



*W. Katzung, R. Rittig, A. Gelhaar*

## **Einfluß der Legierungselemente Al, Pb und Sn in der Zinkschmelze auf das Verzinkungsverhalten von Stählen**

Sonderdruck aus der Fachzeitschrift Metall 1/96, Seite 34–38

GAV-Bericht Nr. 133  
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.

# Einfluß der Legierungselemente Al, Pb und Sn in der Zinkschmelze auf das Verzinkungsverhalten von Stählen

W. Katzung\*, R. Rittig\*, A. Gelhaar\*

Der reduzierende Einfluß von Al in der Zinkschmelze auf die Zinküberzugsdicke ist abhängig von der Temperatur der Schmelze und der chemischen Zusammensetzung der Stähle. Im Ergebnis durchgeführter Versuche wurde festgestellt: Stähle mit Si < 0,12 % und P < 0,02 % werden bei Schmelztemperatur 440 ... 450 °C durch bis zu 0,03 % Al-Gehalt in der Zinkschmelze hinsichtlich der Überzugsdicke nicht nutzbar beeinflusst. Al-Gehalte bis zu 0,015 % in der Zinkschmelze verursachen für Stähle mit erhöhtem P-Gehalt (> 0,020 %) je nach Pb- und/oder Sn-Gehalt der Schmelze bei 440 ... 450 °C unterschiedliche Überzugsdickenmaxima und ungleichmäßige und rauhe Zinküberzüge. Das gilt auch für Stähle mit Si-Gehalten im Sandelin-Bereich bei 460 °C Schmelztemperatur. Je größer der Si- und/oder P-Gehalt der Stähle ist und je niedriger die Schmelztemperatur, um so eher beginnt die reduzierende Wirkung von Al in der Zinkschmelze auf die Zinküberzugsdicke. Optimal im Sinne der Einhaltung der Überzugsdickennormwerte nach DIN 50976 für alle untersuchten Stähle ist eine Zusammensetzung der Zinkschmelze Al ~ 0,025 %, Pb gesättigt, Sn 0,5 % oder 0 %, und eine Schmelztemperatur von ~ 445 °C.

*Influence of the alloying elements Al, Pb and Sn in the zinc melting as to the behaviour of hot dip galvanized fabricated ferrous products*

*The reducing influence of Al within the zinc melting on the thickness of the zinc coating depends on the temperature of the melting and on the chemical composition of the steels. Regarding the accomplished analyses it could be stated: Steels with Si < 0.12 % and P < 0.02 % are not usable influenced with regard to the thickness of the coating when using temperatures of the melting of 440 ... 450 °C and 0.03 % proportion of Al within the zinc melting. Al proportions up to 0.015 % within the zinc melting bring about differential maxima of the thickness of coating and irregular as well as rough zinc coatings in the case of steels having an increased P proportion (> 0.020 %) depending on the Pb and/or Sn proportion of the melting during temperatures from 440 to 450 °C. This is also valid for steels with Si proportions within the "Sandelin range" at a temperature of melting of 460 °C. The greater the Si and/or the P proportion of the steels and the lower the temperature of the melting, the sooner the reducing action of Al with regard to the thickness of the zinc coating will begin within the zinc melting. Optimum for all analysed steels is a composition of the zinc melting of Al ~ 0.025 %, Pb saturated, Sn 0.5 % or 0 % and a temperature of the melting of ~ 445 °C.*

Beim Feuerverzinken von Stückgut sollen Zinküberzüge hergestellt werden, die den korrosionsschutztechnischen, mechanischen und ästhetischen Anforderungen an die Erzeugnisse entsprechen. Dazu sind in nationalen und internationalen Vorschriften weitgehend übereinstimmende Mindestparameter festgelegt worden. Ein optimaler Zinküberzug, der allen Anforderungen entspricht, sollte hellglänzend und ggf. mit Zinkblume versehen sein, eine Überzugsdicke von ca. 80 ... 100 µm haben und gut auf der Stahloberfläche haften. Diese auch aus Gründen der Wirtschaftlichkeit durchaus wünschenswerten Eigenschaften des Zinküberzuges sind jedoch nur erreichbar, wenn der Ablauf der Eisen-Zink-Reaktion während des Verzinkungsprozesses wirkungsvoll beeinflusst werden kann.

Es ist hinreichend bekannt, daß für diese Reaktion mehrere wesentliche Parameter maßgeblich sind:

- Chemische Zusammensetzung des Stahls, insbesondere Si- und P-Gehalt
- Temperatur der Zinkschmelze
- Tauchdauer des Stahls
- Oberflächentopographie des Stahls
- Chemische Zusammensetzung der Zinkschmelze

Trotz dieser Kenntnisse werden in erhöhtem Maße Zinküberzüge hergestellt, deren Dicke die Mindestwerte deutlich, im Extremfall um ein Mehrfaches überschreiten. Solche Überzüge sind oft gegenüber mechanischen Belastungen anfälliger und erfüllen nicht die vorgenannten ästhetischen Anforderungen/Wünsche. Aufgrund zahlreicher Untersuchungen [1 bis 14] weiß man heute sehr genau, daß und welche chemische Zusammensetzung von Stählen, insbesondere hinsichtlich des Si- und P-Gehaltes, Hauptursache für oben genannte Zinküberzüge ist.

