

Untersuchung von Verfahren zum Messen der Schichtdicke von Zinküberzügen

Von Friedrich Stricker in Oberhausen

Mitteilung aus der Forschungsanstalt der Gutehoffnungshütte Sterkrade AG

[Bericht Nr. 44 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken*]

Schichtdicke bei der Badverzinkung. Möglichkeiten der Schichtdickenmessung. Eichung der Geräte. Einfluß der Zusammensetzung, der Dicke, der Größe der Fläche sowie der Oberflächenkrümmung des Grundwerkstoffes und der Ungleichmäßigkeiten der Schichtdicke auf das Meßergebnis. Regeln für die Anwendung magnetischer Schichtdicken-Meßgeräte. Vergleichende Messungen mit magnetischen, elektrochemischen und metallographischen Verfahren.

Um den Begriff der Schichtdicke und den Aussageinhalt von Messungen der Dicke von Zinkschichten erörtern zu können, sei auf das Zustandsschaubild Eisen-Zink von J. Schramm^{1) bis 3)}, die Gefügeausbildung im Zinküberzug und die Permeabilität der Eisen-Zinklegierungen in Bild 1 verwiesen. Das Zustandsschaubild Eisen-Zink sollte sich mit allen im Gleichgewichtszustand bei Raumtemperatur möglichen Legierungen im Aufbau der Zinkschicht widerspiegeln. Abgesehen davon, daß sich unter Betriebsbedingungen der Gleichgewichtszustand selten einstellen kann, besteht kein Grund dafür, daß die Dicke der Zink- und Zinklegierungsschichten der Abszissenanteile des Zustandsschaubildes maßstäblich entsprechen. Die Dicke der gebildeten Schichten ist vielmehr weitgehend veränderlich. Wegen der unterschiedlichen Diffusionsgeschwindigkeiten in den Teilschichten ist besonders damit zu rechnen, daß unter diffusionshindernden Bedingungen die eisennahen, unter diffusionsgünstigen aber die äußeren Teilschichten nur wenig entwickelt sind. Auch kommen in den einzelnen Teilschichten Phasengemische vor, die nach dem Zustandsschaubild nicht zu erwarten sind.

Als Schichtdicke des Zinküberzuges sei die gesamte Dicke der Schicht bezeichnet, die einen höheren Zinkgehalt als der

Grundwerkstoff aufweist. Für die Bestimmung der Dicke der Zinkschicht stehen mehrere Wege offen, die sich in der Genauigkeit der Ergebnisse unterscheiden. Die Verfahren

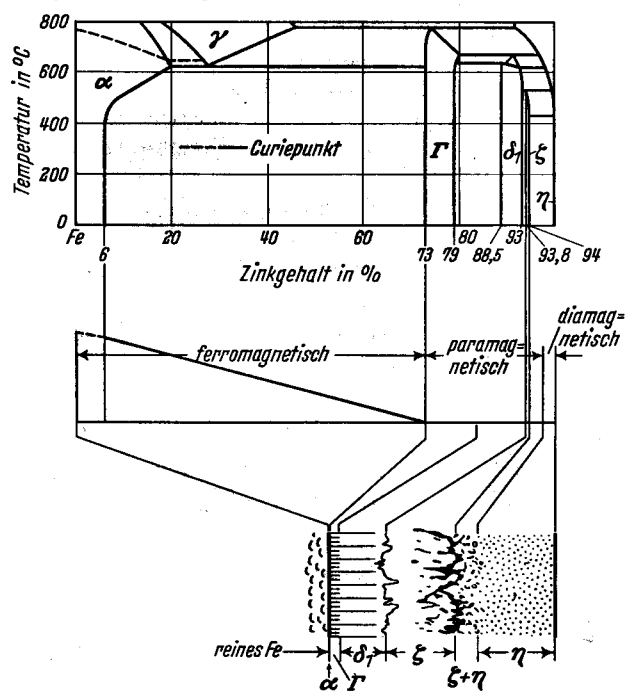


Bild 1. Zustandsdiagramm Fe-Zn, magnetische Eigenschaften der einzelnen Phasen und Aufbau der Phasen

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

¹⁾ Z. Metallkde. 28 (1936) S. 203/07.

²⁾ Z. Metallkde. 29 (1937) S. 222/24; vgl. Stahl u. Eisen 57 (1937) S. 1082.

³⁾ Z. Metallkde. 30 (1938) S. 131/35.

reichen von dem Grenzfall der örtlichen mikroskopischen Dickenmessung an Schnitt- und Schlißflächen als wissenschaftlichem Verfahren bis zum Grenzfall der Ermittlung der Gewichtszunahme des gesamten Werkstückes nach der Verzinkung im Betrieb. Weiter unterscheiden die Verfahren sich dadurch, ob beim Bestimmen der Dicke der Zinkschicht ein Eingriff in den Zinküberzug notwendig ist. Es gibt Verfahren, die

1. die Zerstörung des Werkstückes erfordern, weil sie die Untersuchung von Querschnitten verlangen,
2. mit Oberflächenbeschädigungen auskommen, die einen sehr geringen Umfang (örtliche Anschliffe, chemische oder elektrochemische Abtragung der Zinkschicht) haben und sich ausbessern lassen,
3. zerstörungsfrei arbeiten, indem bei bekannter Oberfläche die Gewichtszunahme des gesamten Werkstückes oder bei ausreichender Größe der Oberfläche die Schichtdicke mit einem magnetischen Verfahren ermittelt wird.

Mikroskopische Dickenmessung an Schnitt- und Schlißflächen

Die Genauigkeit einer mikroskopischen Messung ist sehr groß, z. B. $\pm 0,5 \mu\text{m}$ bei 300facher Vergrößerung, wenn alle Möglichkeiten ausgeschöpft werden. Die zwangsläufig genaue Probenvorbereitung wird durch die Benutzung hochwertiger Mikroskope vorteilhaft ergänzt. Eine Aussage über die Schichtdicke ist aber nur dann möglich, wenn eine genügend große Zahl von Einzelmessungen vorliegt, die eine statistische Auswertung erlaubt.

Die Messung am Schnitt senkrecht zur Oberfläche verlangt die Zerstörung eines Teils oder des ganzen Werkstückes. Zusammen mit der gleichzeitigen metallographischen Erfassung des Schichtaufbaues ist sie das wissenschaftliche Verfahren zur Untersuchung von Zinküberzügen. Durch schräges Anschleifen lassen sich die Schichten auseinanderziehen⁴⁾; stärkere Neigungen zur Oberfläche des Werkstückes sind der Untersuchung, aber nur bei nicht zu stark zerklüfteten Grenzflächen der Teilschichten, förderlich.

Als nur oberflächenbeschädigend darf das Verfahren gelten, bei dem mit zylindrischer, senkrecht zur Oberfläche zugestellter Schleifscheibe ein zylindrischer Anschliff bis an oder in den Grundwerkstoff hergestellt wird⁵⁾. Bei der Auswertung muß die veränderliche Übersetzung zwischen Ist-dicken und zugeordneten Längen beachtet werden.

Einzelheiten zu diesen Verfahren sowie eine vergleichende Untersuchung hierzu werden von H. Barghoorn⁶⁾ mitgeteilt.

Ermittlung der Gewichtsänderung von Werkstücken beim Verzinken

Der Gewichtsunterschied zwischen dem verzinkten und dem bereits gebeizten, aber trockenen Werkstück wird bestimmt. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Aussage über die gesamte Menge des Überzuges. Als Grundlage für die Beurteilung der mittleren oder gar der örtlichen Werte der Schichtdicke ist das Verfahren um so weniger geeignet, je mehr die Gestalt des Werkstückes und der dadurch mitbedingte Ablauf der Bewegung im Zinkbad auf verschiedenen Flächenbereichen verschieden hohe Zinkaufnahmen bewirken.

Mit chemischer Ablösung arbeitende Verfahren

Ermittlung der Schichtdicke aus der Zeit für die Abtragung der Schicht

Hierher gehört das Bemühen, die Preece-Probe in der ASTM-Vorschrift A 239-41, mit der die Gleichmäßigkeit der

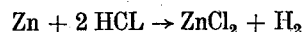
Verzinkung geprüft werden soll, auch zum Bestimmen der Schichtdicke auszunutzen. Untersuchungen von H. Bablik und Mitarbeitern⁷⁾ zeigten, daß die bis zum Entstehen eines zusammenhängenden Kupferüberzuges mögliche Zahl der Tauchungen verzinkter, nicht oxydierter Teile in Kupfersulfatlösung weder ein sicheres Maß für die Gleichmäßigkeit noch für die Dicke der Zinkschicht ist. Potential und Reaktionsgeschwindigkeit fallen nämlich von der η -Schicht zur Γ -Schicht ganz erheblich ab. Schichten gleicher Dicken, die nur aus Reinzink bestehen oder einen hohen η -Anteil haben, halten bei der Preece-Probe viel weniger Tauchungen aus als solche mit hohem Hartzinkanteil. Einflüsse der Ausbildung der Phasengrenzschichten spielen ebenfalls eine Rolle. Vor allem aber entsteht die Kupferschicht, die die beendete Abtragung der Zinkschicht anzeigt, bereits, wenn noch Restschichten von im allgemeinen 10 bis $15 \mu\text{m}$ Dicke vorhanden sind.

