

## Einfluß der Verzinkungsbedingungen auf Dicke, Aufbau und Eigenschaften von Zinküberzügen

Von Friedrich Stricker in Sterkrade und Dietrich Horstmann in Düsseldorf

Mitteilung aus der Forschungsanstalt der Gutehoffnungshütte Sterkrade AG und dem Max-Planck-Institut  
für Eisenforschung, Abhandlung 958

[Bericht Nr. 46 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken\*)]

*Untersuchungen über den Einfluß der Vorbehandlung, der Tauchdauer und Zinkbadtemperatur und der Ausziehgeschwindigkeit auf die Dicke der Eisen-Zink-Legierungsschicht und der Reinzinkschicht. Einfluß der Vorbehandlung auf den Gefügebau des Zinküberzuges. Das Verhalten des Zinküberzuges beim Biegen und Schlagen ohne und mit einer Verformung des Grundwerkstoffes.*

*Effect of the hot-dip galvanizing conditions on the thickness, constitution and properties of zinc coats. Investigations on the effect of the pretreatment, of the time of dipping and temperature of the zinc bath as well as of the drawing-out rate on the thicknesses of the iron-zinc-alloy and pure-zinc layers. Effect of the pretreatment on the structure of the zinc coat. Behaviour of the zinc coat in bending and impacting without and with a deformation of the base metal.*

*L'influence des conditions de zingage sur l'épaisseur, la constitution et les propriétés de revêtements en zinc. Etudes sur l'influence du traitement préalable, de la durée d'immersion et de la température du bain de zinc ainsi que de la vitesse d'extraction sur l'épaisseur des couches d'alliage fer-zinc et de zinc pur. Influence du traitement préalable sur la structure de la couche de zinc. Le comportement du revêtement en zinc en présence d'efforts de pliage et de choc sans ou avec une déformation du métal de base.*

Die Verwendung von feuerverzinkten Konstruktionsteilen nimmt ständig zu. Um für das Verzinken derartiger Teile die besten Bedingungen festzulegen, werden in den Betrieben häufig Verzinkungsversuche durchgeführt. Versuche zur Klärung der erforderlichen Grundlagen sind ebenfalls schon mehrfach gemacht worden<sup>1) bis 6)</sup>, doch fehlt eine zusammenhängende, unter betriebsmäßigen Bedingungen durchgeführte Untersuchung, die gleichzeitig den Einfluß der Vorbehandlung, der Tauchdauer und Zinkbadtemperatur

und der Ausziehgeschwindigkeit auf Dicke, Aufbau und mechanische Eigenschaften des Zinküberzuges zeigt. Daher lassen sich aus den bisher vorliegenden Ergebnissen keine allgemeinen Gesetzmäßigkeiten ableiten, die dem Betriebsmann eine Vorherbestimmung seiner Verzinkungsbedingungen gestatten oder bei plötzlich auftretenden abweichenden Verzinkungsergebnissen trotz anscheinend gleicher Behandlung die Ursache dieser Unregelmäßigkeiten schnell zu erkennen erlauben. Daher erschien es angebracht, durch Versuche mit Blechen aus einer Stahlsorte eine, wenn zunächst auch nur beschränkte Grundlage für das Verzinken von Konstruktionsteilen zu schaffen.

### Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden mit 5 mm dicken warm gewalzten Grobblechen aus einem unberuhigten Stahl mit 0,10% C, < 0,01% Si, 0,64% Mn, 0,053% P, 0,028% S, < 0,002% Al und 0,008% N durchgeführt. Die Bleche stammen aus einer Schmelze und einer Walzung. Ihr Oberflächenzustand war

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

<sup>1)</sup> Hall, W. L., u. P. N. Fagg: Intern. conf. on hot dip galvanizing at Copenhagen 1950. Oxford 1951. S. 14/29.

<sup>2)</sup> Frieli, I.: 4. Intern. conf. on hot dip galvanizing at Milan 1956. London 1957. S. 121/32.

<sup>3)</sup> Gerber, W., R. Gloor und H. Oertli: 5. Intern. conf. on hot dip galvanizing in Holland and Belgium 1958. London 1959. S. 264/70.

<sup>4)</sup> Barmack, B. J.: 6. Intern. conf. on hot dip galvanizing at Interlaaken 1961. London 1962. S. 27/32.

<sup>5)</sup> Mantle, E. C.: 6. Intern. conf. on hot dip galvanizing at Interlaaken 1961. London 1962. S. 33/45.

<sup>6)</sup> The Swedish State Power Board, Västerås Kraftwerk. Nach Rundschreiben des Gemeinschaftsaussch. Verzinken Nr. IV vom 29. 12. 1961.

gleich. Aus diesen Blechen wurden für die Verzinkungsversuche Proben der Größe 250 mm × 250 mm geschnitten, in die zum Aufhängen beim Verzinken an einer Seitenkante zwei Löcher gebohrt wurden.

Tafel 1. Vorbehandlung und Temperatur der Zinkbäder bei den verschiedenen Versuchsreihen

Versuchsreihe	Werk	Vorbehandlung	Zinkbadtemperatur in °C
1	A	Beizen in Schwefelsäure, Spülen, Tauchen in Zink-Ammonium-Chlorid-Lösung, Trocknen über dem Zinkbad . .	433
2	A	wie 1 . . . . .	451
3	B	Beizen in Schwefelsäure, Nachspülen in Salzsäure, Einstreuen mit Salmiak von Hand, Trocknen über dem Zinkbad .	441
4	B	wie 3 . . . . .	462
5	C	Beizen in Salzsäure, Einstreuen mit Salmiak von Hand, Trocknen über dem Zinkbad . . . . .	447
6	C	wie 5 . . . . .	467
7	D	Beizen mit Salzsäure, Aufsprühen von Zink-Ammonium-Chlorid-Pulver mit der Spritzpistole, Trocknen über dem Zinkbad . . . . .	442
8	D	wie 7 . . . . .	462
9	E	Beizen in Salzsäure, Naßverzinken durch eine Zink-Ammonium-Chlorid-Flußmitteldecke . . . . .	441
10	E	wie 9 . . . . .	460