Die Verzinkungsindustrie hat im Rahmen des gegenwärtigen Kenntnisstandes durch Veränderung beeinflussbarer Parameter, wie Tauchdauer und Temperatur der Zink-

\*) Dr. rer. nat. Werner Katzung, Dipl.-Ing. (FH) Renate Rittig und Dipl.-Ing. Andreas Gelhaar, Institut für Stahlbau Leipzig GmbH

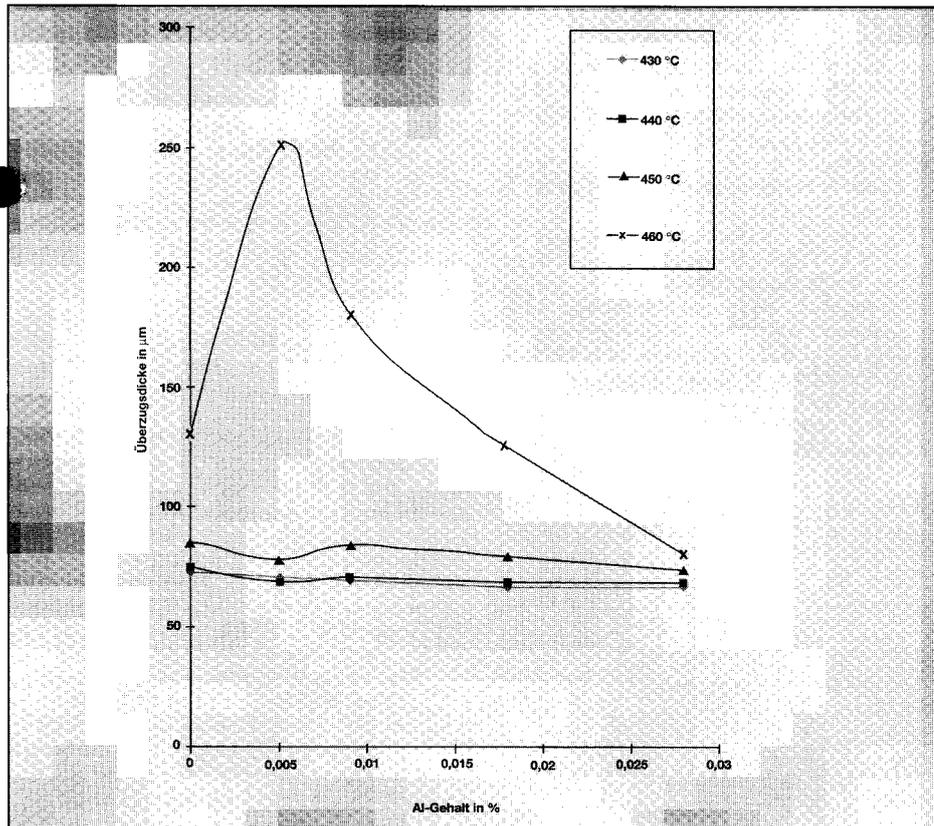
Stahl-Nr.	Si %	P %	C %	Mn %	S %	Cu %	Al %
1	0,0100	0,0100	0,0690	0,3800	0,0080	0,0230	0,0350
2	0,0511	0,0183	0,1582	0,7217	0,0109	0,0183	0,0410
3	0,0649	0,0100	0,1153	0,3912	0,0146	0,0229	0,0003
4	0,1160	0,0590	0,0300	0,2800	0,0050	0,0300	0,0600
5	0,1180	0,0790	0,0600	0,5200	0,0030	0,0300	0,0400
6	0,1950	0,0090	0,1200	0,4600	0,0110	0,1100	0,0280
7	0,2350	0,0710	0,0600	0,5300	0,0060	0,0300	0,0500
8	0,2670	0,0230	0,1300	0,9900	0,0130	0,0300	0,0510
9	0,4000	0,0140	0,1500	1,3800	0,0090	0,0210	0,0330

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der für die Versuche verwendeten Stähle

schmelze, versucht, die bei kritischen Si- und/oder P-Gehalten ablaufende Zink-Eisen-Reaktion in ihrer Geschwindigkeit zu mindern, um auf diese Weise reduzierenden Einfluß auf die Zinküberzugsdicke zu nehmen. Diese Maßnahmen – Verkürzung der Tauchdauer, Senkung der Temperatur der Zinkschmelze von 460 °C auf 440 ... 450 °C – lösen das Problem jedoch nicht in der gesamten Breite, da bei Si-Gehalten zwischen 0,12 und 0,25 % Überzugsdickenmaxima genau in diesem Temperaturbereich liegen [12, 14] und in letzter Zeit Stähle dieser Zusammensetzung häufiger verwendet werden. Ähnlich verhält es sich mit Stählen, deren P-Gehalt z. T. deutlich größer als 0,020 % ist und in Verbindung

