

Einfluß der Hartzinkschicht auf die mechanischen Eigenschaften feuerverzinkter Drähte

Von J. Blanpain in Gentbrugge-lez-Gand, Belgien

Bericht Nr. 107 des Ausschusses für Drahtverarbeitung des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute*)
und Bericht Nr. 50 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken

Verzinkte und entzinkte Drähte werden im Zerreiß-, Biege- und Verwindeversuch geprüft. Die Risse im Hartzink pflanzen sich nicht in den belasteten Draht fort. Der Einfluß der Hartzinkschicht auf das Verformungsvermögen des Drahtes wird erörtert.

Effect of the hard zinc layer on the mechanical properties of hot galvanized wires. Galvanized and dezinked wire were tested in tensile, bend and torsion tests. The cracks in the hard zinc are not transmitted to the loaded wire. The effect of the hard zinc layer on the formability capacity of the wire is explained.

Influence de la couche de zinc dur sur les propriétés mécaniques des fils galvanisés au trempé. Examen de fils galvanisés et dézingués par essais de traction, de flexion et de torsion. Les fissures de la couche de zinc dur ne se propagent pas dans le fil sous charge. Discussion de l'influence de la couche de zinc dur sur la capacité de déformation du fil.

Aufgabenstellung und Versuchsdurchführung

Drahtseile werden vor Korrosion geschützt, indem man die einzelnen Drähte vor dem Verseilen verzinkt. Die älteste und immer noch am meisten verbreitete Verzinkungsart ist das Feuerverzinken, bei dem die fertig gezogenen Drähte durch ein mit geschmolzenem Zink gefülltes Bad geführt werden.

*) Vorgetragen auf der 26. Vollsitzung des Ausschusses für Drahtverarbeitung am 2. Oktober 1963 in Düsseldorf.

Durch die Zinkbad-Temperatur von ungefähr 450 °C erfahren die Drähte eine unerwünschte Wärmebehandlung. Die auf dem Draht gebildete Zinkschicht ist nicht homogen, sondern besteht vor allem aus der äußeren, reinen Zinkschicht und der inneren, an der Stahloberfläche haftenden Hartzinkschicht. Über die Wirkung der Hartzinkschicht auf die mechanischen Eigenschaften der Drähte gehen die Meinungen noch erheblich auseinander.

Es erschien daher zweckmäßig, im Anschluß an eine bei der Felten & Guillaume Carlswerk Eisen und Stahl AG,

Köln-Mülheim, durchgeführte Diplomarbeit¹⁾ über die Größe der durch Hartzink bedingten Änderung der mechanischen Eigenschaften auch deren Ursache zu ergründen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Drähte gleichzeitig und parallel zueinander durch ein Verzinkungsbad und durch ein mit Blei angefülltes und in die Zinkpfanne versenktes Rohr geführt. Zweck dieses Verfahrens war, bei gleicher Wärmebehandlung, d. h. bei gleichen Eintauchlängen, -zeiten und -temperaturen, verzinkte und unverzinkte Drähte zu bekommen, so daß für einen Vergleich von verzinkten und unverzinkten Drähten der Einfluß der Wärmebehandlung ausgeschaltet war und der Unterschied sich lediglich auf das Vorhandensein oder Fehlen der Zinkschicht beschränkte.

Die Ergebnisse zeigten, daß die durch Blei geführten Drähte höhere Biege- und Verwindewerte besaßen. Also hat neben der Wärmebehandlung auch die Zinkschicht einen Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften feuerverzinkter Drähte. Ein Vergleich der durch Blei geführten Drähte mit verzinkten Drähten, deren Zinkschicht aber vor dem Vergleich abgelöst worden war, ergab, daß die durch Blei geführten und die entzinkten Drähte die gleichen mechanischen Eigenschaften besaßen.

Von dem Ergebnis dieser Versuche wird in der vorliegenden Arbeit Gebrauch gemacht. Der Einfluß der Zinkschicht wird durch Vergleich von verzinkten und entzinkten Drähten herausgestellt.

Es liegt nahe, den Abfall der mechanischen Eigenschaften zu der Dicke der Hartzinkschicht in Beziehung zu setzen. Eine dickere Hartzinkschicht müßte demnach einen größeren Abfall der Biege- und Verwindewerte verursachen.

Um die Richtigkeit dieser Annahme beweisen zu können, mußte zunächst die Aufgabe gelöst werden, feuerverzinkte Stahl Drähte mit verschiedenen Hartzinkdicken zu erzeugen, und zwar in dem Schichtdickenbereich, der in der Seildrahtherstellung mit den üblichen Geschwindigkeiten bei der Schlußverzinkung erreichbar ist.

In diesem Bereich kann die Dicke der Hartzinkschicht fertigungstechnisch durch die chemische Zusammensetzung des Stahles und den Spannungszustand der Drahtoberfläche gesteuert werden, weil gemäß einer weitverbreiteten Auffassung eine stärker verspannte Drahtoberfläche einen intensiveren Angriff des Zinks, d. h. eine erhöhte Legierungsfreudigkeit des Eisens mit dem Zink, bewirkt. Es ist außerdem bekannt, daß eine Behandlung in einem Bleibad von ~ 400 °C einen Spannungsabbau an der Drahtoberfläche bewirkt, wovon man sich durch Heißtiefzäprouben überzeugen kann.

Der Spannungszustand der Stahloberfläche wurde daher durch Gesamtquerschnittsabnahmen von etwa 35 bis 75% bei 0,45, 0,60 und 0,80% Kohlenstoff und Drahtenddurchmessern von 3,5, 2,8 und 2,5 mm sowie durch Gesamtquerschnittsabnahmen von 69 bis 88% bei 0,5 und 0,7% Kohlenstoff und einem Drahtdurchmesser von 1,8 mm verändert. Ferner lief ein Teil der Versuchsdrähte durch ein vor die Verzinkungsanlage geschaltetes Bleibad von rd. 400 °C, das den Draht gleichzeitig entspannt und entfettet.

Die Wirkung der verschiedenen Vorbehandlungen auf die Dicke der Hartzinkschicht wurde durch die Ermittlung des Eisengehaltes dieser Schicht untersucht, weil die Annahme berechtigt ist, daß in dickeren Hartzinkschichten größere Eisenmengen gebunden sind.

¹⁾ Berg, H.-W.: Zusammenhang zwischen Heißverzinkungsprozessen und technologischen Eigenschaften von kalt gezogenen Stahl Drähten mit verschiedenen Kohlenstoffgehalten nach Anwendung verschiedener Reckgrade. Dipl.-Arbeit Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen 1958.

Der Eisengehalt ist zwar kein genaues Maß für die Legierungsdicke, dürfte aber ein ausreichender Anhalt für die nachstehenden Betrachtungen sein. Der Anschaulichkeit halber werden die Eisengehalte unter Annahme einer mittleren Hartzinkzusammensetzung der Formel FeZn₇ auf Dicken in µm umgerechnet, wobei 1 g Eisen/m² einer Schichtdicke von 1,4 µm entspricht.

Versuchsergebnisse

Dicke der Hartzinkschicht

Trägt man die Schichtdicke in Abhängigkeit von der Gesamtquerschnittsabnahme in Bild 1 auf, so lassen sich keine systematischen Unterschiede zwischen den Drähten mit verschiedenen Kohlenstoffgehalten und den mit oder

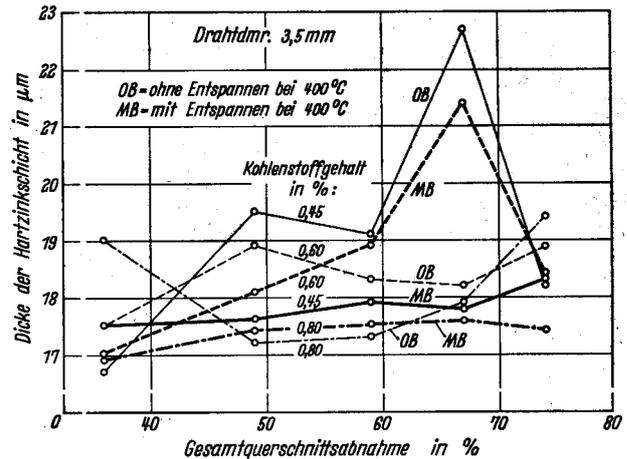


Bild 1. Dicke der Hartzinkschicht in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt und der Gesamtquerschnittsabnahme

ohne vorherige Entspannung im Bleibad verzinkten Drähten erkennen. Auch eine gesetzmäßige Abhängigkeit der Schichtdicke von der Gesamtquerschnittsabnahme scheint nicht vorhanden zu sein.

