

Günther Valtinat

Hochtemperaturverzinkte hochfeste Schrauben 12.9

Wissenschaftlich untersuchtes Anziehverhalten

Bericht Nr. 113
Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V.

TECHNISCHE RUNDschau 82 (1990) 8, Seite 34–41

An der Technischen Universität Hamburg-Harburg wurde ein Forschungsvorhaben «Abwürgverhalten von hochtemperaturverzinkten, hochfesten Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9» durchgeführt. Die Untersuchung hat unter anderem abgerundete Erkenntnisse in bezug auf die Herstellerstreuung gebracht.

Hochtemperaturverzinkte hochfeste Schrauben 12.9

Wissenschaftlich untersuchtes Anziehverhalten

Von Günther Valtinat

Über die Ergebnisse von Anziehversuchen an hochtemperaturverzinkten hochfesten Stahlbauschrauben der Festigkeitsklasse 10.9 hat die «Technische Rundschau» schon berichtet [1, 2]. Mittlerweile wurden weitergehende Versuche in bezug auf das Anziehverhalten hochfester feuerverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 durchgeführt. Sie ergänzen frühere Untersuchungen an normaltemperaturverzinkten HV-Schrauben derselben Festigkeitsklasse [3]. Um die Herstellerstreuung abzudecken, erfolgten die Untersuchungen mit Komponenten verschiedener Herkunft sowohl hinsichtlich der HV-Schrauben als auch der Hochtemperaturverzinkung.

Wissenschaftliche Problemstellung und Forschungsziele

Hochfeste Schrauben bedürfen eines Korrosionsschutzes, der durch Metallüberzüge und/oder Beschichtungen bewirkt wird [5]. Metallüberzüge können beispielsweise galvanisch, im Schmelztauchverfahren oder durch andere Be-

schichtungsverfahren aufgebracht werden, wobei im Falle des Schmelztauchverfahrens für HV-Schrauben in der Bundesrepublik Deutschland ausschließlich das Feuerverzinken Anwendung findet.

Die Zulassung des Einsatzes feuerverzinkter Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 in der Bundesrepublik Deutschland erfolgte im Jahr 1974 mit der Herausgabe der DASt-Richtlinie 010 [6], 1977 ergänzt um DIN 267, Teil 10 [7]; sie fand ferner Eingang in DIN 18800, Teile 1 und 7 [8]. Auch nach [9] und nach Eurocode 3 für Stahlbauten [10] sind diese Schrauben verwendbar.

Voraussetzung hierfür war die wissenschaftliche Klärung der durch das Feuerverzinken möglichen Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe sowie auch der kompletten Schraubenverbindungen, beispielsweise Wasserstoffversprödung, Versprödung durch Eisen-Zink-Legierungsphasen, Gewindenspiel, Anziehverhalten und Schmierung, Setzerscheinungen, Vorspannkraftverlust, Schwingfestigkeitsverhalten und anderes mehr. Die Ergebnisse der größtenteils AIF-geförderten Untersuchungen waren positiv [1 und 2, 11 bis 18]. Heute werden rund 80 % der in der Bundesrepublik Deutschland gefertigten 10.9-Schrauben feuerverzinkt.

Die Feuerverzinkung der Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben für Abwürguntersuchungen erfolgte bei einer Temperatur um 450 °C, wie sie seit Einführung dieses Verfahrens vor fast 150 Jahren üblich ist.

Die Praxis hat gezeigt, daß es beim Einsatz dieser Schrauben immer wieder Schwierigkeiten hinsichtlich der Maßhaltigkeit gibt. Dies ist hauptsächlich bedingt durch ungleichmäßig oder zu dick ausgebildete Zinküberzüge, was mit dem durch die Begleitelemente des

Stahls beeinflussten Ablauf der Eisen-Zink-Reaktionen zusammenhängt [19, 20]. Hierzu wird seit vielen Jahren international intensive Forschung betrieben, ohne daß jedoch die Zusammenhänge bisher hinreichend geklärt werden konnten [21 bis 33].

Zur Problemlösung zeichnen sich verschiedene Wege ab, die zumindest in Teilbereichen der Verzinkungsindustrie realisierbar erscheinen. In bezug auf das Feuerverzinken von HV-Schrauben liegt dieser Lösungsweg im *Hochtemperaturverzinken* [29]. Dies bedeutet, daß die Zinkbadtemperatur auf 530 bis 560 °C angehoben wird; sie liegt damit oberhalb des Reaktionsmaximums, das im Temperaturbereich um 490 bis 510 °C liegt. Die Zinküberzüge bilden sich gleichmäßiger und dünner aus, sind aber noch normgerecht.

Wie Untersuchungen im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsvorhabens AIF-Nr. 5228 zeigen, lassen sich 10.9-Schrauben *hochtemperaturverzinken*, ohne daß sich im Vergleich zur *Normaltemperaturverzinkung* signifikante Abweichungen in bezug auf die mechanischen Eigenschaften und das Anziehverhalten ergeben [1, 34, 35]. In einer weiteren Untersuchung (AIF-Nr. 5717) wurde festgestellt, daß die Herstellerstreuung, die durch zwei verschiedene Schraubenhersteller und unterschiedliche Verzinkerei-Betriebe bedingt ist, kaum ins Gewicht fällt [2].

