger, E.: *Fördertechn.* 35 (1942) Nr. 5/6, S. 43/45.

Form eines Eulerschen Knickstabes bogenförmig gespannt werden. Zu diesem Zweck wird die Drahtprobe an einem Ende in dem am Motor befindlichen Spannfutter fest eingespannt. Der Motor selbst ist um eine senkrechte Achse pendelnd aufgehängt, seine Masse wird durch ein Gegen-

abschnittes in der Mitte der freien Prüfstrecke auftritt. Die Einspannlänge der Drähte wurde gleich dem 150fachen des Drahtdurchmessers gewählt. Um einen ruhigen Lauf der Maschine zu gewährleisten und unerwünschte Zusatzbeanspruchungen durch Schwingen der Drähte in verschie-

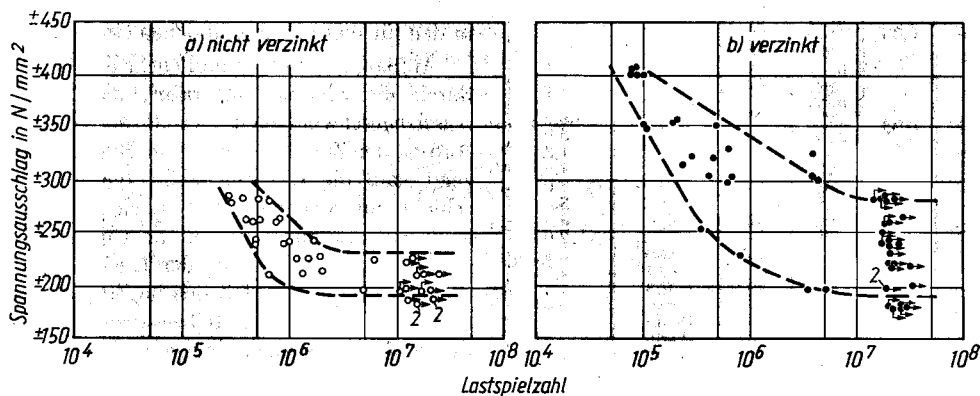


Bild 3. Drähte Nr. 2 und 3

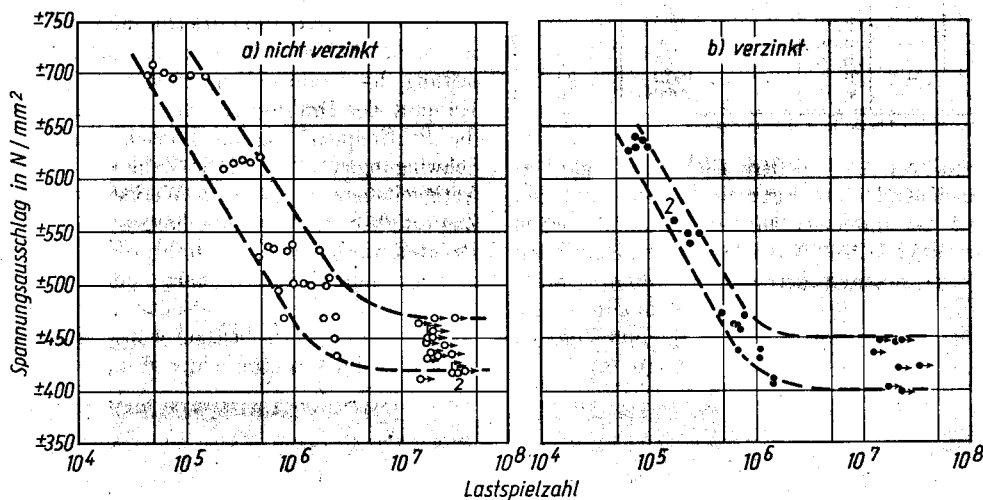


Bild 4. Drähte Nr. 7 und 8

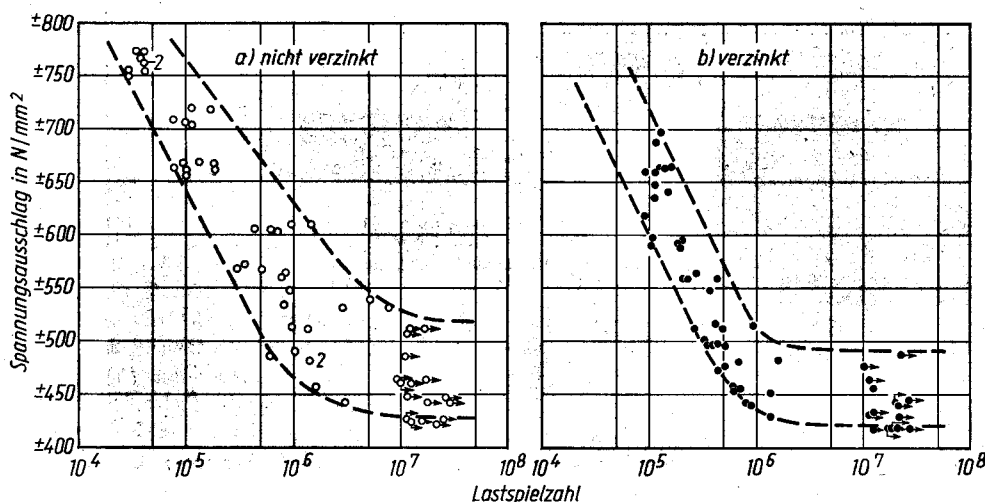


Bild 5. Drähte Nr. 9 und 10

Bilder 3 bis 7. Wöhlerlinien verzinkter und nicht verzinkter Stahldrähte unterschiedlicher Festigkeit (vgl. Tafel 1)

gewicht am unteren Ende der Schwenkspindel ausgeglichen, so daß unerwünschte Zusatzbeanspruchungen in der Probe vermieden werden. Das andere Drahtende ruht in einem Druckkugellager, an das sich die Kraftmeßfeder mit der Belastungs- und Meßvorrichtung anschließt. Durch diese Belastungsanordnung wird erreicht, daß das Biegemoment an den Einspannungen gleich Null wird und daß die Höchstspannung nur in den Randfasern eines kurzen Draht-

denen Schwingungsformen zu vermeiden, wurden von Hand gerichtete Drähte verwendet und die Prüffrequenz im Bereich zwischen 2000 und 6000/min entsprechend eingestellt.