mit bestimmten Si-Gehalten bei 430 ... 450 °C Zinkschmelzetemperatur die größte Reaktivität gegenüber Zink aufweisen. Eine weitere Möglichkeit zur Beeinflussung der Eisen-Zink-Reaktion besteht darin, durch Legierungszusätze zur Zinkschmelze die Reaktionsgeschwindigkeit so herabzusetzen, daß bei praktisch möglichen Tauchdauern Zinküberzüge mit den gewünschten Eigenschaften entstehen können. Seit langem ist bekannt, daß bereits geringe Al-Zusätze von etwa 0,1 % zu der Zinkschmelze dem Zinküberzug Glanz verleihen [15]. Bekannt ist auch, daß bei geringen Al-Gehalten im Zink abhängig von der Temperatur der Zinkschmelze die Eisen-Zink-Reaktion durch

Abb. 1: Zinküberzugsdicke in Abhängigkeit vom Al-Gehalt der Zinkschmelze für Stähle im Sandelin-Bereich (Si: 0,0511 %, P: 0,018 %) )



Ausbildung einer dünnen Fe<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>- und FeAl<sub>3</sub>-Schicht auf der Stahloberfläche mehr oder weniger lange gehemmt wird und dadurch die Bildung des Zinküberzuges hinsichtlich Dicke und Zusammensetzung beeinflusst werden kann [16, 17].

Mit der wachsenden Verbreitung des Stahlstranggusses und der zunehmenden Verwendung von höherfesten siliziumlegierten Baustählen zu Beginn der 70er Jahre ist das Problem der Feuerverzinkung von siliziumhaltigen Stählen stark in den Vordergrund getreten. In [18 bis 21] wird über Untersuchungen zu diesem Problem berichtet. Die Ergebnisse sind wie auch die Empfehlungen für Al-Zusätze in Zinkschmelzen sehr unterschiedlich und gehen von 0,03 % [18], 0,02 bis 0,03 % [19], 0,04 bis 0,07 % [20] bis zu > 0,1 % [21]. In [22] wurde 1979 dieser Sachverhalt überprüft und der Einfluß von Al auf das Verzinkungsverhalten von 8 Stahlsorten mit Si-Gehalten zwischen 0,02 und 0,40 % untersucht. Der Al-Zusatz zur Zinkschmelze betrug 0, 0,015, 0,041, 0,065, 0,10, 0,15 und 0,20 %.

In [23] wird 1980 über Labor- und Industrieversuche berichtet, bei denen der Zinkschmelze Pb, Al, Mg und Sn (Polygalva.-Verfahren) zulegiert wurden. Die Versuche wurden bei einer Schmelzetemperatur von 450 °C durchgeführt. Es wurde festgestellt, daß für alle Stähle mit einem Si-Gehalt < 0,20 % Überzüge mit einer Dicke von 65 bis 120 µm erhalten werden. Bei Stählen mit > 0,20 % Si werden die Normwerte für die Überzugsdicke z. T. deutlich unterschritten. Auf größtmögliche Sorgfalt bei der Oberflächenvorbehandlung und Einhaltung ganz bestimmter Grenzen der Schmelzezusammensetzung wird hingewiesen, ebenso auf das Problem des schweren Abfließens des Zinks von der Oberfläche des Verzinkungsgutes (Tropfenbildung, Zinkverdickungen). In [24] wird über das Verzinkungsverhalten von Stählen mit < 0,06 % Si und 0 bis 0,09 % P in Schmelzen mit 0,024 % Al berichtet.

Aus den Untersuchungsergebnissen obengenannter Autoren, die sich vor allem mit Al-Zusätzen > 0,03 % beschäftigten, ist abzuleiten, daß es z. Z. keine Lösung gibt, mit der das gesamte Spektrum der Baustähle mit unterschiedlichen Si-/P-Gehalten zufriedenstellend verzinkt werden kann. Als Problem ergibt sich insbesondere das Entstehen von Fehlstellen (Schwarzfleckigkeit) im Zinküberzug sowie deren ungleichmäßige und raue Ausbildung bei Al-Gehalten > 0,03 %. Im Rahmen unserer Arbeit wurde der Einfluß von Al (0 ... 0,03 %) in Wechselwirkung mit Pb (0,5 % und Pb