Die Proben wurden in fünf Werken vorbehandelt und verzinkt, wie es in jedem dieser Betriebe üblich war. In jedem Werk wurden mit zwei Zinkbadtemperaturen Versuchsreihen durchgeführt, bei denen die Tauchdauer und die Ausziehgeschwindigkeit verändert wurden. Die Art der Vorbehandlung und die Temperaturen des Zinkbades sind für die zehn Versuchsreihen in *Tafel 1* zusammengestellt. Je Versuchsbedingung wurden drei Bleche gleichzeitig behandelt. Die Tauchdauer betrug bei jeder dieser Versuchsreihen 2,5, 5, 10 und 20 min. Als Beginn wurde die erste Berührung der Probe mit der Zinkbadoberfläche und als Ende das Durchstoßen der Probe durch die Badoberfläche festgelegt. Die Ausziehgeschwindigkeit war für jede Tauchdauer 0,75, 1,5, 3 und 6 m/min. Zum Tauchen und Herausziehen wurde eine tragbare Winde mit Elektromotor eingesetzt, um gleiche und gleichmäßige Eintauch- und Ausziehverhältnisse zu erhalten. Die einzelnen Geschwindigkeiten konnten durch Einschalten von Über- oder Untersetzungen wiederholbar eingestellt werden. Die Proben wurden senkrecht zur Zinkbadoberfläche herausgezogen. Die Zinkbadtemperatur schwankte während einer Versuchsreihe höchstens um  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Alle Zinkbäder enthielten die üblichen Verunreinigungen von Eisen, Blei, Kupfer, Zinn und Cadmium in etwa gleichen Mengen. Die Aluminiumgehalte lagen zwischen 0,005 und 0,008%; sie reichten also in keinem Fall aus, um die Bildung von Eisen-Zink-Legierungsschichten zu hemmen<sup>7)</sup>.

An diesen Proben wurde die Dicke des Zinküberzuges durch Ablösen in verdünnter Salzsäure mit einem Zusatz von Antimon-III-Chlorid nach DIN 50 952 ermittelt. Die Dicke der Eisen-Zink-Legierungsschicht wurde elektrochemisch gemessen<sup>8)</sup>. Die elektrochemische Meßeinrichtung wurde für diese Versuche verbessert<sup>9)</sup>. Der Aufbau des Überzuges wurde metallographisch an Schliffen untersucht, die zum Sichtbarmachen des Gefüges der Legierungsschicht mit einer Lösung von vier Tropfen konzentrierter Salpetersäure in 50 ml Amylalkohol<sup>10)</sup> geätzt wurden. Biegeversuche sollten Aufschluß über das Verhalten des Zinküberzuges bei einer

Biegebeanspruchung geben. In *Bild 1a* ist die zum Biegen benutzte Vorrichtung zu sehen. Die Biegeproben von 40 mm × 150 mm wurden auf das Unterteil gelegt und mit einem Dorn von 20 mm Dmr. mit gleichbleibender Geschwindigkeit von 40 mm/min nach unten gebogen. Während des Biegens wurde die untere Oberfläche mit einem Spiegel beobachtet. Beim Auftreten des ersten Anrisses wurde das Biegen beendet. Der erreichte Biegewinkel wurde als Maß für die Kennzeichnung des Verhaltens des Zinküberzuges heran-

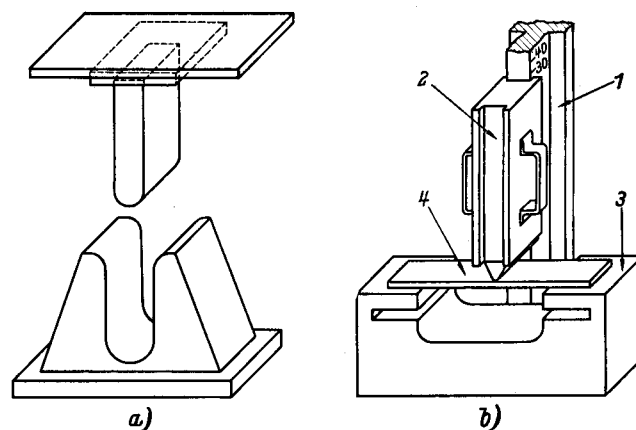


Bild 1. Prüfvorrichtungen  
a) Biegevorrichtung, b) Schlag- und Schlagbiegevorrichtung  
(1 Bährführung mit Fallhöhen-einstellung, vordere Führungsbahn abgenommen, 2 Fallbär, 3 Schabotte, 4 Probe)

gezogen. Durch Schlag- und Schlagbiegeversuche sollte das Verhalten des Zinküberzuges bei schlagartiger Beanspruchung ohne und mit einer Verformung des Grundwerkstoffes untersucht werden. *Bild 1b* zeigt den hierfür verwendeten Fallbär von 12,5 kg. Bei den Schlagversuchen wurden die Versuchsstücke von 40 mm × 250 mm in den Schlitz der Schabotte gesteckt und die untere Aussparung mit einem Paßstück ausgefüllt, so daß die Probe voll auflag. Die Schlagarbeit betrug 1,25 kgm. Bei dieser Arbeit entstand gerade noch keine Verformung des Grundwerkstoffes. Bei den Schlagbiegeversuchen wurden die Probestücke von 40 mm × 250 mm hohl auf die Schabotte gelegt und mit einer Schlagarbeit von 8,75 kgm geschlagen. Die Proben wurden dabei in einem Winkel von etwa 45° schnell gebogen. Die Wirkung des Schlages auf den Zinküberzug wurde nach dem Aussehen der geschlagenen Seite, also der Innenseite des Winkels beurteilt. Man unterschied dabei zwischen glatten und rauen Zinküberzügen, Zinküberzügen mit leichten und starken Rissen und Zinküberzügen, die ablättern.

#### Einfluß der Verzinkungsbedingungen auf die Dicke des Zinküberzuges

Beim Eintauchen von Stahl in eine Zinkschmelze werden an der Stahloberfläche Eisen-Zink-Legierungsschichten gebildet, über die sich beim Herausziehen ein Film der Zinkschmelze legt, der als Reinzinkschicht erstarrt. Die Dicke und der Aufbau des Zinküberzuges hängen daher von den Wachstums- und Entstehungsbedingungen dieser beiden Schichten ab. Während die Wachstumsverhältnisse der Legierungsschicht schon häufig untersucht worden sind<sup>11) bis 20)</sup>,