Örtliches Abbeizen und Messen der Schichtdicke

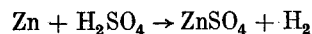
Nach dem Abbeizen einer möglichst scharf begrenzten kleinen Fläche wird die Schichtdicke als örtlicher Höhenunterschied gegenüber der ungebeizten Probe mit Feintastern ermittelt⁸⁾. Fehler durch Druckwirkung des Tasters auf weichen Schichten müssen hierbei vermieden werden. Das Verfahren hat sich nicht durchgesetzt.

Örtliches Abbeizen mit Rückschuß auf die Schichtdicke durch Messen der abgeschiedenen Menge Wasserstoff

Die Schichtdicke wird beim örtlichen Ablösen mit Säure aus der abgeschiedenen Wasserstoffmenge bestimmt. Nach den Gleichungen



oder



entspricht 1 g-Atom Zink einem Molvolumen Wasserstoff. Beim Ablösen der Zinkschicht wird aber zugleich das Eisen der Legierungsschichten unter Wasserstoffentwicklung gelöst. Hierbei bilden sich Eisen(II)-chlorid oder Eisen(II)-sulfat und je g-Atom Eisen ein Molvolumen Wasserstoff. Da die beiden Atomgewichte mit 65,38 für Zink und 55,84 für Eisen — bei einem verhältnismäßig kleinen Eisenanteil der Zinkschicht — nicht allzu unterschiedlich sind, kann mit hinreichender Genauigkeit gesagt werden, daß die beim Ablösen der Zinkschicht freiwerdende Wasserstoffmenge der gesamten Schichtdicke entspricht.

Elektrochemisches Ablösen der Zinkschicht nach J. C. Britton⁸⁾ und W. Katz⁹⁾

Die Grundlage aller elektrochemischen Verfahren sind die Faradayschen Gesetze. Wird beim elektrochemischen Ablösen eines aus mehreren Teilschichten unterschiedlicher Stoffe aufgebauten Überzuges das in jedem Augenblick herrschende Schichtpotential gemessen, so ist beim Übergang von einer Stoffschicht zur anderen ein Potentialsprung zu erkennen. Sobald also der Sprung zum Potential der Eisengrundschicht erfolgt, ist die gesamte Zinkschicht abgelöst. Die für das vollständige Ablösen notwendige Elektrizitätsmenge ergibt dann die Schichtdicke.

Ist die elektrochemische Ablösung ohne eine Potentialverfälschung durch Wasserstoffabscheidung möglich, können auch die Potentialsprünge zwischen der Reinzinkschicht und den einzelnen Zinklegierungen als Endpunkte der Auflösung der betreffenden Phasen angesehen werden. Da-

⁴⁾ Klemm, H.: Metall 1 (1947) S. 79/83.

⁵⁾ Blum, W., u. A. Brenner: J. Res. nat. Bur. Stand. 16 (1936), S. 171/84.

⁶⁾ Metalloberfläche, Ausg. B, 7 (1955) S. 8/11, 20/25 u. 36/39.

⁷⁾ Metalloberfläche, Ausg. A, 7 (1953) S. 66/72.

⁸⁾ J. Inst. Metals 58 (1936) S. 211/25.

⁹⁾ Arch. Eisenhüttenwes. 25 (1954) S. 307/14 (Gemeinschaftsaussch. Verzinken 12); Stahl u. Eisen 75 (1955) S. 1101/06 (Gemeinschaftsaussch. Verzinken 17).

mit werden außer der gesamten Schichtdicke der Aufbau der Zinkschicht und die Dicke der einzelnen Legierungsschichten bestimmt. Die Beschaffenheit der Grenzflächen zwischen den einzelnen Schichten wird durch die Form des Überganges vom einen zum anderen Potential gekennzeichnet.

Elektrische, akustische und durchstrahlende Verfahren

Die Dicke einer leitenden Deckschicht kann aus dem Widerstand bei Stromdurchgang senkrecht zur Oberfläche ermittelt werden. Wirbelstromverfahren nutzen die Veränderung der Induktion einer Hochfrequenzspule aus, die durch die Dickenänderung einer leitenden Deckschicht hervorgerufen wird. Derartige sowie akustische und durchstrahlende Verfahren eignen sich wenig für die beim Verzinken entstehenden Schichtdicken.

Magnetische Schichtdickenmessung

Die magnetische Messung nutzt für die Ermittlung der Schichtdicke die erhebliche Vergrößerung des magnetischen Widerstandes des ferromagnetischen Grundwerkstoffes durch die nicht ferromagnetische Zinkschicht aus. Nach Bild 1 sind die Hauptphasen der Zinkschicht para- oder diamagnetisch. Ferner ist zu beachten, daß an Phasengrenzflächen beim Übergang des magnetischen Flusses Verluste auftreten, die einen magnetischen Widerstand vortäuschen und besonders bei sehr zerklüfteten Phasengrenzflächen einen Betrag erreichen, der bei genauen Messungen berücksichtigt werden muß. Die Möglichkeit der zerstörungsfreien Messung und die zu erwartende einfache Anwendung der hierfür erforderlichen Geräte führten zur Untersuchung der in Westdeutschland im Handel erhältlichen Geräte zur magnetischen Schichtdickenmessung.

Rein magnetisch arbeitende, die Abreißkraft eines Magneten messende Geräte

Ein kleiner Dauermagnet mit meist halbkugelförmiger Kuppe wird senkrecht auf die Zinkschicht aufgesetzt und

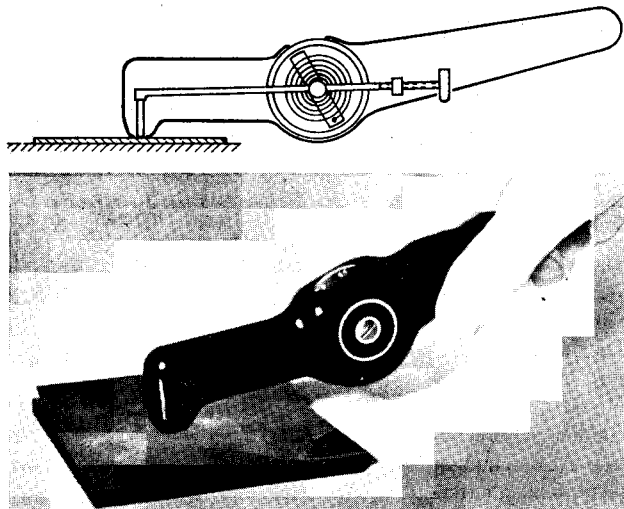


Bild 2. Gerät B, Magnetwaage

durch vorsichtiges Spannen einer Rückzugfeder die Abreißkraft bestimmt, die ein Maß für die Schichtdicke ist. Das Ergebnis der Messung gilt aber nur für den Einzelpunkt; es ist zu empfehlen, an der zu untersuchenden Stelle mehrere Messungen nebeneinander auszuführen, um die Streuung kennen zu lernen und einen Mittelwert zu bilden. Bei Gerät A¹⁰⁾ enthält das stabförmige Gehäuse einen längsbeweglichen Magnetträger mit Magnet, Feder und Rücklaufperre. Das Gerät wird senkrecht aufgesetzt und vorsichtig senkrecht abge-

zogen. Die Feder wird bis zum Abreißen des Magneten von der Zinkschicht gespannt. Die Abreißlage des Magneten wird festgehalten und die Schichtdicke abgelesen.

Eine andere Bauart hat einen quer zur Geräteachse am Magnetträger befestigten Magneten, der in zwei Punkten die Oberfläche des Werkstückes berührt.

Bei Gerät B in Bild 2 ist in einem handlichen Kunststoffgehäuse eine Drehmomentwaage gelagert mit einem kleinen Stabmagneten und einem Gegengewicht, das ein Messen unabhängig von der Lage der Oberfläche ermöglicht. Der eine Endpunkt der spiralförmigen Rückzugfeder ist so an einer Achse mit Verstell- und Meßrad befestigt, daß das Gerät geeicht werden kann. Auf dem Meßrad wird die Schichtdicke unter einer Meßmarke des Gehäuses abgelesen.

Magnetinduktive Geräte

Als Beispiel sei das Gerät C behandelt, bei dem zwischen den Schenkeln eines U-förmigen Magneten ein Stabmagnet oder Weicheisenanker drehbar gelagert ist. Der Anteil des Kraftflusses über dieses drehbare Glied ändert sich mit dem magnetischen Widerstand des äußeren Kraftlinienweges — durch Grundwerkstoff und Zinkschicht gebildet — und dreht den Stabmagneten in die entsprechende Gleichgewichtslage. Die Größe der Drehung ist ein Maß für die Schichtdicke. Das rein magnetisch arbeitende Gerät benötigt keine Stromquelle. Es hat nur eine Eichmöglichkeit, die man zum Einstellen des Nullpunktes oder der mittleren, bei der jeweiligen Messung zu erwartenden Schichtdicke benutzt.