V Versuchsergebnisse

Die Auswertung der an den verschiedenen Drähten erhaltenen Ergebnisse aus den Dauerschwingversuchen erstreckten sich auf die Darstellung und den Vergleich der

Wöhlerlinien nicht verzinkter und verzinkter Drähte, auf die Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Biegewechsel-

und 3, 7 und 8, 9 und 10, 17 und 18 sowie 26 und 27 in Form von Wöhlerlinien wiedergegeben. Da sich die Versuchs-

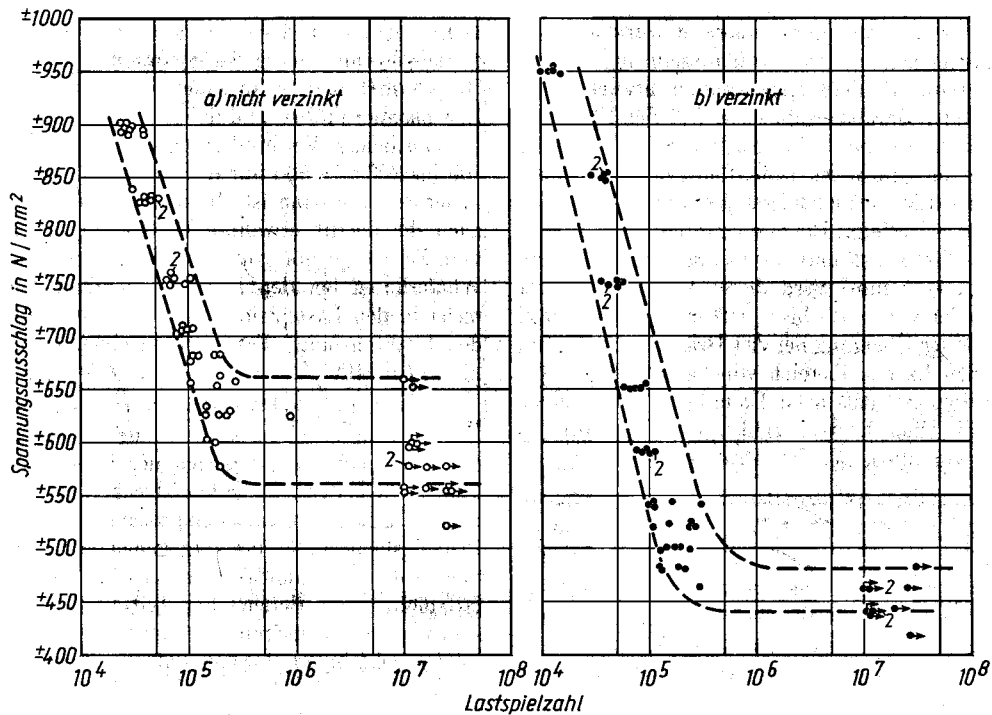


Bild 6. Drähte Nr. 17 und 18

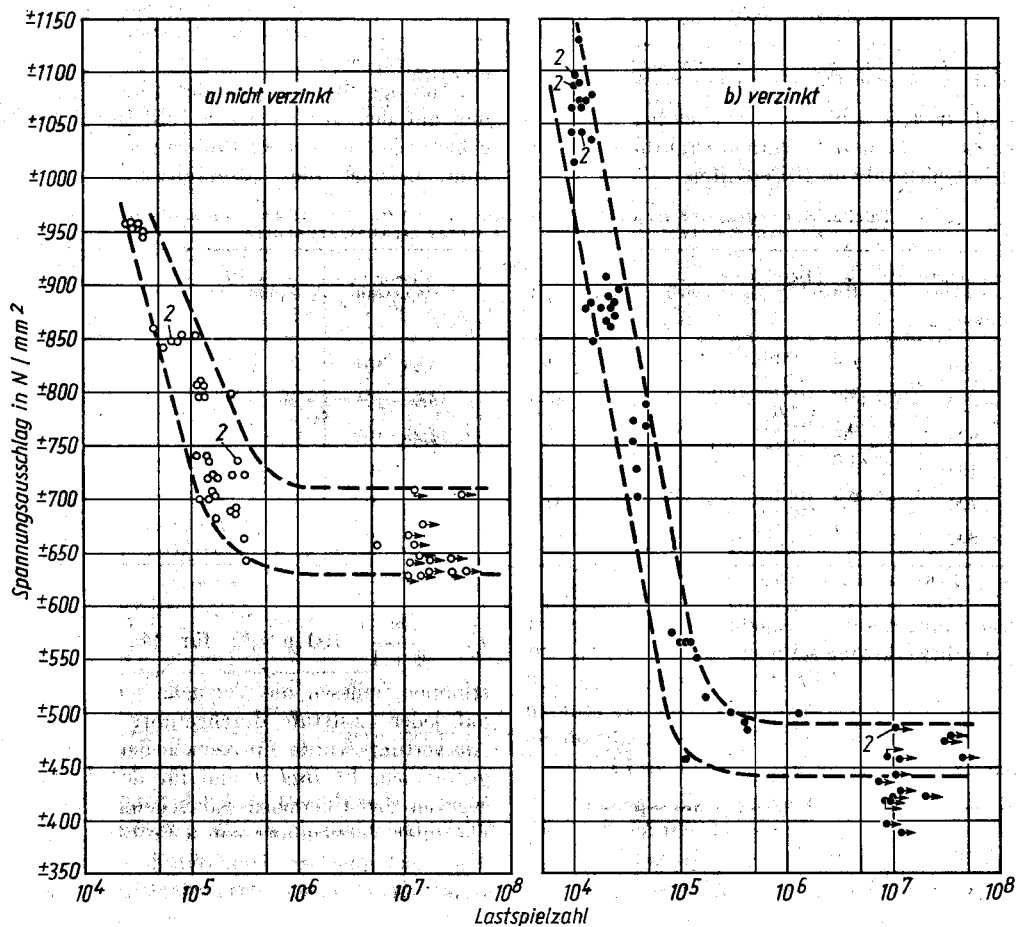


Bild 7. Drähte Nr. 26 und 27

Bilder 3 bis 7. Wöhlerlinien verzinkter und nicht verzinkter Stahldrähte unterschiedlicher Festigkeit (vgl. Tafel 1)

festigkeit und Zugfestigkeit sowie auf die Untersuchung und Beurteilung der aufgetretenen Dauerbrüche.

In den Bildern 3 bis 7 sind Beispiele für die Wertepaare von Spannungsausschlag und Lastspielzahl der Drähte Nr. 2

werte sowohl im Zeit- als auch im Wechselfestigkeitsbereich nur einem mehr oder weniger großen Streubereich zuordnen lassen, wurde in den Schaubildern keine mittlere Wöhlerlinie, sondern zur Kennzeichnung der Streubreite eine untere

und obere Grenzlinie eingezeichnet. Besonders sei darauf hingewiesen, daß zur Verringerung der Bildzahl die Wöhlerlinien jeweils für zwei Behandlungszustände in den einzelnen Schaubildern wiedergegeben sind. Insgesamt wurden in der vorliegenden Untersuchung die Wöhlerlinien an Proben von 16 verzinkten und 17 nicht verzinkten Drahtwerkstoffen bestimmt (Tafel 1). Daraus ergibt sich, daß der Übergang vom Zeitfestigkeits- in den Wechselfestigkeitsbereich in den Wöhlerlinien der Drähte Nr. 1 bis 10 mit Zugfestigkeiten von etwa 400 bis 900 N/mm² nach Lastspielzahlen im Bereich von $> 10^6$ und $\leq 10^7$ erfolgt. Bei den Drähten Nr. 11 bis 14, 17 bis 20, 22 bis 29 sowie 32 und 33 mit Zugfestigkeiten von etwa 1000 bis 2000 N/mm² wird dieser Übergang bereits nach Lastspielzahlen von $> 10^5$ bis $\leq 10^6$ erreicht; allerdings verschiebt sich dieser Übergang bei vier Drähten (Nr. 15, 16, 21 und 31) in den Lastspielbereich von $> 10^6$ bis $< 10^7$. Darauf hinzuweisen ist, daß noch Dauerbrüche an einigen Drähten oberhalb einer Lastspielzahl von 10^7 eingetreten sind, und zwar vor allem bei den Drähten niedriger Zug-