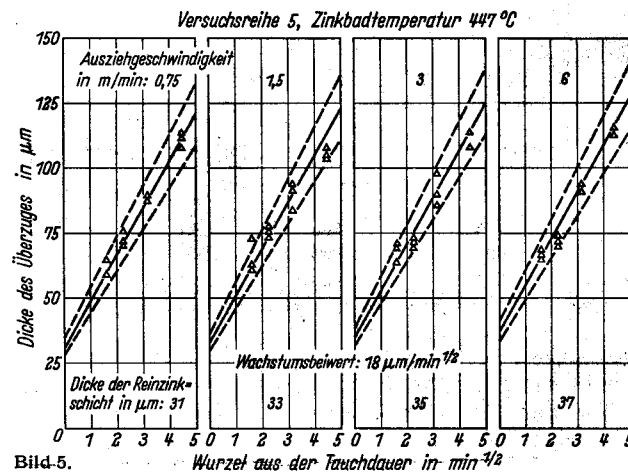
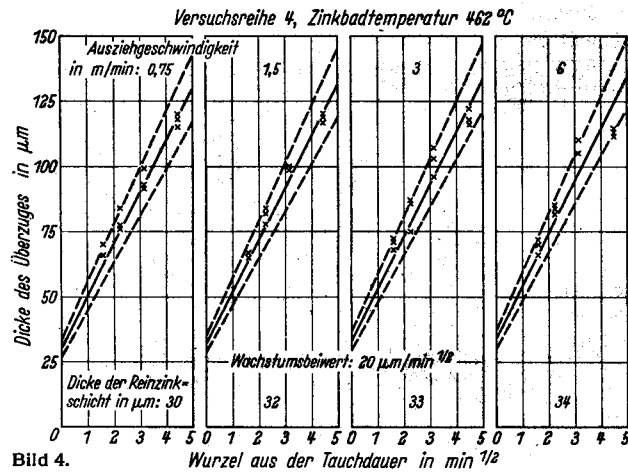
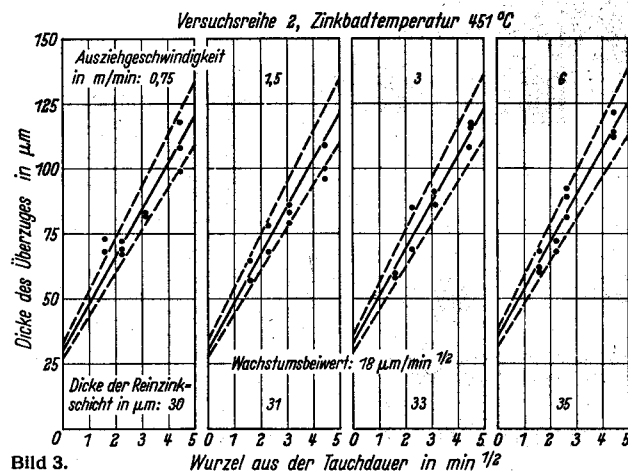
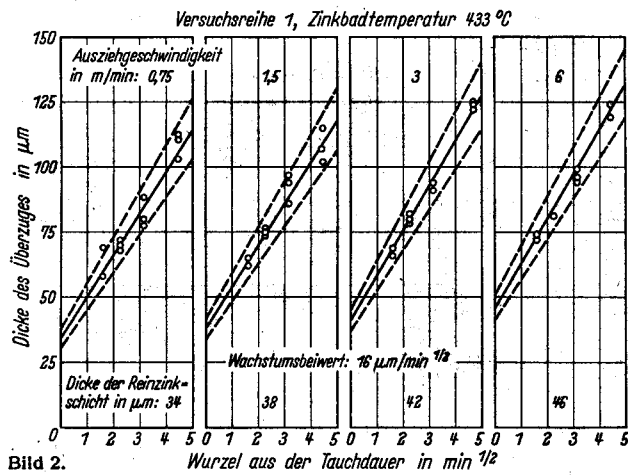
- <sup>11)</sup> Bablik, H.: Das Feuerverzinken. Wien 1941.
- <sup>12)</sup> Daniels, E. J.: I. Inst. Metals 46 (1931) S. 81/96.
- <sup>13)</sup> Grubitsch, H.: Angew. Chem. 48 (1935) S. 689/91.
- <sup>14)</sup> Pügel, W., E. Scheil u. R. Stenkhoff: Arch. Eisenhüttenwes. 9 (1935/36), S. 301/04.
- <sup>15)</sup> Scheil, E., u. H. Wurst: Z. Metallkde. 29 (1937) S. 224/29 u. 30 (1938) S. 4/7; vgl. Stahl u. Eisen 57 (1937) S. 1082.
- <sup>16)</sup> Bablik, H., F. Götzl u. R. Kukaczka: Korrosion u. Metallsch. 14 (1938) S. 168/72 u. 350/52; 17 (1941) S. 128/30 u. 18 (1942) S. 222/26.
- <sup>17)</sup> Grubitsch, H., u. F. Brückner: Korrosion u. Metallsch. 13 (1937) S. 254/60.
- <sup>18)</sup> Horstmann, D.: Stahl u. Eisen 73 (1953) S. 659/65 (Mitt. Max-Planck-Inst. Eisenforsch., Abh. 573, u. Gemeinschaftsaussch. Verzinken 2).
- <sup>19)</sup> Horstmann, D.: Stahl u. Eisen 80 (1960) S. 1531/40 (Mitt. Max-Planck-Inst. Eisenforsch., Abh. 867, u. Gemeinschaftsaussch. Verzinken 38).
- <sup>20)</sup> Horstmann, D.: 6. Intern. conf. on hot dip galvanizing at Interlaken 1961. London 1962. S. 319/28.

<sup>7)</sup> Horstmann, D.: Arch. Eisenhüttenwes. 27 (1956) S. 297/302 (Mitt. Max-Planck-Inst. Eisenforsch., Abh. 664, u. Gemeinschaftsaussch. Verzinken 22).

<sup>8)</sup> Stricker, F.: Stahl u. Eisen 82 (1962) S. 1781/90 (Gemeinschaftsaussch. Verzinken 44).

<sup>9)</sup> Stricker, F.: Stahl u. Eisen demnächst.

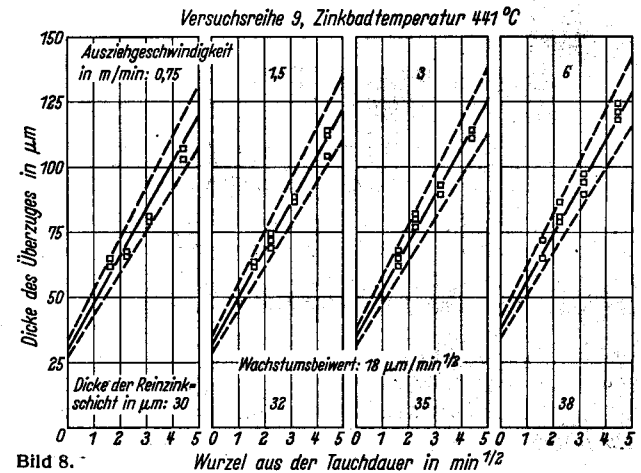
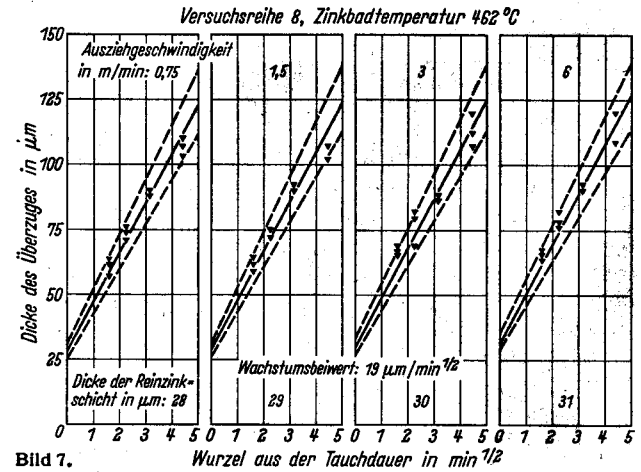
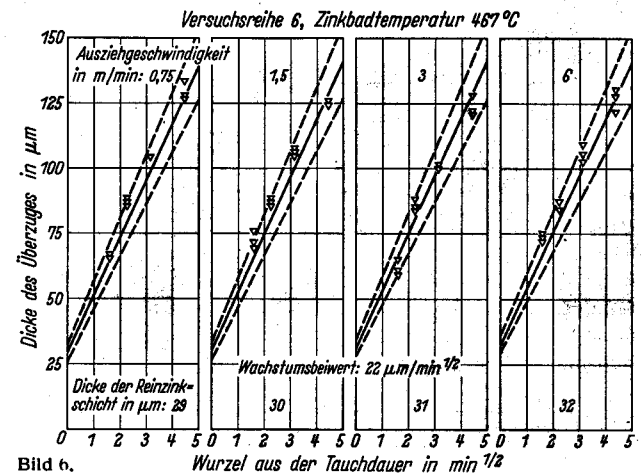
<sup>10)</sup> Rowland, D. H.: Trans Amer. Soc. Metals 40 (1948) S. 983/1011.