Das Gerät arbeitet zweipolig und mißt bei ungleichen Schichtdicken unter beiden Polen den magnetischen Mittelwert der Schichtdicke. Wie nachstehend gezeigt werden wird, weicht dieser nur dann merklich vom arithmetischen Mittelwert ab, wenn die Dickenwerte unter den Polen sehr unterschiedlich sind. Gegen das selbsttätige Mitteln der Meßwerte für zwei nahe beieinander liegende Oberflächenpunkte ist nichts einzuwenden, denn die punktweise ermittelte Dicke darf nicht überbewertet werden, besonders da sie im Betrieb nur zur Mittelwertbildung verwendet wird.

Bei den Messungen wurde folgende Fehlerquelle auf ihre Auswirkung geprüft. Die Meßsonden der magnetischen Meßgeräte haben eine kugelige Oberfläche. Da die Zinkschicht nicht eben ist, sondern Berge und Täler aufweist, ist damit zu rechnen, daß die Sonden bei der überwiegenden Zahl der Messungen in die Täler abrutschen. Es müssen also zu niedrige Schichtdicken gefunden werden. Um die Größe des Fehlers festzustellen, wurden mit dem Gerät C die Meßsonden durch die Löcher einer auf die Probe gelegten Messing-schablone geführt. Der Durchmesser dieser Löcher war so bemessen, daß die Sonden zwar hindurchgingen, aber nicht mehr seitlich wegrutschen konnten, wenn sie auf einem Berg aufsaßen.

Elektromagnetische Geräte

Diese Geräte sind auf eine Stromquelle angewiesen. Es sind eine Reihe grundsätzlich verschiedener Schaltungen möglich. Sie müssen so aufgebaut sein, daß die Messung von den üblichen Schwankungen der Netzspannung ausreichend unabhängig bleibt.

Bei Gerät D speist die stabilisierte Netzspannung über einen Transformator zwei Kreise. Der als Sonde benutzte U-Magnet hat nur eine Wicklung, die in einem der beiden Kreise liegt und deren Spannungsabfall von der Schichtdicke abhängt. Die Schichtdicke wird von einem Milli-ampere-meter angezeigt. Zwei veränderliche Widerstände ermöglichen eine Zwei-Punkt-Eichung auf elektrischem Wege, z. B. auf die Dicke Null und auf die Dicke im Bereich der zu erwartenden Schichtdicke. Da beide Eichpunkte nicht völlig

¹⁰⁾ Berthold, R.: VDI-Z. 91 (1949) S. 476/78.

unabhängig voneinander sind, muß die Eichung im Näherungsverfahren mehrmals durchgeführt werden.

Ein Gerät E arbeitet mit Magnetverstärker, die Eichung wird wie bei Gerät D durchgeführt.

Mit F sei eine verbesserte Ausführung des Gerätes D bezeichnet, das nur noch zu einem Teil der Messungen herangezogen werden konnte. Die Arbeitsweise des Gerätes wird von V. Deutsch¹¹⁾ beschrieben. Es hat nur eine kugelförmige Meßsonde, die nahezu unempfindlich gegen Verkippen beim Messen ist. Die Eichung ist wiederum über zwei verschiedene Meßpunkte möglich.

Eichung der Geräte und Vergleich der Soll- und Ist-Werte bei ebenem Grundwerkstoff

In den Bildern 3 bis 6 sind auf der Abszisse die Sollwerte der verwendeten Folien, auf der Ordinate die von den unter-

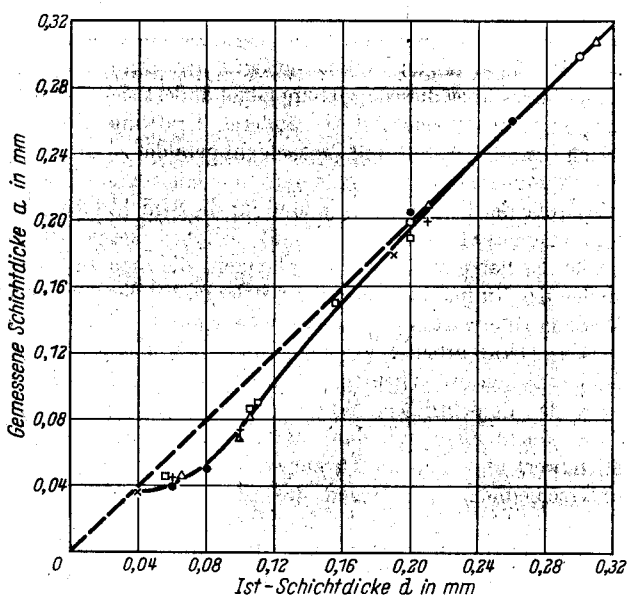


Bild 3. Messungen mit Gerät B; geeicht mit Folie aus Ms 63, 0,21 mm dick. Prüfplatte aus St 42, 100 mm × 1 mm × 10 mm

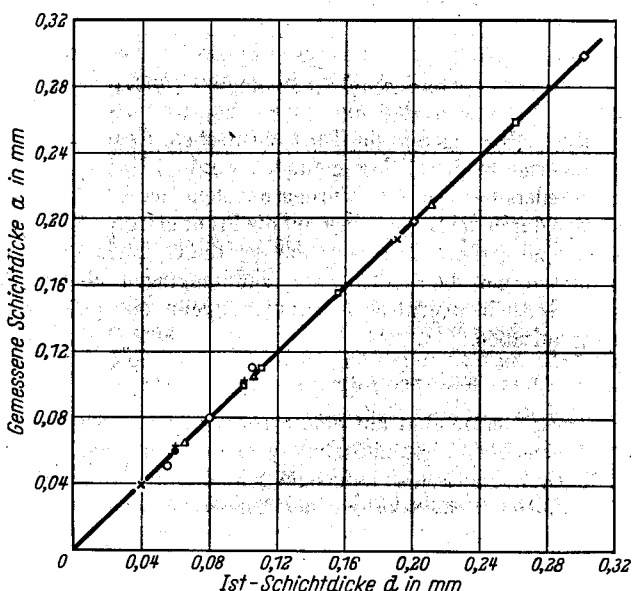


Bild 4. Messungen mit Gerät C; geeicht mit Folie aus Ms 63, 0,21 mm dick. Prüfplatte aus St 42, 100 mm × 100 mm × 10 mm

suchten Geräten angezeigten Dickenwerte in Millimetern aufgetragen. Grundwerkstoff waren Stahl St 42 und St 37. Die Fläche der Platte und deren Dicke wurden nach Vorversuchen mit 100 mm × 100 mm × 10 mm so gewählt, daß

eine geringfügige Änderung dieser Abmessungen keinen Einfluß auf die Anzeige ausübte.

Geeicht wurde unabhängig von den Angaben der Hersteller, indem auf die feingeschlichtete Oberfläche des Grundwerkstoffes für die Geräte B und C eine gewalzte Folie

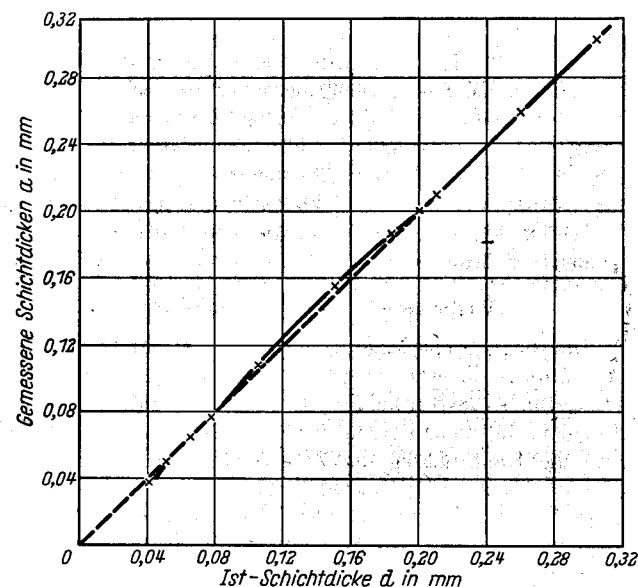


Bild 5. Messungen mit Gerät D; geeicht mit Folie aus Ms 63, 0,051 und 0,200 mm dick. Prüfplatte aus St 37, 100 mm × 100 mm × 10 mm

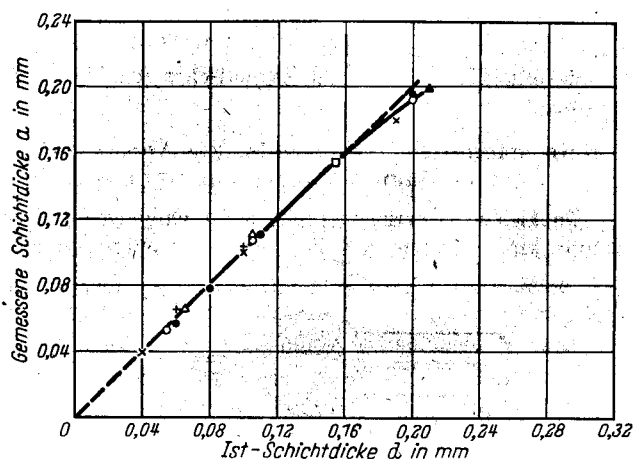


Bild 6. Messungen mit Gerät E; geeicht mit Folie aus Zn 0,155 mm und Al 0,04 mm dick. Prüfplatte aus St 42, 100 mm × 100 mm × 10 mm

aus Messing Ms 63 von 0,21 mm Dicke aufgelegt und die Geräte auf die Anzeige 0,21 mm eingestellt wurden. Das Gerät D wurde mit Ms-63-Folien von 0,51 und 0,200 mm Dicke, das Gerät E mit einer Aluminiumfolie von 0,04 mm und einer Zinkfolie von 0,155 mm Dicke geeicht. Bei allen Messungen wurde sorgfältig darauf geachtet, daß die Meßsonden senkrecht zur Oberfläche aufgesetzt wurden, weil bei Abweichungen von der Senkrechten ein Meßfehler (Kippfehler) entsteht.