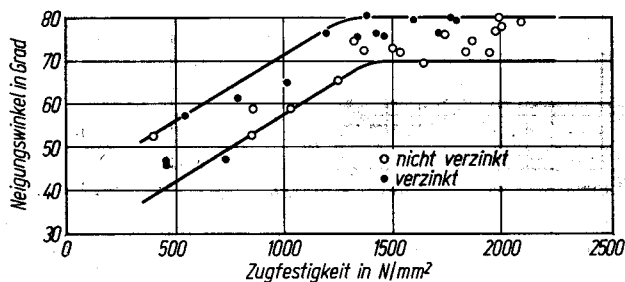


Bild 8. Mittlerer Neigungswinkel der Wöhlerlinien im Zeitfestigkeitsbereich zur Abszissenachse (Lastspielzahl) in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit verzinkter und nicht verzinkter Stahldrähte

festigkeit (Draht Nr. 1, 2, 4 bis 9); aber auch bei den hochfesten Drähten Nr. 15, 30 und 31 wurden Drahtbrüche oberhalb der Grenzlastspielzahl von 10^7 erhalten.

1300 N/mm² einem gleichbleibenden Winkel von etwa 70 bis 80° zustrebt. Dabei nimmt dieser Winkel bei den verzinkten Drähten stärker mit der Zugfestigkeit zu als bei den nicht verzinkten. Dies bedeutet, daß im ersten Fall eine geringe Verminderung des Spannungsausschlages (um etwa 50 N/mm²) bereits zu einer wesentlichen Erhöhung der Lebensdauern führt, und daß im zweiten Fall selbst bei einer beträchtlichen Verminderung der Spannungen (um etwa 100 bis 200 N/mm²) nur eine geringe Zunahme der Lebensdauern zu erwarten ist. In Übereinstimmung hiermit steht auch die bereits erwähnte Feststellung, daß der Übergang vom Zeitfestigkeits- zum Wechselfestigkeitsbereich in den Wöhlerlinien bei den Drähten niedriger Zugfestigkeit zumeist in den Lastspielbereich von $> 10^6$ bis $\leq 10^7$ und bei den Drähten hoher Festigkeit in einen solchen von $> 10^5$ bis $< 10^6$ fällt.

Bei der Besprechung der ertragbaren Lebensdauern im Übergangsbereich von der Zeit- zur Wechselfestigkeit wurde darauf hingewiesen, daß sich der Lebensdauerstreubereich über mehr als eine Dekade erstrecken kann (Bild 3 bis 7). Einige Angaben, mit welchen prozentualen Streuungen in den Bruchlastspielzahlen bei vorgegebenem Spannungsausschlag und in den Spannungsausschlägen bei vorgegebener Bruchlastspielzahl im Bereich der Zeitfestigkeit zu rechnen ist, sind in Tafel 2 zusammengestellt. Aus diesen wenigen Beispielen geht bereits hervor, daß die Streuungen der Bruchlastspielzahlen ($\pm \Delta N_{Br}$) je nach Werkstoff und Höhe des Spannungsausschlages einen Bereich von etwa 30 bis 60% umfassen, die Streuungen der Spannungsausschläge ($\pm \Delta \sigma_a$) dagegen bei vorgegebener Lastspielzahl (N_{Br}) nur einen solchen von etwa 5 bis 15%.

Aus den Wöhlerlinien der Bilder 3 bis 7 geht hervor, daß auf den verschiedenen Laststufen des Zeitfestigkeitsgebietes je 5 oder mehr Proben geprüft wurden. Um jedoch zum Beispiel die Überlebenswahrscheinlichkeit⁶⁾

Tafel 2. Streuung der Bruchlastspielzahlen und der Spannungsausschläge im Zeitfestigkeitsbereich einiger Drahtwerkstoffe

Draht-Nr. ¹⁾	Spannungsausschlag N/mm ²	Bereich der Bruchlastspielzahlen ²⁾	Streuung der Bruchlastspielzahlen %	Bruchlastspielzahl	Bereich der Spannungsausschläge ²⁾ N/mm ²	Streuung der Spannungsausschläge %
1	± 350	2,3 · 10 ⁵ bis 9,0 · 10 ⁵ (5,65 · 10 ⁵)	± 59,5	5,65 · 10 ⁵	310 bis 370 (340)	± 8,8
12	± 550	9,0 · 10 ⁴ bis 21,0 · 10 ⁴ (15,0 · 10 ⁴)	± 40,0	15,0 · 10 ⁴	475 bis 590 (532,5)	± 10,8
13	± 600	6,5 · 10 ⁴ bis 16,0 · 10 ⁴ (11,25 · 10 ⁴)	± 42,2	11,25 · 10 ⁴	490 bis 670 (580)	± 15,5
	± 700	4,8 · 10 ⁴ bis 9,8 · 10 ⁴ (7,3 · 10 ⁴)	± 34,2	7,3 · 10 ⁴	555 bis 755 (655)	± 15,3
	± 700	6,3 · 10 ⁴ bis 15,3 · 10 ⁴ (10,8 · 10 ⁴)	± 41,6	10,8 · 10 ⁴	620 bis 740 (680)	± 8,8
14	± 800	3,4 · 10 ⁴ bis 6,4 · 10 ⁴ (4,9 · 10 ⁴)	± 30,6	4,9 · 10 ⁴	740 bis 830 (785)	± 5,7

¹⁾ Siehe Tafel 1. — ²⁾ In Klammern sind die Mittelwerte angegeben.

Zur Kennzeichnung des unterschiedlichen Verhaltens der verschiedenen Drahtwerkstoffe sei noch auf den Verlauf der Wöhlerlinien im Bereich der Zeitfestigkeit eingegangen, und zwar unter Heranziehung der Neigungswinkel der unteren und oberen Begrenzungslinie des Lebensdauerstreubandes in den Wöhlerlinien zur Abszissenachse (Bilder 3 bis 7).