Der unregelmäßige Kurvenverlauf überdeckt zumindest mit seinem Streubereich eine etwa bestehende Gesetzmäßigkeit. Falls diese Gesetzmäßigkeit besteht, ist sie jedenfalls für den Betrieb unbedeutend und mit den hier angewendeten Mitteln nicht steuerbar.

Verhalten des Drahtes im Zugversuch

Bild 2 zeigt die Zugfestigkeit der Versuchsdrähte in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt und der Gesamtquerschnittsabnahme. Der Unterschied zwischen den oberen Kurven für den nicht verzinkten Draht und den mittleren Kurven für den entzinkten Draht gibt den Einfluß der Alterung wieder.

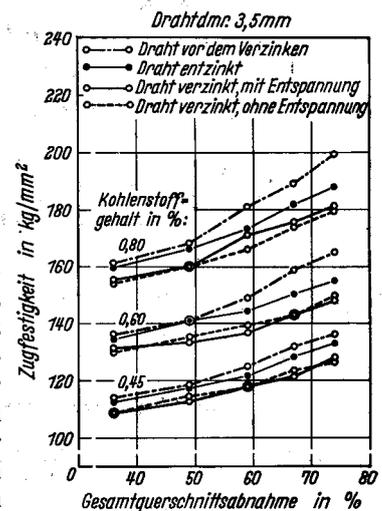


Bild 2. Zugfestigkeit von Drähten mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt und der Gesamtquerschnittsabnahme

Der Unterschied zwischen den mittleren Kurven für den entzinkten Draht und den unteren Kurven für den verzinkten Draht zeigt den Einfluß der Hartzinkschicht. Der durch

das Zink verursachte Zugfestigkeitsabfall ist konstant für den gesamten betrachteten Verformungsbereich. Die Kurven für die Drähte, die vor dem Verzinken ein Bleibad durchliefen, decken sich mit den Kurven der Drähte, die ohne diese Vorbehandlung verzinkt wurden. Der vom Bleibad verursachte Spannungsabbau spiegelt sich also nicht in der Zugfestigkeit nach dem Verzinken wieder. Der Einfluß der Zinkschicht dagegen scheint deutlich erkennbar. Er beruht aber nicht auf der Wirkung der Hartzinkschicht als solcher,

Verhalten beim Hin- und Herbiegeversuch
Auch auf die Zahl der Hin- und Herbiegungen (*Bild 3*) haben die Entspannungs-Bleibäder keinen nennenswerten Einfluß, weder auf die im verzinkten noch auf die im entzinkten Zustände untersuchten Drähte. Würden einige der gemessenen Biegewerte um nur eine Einheit verschoben, so verliefen die Kurven für entzinkte und verzinkte Drähte bereits parallel. Wird also ein Streubereich von plus oder minus einer Biegung als zulässig angesehen, so ist der durch Hartzink verursachte Biegeabfall über den hier untersuchten Verformungsbereich konstant. Er beträgt im Mittel eine bis drei Biegungen.

Verhalten beim Verwindeversuch

Die gestrichelten und ausgezogenen Kurvenzüge sind auch bei den Kurven für die Verwindewerte fast deckungsgleich (*Bild 3*). Die Entspannung im Bleibad hat also auch hier keinen Einfluß.

Betrachtet man die unterschiedliche Lage der Kurven für entzinkte und verzinkte Drähte, so erkennt man, daß mit zunehmenden Kohlenstoffgehalten und Gesamtquerschnittsabnahmen die Kurven dichter zusammenrücken. Hier ist im Gegensatz zum Zerreiß- sowie Hin- und Herbiegeversuch die Wirkung der Hartzinkschicht von der Formänderung abhängig.

Da die Unabhängigkeit des durch Hartzink bedingten Abfalls der Biegungen von der Gesamtquerschnittsabnahme und die Abhängigkeit des Abfalls der Verwindewerte von der Gesamtquerschnittsabnahme sich in keiner Weise in der ebenfalls von der Gesamtquerschnittsabnahme abhängigen Dicke der Hartzinkschicht widerspiegelt, ist anzunehmen, daß die Dicke der Hartzinkschicht im vorliegenden Versuchsbereich die mechanischen Eigenschaften der verzinkten Drähte nicht beeinflußt. Es ist also gleichgültig, ob die Hartzinkschicht etwas dicker oder etwas dünner ist; ihre Wirkung scheint hauptsächlich auf ihrer Gegenwart als solcher zu beruhen. Die gleichen Ergebnisse wurden bei Versuchen an Drähten mit 2,8 mm Dmr. gefunden.

Wirkungsweise der Hartzinkschicht

Zerreißversuch

Verzinkte Drahtproben wurden in die Zerreißmaschine eingespannt und bis kurz vor oder bis nach Ausbildung des Einschnürkegels belastet. Dieser wurde dann aus dem Draht herausgeschnitten und im Längsschliff mikroskopisch untersucht.

Am deutlichsten lassen sich die im folgenden geschilderten Vorgänge an einem weichen Draht entsprechend den *Bildern 4 und 5* schildern.

Bild 4a entspricht dem Anfangszustand. Auf dem Draht Fe sitzt eine Eisen-Zink-Legierung HZ, das Hartzink, an das sich die Reinzinkphase Zn anschließt. Die erste sichtbare Störung besteht im Aufreißen der Hartzinkschicht, ohne daß sich diese Risse in den Draht fortpflanzen (*Bild 4b*). Die Hartzinkrisse entstehen bereits vor dem Beginn der Einschnürung. Bei wachsender Belastung und nach Erscheinen der Einschnürung werden die vorher entstandenen Risse breiter, und es kommen neue hinzu (*Bild 4c*). Unterhalb der Trennungen im Hartzink bilden sich im Stahl kleine lokale

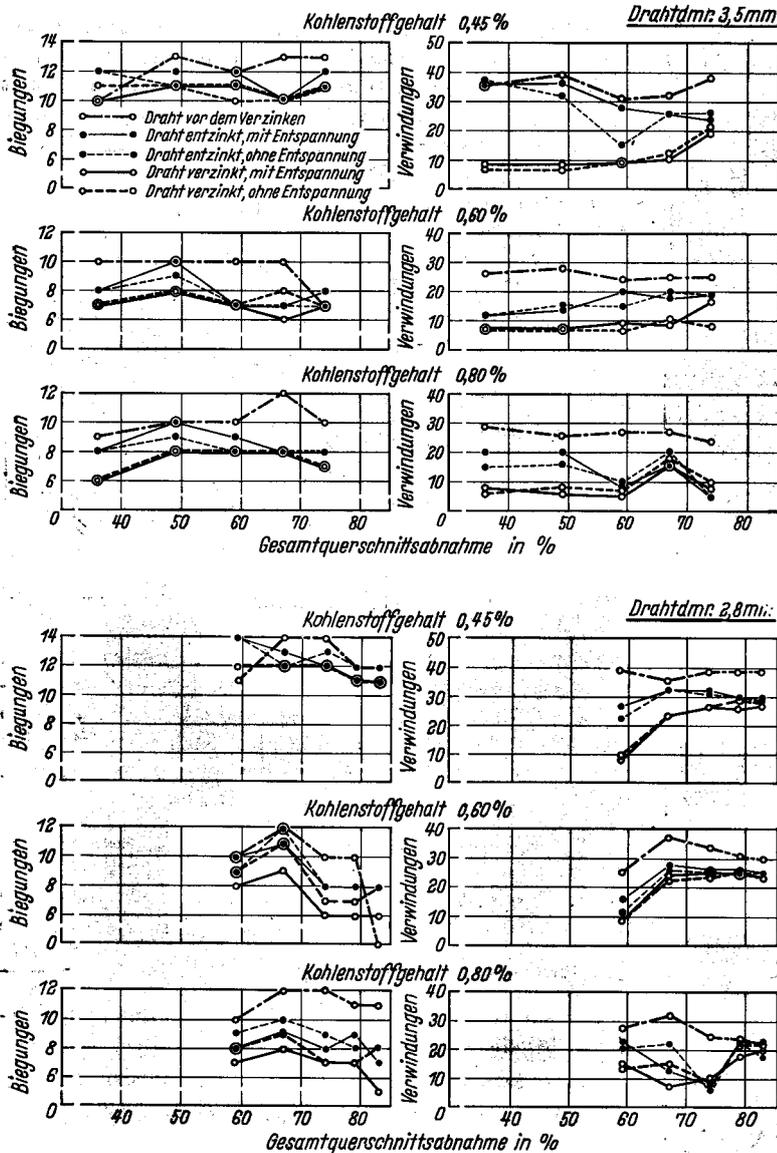


Bild 3
Biegungen und Verwindungen von Drähten mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt und der Gesamtquerschnittsabnahme