Die für die Prüfung der Geradlinigkeit der Anzeige verwendeten Folien waren ebenfalls aus verschiedenen, unmagnetischen Werkstoffen, die bei gleicher Dicke und unter gleichen Prüfbedingungen gleiche Anzeigen ergaben.

Abgesehen vom unteren Meßbereich des Gerätes B wurde eine geradlinige Abhängigkeit des Meßwertes von der Foliendicke gefunden.

Einfluß der Zusammensetzung und der Vorbehandlung des Grundwerkstoffes

Nach dem Eichen auf einen Grundwerkstoff bestimmter Permeabilität müssen Messungen auf Grundwerkstoffen

¹¹⁾ Elektronik 8 (1959) S. 187/88.

anderer Permeabilität unter sonst gleichen Bedingungen wegen des veränderten magnetischen Widerstandes zu kleine oder zu große Werte gegenüber dem Eichwert ergeben. Dies bestätigten Messungen mit den Geräten C, D und E. Nach dem Eichen auf Stahl St 42 wurden nichtmagnetische Folien auf Stahl St 42 (Wert a_1) und auf Stahl St 52 (Wert a_2) ausgemessen. In Bild 7 sind auf der Abszisse die Schichtdicke in

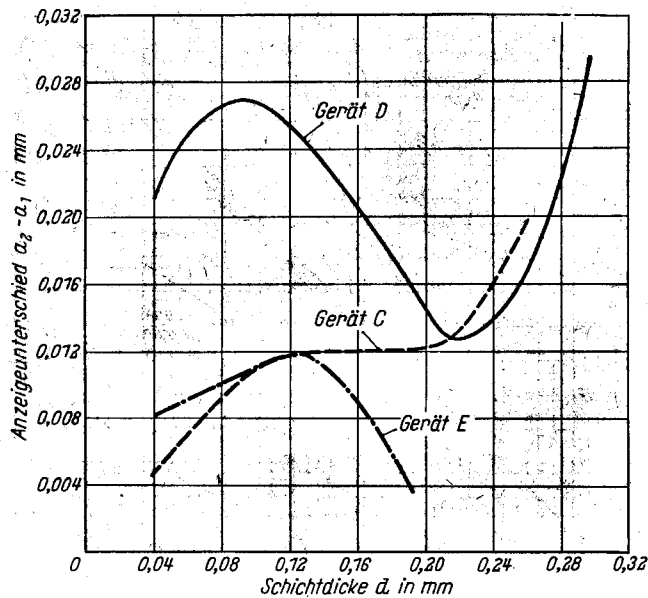


Bild 7. Einfluß der Permeabilität des Grundwerkstoffes, geeicht auf Grundwerkstoff St 42 mit Folie aus Ms 63, 0,21 mm dick (Geräte C und D) sowie Zn 0,155 und Al 0,04 mm dick (Gerät E). a_1 ist die Anzeige auf St 42, a_2 auf St 52. Abmessungen der Prüfplatte 100 mm \times 100 mm \times 10 mm

Millimeter und auf der Ordinate der Unterschied $a_2 - a_1$ der angezeigten Schichtdicke eingetragen. Der Unterschied der Meßwerte hat für die drei Geräte einen unterschiedlichen Verlauf in Abhängigkeit von der Schichtdicke. Die geringere

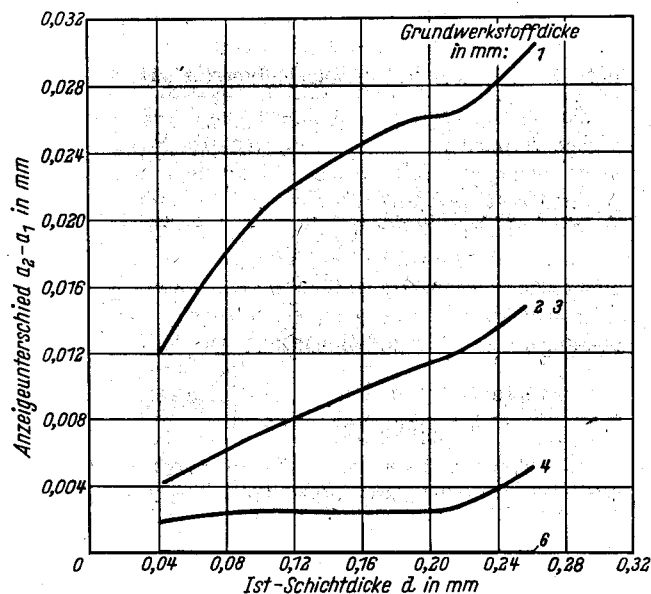


Bild 8. Einfluß der Dicke des Grundwerkstoffes beim Gerät C; geeicht auf Grundwerkstoff St 52 mit Folie aus Ms 63, 0,21 mm dick. a_1 ist die Anzeige für 10 mm Dicke des Grundwerkstoffes, a_2 für s mm. Sonstige Abmessungen der Prüfplatte 100 mm \times 100 mm

Permeabilität des Stahles St 52 mit dem höheren Kohlenstoffgehalt täuscht durchweg eine zu große Schichtdicke vor.

Entsprechende Überlegungen gelten für die Wirkung einer Verformung oder Wärmebehandlung des Grundwerkstoffes und der üblichen Schwankung in der Zusammensetzung des Stahles.

Für größere Dickenmessungen auf unlegierten Stählen können diese Einflüsse vernachlässigt werden. Zuverlässige Messungen setzen aber zumindest voraus, daß die gleiche Stahlsorte für die Eichung verwendet wird. Nach Möglichkeit ist auf dem Grundwerkstoff der zu verzinkenden Teile zu eichen, weil dann diese Einflüsse erfaßt werden.

Einfluß der Dicke des Grundwerkstoffes

Bei den bisherigen Messungen war die Dicke des Grundwerkstoffes stets auf 10 mm festgelegt worden, weil bei dieser und bei größeren Dicken keine Dickenabhängigkeit der Schichtdicken-Anzeige besteht. Bild 8 bringt als Beispiel Messungen mit dem Gerät C. Wieder sind auf der Abszisse die Schichtdicke in mm und auf der Ordinate der Anzeigeunterschied eingetragen. Nach dem Eichen und Messen auf dem 10 mm dicken Grundwerkstoff der Fläche 100 mm \times 100 mm wurde die Platte bis auf die zu messende Dicke abgefräst. Bis 6 mm Dicke ist kein Unterschied zwischen der Anzeige a_1 bei 10 mm und der zu vergleichenden Dicke a_2 festzustellen. Bei geringerer Dicke des Grundwerkstoffes wird eine scheinbar größere Dicke der Zinkschicht gemessen. Dieser Einfluß nimmt mit zunehmender Schichtdicke zu.

Einfluß der Größe der Fläche

Wenn die Geräte auf ebenen Grundflächen ausreichender Flächengröße geeicht und dann gleiche Schichtdicken auf

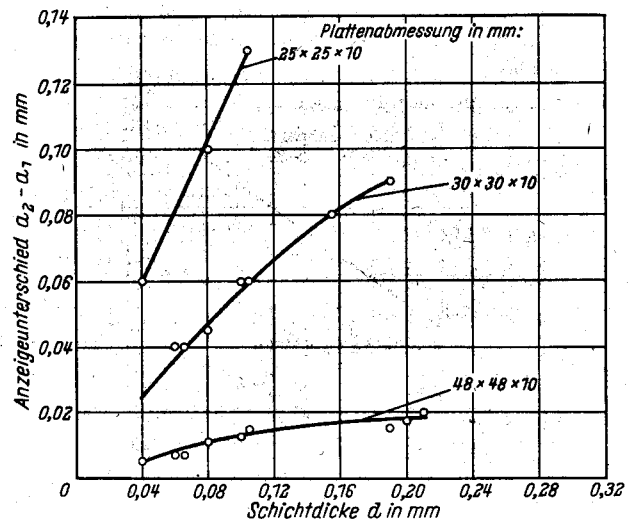


Bild 9. Einfluß der Oberflächengröße bei Gerät C

a_1 = Anzeige auf einer Fläche 100 mm \times 100 mm

a_2 = Anzeige auf angegebener Fläche, geeicht auf Grundwerkstoff St 52, 100 mm \times 100 mm \times 10 mm, gemessen auf Grundwerkstoff St 52

mehr und mehr verkleinerter Grundfläche gemessen werden, fallen die Meßwerte von einer bestimmten, von Bauart und Abmessungen des Gerätes abhängigen Flächengröße an zu hoch aus. Umgekehrt werden nach dem Eichen auf zu kleinen Flächen, die einen merkbaren Einfluß auf das Meßergebnis ausüben, die Schichtdicken auf größeren Flächen zu klein gefunden. Bei zweipoligen Geräten treten diese Einflüsse bei um so kleineren Flächen auf, je kleiner der Abstand zwischen den Magnetpolen ist. Einpolige Geräte sind wesentlich unempfindlicher.