Aus den Berechnungen des Neigungswinkels gemäß

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_a(N_1) - \sigma_a(N_2)}{N_2 - N_1}$$

wurden die Mittelwerte der Neigungswinkel α für die verschiedenen Drahtwerkstoffe bestimmt und in Bild 8 in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit, unter Kennzeichnung des Oberflächenzustandes, aufgetragen. Hier zeigt sich nun, daß im Zeitfestigkeitsbereich der Neigungswinkel der Wöhlerlinien mit wachsender Zugfestigkeit von etwa 45 bis 70° zunimmt und oberhalb einer Zugfestigkeit von etwa

$$P_{\bar{u}} = \frac{m}{2+1} \cdot 100 \text{ in } \% \text{*) für } 90, 50 \text{ und } 10\% \text{ zu be-}$$

stimmen, müssen die Versuche mit mindestens 9 Proben auf jeder Laststufe durchgeführt werden. Eine derartige Auswertung wurde für verschiedene Drahtwerkstoffe vorgenommen. In Bild 9 sind für den Werkstoff Nr. 24 die Kurven der Überlebenswahrscheinlichkeiten eingezeichnet, die unter Verwendung von 9 Proben erhalten wurden. Zur Kennzeichnung der Streubreite in den Bruchlastspielzahlen ist in diesem Bild noch das Lastspielzahlverhältnis $P_{\bar{u}90}/P_{\bar{u}10}$ mit eingetragen. Der allgemein zu beobachtende Anstieg der Verhältniswerte mit abnehmendem Spannungsausschlag $\pm \sigma_a$ bestätigt, daß die Lebensdauerstreuung bei Annäherung an den Wechselfestigkeitsbereich größer wird.

⁶⁾ Maennig, W.-W.: Mater. Prüf. 12 (1970) S. 124/31.

*) Hier bedeutet n die Anzahl der auf einer Laststufe geprüften Proben und m die Ordnungszahl, wobei $m = 1$ dem Größtwert und $m = n$ dem Kleinstwert der Bruchlastspielzahl zugeordnet ist.

Aus diesen Bildern wurden die Lastspielzahlen für $P_{\bar{u}} = 90$, 50 und 10% entnommen und auf den jeweiligen Spannungsstufen des Zeitfestigkeitsbereiches der Wöhlerlinien eingetragen.

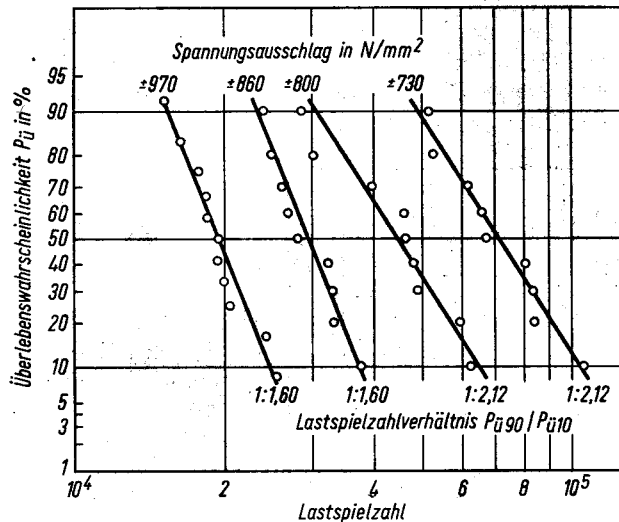


Bild 9. Überlebenswahrscheinlichkeit des Stahldrahtes Nr. 24 (unlegierter Stahl, D 65-2, patentiert-gezogen; $\sigma_B = 1727 \text{ N/mm}^2$) bei verschiedenen Spannungsamplituden im Zeitfestigkeitsbereich

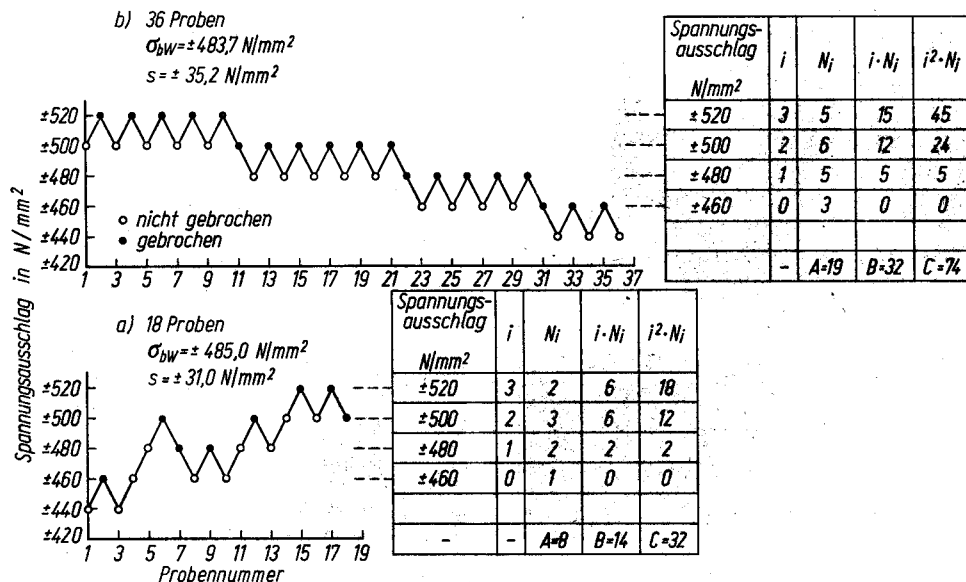
Die Versuche im Wechselfestigkeitsbereich wurden auf den verschiedenen um 15, 20 oder 25 N/mm² abgestuften Spannungsniveaus mit je 5 Proben ausgeführt, und zwar wurden in den verschiedenen Versuchsreihen je nach der Menge des vorhandenen Drahtwerkstoffes etwa 16 bis 42 Proben verwendet. Die Bestimmung des mittleren Wechselfestigkeitswertes für eine Bruchhäufigkeit von 50%

Beispiel enthält Bild 10 eine derartige Auswertung für den Drahtwerkstoff Nr. 12, und zwar unter Verwendung von 18 bzw. 36 Proben. Zur Berechnung des mittleren Wechselfestigkeitswertes (σ_{BW}) für eine Bruchhäufigkeit von 50% wurde die Beziehung $\sigma_{BW} = \sigma_{a(0)} + d \cdot (B/A - 0,5)$ benutzt; hierin bedeutet $\sigma_{a(0)}$ die niedrigste Spannungsstufe, bei der ein Dauerbruch eingetreten ist und d den Abstand der Laststufen; die Größen A und B sind aus der in Bild 10 eingetragenen Tafel zu entnehmen, und zwar stellt A die Anzahl der gebrochenen Proben und B die Summe der Produkte aus $i \cdot N_i$ dar, wobei i die Nummer der Spannungsstufe bedeutet. Die Standardabweichung s des Mittelwertes σ_{BW} wurde unter Anwendung der Beziehung

$$s = 1,62 \cdot d \cdot \left(\frac{A \cdot C - B^2}{A^2} + 0,029 \right)$$

berechnet, wobei $C = \sum i^2 \cdot N_i$ ist; diese Formel gilt mit ausreichender Genauigkeit, falls der Wert für den Klammerausdruck $> 0,3$ ist. Wie Bild 10 erkennen läßt, sind die Abweichungen in den mittleren Wechselfestigkeitswerten und in den Streuungen bei Verwendung von 18 und 36 Proben äußerst gering.