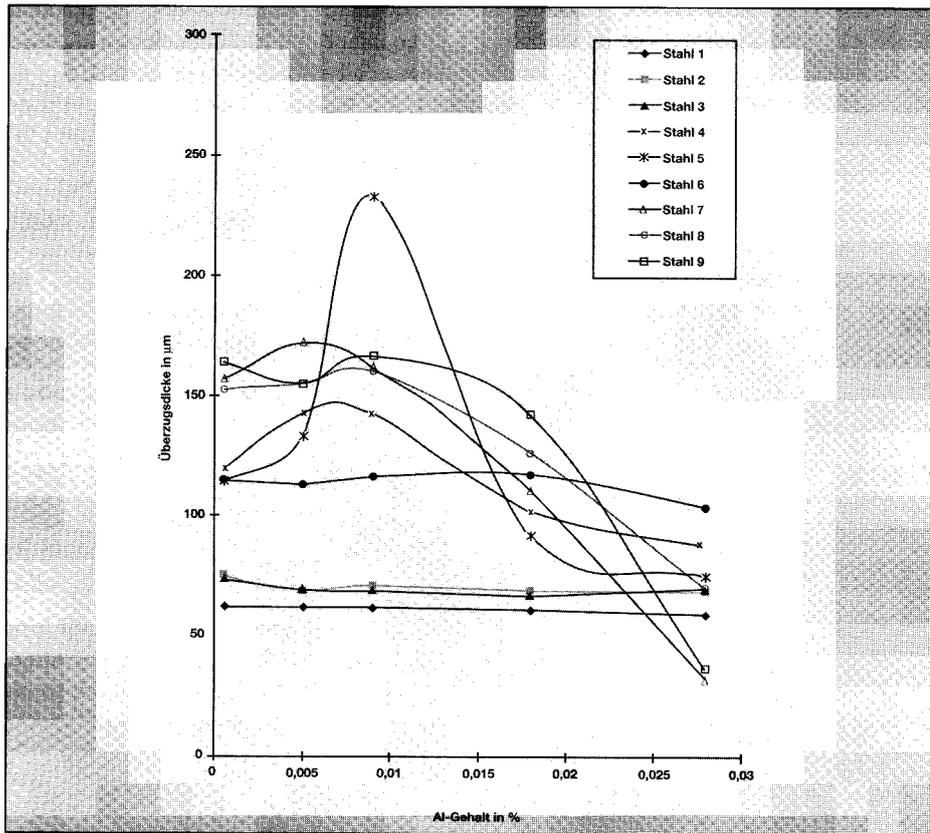


Abb. 2: Zinküberzugsdicke in Abhängigkeit vom Al-Gehalt der Zinkschmelze bei 440 °C

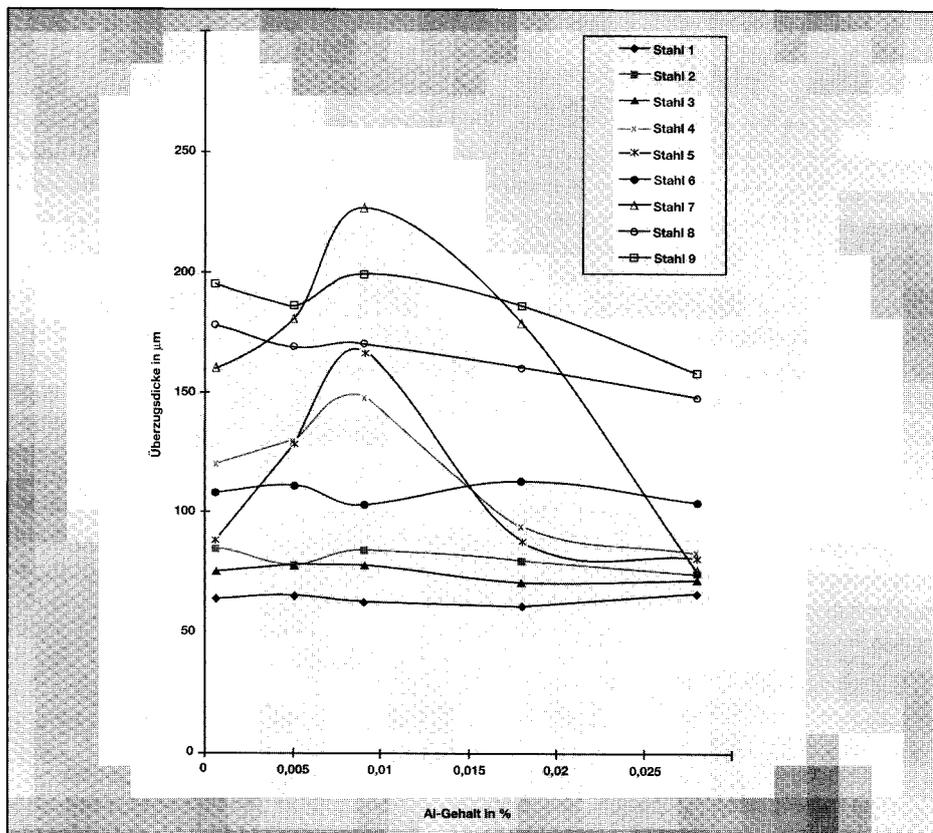


Abb. 3: Zinküberzugsdicke in Abhängigkeit vom Al-Gehalt der Zinkschmelze bei 450 °C

gesättigt) und Sn (0 und 0,5 %) als Legierungszusätze zur Zinkschmelze untersucht, ohne die gebräuchlichen Prozeßpa-

parameter des Feuerverzinkens zu verändern. Durch visuelle Bewertung und Ermittlung der Überzugsdicke in Abhängigkeit von

Schmelztemperatur, Legierungskombination und chemischer Zusammensetzung der Stähle soll herausgefunden werden, ob Al-Gehalte unterhalb der Grenzwerte, die zu Fehlstellen im Zinküberzug führen, in Verbindung mit Pb- und Sn-Anteilen in der Schmelze zu fehlerfreien Überzügen führen und gleichzeitig die Zink-Eisen-Reaktion so beeinflussen, daß die Zinküberzugsdicke für hochreaktive Stähle in Richtung der Mindestwerte beeinflusst werden kann.