sondern auf der hier verwendeten Festigkeitsberechnung, die — wie allgemein üblich — sich nicht auf den Querschnitt des unverzinkten Kerndrahtes, sondern auf den Gesamtquerschnitt des verzinkten Drahtes bezieht.

Um die tatsächlich auftretende Wirkung der Hartzinkschicht zu erfassen, muß man die aus der Bruchlast und dem Querschnitt des unverzinkten Kerndrahtes errechnete Zugfestigkeit mit derjenigen der entzinkten Drähte vergleichen. In diesem Falle ist ein durch Entzinken bedingter Festigkeitsanstieg nicht festzustellen, doch wird später noch gezeigt werden, daß eine mit Hartzink behaftete Stahloberfläche sich in ihrem Verhalten beim Zerreißversuch von derjenigen eines unverzinkten Drahtes unterscheidet.

Einschnürstellen, die auf Fließvorgänge schließen lassen. Nach Fortschreiten der Gesamteinschnürung werden die Risse immer breiter, und die im Stahl befindlichen lokalen Einschnürstellen werden deutlich tiefer (Bild 4d).

Die Vorgänge sind besonders an weicheren Stählen sehr gut zu erkennen. Vergleicht man das Bruchgeschehen an

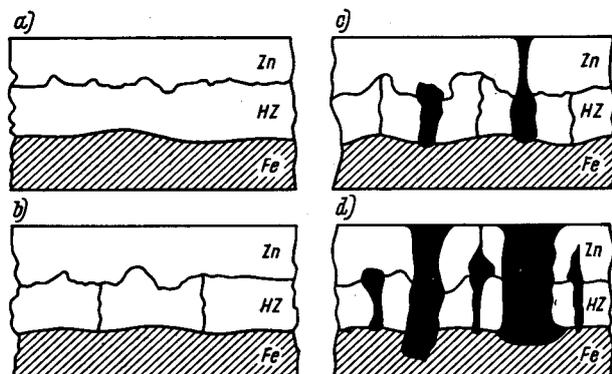
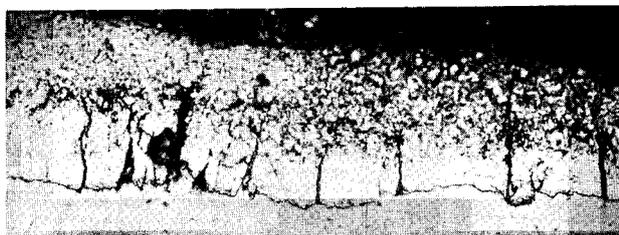
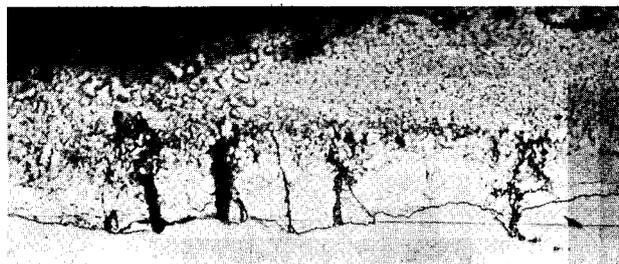


Bild 4. Verhalten des Zinküberzuges beim Zerreißversuch (schematisch)



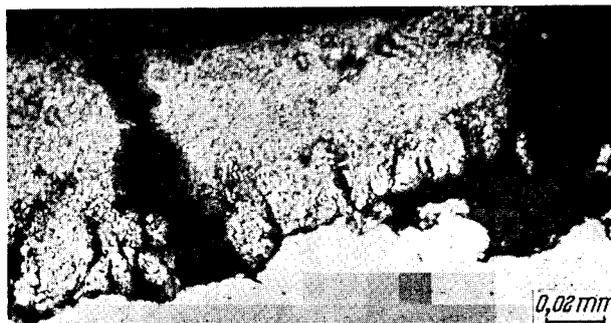
a) kurz vor dem Einschnüren



b) bei Beginn des Einschnürens



c) nach Fortschreiten des Einschnürens



d) in der Einschnürzone nach dem Bruch

Bilder 5a bis d. Längsschliff von Zinküberzügen beim Zerreißversuch (380:1, Original 500:1)

verzinkten Drähten mit demjenigen entzinkter oder unverzinkter Proben, so bemerkt man bei letzteren an der Oberfläche ebenfalls Kerben und Risse. Sie sind jedoch meist nicht so scharf ausgeprägt und entstehen nur kurz vor dem Bruch.

Eine eingehendere Betrachtung der genannten mikroskopischen Vorgänge gibt Aufschluß über die Wirkungsweise des Hartzinks und ist besonders für die später besprochenen Biegeversuche von großem Wert, weil die geschilderte Art der Ribbildung auf die Biegewerte einen großen Einfluß hat.

Wichtig für das Bruchverhalten ist, daß die Hartzinkschicht in einzelne Klötzchen aufgeteilt wird. Werden in Gedanken zwei solche Hartzinkklötzchen X und Y isoliert und die durch die schematische Skizze in Bild 6 dargestellten

Anfangs- und Endzustände verglichen, so ergeben sich folgende Betrachtungen. Das Hartzink ist hart und spröde. Das Dehnvermögen und damit die Bruchdehnung des Hartzinks ist vernachlässigbar klein gegenüber der des Stahles. Betrachtet man nun die Haftflächen der Hartzinkblöcke auf dem Stahl, so stellt man fest, daß das Hart-

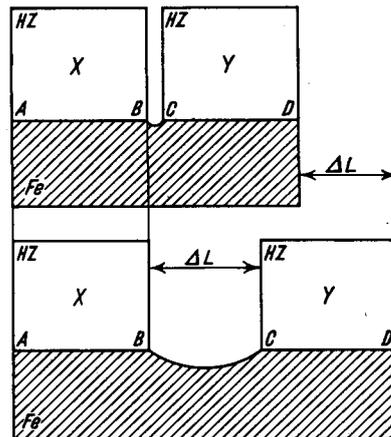


Bild 6. Ribbildung in der Hartzinkschicht (schematisch)

zink trotz seiner Sprödigkeit entlang den Strecken AB und CD nicht aufgerissen ist. Die Dehnungen der Hartzinkschicht entlang den Strecken AB und CD sowie diejenigen der unmittelbar darunter liegenden Stahloberfläche sind also kleiner als die Bruchdehnung des Hartzinks, d. h. weitgehend vernachlässigbar.

Die Hartzinkblöcke X und Y seien vom Stahl um den Betrag ΔL auseinandergetragen worden. Die ursprünglich kurze, durch das Aufreißen der Hartzinkschicht freigelegte Strecke BC muß also die Gesamtlänge ΔL der Strecke AD angenommen haben. Die örtliche Dehnung $\delta_{BC} = \frac{\Delta L}{BC}$ der Trennstrecke BC ist sehr groß, da die Anfangsbezugs-länge BC klein war.

Wäre kein Hartzink auf dem Stahl vorhanden, so hätte sich der Längenzuwachs ΔL auf die Gesamtlänge AD verteilt, und ihm entspräche in jedem Punkt der Stahloberfläche eine Dehnung von $\delta_{AD} = \frac{\Delta L}{AD}$.