ist über die Entstehungsbedingungen der Reinzinkschicht wenig bekannt<sup>1) 21)</sup>. Bei Stahl mit der gleichen chemischen Zusammensetzung und Oberflächenbeschaffenheit hängt die Dicke beider Schichten im wesentlichen von der Tauchdauer, der Temperatur des Zinkbades und der Ausziehgeschwindigkeit ab, wenn die Zusammensetzung des Zinkbades annähernd gleich ist und die Art des Herausziehens dieselbe ist. Durch Verändern dieser drei Größen kann daher die Dicke des gesamten Überzuges und die der einzelnen Schichten gezielt verändert werden, wenn man die Gesetzmäßigkeiten beim Wachsen der Legierungsschicht und beim Entstehen der Reinzinkschicht kennt.

Bei unberuhigten Stählen mit der üblichen Zusammensetzung nimmt die Dicke des Zinküberzuges bei Zinkbad-

<sup>21)</sup> Bablik, H.: Mitt. Forsch.-Ges. Blechverarb. (1955) Nr. 11, S. 129/34.



Bilder 2 bis 8. Dicke des Zinküberzuges in Abhängigkeit von der Wurzel aus der Tauchdauer bei verschiedenen Ausziehgeschwindigkeiten für unterschiedliche Versuchsbedingungen

temperaturen bis rd. 470 °C mit der Tauchdauer zu, und zwar nach einem parabolischen Gesetz, wobei die Zuwachsraten kleiner werden<sup>11)</sup> bis 20). Die Zunahme entsteht durch das Wachsen der Legierungsschicht. Werden in einem Bild

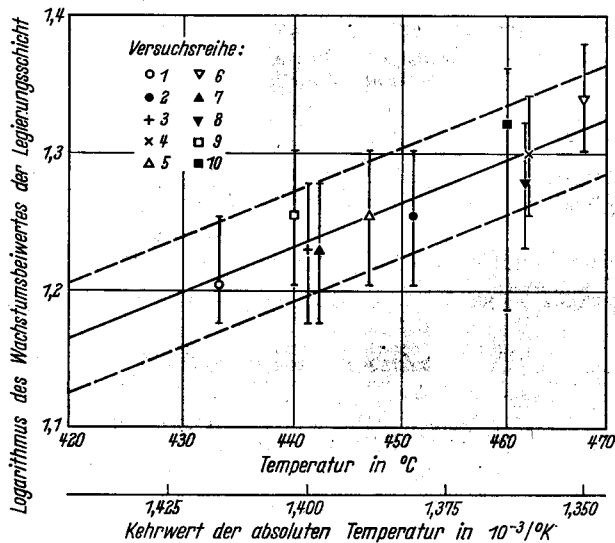


Bild 9. Veränderung des Logarithmus des Wachstumsbeiwertes mit dem Kehrwert der absoluten Temperatur

auf der Ordinate die Schichtdicke des Zinküberzuges und auf der Abszisse die Wurzel aus der Tauchdauer aufgetragen, so stellt sich dieses Zeitgesetz als eine Gerade dar. Bei einer bestimmten Schichtdicke trifft diese Gerade auf die Ordinate.

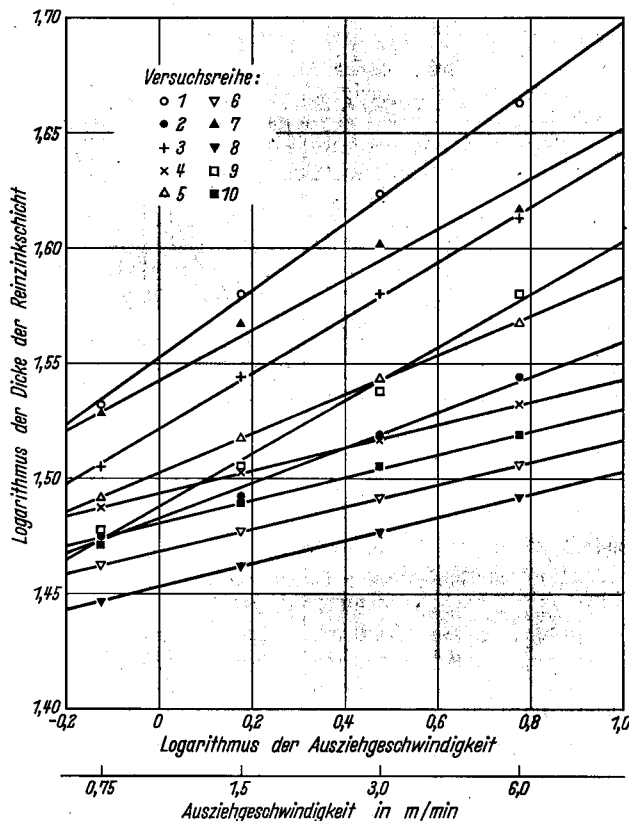


Bild 10. Veränderung des Logarithmus der Dicke der Reinzinkschicht mit dem Logarithmus der Ausziehgeschwindigkeit

Der Auftreffpunkt ist die Dicke des beim Herausziehen mitgerissenen Filmes der Zinkschmelze. Sie entspricht nahezu der Dicke der Reinzinkschicht, wenn man das Weiterwachsen der Legierungsschicht beim Abkühlen vernachlässigt. Bei unruhigen Stählen und Abkühlung an Luft ist die Dickenzunahme durch Weiterwachsen nur gering. In den

Bildern 2 bis 8 ist ein Teil der Ergebnisse der zehn bei verschiedenen Temperaturen durchgeführten Versuchsreihen in dieser Art dargestellt. Die mittlere der eingezeichneten Geraden ist die Kurve für die Mittelwerte, die beiden äußeren,