In Tafel 3 sind die so für die Drahtwerkstoffe Nr. 1 bis 33 berechneten mittleren Wechselfestigkeitswerte und Standardabweichungen zusammengestellt; außerdem sind die Zugfestigkeiten und unter Kennzeichnung des Oberflächenzustandes (v.: verzinkt; n.v.: nicht verzinkt) die aus den Wöhlerlinien entnommenen mittleren Wechselfestigkeitswerte $\pm \sigma_{BW(10^7)}$ und Streubereiche $\pm s$ angegeben. Die Unterschiede in den Wechselfestigkeitswerten und Standardabweichungen sind für die aus den Wöhlerlinien entnommenen und unter Anwendung des Treppenstufenverfahrens



Bilder 10a und b. Bestimmung der Biegewechselfestigkeit nach dem Treppenstufenverfahren mit 18 und 36 Proben eines verzinkten Stahldrahtes. Draht Nr. 12: Unlegierter Stahl, D 35-2, hartgezogen; $\sigma_B = 1324 \text{ N/mm}^2$

erfolgte sowohl zeichnerisch durch Einzeichnung der Streugrenzen in den Spannungsausschlägen als auch rechnerisch unter Anwendung des Treppenstufenverfahrens^{7) bis 9)}. Aus den im Wechselfestigkeitsbereich geprüften Proben wurden 11 bis 36 Proben ausgewählt und unter Kennzeichnung, ob im Schwingungsversuch gebrochen oder nicht, für die verschiedenen Spannungsausschläge über der laufenden Probennummer in einem Schaubild eingezeichnet. Als

berechneten Werte gering, das heißt, die versuchsmäßig bestimmten und berechneten Werte lassen eine gute Übereinstimmung erkennen.

Aus Bild 11 geht der Einfluß der Zugfestigkeit (σ_B) auf die Höhe der Biegewechselfestigkeit $\sigma_{BW(10^7)}$ von Stahldrähten ohne und mit Zinküberzug hervor. Unterhalb einer Zugfestigkeit von etwa 800 bis 1000 N/mm² wirkt die Feuerverzinkung bei einer Dicke der Zinkschicht von etwa 36 bis 51 µm nur geringfügig auf die Wechselfestigkeit der Drähte ein. Mit wachsender Zugfestigkeit nehmen dann die Wechselfestigkeitswerte der nicht verzinkten

⁷⁾ Ransom, J. T.: A guide to statistical methods for use in fatigue testing. Amer. Soc. Test. Mater., Comm. E-9, 1955.

⁸⁾ Bühler, H., u. W. Schreiber: Arch. Eisenhüttenwes. 28 (1957) S. 153/56.

⁹⁾ Gassner, E., u. O. Svenson: Stahl u. Eisen 82 (1962) S. 276/82.

Drähte im allgemeinen zu; die feuerverzinkten Drähte erreichen dagegen im Zugfestigkeitsbereich von etwa 1000 bis 1800 N/mm² praktisch den gleichen Wechselfestigkeitswert (im Mittel etwa ± 435 N/mm²).

und verzinkten Drähten an der oberen Grenze des eingezeichneten Streubereiches, um dann mit wachsender Zugfestigkeit stetig abzunehmen, wobei sich das Wechselfestigkeitsverhältnis der nicht verzinkten Drähte nach der oberen, das

Tafel 3. Vergleich der Biegewechselfestigkeiten von Stahldrähten ohne und mit Zinkauflage

Draht Nr. ¹⁾	Oberfläche ²⁾	Zug- festigkeit N/mm ²	Biegewechselfestigkeit (± σ _{BW}) und Streuung (± s)						Verhältnis ⁴⁾ σ _{BW} /σ _B
			Aus Wöhlerlinien entnommen			Errechnet unter Anwendung des Treppenstufenverfahrens ³⁾			
			σ _{BW} (10 ⁷) N/mm ²	N/mm ² ^s	%	σ _{BW} (10 ⁷) N/mm ²	^s N/mm ²		
1	v.	453	± 235	± 25	± 10,6	± 253	(13)	± 15	0,520
2	v.	452	± 235	± 45	± 19,0	—	—	—	0,520
3	n. v.	399	± 210	± 20	± 9,5	± 215	(22)	± 29	0,525
4	v.	548	± 330	± 50	± 15,2	± 342	(22)	± 69	0,600
5	v.	727	± 375	± 35	± 9,4	± 380	(15)	± 39	0,515
6	n. v.	853	± 415	± 25	± 6,0	± 431	(13)	± 23	0,485
7	v.	785	± 425	± 25	± 5,9	± 433	(14)	± 23	0,540
8	n. v.	855	± 445	± 25	± 5,6	± 457	(17)	± 35	0,520
9	v.	1011	± 455	± 35	± 7,7	± 456	(21)	± 37	0,450
10	n. v.	1030	± 475	± 45	± 9,5	± 487	(22)	± 52	0,460
11	v.	1197	± 370	± 30	± 8,1	± 382	(18)	± 35	0,310
12	v.	1324	± 470	± 30	± 6,4	± 484 ⁵⁾	(36)	± 35	0,355
13	v.	1381	± 485	± 35	± 7,2	± 487	(20)	± 60	0,350
14	n. v.	1363	± 630	± 40	± 6,4	± 638	(19)	± 45	0,460
15	v.	1417	± 525	± 15	± 2,9	± 535	(11)	± 9	0,370
16	n. v.	1499	± 580	± 50	± 8,6	± 586	(31)	± 87	0,385
17	v.	1460	± 460	± 20	± 4,4	± 473	(13)	± 14	0,315
18	n. v.	1534	± 610	± 50	± 8,2	± 620	(18)	± 62	0,395
19	v.	1703	± 455	± 25	± 5,5	± 462	(14)	± 21	0,265
20	n. v.	1639	± 545	± 15	± 2,8	± 553	(14)	± 16	0,330
21	n. v.	1243	± 485	± 15	± 3,1	± 486	(16)	± 21	0,390
22	v.	1866	± 490	± 50	± 12,8	± 505	(30)	± 75	0,265
23	v.	1597	± 440	± 20	± 4,6	± 450	(16)	± 23	0,275
24	n. v.	1727	± 670	± 30	± 4,5	± 686	(19)	± 46	0,390
25	v.	1334	± 390	± 50	± 12,8	± 395	(29)	± 88	0,290
26	v.	1766	± 465	± 25	± 5,4	± 477	(12)	± 19	0,265
27	n. v.	1948	± 670	± 40	± 6,0	± 666	(18)	± 65	0,345
28	v.	1792	± 510	± 40	± 7,9	± 513	(21)	± 49	0,285
29	n. v.	2000	± 675	± 45	± 6,7	± 686	(20)	± 57	0,340
30	n. v.	1990	± 790	± 60	± 7,6	± 797	(18)	± 96	0,395
31	n. v.	1835	± 560	± 50	± 9,0	± 570	(18)	± 75	0,305
32	n. v.	1970	± 745	± 25	± 3,4	± 748	(15)	± 28	0,380
33	n. v.	2090	± 610	± 30	± 4,9	± 610	(16)	± 23	0,290

1) Siehe Tafel 1. — 2) v.: verzinkt; n. v.: nicht verzinkt. — 3) In Klammern ist die Anzahl der zur Errechnung verwendeten Proben angegeben. — 4) Zur Errechnung des Wechselfestigkeitsverhältnisses wurde für σ_{BW} der aus den Wöhlerlinien entnommene mittlere Wechselfestigkeitswert benutzt. — 5) Vgl. Bild 10 b.