Da nun AD sehr viel größer als BC ist, wird δ_{BC} viel größer als δ_{AD} . δ_{BC} liegt also im Fließbereich des Stahles näher an der Bruchdehnung als δ_{AD} , so daß sich die lokalen Einschnürstellen in Ribstellen verwandeln werden, noch ehe der gesamte Stab gebrochen ist. Die ausgeprägten Risse treten aber erst kurz vor Erreichen der Höchstlast auf. Da die Höchstlast die Zugfestigkeit des Stahles bestimmt, kann diese durch die entstandenen Oberflächenrisse nur wenig beeinflußt werden. Wenn auch die Hartzinkschicht die Höchstlast des Stahles nicht verändert, so wird sie doch dessen Bruchdehnung verringern.

Vergleicht man die Spannungs-Dehnungs-Kurven eines weichen, geglühten Stahles und eines harten, gezogenen Stahles, so sieht man, daß bei letzterem der Fließbetrag v_v

dem Bruch viel kleiner, d. h. die Fließdauer kürzer ist. Folglich werden die durch Hartzink bedingten Risse beim Harten, gezogenen Seildraht viel kleiner sein, und deren Entstehen wird zeitlich viel näher am Bruchpunkt liegen. Beim gezogenen Seildraht ist daher die Verminderung der Bruchdehnung in Wirklichkeit sehr klein und schwer meßbar.

Hin- und Herbiegeversuch

Ein Vergleich von Längsschliffen an entzinkten (Bild 7) und verzinkten Drähten (Bild 8), die beim Hin- und Herbiegeversuch nach verschiedenen Biegezahlen bis zum Auftreten des Bruches angefertigt wurden, zeigt, daß entzinkter

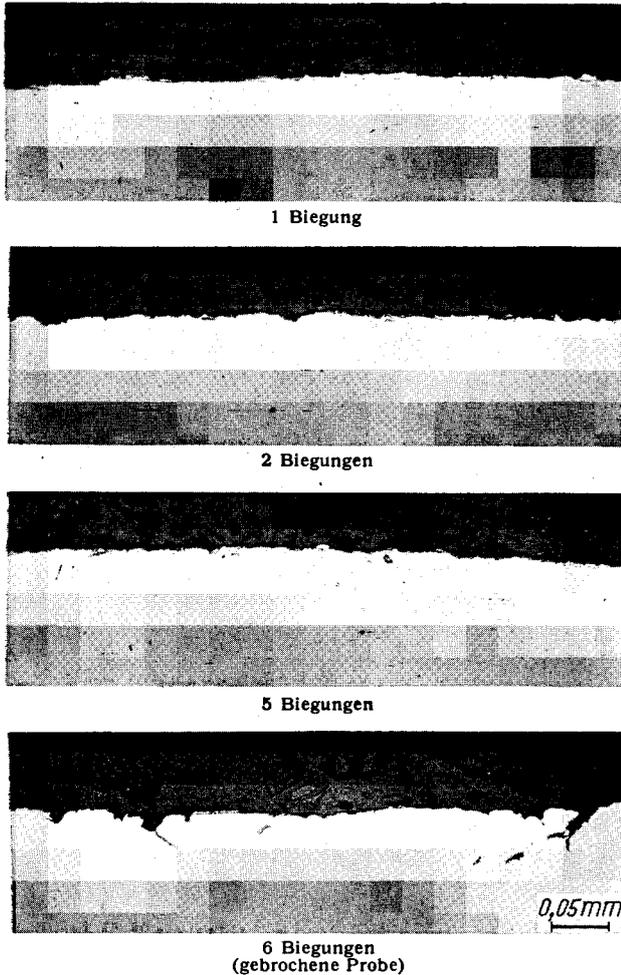


Bild 7. Aussehen der Oberflächen von entzinkten Drähten nach unterschiedlicher Biegebeanspruchung (150:1, Original 200:1); Drahtdurchmesser: 2,5 mm; Zugfestigkeit: 140 kg/mm²

Draht erst bei der letzten oder der vorletzten Biegung einkerbt, während bei verzinkten Drähten die lokalen Einschnürstellen bereits nach einer verhältnismäßig kleinen Biegezahl erscheinen. Ferner fällt in den Schliffbildern die starke Ähnlichkeit der Bruchstellen der im Zerreiβversuch und im Hin- und Herbiegeversuch gebrochenen verzinkten Drähte auf. Das ist nicht erstaunlich, denn beim Hin- und Herbiegen wie beim Zerreiβen geht der Bruch immer von einer gedehnten Faser aus.

Der Hin- und Herbiegeversuch hat mit dem Zerreiβversuch gemeinsam, daß der Draht eine Dehnung ertragen muß. Der Unterschied besteht darin, daß beim Hin- und Herbiegen die Dehnbelastung wiederholt wird und sich nicht über den gesamten Probenquerschnitt erstreckt, sondern sich am stärksten auf die Randfaser, d. h. die riβempfindlichste Stelle eines Drahtes, auswirkt. Ferner geht es beim Biegeversuch nicht um eine zu ertragende Last, sondern um eine die Beanspruchungsrichtung wechselnde Verformung. Die

Dauer des Fließens ist beim Hin- und Herbiegeversuch größer, so daß die dehnungshemmende Wirkung der Hartzinkschicht länger anhält als beim Zerreiβversuch. Außerdem tritt die den Bruch beschleunigende Wirkung der Hartzinkschicht beim Biegeversuch viel stärker in Erscheinung als beim Zerreiβversuch.

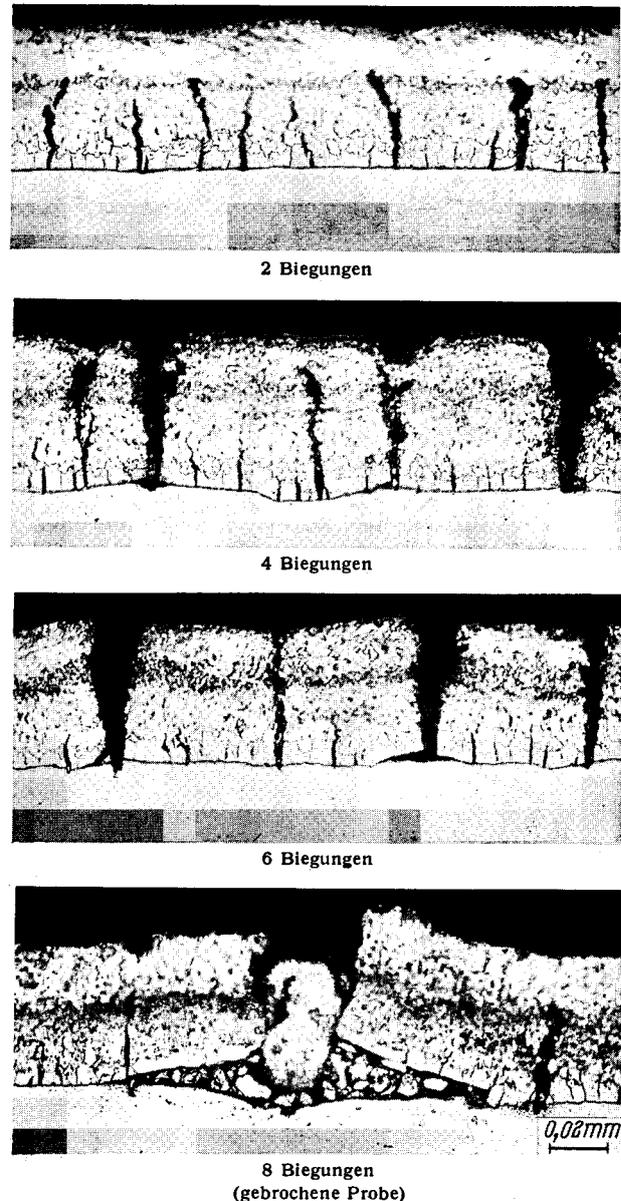


Bild 8. Riβbildung in Zinküberzügen von Drähten nach unterschiedlicher Biegebeanspruchung, Längsschliffe in der Zugspannungszone (380:1, Original 500:1); Drahtdurchmesser: 2,5 mm; Zugfestigkeit: 140 kg/mm²

Beim Vergleich der Biegezahlen während der Versuche stößt man gelegentlich auf Proben, deren Biegezahlen sowohl im verzinkten als auch im entzinkten Zustande gleich sind, d. h. auf Drähte, deren Verhalten nicht mit dem Vorhergesagten übereinstimmt. Dieser gelegentliche Widerspruch ist aber nicht auf die Unwirksamkeit der Hartzinkschicht zurückzuführen, sondern auf seltener auftretende Einflüsse, von denen der wichtigste der Oberflächenzustand des unverzinkten Stahldrahtes ist. Eine fehlerhafte Oberfläche des Drahtes vor dem Verzinken wird die verformungshemmende Eigenschaft der Hartzinkschicht wohl nicht beseitigen, aber deren Wirkung nicht zur Geltung kommen lassen.