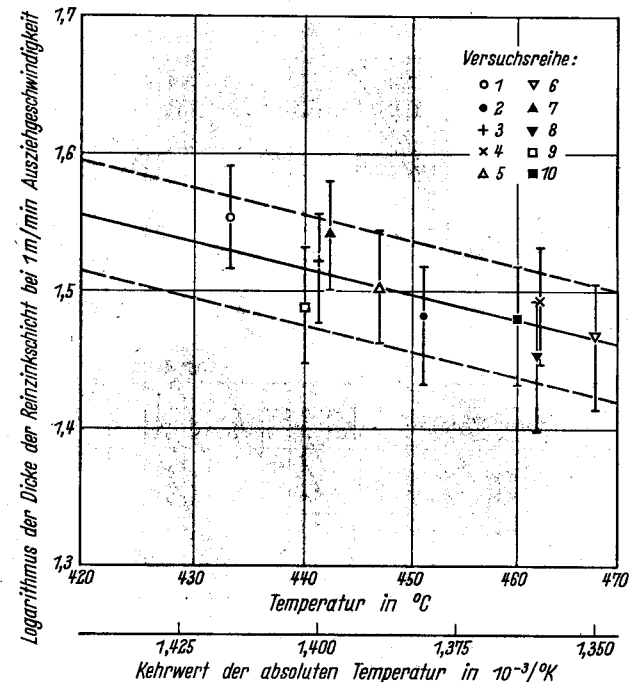


Bild 11. Veränderung des Logarithmus der Dicke der Reinzinkschicht bei einer Ausziehgeschwindigkeit von 1 m/min mit dem Kehrwert der absoluten Temperatur

gestrichelt gezeichneten Geraden grenzen einen Streubereich von  $\pm 10\%$  ab. Im oberen Teil der Teilbilder ist die Ausziehgeschwindigkeit in m/min, unten die Dicke der Reinzinkschicht in  $\mu\text{m}$  angegeben. Die Dickenzunahme der Legie-

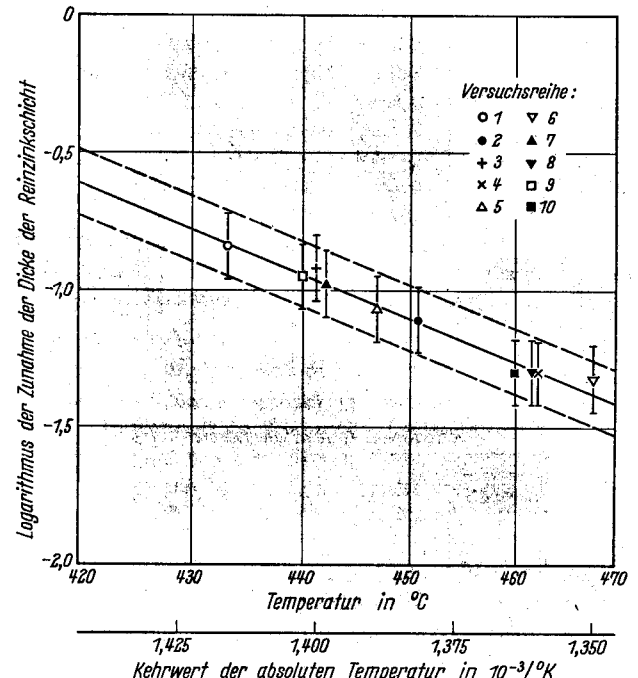


Bild 12. Veränderung des Logarithmus der Zunahme der Dicke der Reinzinkschicht mit dem Kehrwert der absoluten Temperatur

rungsschicht = Dicke/Wurzel aus der Tauchdauer ist durch die Steigung der Mittelwertsgeraden gegeben. Sie wird als „Wachstumsbeiwert“ in  $\mu\text{m}/\text{min}^{1/2}$  angegeben. Dieser Wert ist von der Ausziehgeschwindigkeit unabhängig, denn die Geraden der Mittelwerte der einzelnen Teilbilder laufen parallel zueinander. Die Dicke der Reinzinkschicht nimmt

dagegen mit der Ausziehgeschwindigkeit zu, wie es die Zahlen zeigen. Die Dicke der Reinzinkschicht und der Wachstumsbeiwert der Legierungsschicht ändern sich beide mit den angegebenen Zinkbadtemperaturen, wie es ein Vergleich der an den Bildern angegebenen Zahlen mit der Versuchstemperatur zeigt. Die Dicke der Legierungsschicht

Die Wachstumsgeschwindigkeit der Legierungsschicht nimmt mit steigender Temperatur zu und entsprechend der zeitunabhängige Wachstumsbeiwert. Trägt man auf der Ordinate die Logarithmen dieser Wachstumsbeiwerte und auf der Abszisse die Kehrwerte der absoluten Temperaturen von rechts nach links steigend auf, was einer Temperatur-

zunahme in umgekehrter Richtung entspricht, so erhält man, wie bei allen Diffusionsvorgängen, eine von links unten nach rechts oben ansteigende Gerade (Bild 9). Als Anhalt sind hier auf der Abszisse auch die Temperaturen in °C angegeben. Die Wachstumsbeiwerte der einzelnen Versuchsreihen streuen um eine Mittelwertsgerade in einem ebenfalls eingezeichneten Bereich von  $\pm 10\%$ . Die bei den einzelnen Meßwerten möglichen Streubereiche sind bei jedem Punkt als senkrechte Ordinatenabschnitte angegeben. Weil Lage und Steigung dieser Geraden durch zwei Punkte bestimmt werden, ist es möglich — bei Berücksichtigung des parabolischen Wachstumsgesetzes —, die Dicke der Legierungsschicht nach jeder Tauchdauer und bei jeder Zinkbadtemperatur im voraus zu berechnen.

Die Dicke der Reinzinkschicht nimmt mit der Ausziehgeschwindigkeit zu. In Bild 10 sind auf der Ordinate die Logarithmen der Dicke der Reinzinkschicht und auf der Abszisse die Logarithmen der Ausziehgeschwindigkeit aufgetragen. Bei dieser Art der Darstellung entstehen für die Dicke der Reinzinkschicht in Abhängigkeit von der Ausziehgeschwindigkeit Geraden mit unterschiedlicher Steigung und verschiedenen Lagen im Koordinatennetz. Eine doppeltlogarithmische Abhängigkeit ist

nach den hydrodynamischen Gesetzen immer dann gegeben, wenn an der Oberfläche eine laminare Strömung auftritt. Beim Übergang von einer laminaren in eine turbulente Strömung ist daher, wie bei allen hydrodynamischen Vorgängen, zu vermuten, daß diese Gesetzmäßigkeit nicht mehr gilt.