In der letzten Spalte der *Tafel 3* ist das Wechselfestigkeitsverhältnis der Drähte, das heißt das Verhältnis von Wechselfestigkeit zu Zugfestigkeit, eingetragen. Bei den weichgeglühten und hartgezogenen Drähten mit Kohlenstoffgehalt $< 0,1\%$ (Nr. 1 bis 10) überdecken diese Verhältniswerte einen Bereich von 0,460 bis 0,600 und bei den hart- und patentiert-gezogenen Drähten mit höherem Kohlenstoffgehalt (0,18 bis 0,72%) einen Bereich von 0,265 bis 0,460. *Bild 12* enthält die Auftragung dieser Verhältniswerte unter Kennzeichnung der Mittelwerte und Streu-

der verzinkten Drähte nach der unteren Streugrenze verschiebt.

Rißeinleitung und -ausbreitung

Bei der Umlaufbiegebeanspruchung ist der Ausgangspunkt der Dauerbrüche an der Oberfläche der Drähte durch die beim Ziehen unvermeidbaren Oberflächenfehler und durch den Wert der Höchstspannung im mittleren Teil der

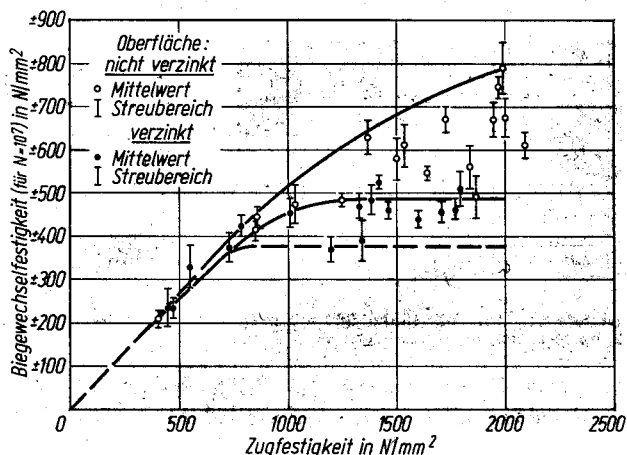


Bild 11. Biegewechselfestigkeit $\sigma_{BW}(10^7)$ verzinkter und nicht verzinkter Stahldrähte in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit (σ_B)

grenzen in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit. Diese Darstellung zeigt besonders deutlich, daß es nicht möglich ist, einen mittleren Verhältniswert von Wechselfestigkeit zu Zugfestigkeit (σ_{BW}/σ_B) für den gesamten Zugfestigkeitsbereich anzugeben. Im Zugfestigkeitsbereich von etwa 400 bis 800 N/mm² liegen die Verhältniswerte von nicht verzinkten

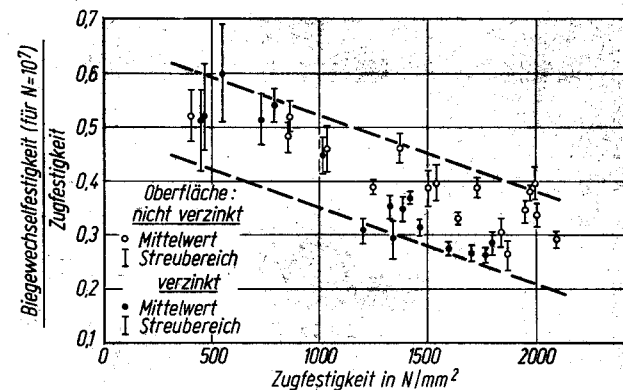
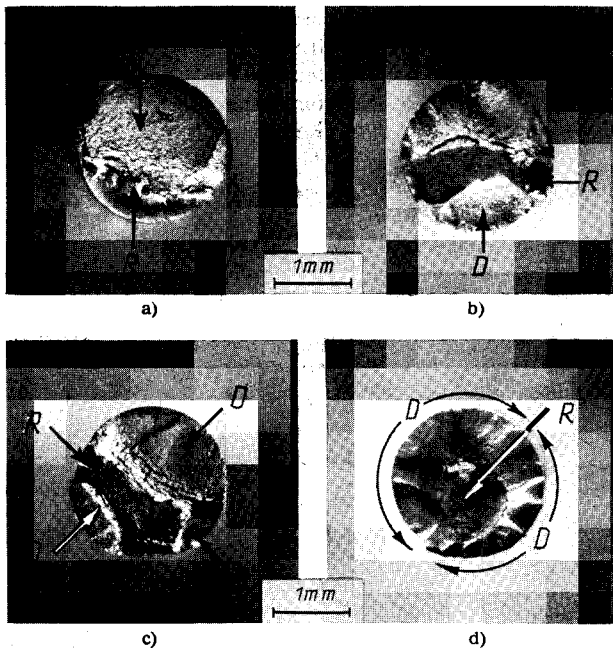


Bild 12. Wechselfestigkeitsverhältnis $\sigma_{BW}(10^7)/\sigma_B$ verzinkter und nicht verzinkter Stahldrähte in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit

freien Prüflänge vorgegeben. Es sei erwähnt, daß die Brüche vielfach auch an Stellen auftreten, bei denen die Spannungen etwa 20 bis 25% unterhalb des Höchstwertes liegen. Bei der benutzten Beanspruchungsart wird der Dauerbruch je nach Größe und Tiefe des Oberflächenfehlers an einer oder an mehreren Stellen seinen Ausgang nehmen. Die in den *Bildern 13a und b* wiedergegebenen Dauerbruchflächen lassen erkennen, daß der Bruchausgang bei geringen Spannungsamplituden an einer Stelle oder an zwei nahezu gegenüberliegenden Oberflächenstellen nach unterschiedlichen Laufzeiten erfolgen kann. Vielfach wird neben dem Restbruch