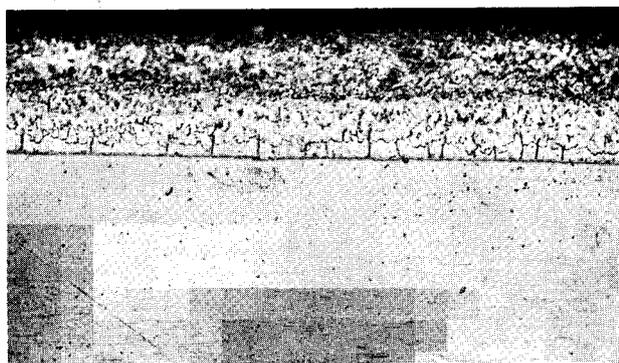
Wie bereits im Zusammenhang mit den Zerreiβversuchen festgestellt worden war, bewirkt die Hartzinkschicht das

Entstehen der örtlichen Verformungen nur dann, wenn der Stab plastisch ist, also erst nach einer bestimmten Belastungszeit, und zwar derjenigen, die nötig ist, um lokale Einschnürungen zu erzeugen. Bei einer schlechten Oberfläche hingegen sind die Kerben bereits vor dem Belasten vorhanden und kommen gleich bei Belastungsanfang zur Wirkung, also zu einem Zeitpunkt, wo die Hartzinkschicht noch keine Risse erzeugt hat. Daher dürften in diesem Falle die von Anfang an im Stahldraht vor dem Verzinken vorhandenen Kerben das Bruchgeschehen beherrschen.

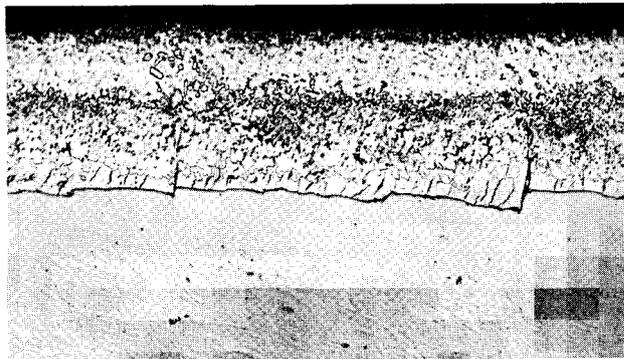
Da die Wirkung der Hartzinkschicht ausschließlich auf ihrem großen Haftvermögen an der Stahloberfläche beruht,

stant galt, stehen die Ergebnisse des Verwindeversuches. Der durch die Hartzinkschicht entstehende Abfall der Verwindewerte ist von der Gesamtquerschnittsabnahme abhängig, so daß die beim Biegen angeführte Verformungsbehinderung für den Verwindeversuch nicht mehr ausschließlich maßgebend zu sein scheint.

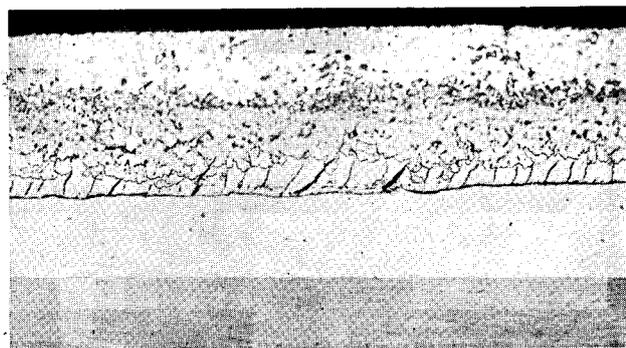
Zur Untersuchung des Verwindeverhaltens verzinkter, entzinkter und unverzinkter Drähte wurden kurze Probe­stücke mit einer Einspannlänge von 3 cm verdreht. Die kurzen Prüflinge ermöglichten das Einbetten der gesamten Prüflänge in Schliffmasse und deren Beobachtung im Mikroskop.



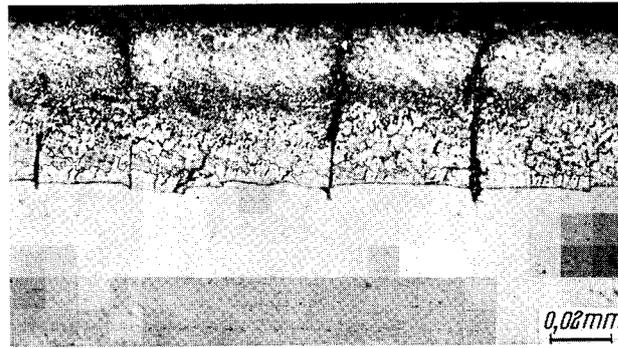
Anfangszustand



2 Verwindungen



1/2 Verwindung



4 Verwindungen, Bruch eingetreten

Bild 9. Rißbildung in Zinküberzügen von Drähten nach unterschiedlicher Verwindebeanspruchung, Längsschliffe (390:1, Original 500:1); Drahtdurchmesser: 2,5 mm; Zugfestigkeit: 140 kg/mm²; Einspannlänge 250 mm

können die Biegezahlen des verzinkten Drahtes auch dadurch erhöht werden, daß die schlecht haftende Hartzinkschicht vom Untergrund abgesprengt wird und größere Strecken blanker Stahloberfläche freigibt. Zu berücksichtigen wäre noch, daß einige der Streuwerte durch Wasserstoffversprödung der entzinkten Proben entstehen können.

Alle eben genannten Einflußgrößen wirken dem Anstieg der Biegezahlen nach dem Entzinken entgegen.

Ein Einfluß der Dicke der Hartzinkschicht auf die technologischen Eigenschaften verzinkter Drähte konnte nicht festgestellt werden. Eine Erklärung liefert der besprochene Bruchmechanismus.

Alle Schliffbilder zeigen, daß die Hartzinkschicht leicht aufreißt. Unabhängig von der Dicke der Hartzinkschicht ist die zur Blockbildung nötige Kraft vernachlässigbar klein. Wichtig ist die Haftfestigkeit der Hartzinkklötze an der Stahloberfläche sowie die daraus entstehende dehnungshemmende Wirkung. Da diese aber von der Höhe der einzelnen Blöckchen unabhängig ist, kann die Hartzinkdicke keinen Einfluß haben.

Verwindeversuch

Im Gegensatz zum Biegeversuch, wo der durch die Hartzinkschicht hervorgerufene Abfall der mechanischen Eigenschaften als über den untersuchten Verformungsbereich kon-

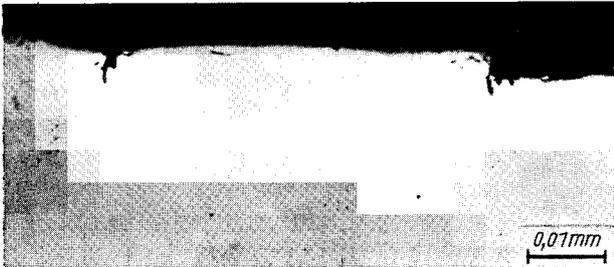
Die auffälligsten Bruchbilder zeigten verzinkte Drähte, deren Hartzinkschicht einen ausgeprägten Abfall der Verwindewerte ergab. Der in Bild 9 gezeigte Draht hatte 25 Verwindungen im verzinkten Zustande und 35 Verwindungen im entzinkten Zustande. Nach einer halben Verwindung riß die Hartzinkschicht auf. Nach zwei Verwindungen erschienen an der Stahloberfläche stufenartige Absätze, die anschließend die Ausgangspunkte von Rissen waren.