Ein solcher Übergang kann durch wesentliches Erhöhen der Ausziehgeschwindigkeit auf einen noch unbekannten Wert oder durch Oberflächeneinflüsse, vor allem durch eine sehr große Oberflächenrauheit, ausgelöst werden. Bei sehr langsamen Ausziehgeschwindigkeiten dürften sich ebenfalls Abweichungen ergeben, die durch das Weiterwachsen der

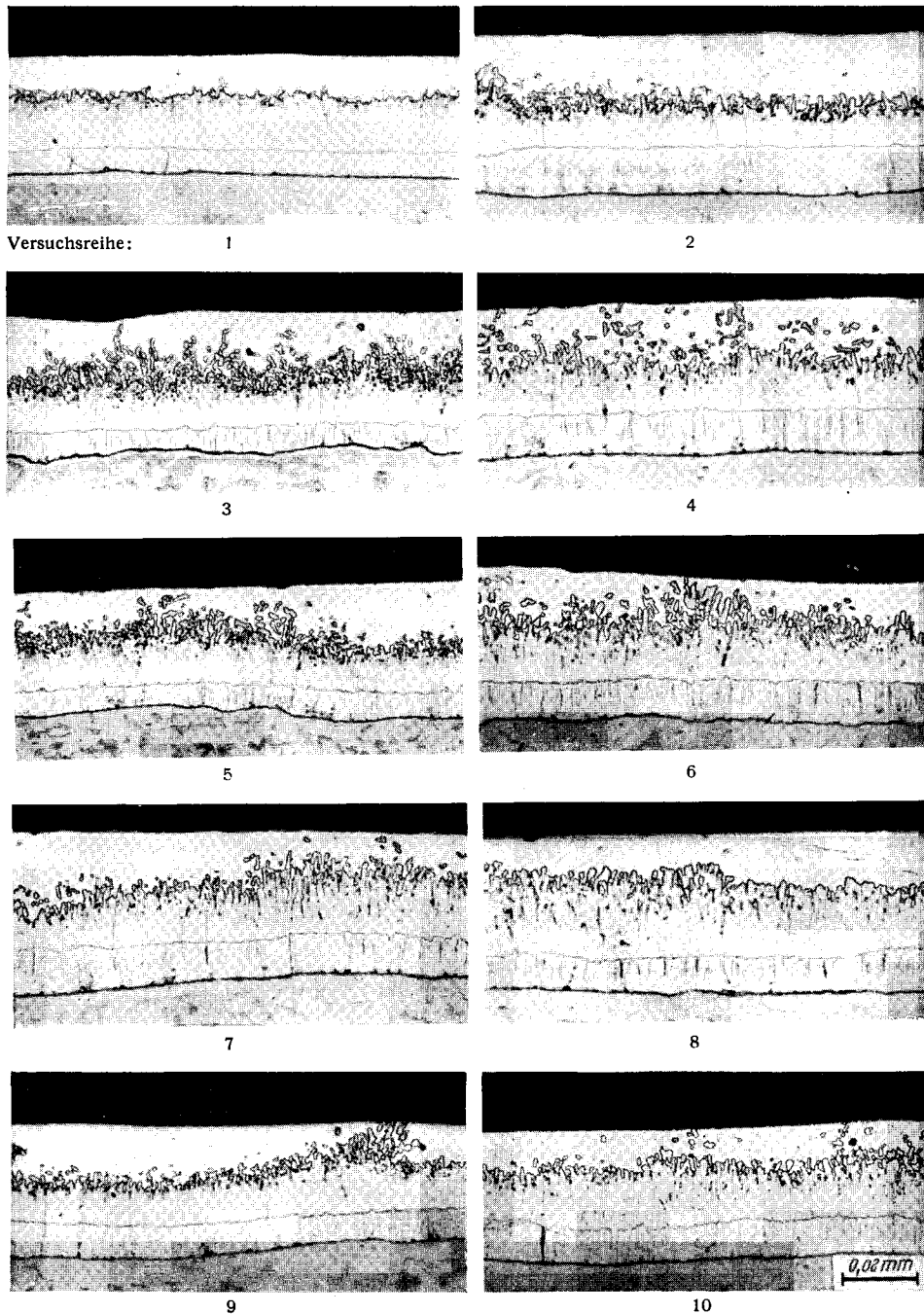


Bild 13. Gefüge der Zinküberzüge der zehn Versuchsreihen  
(Tauchdauer 10 min, Ausziehgeschwindigkeit 1,5 m/min; 500:1)

ist also abhängig von der Tauchdauer und der Zinkbadtemperatur und unabhängig von der Ausziehgeschwindigkeit; die Dicke der Reinzinkschicht hängt von der Ausziehgeschwindigkeit und der Temperatur des Zinkbades und nicht von der Tauchdauer ab. Es ist also notwendig, sowohl den Einfluß der Temperatur auf das Wachstum der Legierungsschicht zu untersuchen — denn der Einfluß der Tauchdauer ergibt sich bereits aus diesem parabolischen Zeitgesetz — als auch die Wirkung der Ausziehgeschwindigkeit und der Temperatur auf die Dicke der Reinzinkschicht zu klären.

Legierungsschicht bedingt sind, das dann mit berücksichtigt werden muß. Die doppeltlogarithmischen Geraden sind durch ihren Schnittpunkt mit der Nullordinate, d. h. die Dicke der Reinzinkschicht bei einer Ausziehgeschwindigkeit von 1 m/min, und ihren Anstieg festgelegt. Bei gleichen Voraussetzungen auf der Stahlseite werden die beiden Größen von der Viskosität der Zinkschmelze bestimmt, die bei gleicher Zusammensetzung der Schmelze durch die Temperatur festgelegt ist.

Der Einfluß der Temperatur auf die Dicke der Reinzinkschicht ist in den Bildern 11 und 12 dargestellt. Auf den Abszissen ist wie in Bild 9 der Kehrwert der absoluten Temperatur von rechts nach links steigend aufgetragen, auf der Ordinate in Bild 11 der Logarithmus der Dicke der Reinzinkschicht bei einer Ausziehgeschwindigkeit von 1 m/min und in Bild 12 der Logarithmus des Anstieges der Geraden, also der Zunahme der Dicke der Reinzinkschicht mit der Ausziehgeschwindigkeit. Bei dieser Art der Darstellung streuen die einzelnen Meßwerte in einem Bereich von  $\pm 10\%$  um eine Mittelwertgerade. Die Streubreiten der einzelnen Punkte sind durch senkrechte Ordinatenabschnitte angedeutet. Beide Werte werden von links nach rechts mit zunehmender Temperatur kleiner. Unter Berücksichtigung der in Bild 10 wiedergegebenen doppeltlogarithmischen Abhängigkeit der Reinzinkschichtdicke von der Ausziehgeschwindigkeit läßt sich aus dem Verlauf der Geraden in Bild 12 die Dicke der Reinzinkschicht für jede Ausziehgeschwindigkeit und jede Zinkbadtemperatur ermitteln.