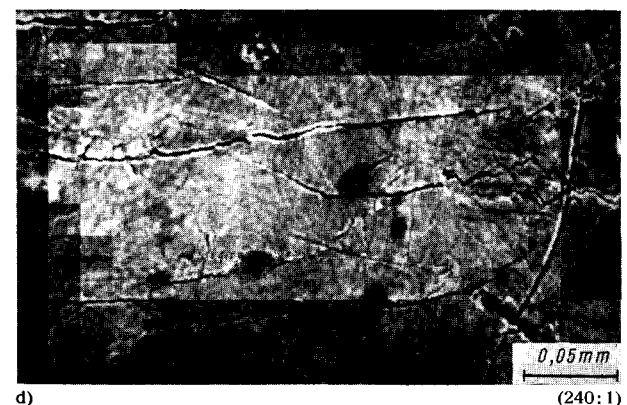
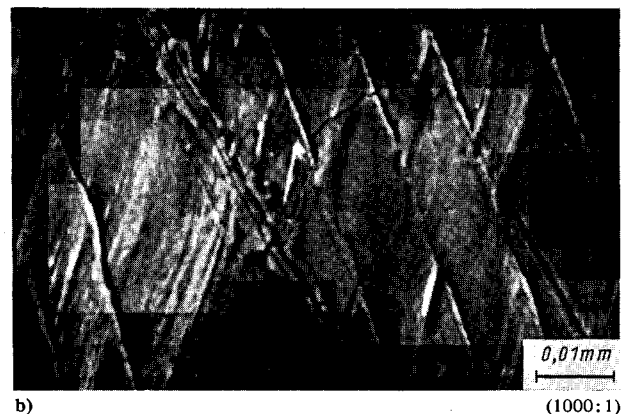
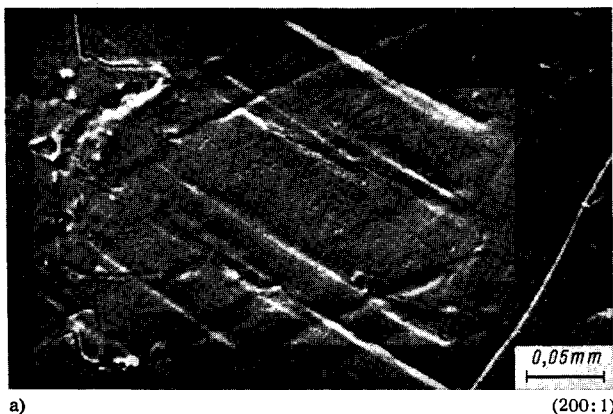
Bilder 13 a bis d. Ausgang des Dauerbruches an einer Stelle a), an zwei b) oder mehreren Stellen c) und d) der Oberfläche eines nicht verzinkten Stahldrahtes (10:1). D: Dauerbruch; R: Restbruch.

Draht Nr. 14: Unlegierter Stahl, D 45-2, hartgezogen; $\sigma_B = 1363 \text{ N/mm}^2$.

- a) Probe Nr. 7: $\sigma_a = \pm 652 \text{ N/mm}^2$, $N_{Br} = 0,220 \cdot 10^6$
b) Probe Nr. 49: $\sigma_a = \pm 750 \text{ N/mm}^2$, $N_{Br} = 0,0605 \cdot 10^6$
c) Probe Nr. 2: $\sigma_a = \pm 800 \text{ N/mm}^2$, $N_{Br} = 0,045 \cdot 10^6$
d) Probe Nr. 34: $\sigma_a = \pm 898 \text{ N/mm}^2$, $N_{Br} = 0,0255 \cdot 10^6$

nur eine Dauerbruchfläche festgestellt, deren Ausdehnungen vom Drahtwerkstoff sowie von der Höhe und Dauer der Wechselbelastung abhängen; mit abnehmendem Spannungsausschlag und wachsender Bruchlastspielzahl nimmt im allgemeinen die Fläche des Dauerbruches zu und die des Restbruches ab. Bei hohen Spannungsamplituden und niedrigen Bruchlastspielzahlen werden meist mehrere Dauerbruchzonen festgestellt (Bilder 13c und d), die von verschiedenen Oberflächenstellen ausgehen und in verschiedenen Bruchebenen verlaufen. Bemerkenswert ist ferner, daß der makroskopische Verlauf des Dauerbruches nahezu senkrecht zur Drahtachse erfolgt, während der Restbruch je nach der Festigkeit des Drahtes unter geringer Einschnürung als Verformungsbruch etwas schräg zur Drahtachse oder als spröder, faseriger Bruch nahezu parallel zur Achse patentiertgezogener, hochfester Drähte erfolgt.

Untersuchungen an verzinkten Blechen haben bereits gezeigt⁴⁾, daß sich hier die Anrisse in der Zinkschicht bilden, die bei entsprechender Höhe des Spannungsausschlages mit zunehmender Beanspruchungsdauer auch in das Stahlblech hinein fortschreiten und zum Dauerbruch führen. Diese Feststellungen konnten bei den Versuchen an verzinkten Stahldrähten bestätigt werden. Einige Beispiele für diese Befunde zeigen die Bilder 14a bis d, in denen das Aussehen verzinkter Drahtoberflächen nach einer Wechselbelastung bei einer Betrachtung mit dem Rasterelektronenmikroskop wiedergegeben ist. Neben einem Hauptriß, der zum Bruch der Probe geführt hat, treten vielfach Gleitlinien in der Zinkschicht auf, die gegenüber den in einem nicht verzinkten



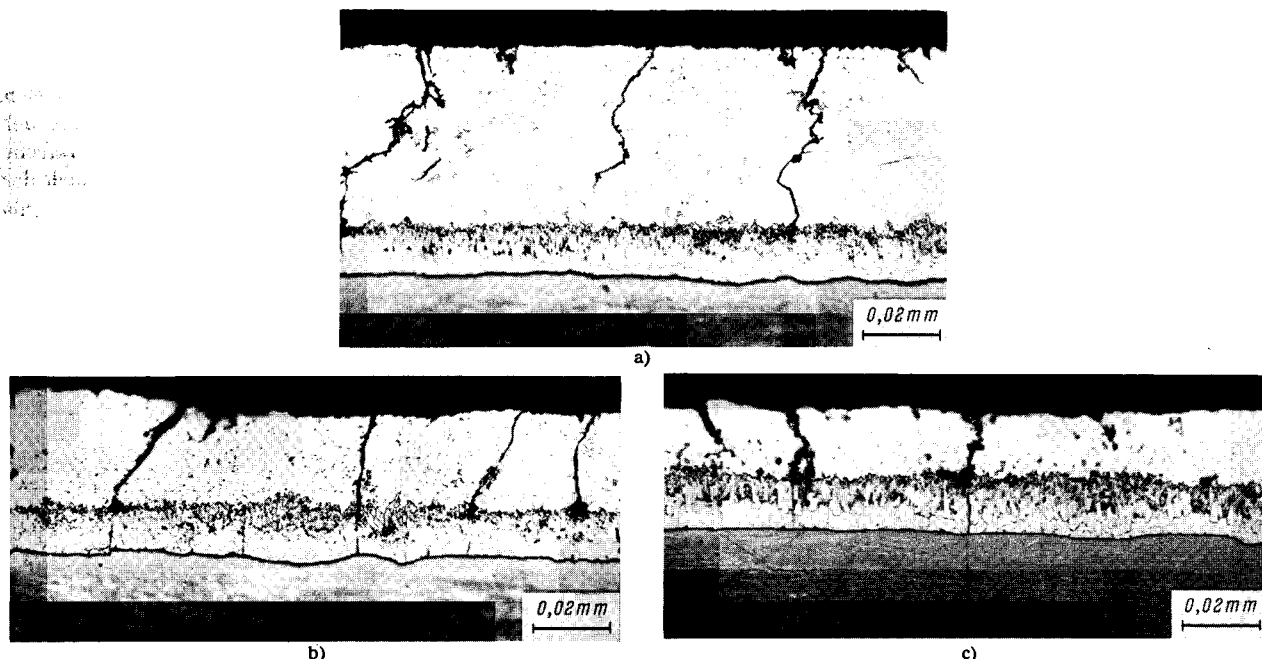
Bilder 14 a bis d. Gleitlinien und Rißbildung auf der Oberfläche wechselbeanspruchter, verzinkter Stahldrähte bei Betrachtung im Rasterelektronenmikroskop