Nach Ablösen der Zinkschicht und Ätzen der Drähte zeigte der Verlauf der Randfaser unterhalb der Stufen bei starker Vergrößerung eine sehr typische Verwerfung (Bild 10). Parallel verlaufende Fasern werden plötzlich aus ihrer Richtung herausgelenkt und besitzen dort einen örtlich steiler ansteigenden Verlauf.

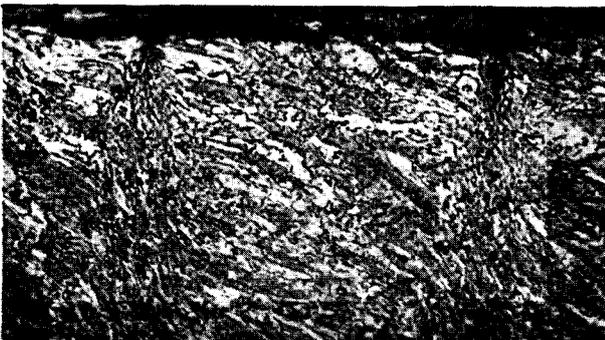
Betrachtet man nun die entsprechende äußere Zinkoberfläche im Binokular bei kleiner Vergrößerung (Bild 11a), so erscheinen die vorhin mikroskopisch festgestellten Fehlerstellen dort als Scharen feinsten Linien, die senkrecht zur Drahtachse verlaufen. Löst man die Zinkschicht mit Salzsäure ab, so werden diese Linienscharen an der Stahloberfläche sichtbar (Bild 11b). Die auch makroskopisch sichtbaren Linien auf der Stahloberfläche verwundener verzinkter Drähte treten in großer Menge und scharenweise auf. Bei verwundenen entzinkten oder nicht verwundenen verzinkten Drähten sind diese Linien nicht festzustellen.



Risse an der Stahloberfläche (ungeätzt) 1000:1



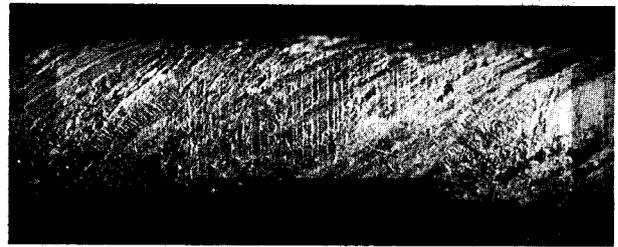
Riß und Absätze an der Stahloberfläche (ungeätzt) 1000:1



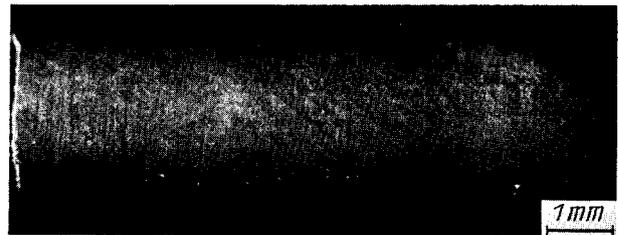
Anreißen der örtlich überdrehten Stellen (800:1, Original 1000:1)

Bild 10. Risse an der Oberfläche verwundener Drähte nach Ablösen der Zinkschicht mit HCl; Drahtdurchmesser: 2,5 mm; Zugfestigkeit: 140 kg/mm²

Mikroskopische Untersuchungen über den Faserverlauf verwundener Stäbe zeigten, daß die unter den Absätzen in der Stahloberfläche beobachteten örtlichen Faserumlenkungen nur überdrehte und in einem weiteren Stadium angerissene Stellen sein können. Es sind sehr kurze Drahtstrecken, die früher plastisch geworden sind als



a) mit Zinküberzug

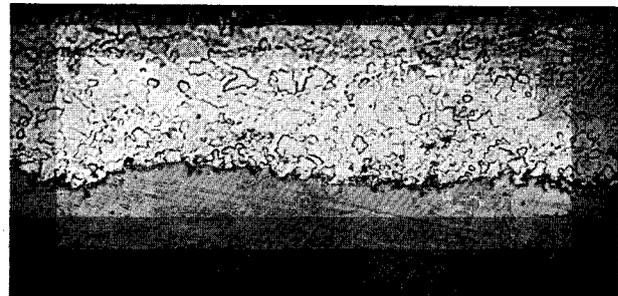


b) nach Ablösen des Zinküberzuges

Bilder 11 a und b. Oberfläche eines verwundenen, verzinkten Drahtes (8,5:1, Original 1:1)

ihre Nachbarstrecken und so den ihnen zugeführten Arbeitsbetrag in Schiebung verwandelt haben.

Die mikroskopische Beobachtung zeigt, daß die bereits nach wenigen Verwindungen aufgerissene Hartzinkschicht sich nach weiteren Verwindungen wieder schließt. Es muß



1 Verwindung



9 Verwindungen (Probe gebrochen)

Bild 12. Aussehen des Zinküberzuges beim Verwinden eines elektrolytisch verzinkten Drahtes (425:1, Original 500:1); Drahtdurchmesser: 1,52 mm; Kohlenstoffgehalt: 0,05%; Zugfestigkeit: 153 kg/mm²; Einspannlänge: 4 cm

also mit zunehmender Zahl der Verwindungen ein Druck in der Hartzinkschicht auftreten, der die gerissene Schicht wieder zusammendrückt.

Beim Verwinden eines verzinkten Drahtes führt der stillstehende Einspannkopf geringe Längsbewegungen aus. Mes-

sungen zeigen, daß der Draht bei Versuchsbeginn länger und später wieder kürzer wird. Die Verkürzung des Drahtes kann auch im Mikroskop beobachtet werden, wenn elektrolytisch verzinkte, hartzinkfreie Proben (Bild 12) verwunden werden. Bereits nach wenigen Verwindungen entstehen an der Stahloberfläche Druckfalten, die bei feuerverzinkten Drähten fehlen, da die Hartzinkschicht durch das Bestreben, den Stab an der Kontraktion zu behindern, das Auftreten solcher Druckfalten verhindert.

Die kontraktionshemmende Wirkung der Hartzinkschicht beruht auf dem äußerst kleinen Verformungsvermögen des Hartzinks, das wie die meisten spröden Werkstoffe eine große Druckfestigkeit besitzt. Da nun eine Kontraktion eine Druckspannung in Längsrichtung erfordert und eine behinderte Kontraktion eine Zugspannung erzeugt, besteht in einem verwundenen unverzinkten Stabe ein Druckspannungsfeld, während im verzinkten Stabe unterhalb der Staboberfläche ein Zugspannungsfeld wirksam ist. Den Spannungszustand an der Staboberfläche einer verwundenen Probe zeigt Bild 13.

An einem Volumenelement an der Staboberfläche greift eine Scherspannung τ und eine Längsspannung σ an. Beim

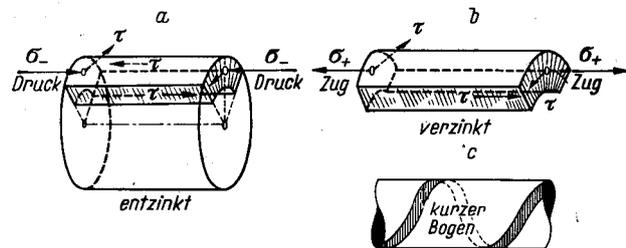


Bild 13. Beanspruchung der Drahtoberfläche beim Verwinden (schematisch)

unverzinkten Stabe ist σ negativ, das heißt eine Druckspannung, und beim verzinkten Stabe positiv, also eine Zugspannung.

σ und τ sind gleichzeitig wirksam, und ihre Überlagerung wird die Verwindbarkeit des Drahtes beeinflussen.