Bild 9 zeigt den Einfluß der Oberflächengröße bei Gerät C. Daraus ist ersichtlich, um welchen Betrag $a_2 - a_1$ die Anzeige zu hoch ausfällt, wenn auf einer Platte von 100 mm \times 100 mm \times 10 mm geeicht und dann bei gleicher Dicke auf kleineren Flächen gemessen wird; mit abnehmender Flächengröße fallen die gemessenen Schichtdicken zu hoch aus.

Aus Bild 10 ist zu entnehmen, daß der bei Gerät C durch eine zu kleine Fläche hervorgerufene Fehler nicht durch Eichen auf einer Fläche gleicher Größe „eingeeicht“ werden kann. Erst bei gleicher Schichtdicke wird bei der Eichung dieser Fehler bedeutungslos. Ein Vergleich der Ordinatenwerte in den Bildern 9 und 10 zeigt aber, daß der Meßfehler

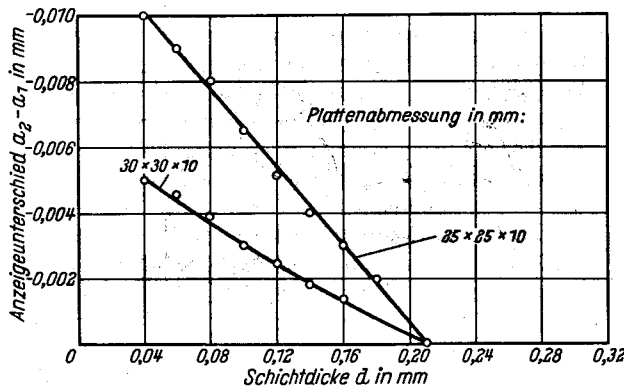


Bild 10. Einfluß der Oberflächengröße bei Gerät C

a_1 = Anzeige bei Eichung auf 100 mm × 100 mm-Fläche und 0,21 mm Schichtdicke
 a_2 = Anzeige bei Eichung auf angegebener Fläche und 0,21 mm Schichtdicke,
 Grundwerkstoff St 52, 10 mm dick

beim Eichen auf einer gleichgroßen Fläche kleiner ist als der Fehler beim Eichen auf einer größeren Fläche. Der Fehler kann nur dann völlig ausgeschaltet werden, wenn die Eichung außer unter den besprochenen Bedingungen auch mit derselben Schichtdicke vorgenommen wird, wie sie gemessen werden soll.

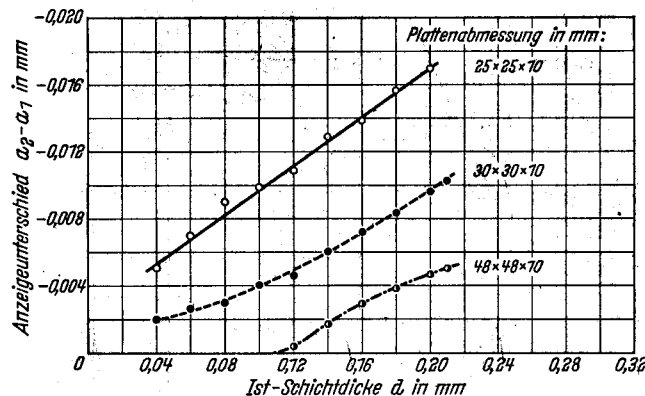


Bild 11. Einfluß der Oberflächengröße bei Gerät E

a_1 = Anzeige auf einer Fläche 100 mm × 100 mm
 a_2 = Anzeige auf angegebener Fläche,
 geeicht auf Grundwerkstoff St 52, 100 mm × 100 mm × 100 mm,
 gemessen auf Grundwerkstoff St 52

In Bild 11 sind die entsprechenden Meßwerte für das Gerät E wiedergegeben.

Die Untersuchungen geben zugleich Aufschluß über den Mindestabstand, der zwischen den Meßsonden und Werkstückkanten bestehen muß, wenn keine merklichen Meßfehler entstehen sollen; denn es ist nicht die gesamte Größe der Fläche des Werkstückes maßgebend, sondern die Fläche in der unmittelbaren Nachbarschaft der Meßsonde.

Einfluß der Oberflächenkrümmung

Es ist leicht einzusehen, daß ein auf ebener Fläche geeichtes Gerät auf dem Rücken einer Krümmung zu große, in dem Bauch der Krümmung zu kleine Meßwerte liefert. Die Wirkung der Krümmung muß mit abnehmendem Krümmungshalbmesser deutlicher werden. Bei Rohren, deren Schichtdicke mit einem zweipoligen Gerät gemessen werden soll, kann es außerdem nicht gleichgültig sein, ob die Meßsonden quer oder gleichlaufend zur Rohrachse aufgesetzt werden.

Bild 12 zeigt für das Gerät C den Einfluß des Krümmungshalbmessers auf die Schichtdickenanzeige. Auf der Ordinate ist wieder die Schichtdicke eingetragen, während auf der Abszisse die Anzeige des Gerätes C wiedergegeben wird. Geeicht wurde auf einer Fläche mit dem Halbmesser unendlich (ausgezogene Kurve). Für Eichung und Messung

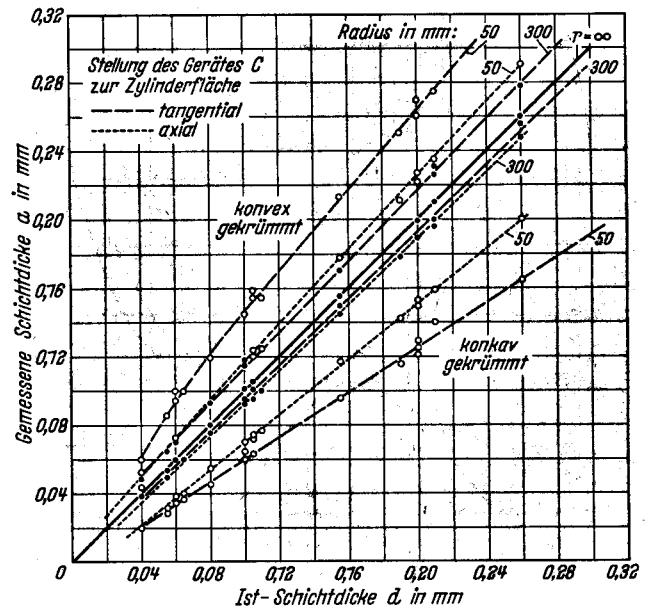


Bild 12. Einfluß der Krümmungshalbmesser auf die Anzeige der Schichtdicke des Gerätes C; geeicht auf ebenem Grundwerkstoff St 42, 100 mm × 100 mm × 4 mm, mit Folie Ms 63, 0,21 mm dick. Gemessen auf Grundwerkstoff St 42, 200 mm × 200 mm × 4 mm

wurden alle Bestimmungsstücke gleichgehalten mit Ausnahme der Krümmung; außerdem wurde noch die Lage der Verbindungslinie der beiden Meßsonden zur Achse der gekrümmten Fläche unterschieden (tangential und axial). Es ist gut zu erkennen, daß sich die Meßwerte gleicher Schichtdicken nicht nur bei konvexer und konkaver Krümmung, sondern auch bei tangentialer und axialer Stellung der Meßsonden von den Eichmessungen und auch untereinander bei gleichem Krümmungshalbmesser unterscheiden.

Daraus ist zu folgern, daß Messungen in gekrümmten Bereichen vermieden werden sollen, wenn die Schichtdicke an einem nicht nur mit ebenen Oberflächen ausgestatteten Werkstück in der Mitte oder auf der größeren Achse eines ebenen Flächenbereiches von mindestens 100 mm × 100 mm × 10 mm Größe (bei wesentlich geringeren Dicken entsprechend kleiner) gemessen werden kann. Muß jedoch auf gekrümmten Flächen gemessen werden, sind für Serienmessungen Vorversuche lohnend.

Einfluß von Ungleichmäßigkeiten der Schichtdicke

Einpolige Geräte messen punktweise die Schichtdicke unter der Meßsonde. Zweipolige Geräte liefern zunächst nur einen Mittelwert des magnetischen Feldes zwischen den beiden Sonden, wenn die Schichtdicke unter den beiden Sonden verschieden groß ist. Dieser Mittelwert braucht nicht notwendig mit dem Mittelwert der Schichtdicke übereinzustimmen. Bild 13 zeigt am Beispiel von Messungen mit dem Gerät C bei ungleichen Schichtdicken d_1 und d_2 unter den Meßsonden, daß die angezeigte Schichtdicke erheblich von der wahren mittleren Schichtdicke abweichen kann. Auf der Abszisse ist die mittlere, auf der Ordinate die angezeigte Schichtdicke in mm eingetragen. Vor dem Messen wurde das Gerät zunächst auf einer Folie von 0,200 mm Dicke geeicht; dann wurden die Foliendicken unter der einen Sonde gleichgehalten auf 0,200 mm, 0,305 mm und 0,150 mm, während

die Foliendicke unter der anderen Sonde jeweils in kleinen Stufen geändert wurde. Die hierbei erhaltenen drei Kurven weichen von der Eichkurve erst dann merkbar ab, wenn die Schichtdicken unter den beiden Sonden sehr ungleich sind.