### 1. Versuchsdurchführung und -bedingungen

Je nach Schmelzezusammensetzung wurde ein Stahlkessel mit einem Fassungsvermögen von ca. 700 kg Zink und 100 kg Blei oder ein Graphitschmelztiegel mit 400 kg Zink verwendet. Das Tauchen der Probebleche erfolgte mit einem die Eintauch-/Ausziehggeschwindigkeit regelbaren Seilzug. Die Geschwindigkeit betrug einheitlich 0,75 m/min. Für die Versuche verwendete man Probebleche der Abmessung 100 × 50 × 0,7 ... 3 mm aus kalt- und warmgewalztem Stahl. Die chemische Zusammensetzung der Stähle ist in Tab. 1 aufgeführt.

Für jeden Versuch kamen zur statistischen Absicherung der Ergebnisse je 5 Proben. Die Stahlproben wurden in einer alkalischen Entfettung und in einer Beize vorbereitet:

Alkalische Entfettung:

- Entfettungssalz 50 g/l
- Temperatur 80 ... 90 °C

Beize:

- HCl-Gehalt 10 %
- Fe-Gehalt ca. 15 g/l
- Temperatur 20 ... 30 °C

Zum Fluxen wurden 2 handelsübliche Produkte verwendet: Flußmittel ZnCl<sub>2</sub>/NH<sub>4</sub>Cl = 60 : 40 (Konzentration ca. 20° Bé), raucharmes Flußmittel ZnCl<sub>2</sub>/NH<sub>4</sub>Cl/Alkalichlorid (Konzentration ca. 20° Bé)

Die Proben wurden 10 min bei 80 ... 120 °C getrocknet. Das Verzinken erfolgte in Schmelzen, die eisengesättigt waren. Der geforderte Zinn- und Bleigehalt wurde mit einer Legierung L-Sn 60 Pb nach DIN 1707 eingestellt. Die Steigerung des Aluminiumgehalts wurde durch Zugabe von ZnAl 7 bzw. ZnAl 15 erreicht. Die Verzinkungstemperaturen betragen 430 ... 450 °C in Abstufung von 10 K, stichprobenartig 460 °C, und die Tauchdauer 5 min, stichprobenartig auch 10, 15 und 20 min.

### 2. Ergebnisse, Schlußfolgerungen

Die Feuerverzinkungsindustrie in Deutschland arbeitet im allgemeinen bei

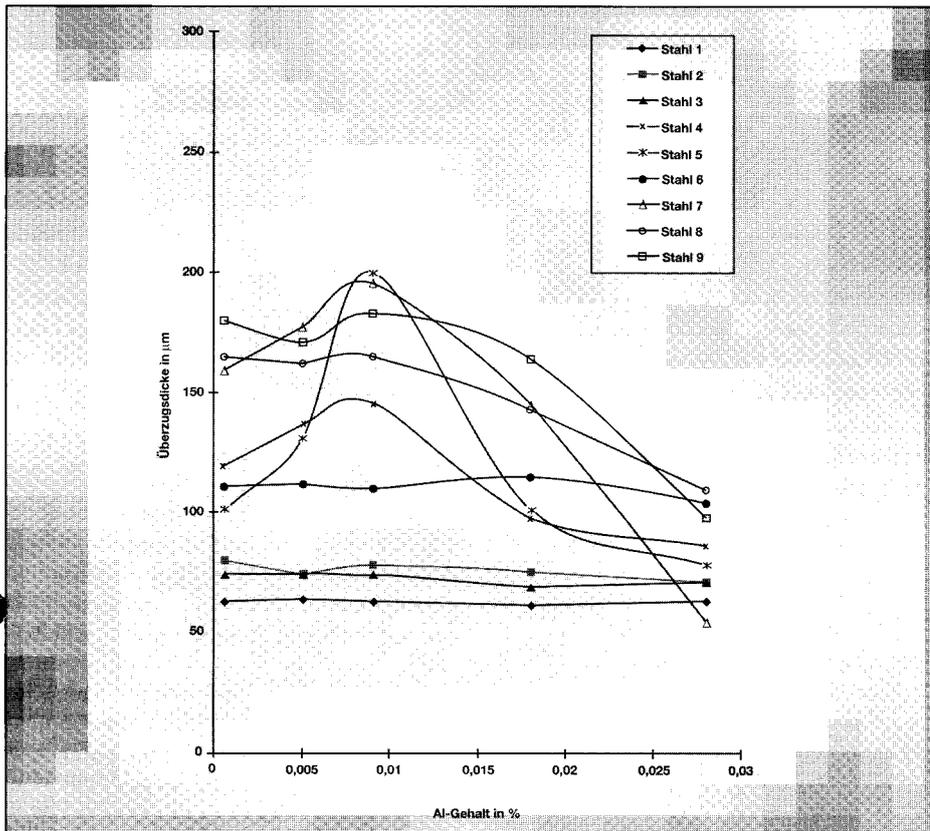


Abb. 4: Zinküberzugsdicke in Abhängigkeit vom Al-Gehalt der Zinkschmelze bei 445 °C (interpoliert aus Abb. 2 und 3)