Die Dicke des Zinküberzuges wird also im wesentlichen durch das Wachstum der Legierungsschicht bestimmt, deren Dicke durch Änderung der Tauchdauer in weiten Grenzen beeinflußt werden kann. Die Dicke der Reinzinkschicht läßt sich dagegen durch die Ausziehgeschwindigkeit nur wenig beeinflussen. Eine Temperaturerhöhung bewirkt ein stärkeres Wachstum der Legierungsschicht; die Dicke der Reinzinkschicht nimmt dagegen ab. An dieser Stelle muß aber ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß die Ergebnisse dieser Versuche sich zunächst nur auf den untersuchten einen Stahl mit einer bestimmten Oberflächenbeschaffenheit beziehen. Für andere Stähle und andere Oberflächenzustände gelten die hier aufgezeigten Gesetzmäßigkeiten daher nur in qualitativer Hinsicht, wenn die Art der Reaktion des Zinks mit dem Eisen die gleiche ist. In den Zahlenwerten können dagegen erhebliche Abweichungen von diesen Ergebnissen entstehen.

#### Aufbau der Zinküberzüge

In Bild 13 ist das für die einzelnen Versuchsreihen kennzeichnende Gefüge der Zinküberzüge wiedergegeben. Bei allen Versuchsreihen besteht der Überzug aus der sehr dünnen, bei dieser Vergrößerung nicht mehr aufgelösten  $\Gamma$ -Schicht, der palisadenartig aufgebauten  $\delta_1$ -Schicht und der  $\zeta$ -Schicht, über die sich die Reinzinkschicht gelegt hat. In der Reinzinkschicht ist eine mehr oder weniger große Anzahl abschwimmender  $\zeta$ -Kristalle eingelagert, und zwar bei den Versuchsreihen 1, 2, 7, 8, 9 und 10 im allgemeinen sehr wenig und bei den Versuchsreihen 3, 4, 5 und 6 im Durchschnitt deutlich mehr. Es darf angenommen werden, daß dieser Unterschied auf die verschiedene Vorbehandlung zurückzuführen ist. Die Art der Beizbehandlung und der Beizsäure scheint dabei von untergeordneter Bedeutung zu sein, denn man findet beide Arten der Gefügeausbildung sowohl nach dem Beizen in Schwefelsäure als auch in Salzsäure (Tafel 1). Entscheidend dürfte vielmehr die Flußmittelbehandlung sein. Bei den Versuchsreihen mit wenigen  $\zeta$ -Kristallen in der Reinzinkschicht wurde das Flußmittel, sei es als Lösung, Pulver

oder Schmelze, sehr gleichmäßig aufgetragen, bei den vier Versuchsreihen mit vielen  $\zeta$ -Kristallen in der Reinzinkschicht wurde das Flußmittel dagegen grob mit der Hand aufgestreut. Möglicherweise wirkt sich auch die Art des Flußmittels, Zink-Ammonium-Chlorid oder Salmiak, auf diese Erscheinung aus.

#### Der Einfluß der Dicke und des Aufbaues des Zinküberzuges auf sein Verhalten bei einer Biege- und Schlagbeanspruchung

Das Verhalten beliebiger Deckschichten bei einer mechanischen Beanspruchung durch Biegen und Schlagen wird

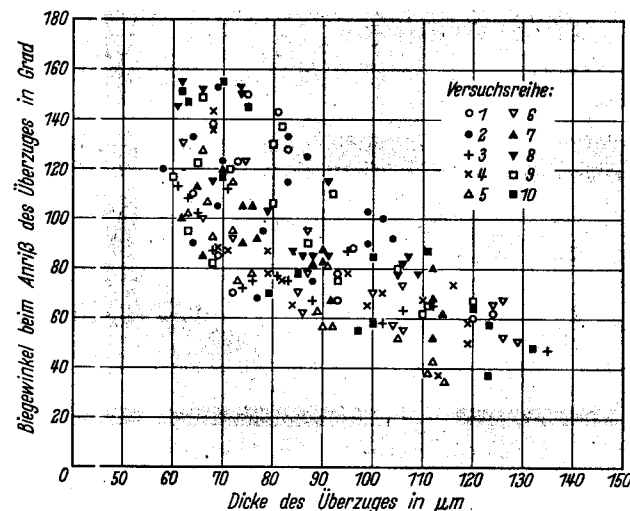


Bild 14. Einfluß der Dicke des Zinküberzuges auf sein Biegeverhalten

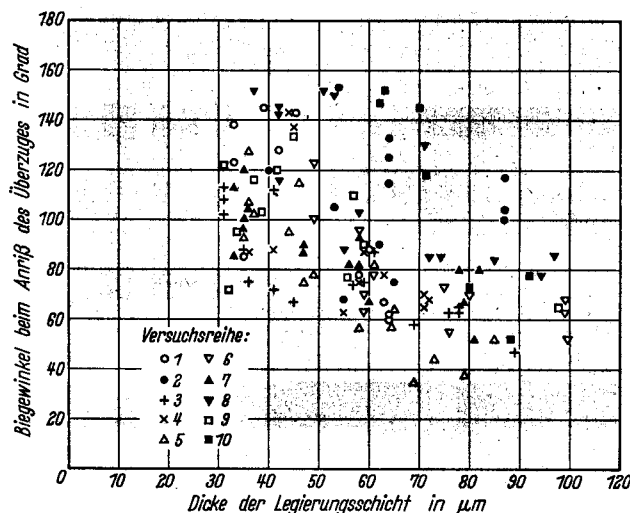


Bild 15. Einfluß der Dicke der Eisen-Zink-Legierungsschicht auf das Biegeverhalten

mit zunehmender Schichtdicke schlechter. Daneben hat häufig auch der Aufbau des Überzuges und die Beschaffenheit des Untergrundes einen entscheidenden Einfluß. Das gilt auch für Zinküberzüge. In Bild 14 sind die Biegewinkel, bei denen der Zinküberzug den ersten sichtbaren Anriß zeigt, für verschiedene Schichtdicken des Zinküberzuges aufgetragen. Das schlechtere Verhalten mit zunehmender Schichtdicke ist trotz der verhältnismäßig großen Streubreite gut zu erkennen. Häufig wird die Ansicht vertreten, daß das Biegeverhalten von Zinküberzügen vor allem durch die Dicke der Eisen-Zink-Legierungsschicht beeinflusst wird. Daher sind in Bild 15 diese Biegewinkel gegen die Dicke der Legierungsschicht aufgetragen. Es ergibt sich zwar der gleiche Verlauf, doch sind die Streuungen hier wesentlich größer. Das Ergebnis läßt nur den Schluß zu, daß nicht die



Dicke der Legierungsschicht allein in einem gegebenen Zinküberzug für das Biegeverhalten verantwortlich ist.