Das reine Schiebungsverhalten eines verzinkten Drahtes wird durch die Hartzinkschicht wesentlich beeinflusst. Ihr frühzeitiges Aufreißen unterteilt die Schicht in spröde Ringstücke. Die Ringstücke umfassen selten den ganzen Kreisumfang, sondern erstrecken sich meist nur über einen Kreisbogen. Eine häufig beobachtete Verteilung der Hartzink-Trennungen ist in Bild 13c wiedergegeben. Durch diese Trennungen ist die Hartzinkschicht gegenüber der Scherkraft nicht mehr kraftschlüssig, d. h., sie kann selbst keine Schiebungen übertragen und läßt sich von der Stahloberfläche mitschleppen.

Die Stahlscheiben, die diese Hartzink-Ringsegmente tragen, werden durch deren starke Haftung in der Schiebung gehemmt, und der Eintritt des plastischen Zustandes wird verzögert. Das plastische Fließen wird vorerst auf die Trennstelle zweier Hartzink-Ringsegmente beschränkt und führt zu den im Mikroskop beobachteten örtlichen Überdrillungen. Da die von Hartzink befreiten Stahlstrecken sehr kurz sind, bieten sie der Schiebung nur äußerst kleine Verformungsvolumina an, und ihr örtliches Schiebungsvermögen wird früher erschöpft sein als das der Nachbarelemente.

Die an den örtlichen Überdrillungsstellen beobachteten Absätze in der Stahloberfläche treten nur auf, wenn dort noch zusätzliche Risse sind. Ihr Entstehen läßt sich an Hand eines Beispiels klären. Sägt man einen Rundstahl senkrecht zur Achse an, so ist der entstandene Querschnitt nicht mehr kreisförmig. Verdrillt man nun den Stab, so wird die eine Hälfte sich gegenüber der anderen herausdrehen, weil der

Drehpunkt nicht mehr im Kreismittelpunkt liegt, sondern zur Mitte des restlichen Querschnittes hin verschoben wurde.

Die Anrisse der örtlichen Überdrillungsstellen eines verzinkten Stabes entsprechen den Einschnitten, und die Stufen in der Oberfläche sind nur ein Maß für das Herausdrehen der einzelnen Stahlscheiben gegeneinander. Das Aussehen der Proben in den Bildern 9 bis 11 wird also durch die Wirkung der reinen Schubbeanspruchung bestimmt.

Wenn das Verhalten der Drähte bei Schubbeanspruchung auch eine befriedigende Erklärung für den sichtbaren Ablauf der Vorgänge zuläßt, so gestattet es doch nicht, die Abhängigkeit der Verwindezahlen von der Gesamtquerschnittsabnahme zu deuten. Der Anstieg der Verwindewerte mit wachsender Gesamtquerschnittsabnahme und zunehmendem Kohlenstoffgehalt wird durch die Zugspannung verursacht, die bei dem durch die Hartzinkschicht behinderten Zusammenziehen des Drahtes entsteht.

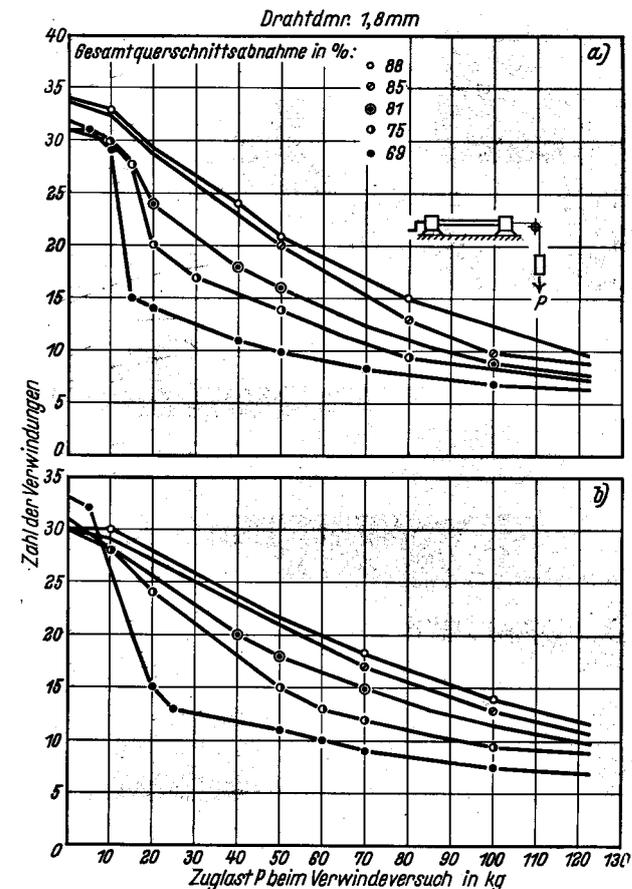


Bild 14. Einfluß der Zugspannung beim Verwindeversuch auf die Zahl der Verwindungen von entzinkten Drähten; a) Kohlenstoffgehalt: 0,5%; b) Kohlenstoffgehalt: 0,7%

Werden entzinkte Drähte mit verschiedenem Kohlenstoffgehalt nach unterschiedlicher Gesamtquerschnittsabnahme unter Zugbelastung bis zum Bruch verdreht, so gilt die in Bild 14 gezeigte Abhängigkeit der Verwindezahlen von der Zugbelastung. Je größer Verformung und Kohlenstoffgehalt eines Drahtes, um so größer ist seine Zugfestigkeit und um so kleiner der Einfluß der Zugspannung beim Verwinden. Nach kleinen Querschnittsabnahmen, in Bild 14 besonders nach 69% Verformung, führen schon kleine Zugbelastungen beim Verwindeversuch zu einem starken Abfall der Zahl der Verwindungen.

Hiermit ist der qualitative Beweis für die Wirkung der beim Verwinden verzinkter Proben entstehenden Zugspannung erbracht. Eine zahlenmäßige Bestimmung ist schwer, da die Größe der überlagerten Scherspannung unbekannt ist.

Das Zusammenwirken beider Spannungen läßt sich trotzdem in etwa beschreiben. Ein unverzinkter oder ein entzinkter Stab, der sich beim Verwinden zusammenzieht, widersteht einer Druck- und Scherbelastung. Ein verzinkter Draht unterliegt einer Scher- und einer Zugbelastung. Da die Oberfläche beim Verwinden ganz im plastischen Bereich verformt wird,

werden die Brüche nicht durch Überschreiten der Zug-, Druck- oder Schubfestigkeiten eingeleitet, sondern durch Erschöpfung des Verformungsvermögens.

Die Abhängigkeit der Verwindenzahlen von der Gesamtquerschnittsabnahme

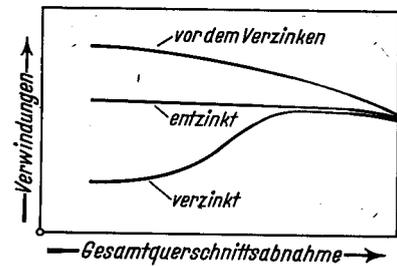


Bild 15. Zusammenhang zwischen Zahl der Verwindungen und der Gesamtquerschnittsabnahme für Drähte mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung (schematisch)

nahme der entzinkten Drähte wird also durch die Verformungsfähigkeit des Werkstoffes bestimmt (Bild 15).