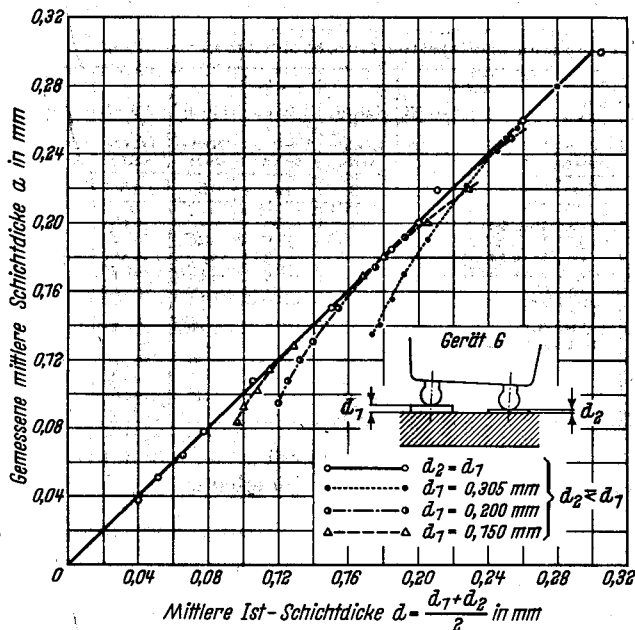


Bild 13. Verhalten zweipoliger Meßgeräte bei ungleicher Schichtdicke des Gerätes C; geeicht auf Grundwerkstoff St 37 mit einer Folie von 0,200 mm Dicke, Abmessungen der Prüfplatte 100 mm × 100 mm × 10 mm; gemessen auf Grundwerkstoff St 37

Regeln für die Handhabung magnetischer Schichtdicken-Meßgeräte

Die Dicke von Zinkschichten läßt sich auf ferromagnetischen Grundstoffen mit magnetischen Meßgeräten mit einer für technische Zwecke ausreichenden Genauigkeit messen, wenn folgende Regeln beachtet werden:

1. Meßbereich des Gerätes gut an die zu messende Schichtdicke anpassen.
2. Geräte mit Einpunkt-Eichung im Schwerpunkt der zu erwartenden Schichtdicken eichen, Geräte mit Zweipunkt-Eichung in den zu erwartenden oberen und unteren Schichtdickenbereichen.
3. Zum Eichen können beliebige nichtferromagnetische Folien verwendet werden, soweit sie unter dem Druck der Meßsonden nicht verformt werden.
4. Meßsonden beim Eichen und Messen senkrecht auf die Schicht setzen.
5. Immer unter den gleichen Bedingungen eichen, wie gemessen werden soll. Das heißt:
 - a) Gleicher Grundwerkstoff.
 - b) Gleiche Dicke des Grundwerkstoffes. Bei Dicken größer oder gleich 6 mm brauchen die Grundwerkstoffe von Eichplatte und Werkstück nicht mehr gleich dick zu sein.
 - c) Gleiche Größe der Prüffläche. Bei ebenen Werkstoffflächen größer oder gleich 100 mm × 100 mm genügt eine Eichplatte von 100 mm × 100 mm.
 - d) Gleicher Randabstand. Bei ebenen Flächen wichtig, wenn der Abstand der Meßsonden vom Rand weniger als 50 mm beträgt.
 - e) Gleiche Krümmung von Werkstück und Eichkörper und gleiche Lage der Meßsonden zur Krümmung beim Eichen und Messen. Es empfiehlt sich, auf dem nicht-verzinkten Werkstück an gleicher Stelle und in gleicher Lage zu eichen.

Vergleichende Messungen mit magnetischen, elektrochemischen und metallographischen Verfahren

Die Probeplatten hatten die Abmessung 250 mm × 250 mm × 4,75 mm. *Tafel 1* gibt die Erschmelzungsart und die chemische Zusammensetzung der verwendeten Stahl-sorten wieder.

Tafel 1. Chemische Zusammensetzung der Probebleche

Probe	Erschmelzungsart	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% N
1 2	Siemens-Martin-Stahl, beruhigt	0,14	0,05	1,03	0,019	0,036	0,007
3 4	Siemens-Martin-Stahl, unberuhigt	0,24	Spur	0,52	0,019	0,041	0,006
5 6	Sauerstoffaufblas-stahl, beruhigt	0,17	0,08	0,69	0,019	0,023	0,007
7 8	Sauerstoffaufblas-stahl, unberuhigt	0,18	0,03	0,54	0,023	0,018	0,007
9 10	Thomasstahl, beruhigt	0,16	0,08	0,71	0,017	0,022	0,008
11 12	Thomasstahl, unberuhigt	0,17	Spur	0,55	0,016	0,031	0,007

Die Bleche wurden 25 min lang bei 930 °C (Nr. 1, 2, 5 bis 12) und bei 880 °C (Nr. 3 und 4) normalgeglüht und langsam abgekühlt. Vor dem Verzinken wurden die Bleche in einem Beizbad mit rund 12% H₂SO₄ bei 80 °C gebeizt, anschließend gespült und für 4 min bei 460 °C in das Zinkbad getaucht. Dabei wurden Zinkoberflächen erhalten, die dem Aussehen nach in zwei Klassen eingeteilt werden konnten. Die beruhigten Bleche zeigten eine matte, die unberuhigten eine blanke Oberfläche.

An den so vorbereiteten Blechen wurde die Schichtdicke gemessen.

Magnetische Schichtdickenmessung mit Gerät C

Geeicht wurde das Gerät mit einem unverzinkten, gereinigten Probeblech und einer Zinkfolie von 150 µm Dicke.

Um einen guten Durchschnittswert zu erhalten, wurde zwischen vier Punkten, die auf einem Kreisumfang lagen, die Schichtdicke ermittelt. Der Mittelpunkt des Kreises lag im Blechmittelpunkt.

Bild 14 gibt die Anordnung der Meßstellen wieder. Jeder der vier Meßwerte ist der Mittelwert aus mehreren Messungen, wobei auch die Richtung der Messung vertauscht wurde (z. B. 2 → 2', 2' → 2). Eine zweite Meßreihe sollte den Einfluß der Unebenheiten der Blechoberfläche klären. Die Anordnung der Meßpunkte war die gleiche wie in *Bild 14*. Auch hier ist jeder der Meßwerte ein Mittelwert aus mehreren Messungen, wobei auch die Richtung der Messung vertauscht wurde.

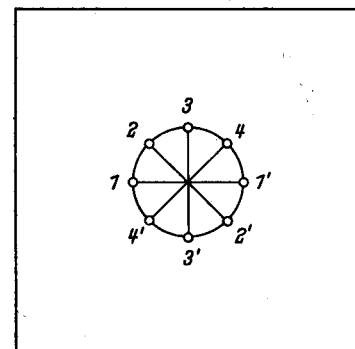


Bild 14. Anordnung der Meßstellen für die magnetische Messung mit Gerät C

Die beiden Flächen der Bleche wurden mit „Oberseite“ und „Unterseite“ bezeichnet.

Werden die in *Tafel 2* in den Spalten 2 bis 5 wiedergegebenen Mittelwerte gegeneinander aufgetragen (*Bild 15*), so ist zu erkennen, daß der größte Teil der Messungen mit Schablone größere Schichtdicken anzeigt als die Messungen ohne Schablone. Im einzelnen ergeben sich folgende Zahlen.

Auch bei diesen Messungen gilt der bei Gerät C besprochene Einfluß der Unebenheiten der Oberfläche. Messungen mit einer Schablone wurden aber nicht ausgeführt, weil die gleichen Ergebnisse zu erwarten sind. Auf die Messung der Unterseite wurde ebenfalls verzichtet, weil die Meßstrecke

Tafel 2. Zusammenstellung der mit den eingesetzten Meßverfahren ermittelten Durchschnittswerte in μm

Probe	Gerät C				Gerät F	Elektrochemische Bestimmung		Metallographische Bestimmung		$\Delta 9-2$		$\Delta 10-3$		$\Delta 9-4$		$\Delta 10-5$		$\Delta 9-6$		$\Delta 9-7$		$\Delta 10-8$	
	ohne Schablone	mit Schablone	ohne Schablone	mit Schablone		Ober-seite	Unter-seite	Ober-seite	Unter-seite	Ober-seite	Unter-seite	Ober-seite	Unter-seite	Ober-seite	Unter-seite	Ober-seite	Unter-seite	Ober-seite	Unter-seite	Ober-seite	Unter-seite	Ober-seite	Unter-seite
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	130	130	135	129	—	98	111	116	113	—14	—17	—19	—16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	111	114	115	113	112	90	102	86	105	—25	—9	—29	—8	—26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	106	89	101	91	—	92	85	130	88	+24	—1	+29	—3	—38	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	90	85	109	93	79	94	80	91	89	+1	+4	—18	—4	+12	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	117	130	129	128	128	108	111	109	99	—8	—33	—20	—31	—19	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	139	124	147	125	—	118	105	119	114	—20	—10	—28	—11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	99	101	127	96	113	94	112	98	111	—1	+2	+22	—13	—15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	90	101	91	116	—	105	105	113	103	+23	—27	—11	—20	—6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	118	131	115	124	110	102	97	104	104	—14	—24	+2	—33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	138	122	131	131	—	114	108	133	98	—5	—24	+12	+30	+26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	79	86	85	98	90	80	90	116	98	+37	+12	+31	—18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	96	87	111	97	—	90	92	80	79	—16	—8	—31	—18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