In Bild 16 sind auf der Ordinate wieder der Biegewinkel und auf der Abszisse die Dicke des Zinküberzuges aufgetragen. Es ist hier jedoch getrennt worden zwischen Über-

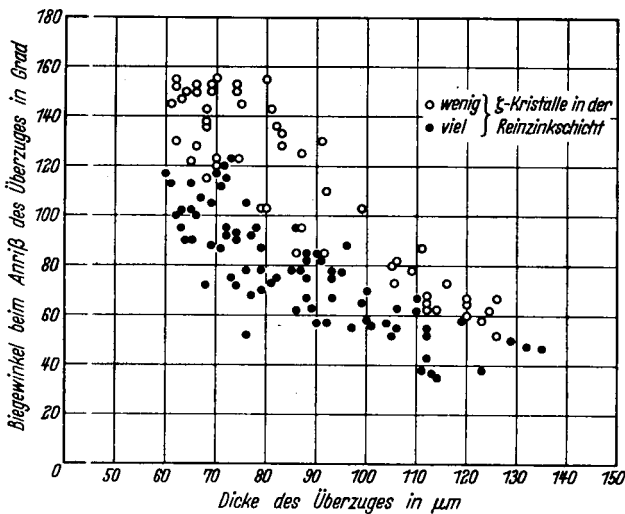


Bild 16. Wirkung der in der Reinzinkschicht vorhandenen abgeschwommenen  $\zeta$ -Kristalle auf den Biegewinkel

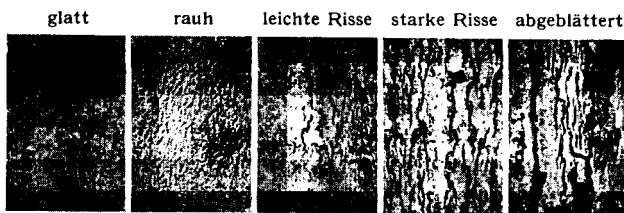
zügen mit wenigen und mit vielen  $\zeta$ -Kristallen in der Reinzinkschicht. Alle Meßwerte der Überzüge mit wenig Kristallen liegen im oberen Bereich und alle Meßwerte der

Die Schlagversuche sollten das Verhalten des Zinküberzuges bei einer schlagartigen Beanspruchung ohne Verformung des Grundwerkstoffes klären. Bei keiner Probe war eine Beschädigung des Zinküberzuges durch Reißen oder Abblättern festzustellen. Das gelegentlich beobachtete Abplatzen bei Konstruktionsteilen trat bei den Versuchen nicht auf. Da beim Biegen die abschwimmenden Kristalle von großem Einfluß sind, kann daraus geschlossen werden, daß die Zinkschicht bei schlagartiger Beanspruchung ohne Verformung nur dann abplatzen wird, wenn die Menge dieser Kristalle noch wesentlich größer ist als in diesen Versuchsstücken.

Ein anderes Ergebnis erhält man, wenn beim Schlagen der Grundwerkstoff mit verformt wird. Es können dann sowohl auf der geschlagenen Seite als auch an der gegenüberliegenden Zugseite Risse und Abblätterungen auftreten. Die Beschädigungen sind im allgemeinen an der geschlagenen Seite größer. Der Umfang der Beschädigung nimmt mit der Überzugsdicke zu, wie es die Zusammenstellung in Bild 17 zeigt. Die angegebenen Zahlen sind Prozentanteile in der jeweiligen Gruppe. Das Verhalten des Zinküberzuges beim schnellen Biegen durch Schlag ist also ähnlich wie bei einer langsamen und gleichmäßigen Biegebeanspruchung. Der breite Streubereich ist auch hier durch den Aufbau, vor allem durch die verschiedenen Mengen von  $\zeta$ -Kristallen in der Reinzinkschicht des Zinküberzuges zu erklären.

### Zusammenfassung

Durch umfangreiche Versuche wird der Einfluß der Verzinkungsbedingungen auf Dicke, Aufbau und Eigenschaften eines Zinküberzuges untersucht. Die Dicke des Zinküberzuges hängt im wesentlichen vom Wachstum der Eisen-Zink-Legierungsschicht ab. Bei den üblichen unberuhigten Stählen folgt das Wachstum der Legierungsschicht bei Temperaturen bis zu 470 °C einem parabolischen Zeitgesetz. Durch eine Temperaturerhöhung nimmt die Wachstumsgeschwindigkeit zu. Die Ausziehgeschwindigkeit beeinflusst nicht die Dicke der Legierungsschicht. Eine Veränderung der Dicke der Reinzinkschicht ist nur in engen Grenzen möglich. Diese Schicht wird mit steigender Ausziehgeschwindigkeit dicker. Durch eine Temperaturerhöhung wird dagegen die Reinzinkschicht dünner. Die Art der Vorbehandlung hat keinen wesentlichen Einfluß auf die Dicke beider Schichten. Dagegen ist sie auf die Art des entstehenden Gefüges der Zinküberzüge von großem Einfluß und bedingt unter Umständen, daß größere Mengen abschwimmender Kristalle der Eisen-Zink-Verbindungen in der Reinzinkschicht vorhanden sein können.



Dicke des Überzuges in $\mu\text{m}$	glatt	rauh	leichte Risse	starke Risse	abgeblättert
130 bis 140	—	—	—	25,0 %	75,0 %
120 bis 130	—	—	—	46,5 %	53,5 %
110 bis 120	—	—	—	57,5 %	42,5 %
100 bis 110	—	1,8 %	11,1 %	42,6 %	44,5 %
90 bis 100	2,1 %	23,4 %	25,8 %	27,6 %	21,3 %
80 bis 90	12,8 %	37,2 %	27,2 %	11,4 %	11,4 %
70 bis 80	62,5 %	29,2 %	8,3 %	—	—
60 bis 70	93,2 %	6,8 %	—	—	—
50 bis 60	(100 %)	—	—	—	—

Bild 17. Einfluß der Dicke des Zinküberzuges auf das Verhalten der Proben bei Schlagbiegebeanspruchung

Überzüge mit viel Kristallen im unteren Bereich. Die abschwimmenden  $\zeta$ -Kristalle wirken sich sehr stark auf das Biegeverhalten aus. Der Aufbau des Überzuges hat also ebenfalls einen entscheidenden Einfluß.

Es sei noch bemerkt, daß Verformungen von der Größe, die hier zum Anreißen des Zinküberzuges führen, bei verzinkten Konstruktionsteilen verhältnismäßig selten sind, so daß eine Beschädigung des Zinküberzuges im Betrieb nur in wenigen Fällen zu erwarten ist.

Biege-, Schlag- und Schlagbiegeversuche haben gezeigt, daß das Verhalten des Zinküberzuges bei derartigen Beanspruchungen schlechter wird, je dicker der gesamte Überzug ist. Die Dicke der Eisen-Zink-Legierungsschicht ist dabei nicht von wesentlichem Einfluß, wenn man davon absieht, daß sie die Gesamtdicke des Überzuges maßgeblich beeinflusst. Durch in der Reinzinkschicht eingelagerte Kristalle der Eisen-Zink-Verbindungen wird das Verhalten des Zinküberzuges bei derartigen Beanspruchungen verschlechtert.