Teilbild	Draht Nr. ¹⁾	Drahtsorte ¹⁾	Behandlung	Zugfestigkeit N/mm ²	Proben-Nr.	Spannungsausschlag N/mm ²	Bruchlastspielzahl 10 ⁶
a	28	unleg. Stahl D 75,2	patent.-gezogen	1792	18	± 501	0,384
b	2	Thomasstahl D 5-1	weichgeglüht	452	56	± 282	$N = 22\ 500^2)$
c/d	15	unleg. Stahl D 45,2	patent.-gezogen	1417	21	± 560	0,304

¹⁾ Vgl. Angaben in Tafel I. — ²⁾ Probe nicht gebrochen; N: Grenzlastspielzahl.

Stahl¹⁰⁾ entstehenden einen größeren Abstand besitzen und wesentlich häufiger gekreuzt angeordnet sind (*Bild 14a*). Dieses Verhalten dürfte auf dem unterschiedlichen Aufbau des kubisch-raumzentrierten Kristallgitters beim Stahl und des hexagonalen Gitters beim Zink beruhen. Bei langfristig

mit niedrigen Festigkeiten lassen diese Anrisse mit ihren Spannungserhöhungen im Grundwerkstoff nicht voll zur Wirkung kommen. Bei Drähten mit höherer Festigkeit und geringerem plastischem Verformungsvermögen wirkt sich die Spannungserhöhung im Kerbgrund eines in der Legie-



Bilder 15a bis c. Rißeinleitung und -ausbreitung in verzinkten Drähten (Längsschliffe, geätzt; 500:1)

Teilbild	Draht Nr. ¹⁾	Drahtsorte ¹⁾	Behandlung	Zugfestigkeit N/mm ²	Proben- Nr.	Spannungs- ausschlag N/mm ²	Bruch- lastspielzahl 10 ⁶
a	17	unleg. Stahl D 55-2	patent-gezogen	1460	8	± 948	0,0148
b	13	unleg. Stahl D 45-2	hartgezogen	1381	41	± 600	0,1424
c	28	unleg. Stahl D 75-2	patent-gezogen	1792	2	± 878	0,0216

¹⁾ Vgl. Angaben in *Tafel I*.

im Bereich der Wechselfestigkeit beanspruchten Proben treten neben den Gleitlinien noch Anrisse im Zinküberzug auf, die jedoch nicht zum Bruch der Probe führen (*Bild 14b*). Durch die im Vergleich zur Festigkeit des Zinks sehr hohe Belastung der Drähte bei Biegewechselversuchen im Zeitfestigkeitsbereich treten die Anrisse im Zinküberzug sowohl in den Gleitlinien (*Bild 14c*) als auch außerhalb eines Gleitlinienbereiches in den Zinkkristallen auf (*Bild 14d*).

Untersuchungen an Längsschliffen zeigen weiter, daß die Anrisse offenbar zu einem frühen Zeitpunkt in der Zinkschicht entstehen und sich dann mit zunehmender Beanspruchungsdauer durch die Eisen-Zink-Legierungsschichten in den Stahl hinein ausbreiten. In den *Bildern 15a bis c* sind einige Beispiele wiedergegeben, die diese Befunde verdeutlichen. Man sieht, wie sich ein Riß zunächst von der Oberfläche der Zinkschicht in diese hinein ausbreitet (*Bild 15a*), dann in die Legierungsschichten eintritt und den Stahluntergrund erreicht (*Bild 15b*) und schließlich im Stahl weiterläuft (*Bild 15c*).

Deutung der Versuchsergebnisse

Aus *Bild 11* ist die Feststellung zu entnehmen, daß die Wechselfestigkeit verzinkter Drähte bei Zugfestigkeiten etwa oberhalb 1000 N/mm² nicht mehr mit weiter zunehmender Zugfestigkeit ansteigt, wie dies bei den nicht verzinkten Drähten der Fall ist. Aus den metallographischen Beobachtungen läßt sich dieser Befund dahingehend deuten, daß Anrisse, die bis zum Stahl durch die Eisen-Zink-Legierungsschichten vorgedrungen sind, an der Stahloberfläche zu Spannungsspitzen führen. Die hohe Plastizität der Drähte

rungsschicht vorhandenen Anrisses an der Oberfläche des Grundwerkstoffes immer stärker aus, so daß ein solcher Anriß nicht mehr von diesem aufgefangen werden kann. Dies dürfte der Grund dafür sein, daß die Wechselfestigkeit verzinkter Drähte bei Zugfestigkeiten oberhalb etwa 1000 N/mm² nicht mehr weiter ansteigt.

Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung befaßt sich mit dem Einfluß des Feuerverzinkens auf das Dauerschwingverhalten von Drähten verschiedener Zugfestigkeit. Die Dauerschwingversuche wurden an nicht verzinkten und verzinkten Drähten mit einem Durchmesser von etwa 2 mm und Zugfestigkeiten von etwa 400 bis 2100 N/mm² unter Umlaufbiegebelastung durchgeführt.

Die Wechselfestigkeit der Drähte mit geringer Zugfestigkeit und genügend hohem plastischem Verformungsvermögen wird durch das Feuerverzinken kaum beeinflusst. Bei Drähten mit Festigkeiten oberhalb rd. 1000 N/mm² ist die Wechselfestigkeit der verzinkten Drähte deutlich geringer als die von nicht verzinkten Drähten gleicher Festigkeit.

Metallographische Untersuchungen haben gezeigt, daß dieses verschiedenartige Verhalten offenbar darauf beruht, daß die in der Zinkschicht entstehenden und durch die Eisen-Zink-Legierungsschicht hindurchlaufenden Anrisse als Kerben wirken. Bei Drähten niedriger Zugfestigkeit wirken sich die im Anrißgrund vorhandenen Spannungserhöhungen kaum aus, so daß die Wechselfestigkeit nur unwesentlich beeinflusst wird. Bei Drähten mit höheren Festigkeiten bleibt die Spannungserhöhung im Anrißgrund voll erhalten, so daß die Wechselfestigkeit der verzinkten Drähte gegenüber den nicht verzinkten herabgesetzt wird.

¹⁰⁾ Wever, F., M. Hempel u. A. Schrader: Arch. Eisenhüttenwes. 26 (1955) S. 739/54.