Zinkschmelzetemperaturen von 440 bis 450 °C (Normaltemperatur). Insofern ist es gerechtfertigt, die Ergebnisse dieser Untersuchung insbesondere für diesen Temperaturbereich zu bewerten. Ein Vergleich mit Untersuchungsergebnissen anderer Einrichtungen im In- und Ausland ist nur bedingt möglich, da die Mehrzahl der Autoren über den Einfluß des Al-Gehaltes der Zinkschmelze auf die Dicke der Überzüge für Al-Gehalte von 0 bis 0,20 % berichten und der von uns untersuchte Bereich von 0 bis 0,03 % Al dabei eine untergeordnete Rolle spielt. Ebenso wurden nur wenige Untersuchungen im Schmelzetemperaturbereich < 455 °C durchgeführt. Die für die Untersuchungen verwendeten Stahlsorten wurden hinsichtlich des Si-Gehaltes von 0,01 bis 0,4 % ausgewählt, wobei der P-Gehalt unterhalb des kritischen Bereiches von 0,020 % lag. Aus den von uns erhaltenen Ergebnissen (Tab. 2, Abb. 1 bis 4) ist abzuleiten, daß Al-Gehalte in der Zinkschmelze im untersuchten Bereich von 0 ... 0,03 % in Verbindung mit unterschiedlichem Pb- und Sn-Gehalt Einfluß auf Aussehen und Dicke der Zinküberzüge nehmen. Die stellvertretend für den Bereich 0 ... 0,12 % Si und < 0,02 % P untersuchten Stähle 1, 2 und 3 werden durch Al, Pb und Sn in der Zinkschmelze bei 440 ... 450 °C nur hin-

sichtlich des Aussehens der Zinküberzüge beeinflusst. Mit zunehmendem Al-Gehalt werden die Überzüge heller und glänzender. 0,5 % Sn in der Schmelze führt zu einer besser ausgeprägten Zinkblume. Die gefundenen geringfügigen Unterschiede in der Dicke der Zinküberzüge sind praktisch nicht relevant.

Bei einer Zinkschmelzetemperatur von 460 °C durchlaufen Stähle mit Si-Gehalten im Sandelin-Bereich und niedrigem P-Gehalt (< 0,020 %) hinsichtlich der Zinküberzugsdicke bei Al ca. 0,005 % ein Maximum (siehe Abb. 1). Ein vergleichbares Verhalten wurde für die Stähle 4, 5 und 7 bei Al ~ 0,01 % aber Zinkschmelzetemperatur von 440 bzw. 450 °C gefunden (Abb. 2 und 3). Allen 3 Stählen ist ein hoher P-Gehalt (0,06/0,08/0,07 %) gemeinsam. Die Reaktivität von Stählen dieser Zusammensetzung gegenüber der Zinkschmelze ist bei 440 ... 450 °C am höchsten und der der Sandelin-Stähle bei 460 °C vergleichbar. Erst bei Al ~ 0,015 % in der Zinkschmelze werden die Werte der Zinküberzüge ohne Al-Zusatz in der Schmelze wieder erreicht bzw. beginnt der dickenreduzierende Einfluß von Al. Im Bereich der Maxima sind die Zinküberzüge rau und z. T. ungleichmäßig ausgebildet. Bei den Stählen 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 und 9 ist bei Al 0,028 % und Schmelzetemperatur

450 °C nur ein geringer Effekt hinsichtlich der Reduzierung der Zinküberzugsdicke gegeben (Abb. 3). Nur bei Stahl 7 (0,235 % Si, 0,071 % P) mit einem sehr hohen P-Gehalt beträgt die Zinküberzugsdicke mit ~ 80 µm nur noch 50 % des Ausgangswertes in Al-freien Schmelzen. Bei der Schmelzetemperatur 440 °C und Al 0,028 % ist die Reduzierung der Überzugsdicke deutlich auch für die Si-beruhigten Stähle 8 und 9 zu erkennen (Abb. 2). Die Stähle 7 und 9 haben jedoch nur noch eine Zinküberzugsdicke von 30 ... 40 µm.

Durch Interpolation aus den graphischen Darstellungen Abb. 2 und 3 in Verbindung mit den Zinküberzugsdickenwerten bei 440 und 450 °C nach Tab. 2 entstand Abb. 4. Daraus ist ableitbar, daß optimale Verzinkungsbedingungen gegeben sind, wenn der Al-Gehalt der Zinkschmelze (Pb-gesättigt, Sn 0,5 %) ca. 0,025 % und die Schmelzetemperatur 445 °C beträgt. Bei diesen Bedingungen werden auch für Si-beruhigte Stähle die Überzugsdickenwerte nach DIN 50976 nicht unterschritten. Zur Ermittlung des wirtschaftlich nutzbaren Einflusses steigender Al-Gehalte in der Zinkschmelze bei gleichzeitiger Anwesenheit von Pb und Sn sind in Tab. 3 die Überzugsdickenwerte für Al 0 und 0,025 % für die Schmelzetemperatur 445 °C zusammengestellt und die prozentuale Reduzierung der Überzugsdicke berechnet.