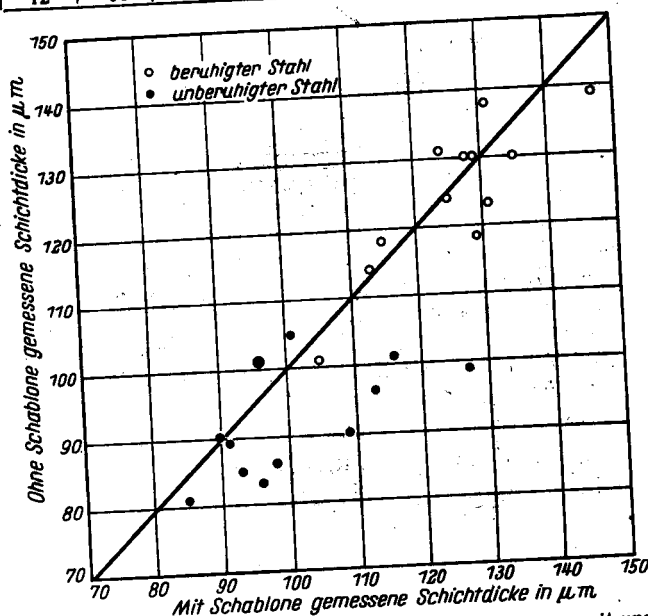


Bild 15. Vergleich der Mittelwerte der Schichtdickenmessung mit und ohne Schablone

62,5% der Meßwerte mit Schablone liefern größere, 29,2% kleinere Schichtdicken als die Meßwerte ohne Schablone. 8,3% der Messungen stimmen überein.

Wird die unterschiedliche Behandlung des Probenwerkstoffes — beruhigt und unberuhigt — berücksichtigt, verändern sich diese Anteile wie folgt:

Behandlung des Stahles	Beruhigt	Unberuhigt
Höhere Werte mit Schablone	50 %	75 %
Höhere Werte ohne Schablone	42 %	17 %
Gleiche Werte	8 %	8 %

Ob diesen Zahlen eine Bedeutung zukommt, muß durch weitere Versuche geklärt werden.

Bei der magnetischen Dickenmessung mit dem Gerät C liefert also die Messung mit der Schablone durchschnittlich höhere Werte als die Messung ohne Schablone.

Magnetische Schichtdickenmessung mit Gerät F¹¹⁾

Gemessen wurde — beschränkt auf sechs Bleche — nach einer Zweipunkt-Eichung längs einer geraden Linie im Abstand von 5 mm insgesamt zwölfmal; die Werte wurden dann gemittelt. *Tafel 2* zeigt in Spalte 6 die Mittelwerte.

und die Anzahl der Meßwerte groß genug waren, um einen zuverlässigen Durchschnittswert zu erhalten.

Elektrochemische Schichtdickenmessung

Die elektrochemische Schichtdickenmessung wurde nach dem von W. Katz⁹⁾ angegebenen Verfahren, an dem einige Änderungen vorgenommen wurden, durchgeführt.

Die Elektrolysezelle von W. Katz⁹⁾ wurde zentrisch zu den Meßpunkten in *Bild 14* auf die verzinkte Oberfläche gesetzt. Die elektrolysierte Oberfläche ist dann 1 cm² groß. Die waagrecht angebrachte Gegenelektrode aus Platinblech wurde ausgebaut und dafür ein 40 mm hoher Ring aus Kupferblech senkrecht zur verzinkten Oberfläche so eingebaut, daß zwischen dem Ring und der zylindrischen Gefäßwand noch 3 mm Abstand waren. Von oben her waren ein Glasrührer und eine Kapillare eingeführt. Die Kapillare war der Stromschlüssel für eine Kalomel-Bezugselektrode. Als Elektrolyt wurde die von W. Katz angegebene Lösung mit 20 g Natriumchlorid und 10 g kristallinem Zinksulfat in 100 g Wasser genommen. Die Stromdichte betrug 50 mA/cm². Die verzinkte Oberfläche war als Anode, das Kupferblech als Kathode geschaltet. Es wurde sowohl das Potential zwischen verzinkter Oberfläche und Kalomel-Elektrode als auch zwischen verzinkter Oberfläche und Kupferblech gemessen. Das letzte Potential wird als Klemmenspannung abgenommen. Mit einem Mehrfarbensreiber wurden die beiden Potentiale und die Stromdichte laufend aufgezeichnet. Die Beendigung der Ablösung der einzelnen Phasen des Zinküberzuges ist durch einen Potentialsprung gekennzeichnet. Aus der Zeit zwischen Beginn und Ende der Elektrolyse und der Stromdichte läßt sich die Schichtdicke errechnen. *Bild 16* zeigt eine kennzeichnende Aufzeichnung der elektrochemischen Ablösung einer Zinkschicht.

Die Werte der elektrochemischen Schichtdickenmessung sind in *Tafel 2* in den Spalten 7 und 8 wiedergegeben.

Metallographische Schichtdickenmessung

Für die metallographische Auswertung wurden die Proben so zerschnitten, daß der Schnitt durch den Durchmesser des Kreises, der bei der elektrochemischen Schichtdickenmessung durch das Lösen der Zinkoberfläche entstanden war, hindurchführte. Gleichzeitig führte er durch zwei sich gegenüberliegende Meßpunkte der magnetischen Schichtdickenmessung (*Bild 14*). An einem dieser Punkte wurde nach dem Schleifen und Ätzen eine Aufnahme des Zinküberzuges bei 500facher Vergrößerung gemacht. Ein Ver-

⁹⁾ Herrn Dr. Katz sind wir für die Überlassung der Zelle zu großem Dank verpflichtet.

gleich des Aufbaues der Zinkschichten der beruhigten und unberuhigten Bleche zeigt große Unterschiede in der Schichtausbildung, wie *Tafel 3* zu entnehmen ist.

Tafel 3. Metallographische Beurteilung der Zinkschicht

Phase	Beruhigtes Blech	Unberuhigtes Blech
Stahloberfläche	glatt dünn	rauh, wellig dünn
δ_1	mäßig bis gut ausgebildet	gut ausgebildet
ζ	dicht, stark zerklüftet	locker, teilweise abschwimmend
η	nicht vorhanden	vorhanden, durchsetzt mit ζ -Kristallen

Die Schichtdicke wurde am Schliff unter dem Mikroskop mit einem Mikromaßstab an 20 Stellen gemessen und gemittelt. Die höchsten und niedrigsten Werte wurden, sofern sie nur einmal auftraten, nicht zur Bildung der Durch-

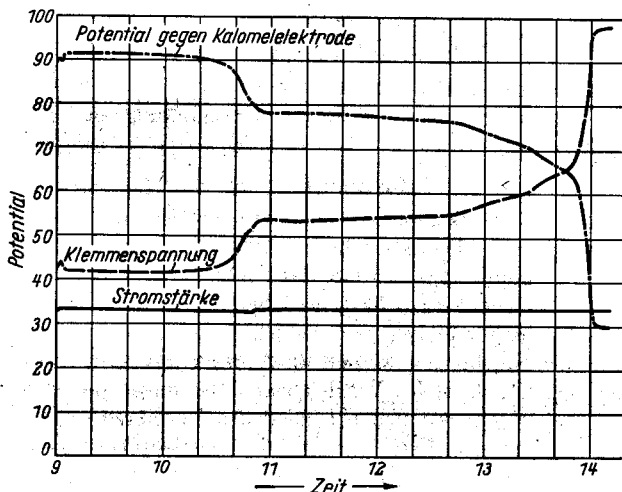


Bild 16. Potential- und Stromkurven bei der elektrischen Ablösung der Zinkschicht

schnittswerte herangezogen. In *Tafel 2*, Spalten 9 und 10, sind die Werte wiedergegeben.

Besprechung der Versuchsergebnisse

In *Tafel 2* sind die Durchschnittswerte aller Meßverfahren zusammengestellt. Ehe die Werte miteinander verglichen werden, sollen die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Meßergebnisse besprochen werden.