Der durch Verzinken verursachte Abfall der Verwindenzahlen wird — zumindest teilweise — durch eine verformungshemmende Wirkung der Hartzinkschicht verursacht, die von der Gesamtquerschnittsabnahme unabhängig sein

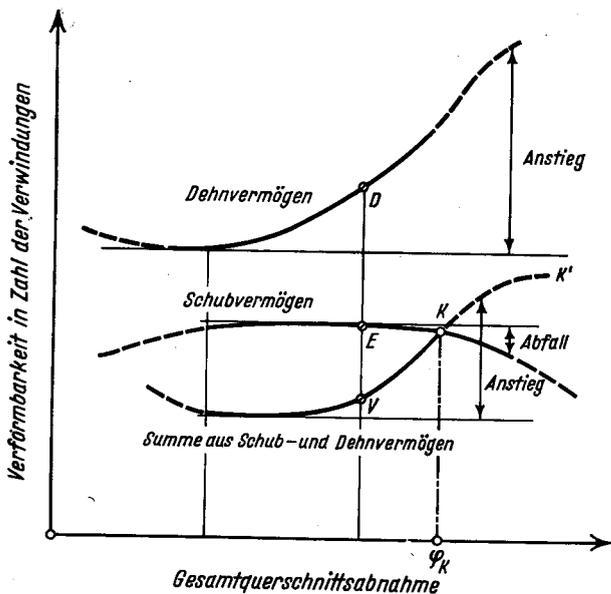


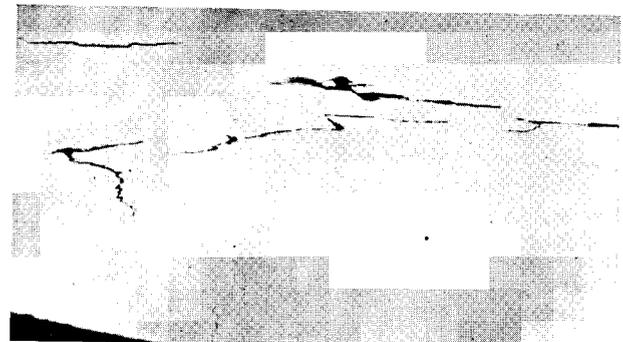
Bild 16. Abhängigkeit der durch die Verwindenzahl ausgedrückten Verformbarkeit von der Gesamtquerschnittsabnahme

dürfte. Da die örtlichen Überdrillungen vor dem Bruch auftreten und die Bogenlängen, über die sie sich erstrecken, meistens gegenüber dem gesamten Kreisumfang klein sind, ist anzunehmen, daß sie nicht allein die Verwindenzahl verzinkter Drähte so stark mindern, zumal die Verwindungen mit wachsender Gesamtquerschnittsabnahme wieder ansteigen. Es liegt also nahe, den allein durch den Schiebungsanteil der Verformung bedingten Abfall der Verwindewerte über das hier betrachtete Verformungsgebiet als konstant anzusehen.

Vernachlässigt man der Einfachheit halber diesen konstanten Abfall, so drückt sich die durch den Schiebungsanteil bedingte Schubbeständigkeit auch in der Abhängigkeit der Verwindungen der entzinkten Drähte von der Gesamtquerschnittsabnahme aus.

Der mit steigender Gesamtquerschnittsabnahme abnehmende Unterschied zwischen den Kurven für entzinkte und verzinkte Drähte (Bild 15) läßt sich — wie bereits festge-

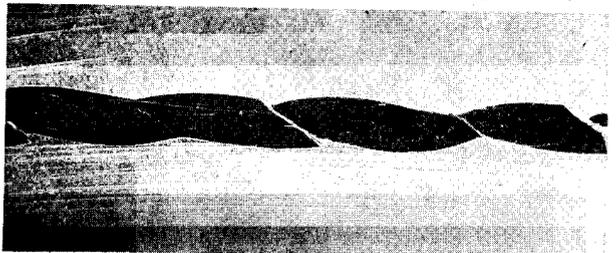
stellt — nur auf das beim Verwinden aufgebrachte Zugspannungsfeld zurückführen. Die beim Verwinden verzinkter Drähte aufgebrachte Dehnung wird der Scherung überlagert und beschleunigt den Bruch durch das Bestreben, die überdrehten Stahlscheiben zu teilen und nach erfolgtem Anriß



2 Verwindungen (rd. 30:1, Original 40:1)



11 Verwindungen (Probe gebrochen; rd. 30:1, Original 40:1)



Brüche mit splittigen Bruchstellen (2,2:1, Original 3:1)

Bild 17. Brüche, die beim Verwinden überzogener Drähte entstanden sind; Drahtdurchmesser: 2,5 mm; Kohlenstoffgehalt: 0,8%; Gesamtquerschnittsabnahme: 87%

die Scherebene völlig zu trennen. Es werden um so eher Anrisse auftreten, je niedriger die Zugfestigkeit des verwundenen Drahtes ist. Je höher die Zugfestigkeit ist, um so mehr Verwindungen kann der Draht ertragen.

Eine schematische Darstellung, ausgehend von der Annahme, daß die einzelnen Arten der Verformung des Werkstoffes getrennt in Abhängigkeit von der Gesamtquerschnittsabnahme auftragbar sind, zeigt Bild 16. Da alle Verformungen, d. h. Dehnungen und Schiebungen, durch Verwinden aufgebracht werden, kann die entsprechende Verwindenzahl als Maß für deren Größe betrachtet werden. Die durch den Punkt D gelegte Kurve gibt die für die Erschöp-

fung des Dehnvermögens notwendige Verwindezahl an, falls die aufgegebenen Verwindungen den Draht nur auf Zug beanspruchen würden. Die Kurve durch den Punkt E gibt die Verwindezahl an, die die Schubfähigkeit des Drahtes erschöpfen würde, falls die aufgegebenen Verwindungen den Stab ausschließlich auf Schub belasten würden.

Da die Verwindung aus beiden Verformungsarten zusammengesetzt ist, wird die mögliche Verwindezahl gegenüber den Einzelbeanspruchungen geringer sein. Die Steigung der resultierenden V -Kurve erhält man durch Subtraktion der abfallenden E -Kurve von der ansteigenden D -Kurve. Da das Dehnvermögen mit steigender Verformung schneller steigt, als das Schubvermögen fällt, steigt die V -Kurve an und schneidet die fallende E -Kurve.

Der gemeinsame Schnittpunkt ist durch den Verformungsgrad φ_K gekennzeichnet, der zwei für das Bruchgeschehen verzinkter Drähte verschiedene Verformungsbe- reiche trennt: Bei Verformungsgraden, die kleiner sind als φ_K , verursacht die Hartzinkschicht einen Abfall der Verwindezahl, wie es aus den gezeigten Schliffbildern hervor- geht. Bei Verformungsgraden, die größer sind als φ_K , also bei sehr stark gezogenen und dann verzinkten Drähten, ist der Kurvenast KK' , gestrichelt gezeichnet, weil das Bruchge- schehen rechts von φ_K ausschließlich von der E -Kurve be- stimmt wird, d. h. vom Verhalten des Kerndraht-Werk- stoffes. Der Kurventeil KK' bedeutet nur, daß rechts von φ_K das Dehnvermögen so groß geworden ist, daß die Zug- spannung nicht mehr ausreicht, um örtliche Überdrillungs- stellen zu Bruch zu führen, ehe die innere Belastbarkeit des Stahles erschöpft ist.

Auch in diesem Falle ist eine mikroskopische Beurteilung möglich, weil noch vor dem Erscheinen örtlicher Überdril- lungen im Stabinnern Risse zu beobachten sind, die parallel zu den verdrehten Fasern verlaufen und kennzeichnend für zu stark gezogene Drähte sind (*Bild 17*).

In einem beschränkten Nachbarggebiet beiderseitig von φ_K kann man im Schliffbild das Entstehen beider Bruchtypen, d. h. des durch Hartzink bedingten und des durch Werkstoff- erschöpfung verursachten, beobachten.

Zusammenfassung

Untersuchungen an verzinkten und entzinkten Drähten zeigen, daß sowohl beim Zerreiß- als auch beim Biege- und Verwindeversuch die Hartzinkrisse bereits lange vor dem Bruch des untersuchten Drahtes entstehen, ohne sich in dessen Inneres fortzupflanzen.

Die Hartzinkschicht wirkt durch ihre starke Verbund- wirkung mit der Stahloberfläche sowie durch ihre äußerst geringe Verformungsfähigkeit auf einen sich im pla- stischen Zustand befindlichen Stahl dehnungs-, kon- traktions- und schiebungshemmend.

Dadurch zwingt die Hartzinkschicht den durch ihr Auf- reißen von Hartzink befreiten kurzen Stahlstrecken eine außerordentlich große örtliche Verformung auf, die das Formänderungsvermögen des Stahles an diesen Stellen früh- zeitig erschöpft. Sie kann, wie es beim Verwinden der Fall ist, auch durch ihre kontraktionshemmende Wirkung zu- sätzlich den Bruch beschleunigende Spannungsfelder auf- bauen. Die Nachteile der Hartzinkschicht entstehen also nicht durch eine Kerbwirkung.