Die Werte für Al 0,005, 0,009 und 0,018 % wurden nicht berücksichtigt, da in diesem Bereich ein wirtschaftlich nutzbarer Effekt nicht nur nicht gegeben ist, sondern bei bestimmten Stählen und Schmelzetemperaturen eher Nachteile in Kauf genommen werden müssen. Für die Stähle 1, 2, 3 und 6, repräsentativ für Si < 0,20 % und P < 0,020 %, ist kein nutzbarer Einfluß ableitbar.

Bei Stählen mit P 0,06 bis 0,08 % ist auch bei Si-Gehalten ~ 0,12 % eine Schichtdickenreduzierung von ca. 25 % zu erreichen. Stahl 7 mit Si 0,23 % und P 0,071 % wird am stärksten beeinflusst und die Si-beruhigten Stähle 8 und 9 mit ca. 30 % noch deutlich. Die Schichtdickenwerte der Norm werden nicht unterschritten.

### 3. Wirtschaftliche Bedeutung

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen kann abgeleitet werden, daß durch Zulegieren von ca. 0,025 % Al in Zinkschmelzen bei dem in Deutschland relevanten Temperaturbereich von 440 ... 450 °C die Überzugsdicken siliziumberuhigter Stähle (> 0,020 % Si) z. T. sehr deutlich reduziert werden können. Bei einer Tauchdauer von 5 min beträgt die Minderung der Überzugsdicke ca. 20 ... 40 %. Die größte Re-

Stahl-Nr.	Zinüberzugsdicke [µm] bei Al-Gehalt der Zinkschmelze														
	0,0006 %			0,005 %			0,009 %			0,018 %			0,028 %		
	440 °C	445 °C	450 °C	440 °C	445 °C	450 °C	440 °C	445 °C	450 °C	440 °C	445 °C	450 °C	440 °C	445 °C	450 °C
1	62	63	64	62	64	65	62	63	63	61	61	61	59	63	66
2	75	80	85	69	74	78	71	78	84	69	75	80	69	71	74
3	73	74	75	70	74	78	69	74	78	67	69	71	70	71	72
4	119	120	120	143	137	130	143	146	148	102	98	94	89	86	83
5	114	101	88	133	131	128	233	200	167	92	101	88	75	78	81
6	115	111	108	113	112	111	116	110	103	117	115	113	104	104	104
7	157	159	160	172	177	181	162	195	227	111	145	179	32	54	75
8	152	165	178	155	162	169	160	165	170	126	143	160	70	109	148
9	164	180	195	155	171	186	167	183	199	142	164	186	37	98	158

Tab. 2: Zinküberzugsdicke in Abhängigkeit vom Al-Gehalt der Zinkschmelze (Pb: gesättigt, Sn: 0,5 %). Für Stähle 4 und 7 Pb: 0,5 %

duzierung erfolgt bei Stählen mit ~ 0,12 % Si bzw. 0,24 % Si und gleichzeitig hohem P-Gehalt (0,06 ... 0,08 %).

Praktisch bedeutungsvoller ist jedoch der Effekt bei siliziumberuhigten Stählen (> 0,25 % Si) mit üblichem P-Gehalt, bei denen eine Überzugsdickenreduzierung von ca. 30 % erreichbar ist. Für Stähle mit <0,12 % Si und <0,020 % P wurde ein wirtschaftlich verwertbarer Effekt hinsichtlich Zinkeinsparung nicht festgestellt.

Unter der Voraussetzung, daß durch verlängerte Tauchdauer gegenüber unseren Untersuchungen (in der Praxis sind bis zu 15 min in Abhängigkeit von Masse und Geometrie der Bauteile durchaus üblich) der reduzierende Einfluß nicht vollständig aufgehoben wird – nach [24] ist das bei 440 °C Schmelztemperatur nicht der Fall – sind neben der Verbesserung des Aussehens der Überzüge im Durchschnitt bis zu 5 % Zinkeinsparung als realistisch anzusehen.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft im Rahmen des AiF-Themas 9134B gefördert. Wir danken dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V. (GAV), Düsseldorf, für seine Unterstützung bei

der Koordinierung, Betreuung und Aus-führung.