Magnetisches Verfahren

Die Zuverlässigkeit der Meßwerte hängt von der Genauigkeit der Eichung der Geräte ab, bei der die angeführten Vorschriften beachtet werden müssen. Die Eichung mit einer Zinkschicht, die genau so aufgebaut ist wie der zu messende Überzug, ist nur selten möglich. Eine derartige Vergleichsmessung muß aber gefordert werden, weil die verschiedenen Phasen der Zinkschicht eine unterschiedliche Permeabilität haben und an den Phasengrenzen das magnetische Feld geschwächt wird. Der grundsätzliche Zusammenhang, daß das vorgegebene magnetische Feld durch die Zinkschicht um so mehr geschwächt wird, je größer die Schichtdicke ist, wird bei Zinkschichten, die bei starker Zerklüftung sehr viele Phasengrenzen haben, wesentlich verfälscht. Eine dünne Zinkschicht mit stark zerklüfteten Phasen und abschwimmenden Kristallen zeigt bei einer magnetischen Messung zu hohe Werte, wenn nicht auf einer gleich aufgebauten Schicht gemessen wurde. Je einheitlicher der Aufbau der Zinkschicht ist, um so mehr wird der Meßwert der wahren Schichtdicke entsprechen. Die Unebenheiten der Oberfläche bilden eine weitere Fehlerquelle.

Ferner wird das Meßergebnis an derselben Stelle verschieden ausfallen, je nachdem, ob die Meßsonden genau senkrecht oder unterschiedlich von der senkrechten Stellung gekippt aufgesetzt werden. Die Größe dieses Fehlers hängt von der gleichmäßigen Arbeitsweise des Messenden ab. Wenn Eichung und Messung stets mit dem gleichen Kippwinkel durchgeführt würden, könnte ein Einfluß dieser Fehlerquelle vermieden werden.

Elektrochemisches Verfahren

Bei konstanter Stromstärke treten Fehler in der Messung auf, weil die einzelnen Phasen der Zinkschicht unterschiedliche spezifische Gewichte haben, die bei der üblichen Auswertung von Versuchsergebnissen zur Ermittlung der Schichtdicke nicht berücksichtigt werden.

Um eine Vorstellung von dem hierbei möglichen Fehler zu bekommen, sei eine elektrochemische Messung einmal genau und einmal auf die übliche Weise ausgewertet.

Die erhaltenen Meßwerte waren:

Stromstärke = $i_t = 50$ mA

Zeit t für die Ablösung der Gesamtschicht: 3766 s

Zeit t_η für die Ablösung der η -Schicht: 1386 s

Zeit t_ζ für die Ablösung der ζ -Schicht: 1950 s

Zeit t_δ für die Ablösung der δ -Schicht: 430 s

Die übrigen zur Rechnung notwendigen Werte sind:

$\gamma_\delta = 7,24^{12})$ $\mathcal{F} = 96\,500$ Coulomb/val $A_\delta = 63,39$ (berechnet)

$\gamma_\zeta = 7,18$ $F = 1$ cm² $A_\zeta = 64,79$ (berechnet)

$\gamma_\eta = 7,20$ $\eta = 2$ $A_\eta = 65,38$.

Die Schichtdicke s ist bei der genauen Auswertung

$$s = s_\delta + s_\zeta + s_\eta$$

$$= \frac{G_\delta}{\gamma_\delta \cdot F} + \frac{G_\zeta}{\gamma_\zeta \cdot F} + \frac{G_\eta}{\gamma_\eta \cdot F} = \frac{1}{F} \left(\frac{G_\delta}{\gamma_\delta} + \frac{G_\zeta}{\gamma_\zeta} + \frac{G_\eta}{\gamma_\eta} \right) [\text{cm}]. \quad (1)$$

Die Gewichte G_t errechnen sich aus dem Faradayschen Gesetz:

$$G_t = \frac{i_t \cdot t}{96\,500} \cdot \frac{A_t}{n_t} \quad \text{zu} \quad (2)$$

$$G_\delta = \frac{50 \cdot 10^{-3} \cdot 430}{96\,500} \cdot \frac{63,39}{2} = 0,0071 \text{ g} \quad (2a)$$

$$G_\zeta = \frac{50 \cdot 10^{-3} \cdot 1950}{96\,500} \cdot \frac{64,79}{2} = 0,0327 \text{ g} \quad (2b)$$

$$G_\eta = \frac{50 \cdot 10^{-3} \cdot 1386}{96\,500} \cdot \frac{65,38}{2} = 0,0235 \text{ g.} \quad (2c)$$

Die Gewichte nach den Gleichungen (2a), (2b) und (2c) sowie die übrigen Werte in Gleichung (1) eingesetzt, ergeben:

$$s = \frac{1}{F} \left(\frac{0,0071}{7,24} + \frac{0,327}{7,18} + \frac{0,0235}{7,20} \right) \text{cm} = 8,79 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \quad (3)$$

$$= 87,9 \mu\text{m}.$$

Bei der üblichen Auswertung ist die Gleichung für die Schichtdicke:

$$s = \frac{1}{F} \cdot \frac{G_{Zn}}{\gamma_{Zn}} \quad (4)$$

$$\text{Wegen: } G_{Zn} = \frac{i_t \cdot t}{96\,500} \cdot \frac{A_{Zn}}{2} \quad (5)$$

erhält (4) die Form:

$$s = \frac{1}{F} \cdot \frac{i_t \cdot t \cdot A_{Zn}}{\gamma_{Zn} \cdot 96\,500 \cdot 2} \quad (6)$$

Die zahlenmäßige Ausrechnung liefert:

$$s = \frac{50 \cdot 10^{-3} \cdot 3766 \cdot 65,38}{1 \cdot 7,20 \cdot 96\,500 \cdot 2} [\text{cm}] = 8,86 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \quad (6a)$$

$$= 88,6 \mu\text{m}.$$

¹²⁾ Bablik, H.: Das Feuerverzinken. Wien 1941.

Der Unterschied beträgt zwischen den beiden Auswertungsverfahren $0,7 \mu\text{m}$, d. h. für fast alle Zwecke genügt die übliche Auswertung. Allerdings erhält man bei der genauen Auswertung auch die durchschnittlichen Schichtdicken der einzelnen Phasen und kann daraus Aussagen über die Eignung der Zinkschicht bei einer bestimmten Beanspruchung ableiten.

Metallographische Verfahren

Eine genaue Schichtdickenmessung ist nur durch eine genügend große Zahl von Einzelmessungen, die eine statistische Auswertung zuläßt, möglich.

Die Genauigkeit bei einer optischen Messung ist sehr groß, wenn alle Möglichkeiten ausgeschöpft werden; das Ergebnis kann im Meßpunkt als die wahre Schichtdicke angesehen werden.

Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Verfahren

In *Tafel 2* sind die Schichtdicken aller angewendeten Verfahren zusammengestellt. Die Spalten 11 bis 17 geben die Unterschiede zwischen den metallographisch und den nach den anderen Verfahren ermittelten Werten nieder.

Die Messungen mit dem Gerät C ohne und mit Schablone lieferten bei zwei Dritteln der Werte Schichtdicken, die über den metallographisch gemessenen liegen (negative Werte). Die mit dem Gerät E erhaltenen Werte liegen ebenfalls zu zwei Dritteln über dem metallographisch gemessenen; ein Drittel der elektrochemisch gemessenen Werte sind höher.

Läßt man eine Maßabweichung von $\pm 5 \mu\text{m}$ zu, so zeigt eine Gegenüberstellung auch kein befriedigendes Ergebnis.

Spalten der der <i>Tafel 2</i>	Anzahl der Messungen	Abweichungen von der metallo- graphisch bestimmten Schichtdicke		
		+	-	=
11 und 12	24	13	5	6
13 und 14	24	16	4	4
15	6	4	2	—
16 und 17	24	4	9	11

Bei der für die Vergleichsmessungen aufgewendeten außerordentlichen Sorgfalt und der großen Anzahl von Einzelmessungen — die in *Tafel 2* aufgeführten Werte sind Mittelwerte — zeigt das Ergebnis, daß die magnetischen Verfahren höchstens Näherungswerte ergeben, das elektrochemische Verfahren dagegen im Durchschnitt gute Werte liefert, wenn die metallographischen Meßwerte als richtig angenommen werden können.

Für den Betrieb haben aber die beiden letzten Verfahren den Nachteil, daß sie nicht zerstörungsfrei arbeiten und eine verhältnismäßig lange Zeit zur Durchführung benötigen. Die magnetischen Verfahren arbeiten dagegen zerstörungsfrei und schnell; für die innerbetriebliche Überwachung sind sie geeignet, sofern man die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit beachtet. Für Vergleiche von Betrieb zu Betrieb, z. B. bei der Abnahmeprüfung, ist aber eines der beiden genauen Verfahren unbedingt vorzuziehen, weil so unterschiedliche Messungen und damit unliebsame Auseinandersetzungen mit großer Sicherheit vermieden werden.

* * *

Dem Leiter der Forschungsanstalt, Herrn Professor Dr.-Ing. W. Peppler, sei für die Bereitstellung von Untersuchungsergebnissen herzlich gedankt.

Zusammenfassung

Die Möglichkeiten der Schichtdickenmessung werden besprochen und besonders die magnetischen Verfahren genau untersucht, um den Einfluß der Flächengröße, der Werkstoffdicke, der Werkstoffart, der Oberflächenkrümmung und der Ungleichmäßigkeit der Schichtdicke kennenzulernen. Aus den Ergebnissen werden die Vorschriften zum Eichen der Geräte aufgestellt. Vergleichende Messungen der Dicke der Zinkschicht mit den verschiedenen Verfahren ergeben, daß magnetische Verfahren für die Betriebsüberwachung geeignet sind. Für genaue Messungen sollen aber elektrochemische, besser noch metallographische Verfahren angewendet werden.