Literatur

[1] Sandelin R. W.: Galvanizing Characteristics of Different Types of Steel, Wire and Wire Products No. 12. Dez. 1940  
 [2] Richards R. W., Clarke H., Goodwin E.: A Re-statement of Sandelin's Work on Reactive Steels and Its Implications for the Galvanicer, Presentation at the E.G.G.A. Technical Forum, Oslo, Norway, Juni 1993  
 [3] Horstmann D.: Der Einfluß von Eisenbegleitern auf den Zinkangriff, METALL 10. Jhg, Heft 15/16 August 1956  
 [4] Horstmann D.: Allgemeine Gesetzmäßigkeiten des Einflusses von Eisenbegleitern auf die Vorgänge beim Feuerverzinken, Stahl und Eisen 80 (1960) Nr. 22, Okt. 1960 (Bericht Nr. 38 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken)  
 [5] Pelerin J., Hoffmann J., Leroy V.: The Influence of Silicon und Phosphorus on the Commercial Galvanization of Mild Steels, METALL 35 Jhg. Heft 9, September 1981  
 [6] NF A 35-503 Juin 1984, Produits Sidérurgiques, Aciers Pour Galvanisation Par Immersion À Chaud  
 [7] Horstmann D.: Das Verhalten mikrolegierter Baustähle mit höherer Festigkeit beim Feuerverzinken, Archiv Eisenhüttenwesen 46 (1975), Nr. 2  
 [8] Horstmann D.: Das Feuerverzinken siliciumhaltiger Stähle Vortrags- und Diskussionsveranstaltung des GAV, Herausgegeben vom Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Düsseldorf  
 [9] Hänsel G.: Zur Ursache von extrem dicken und ungleichmäßigen Schichten bei der Feuerverzinkung, METALL 34 (1980) 9

[10] Hänsel G.: Beitrag zur Feuerverzinkung von aluminiumberuhigten Stählen, METALL 37 (1983) 9  
 [11] Information Feuerverzinken Nr. 04, Herausgeber: Beratung Feuerverzinken, Verlag: Institut für angewandtes Feuerverzinken GmbH, Sohnstr. 70, 40237 Düsseldorf  
 [12] Sebisty J. J.: Diskussionsbeitrag 11. Intern. Conf. on Hot Dip Galvanizing, Stresa 1973  
 [13] Richards R.: Relationship between steel surface chemistry und the galvanizing behaviour of reactive steels, Vortrag auf der 16. Internen Verzinkertagung, Barcelona, 1991  
 [14] Katzung W., Rittig R., Gelhaar A.: Neuere Erkenntnisse zum Feuerverzinken siliciumhaltiger Stähle und zu Fragen der Eisenbilanz beim Feuerverzinken, Vortrag beim 3. Deutschen Verzinkertag, Hannover, 24. September 1993  
 [15] Bablik H.: Zur Theorie und Praxis des Feuerverzinkens, Metalloberfläche, Ausg. A 3 (1949), S. 105/110  
 [16] Horstmann D.: Der Ablauf der Reaktionen zwischen Eisen und aluminiumhaltigen Zinkschmelzen, Schrift II des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Düsseldorf 1975, S. 18  
 [17] Horstmann D.: Die Bedeutung der Stahentwicklung für das Feuerverzinken, Buch „25 Jahre GAV“, S. 58/77, Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Düsseldorf 1977  
 [18] Dreulle P.: Galvanizability of Silicon – Killed Steels, Proc. Seminar on Galvanizing of Silicon – Containing – Steels, Lüttich 1975 ILZRO Inc., S. 127/149  
 [19] Guttman H., Niessen P.: Galvanizing Silicon Steels in Aluminium-Containing Steels, Lüttich 1975, ILZRO Inc., S. 198/218  
 [20] Pierre M.: Galvanizability of Silicon – Killed Steels, Proc. Seminar on Galvanizing of Silicon Containing – Steels, Lüttich 1975, ILZRO Inc., S. 168/197  
 [21] Pearce D. C.: Galvanizing of silicon stells research – past, present and future, Proc. Seminar on Galvanizing of Silicon – Containing – Steels, Lüttich 1975, ILZRO Inc., S. 32/47  
 [22] Heubner U., Nilmen F.: Die Feuerverzinkung siliziumhaltiger Stähle in niedrig aluminiumlegiertem Zink, METALL 33 (1979) 9, S. 955/960  
 [23] Dreulle N., Dreulle P., Vacher J. C.: Das Problem der Feuerverzinkung von siliciumhaltigen Stählen, METALL 34 (1980) 9, 834/838  
 [24] Hänsel G.: Einfluß der Badzusammensetzung auf die Verzinkung siliciumberuhigter Stähle, Erzmetall 40 (1987) Nr. 11, S. 587 – 593

Tab. 3: Prozentuale Abnahme der Zinküberzugsdicke in Abhängigkeit vom Al-Gehalt der Zinkschmelze bei Schmelztemperatur 445 °C (interpoliert aus 440 und 450 °C)

Nr.	Stahl		Zinküberzugsdicke [µm]		Abnahme [%]
	Si [%]	P [%]	Al 0 %	Al 0,025 %	
1, 2, 3	< 0,11	< 0,02	60 ... 75	60 ... 75	-
4*	0,116	0,059	120	90	25
5	0,118	0,079	101	79	22
6	0,195	0,009	111	107	-
7*	0,235	0,071	158	84	47
8	0,267	0,023	165	120	27
9	0,400	0,014	180	118	34