In einem weiteren Forschungsprogramm [3] (AIF-Nr. 4255) wurden schwarze und feuerverzinkte Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 untersucht, deren Anwendung im Stahlbau nach [6 bis 10] bisher nicht zugelassen ist. Die höhere Festigkeit dieser Verbindungselemente würde es gestatten, die im Gesamtbereich des Stahlbaus auftretenden Betriebskräfte durch Reibschluß oder kombinierte Reibschluß-Abscher- und Lochleibungsbeanspruchung weiter zu steigern, was die Wirtschaftlichkeit der Verbindung erhöhen würde. Die Feuerverzinkung der Schrauben für die Versuche in [3] erfolgte im *Normaltemperaturbereich*. Die Ergebnisse zeigen, daß auch in diesem Festigkeitsbereich die Unterschiede zwischen schwarzen und feuerverzinkten Schrauben und Schraubenverbindungen nur minimal sind [3, 36, 37].

Damit liegen Untersuchungsergebnisse für drei von vier Fragenkomplexen vor:

- Normaltemperaturverzinken von 10.9-Schrauben
- Hochtemperaturverzinken von 10.9-Schrauben
- Normaltemperaturverzinken von 12.9-Schrauben

Prof. Dr. Ing. GÜNTHER VALTINAT, Technische Universität Hamburg-Harburg. Das hier dargestellte Forschungsvorhaben wurde vom Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V. (GAV, Düsseldorf) betreut. Die Finanzierung erfolgte durch den Bundesminister für Wirtschaft (BMW) über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AIF, Köln). Das gesamte Forschungsvorhaben wurde in zwei Teilen abgewickelt: Teil 1 im Institut für Werkstoffkunde der Technischen Hochschule Darmstadt (Materialprüfungsanstalt), Teil 2 im Arbeitsbereich Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Im vorliegenden Artikel wird über die Untersuchungsergebnisse des zweiten Teils berichtet. Die Versuchsergebnisse sind detailliert in [4] niedergelegt.

HV M 24 x 120 12,9 Hersteller 1 und 2

Nrn. 201 bis 220
P-V-Soll = 220 kN
M-A-Soll = 80 kNcm

--- 95%-Fraktile
— Mittelwert
--- 0,5%-Fraktile

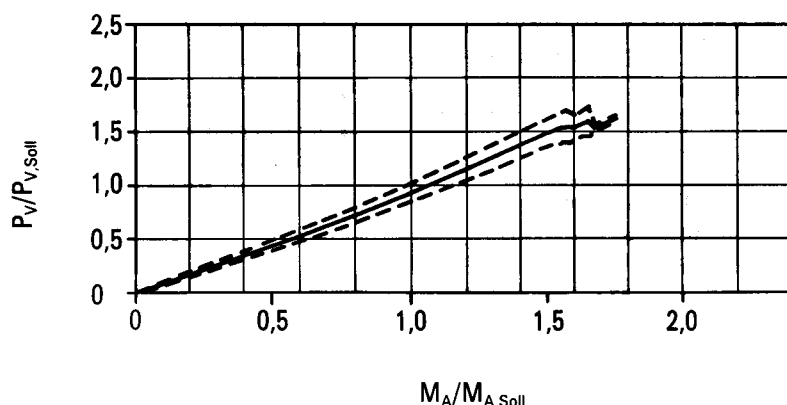
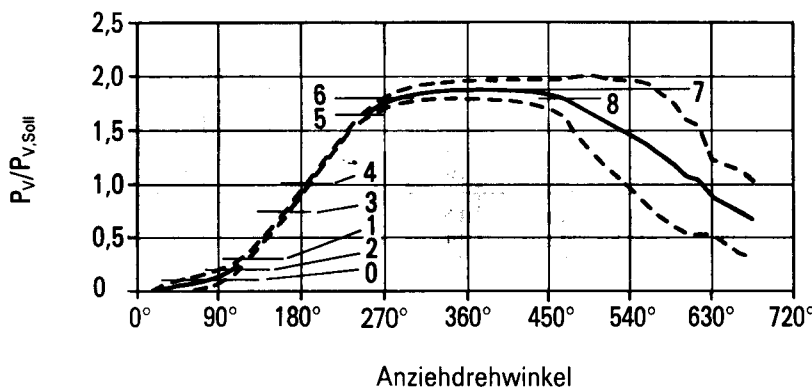


Bild 1. Statistische Auswertung der Untersuchungen an Schrauben HV M 24 x 120, hochtemperaturverzinkt, Festigkeitsklasse 12,9, werksseitige Mutternschmierung MoS₂. Gemeinsame Auswertung der Schrauben beider Hersteller. Oben: φ -P_V-Diagramm; unten: M_A-P_V-Diagramm. P_{V,Soll} = 220 kN, M_{A,Soll} = 800 Nm.

Bis jetzt fehlten noch die Forschungsergebnisse zum Fragenkomplex *Hochtemperaturverzinken von 12,9-Schrauben*. Diese Ergebnisse liegen hiermit und in [4] vor, und sie werden durch den Darmstädter Forschungsbericht über den Teil I dieses Forschungsvorhabens [37] ergänzt. Damit ist wie in den beiden ersten obigen Fällen die Herstellerstreuung mit berücksichtigt. Die Vergütung wird bei hochfesten Schrauben der Festigkeitsklasse 12,9 wesentlich weiter getrieben als bei 10,9-Schrauben. Schrauben mit so hohen Festigkeiten haben eine geringere, in der

Regel aber noch ausreichende Duktilität und reagieren möglicherweise empfindlicher auf die um etwa 80 °C höheren Verzinkungstemperaturen beim Hochtemperaturverzinken. Eine Übertragbarkeit der vorliegenden Untersuchungsergebnisse auf diesen vierten Themenbereich war deshalb nicht ohne weiteres gegeben. Um die Vorzüge der Hochtemperaturverzinkung auch bei HV-Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 12,9 nutzen zu können, mußte der Nachweis einer unbedenklichen Verwendbarkeit erbracht werden.

Mit dem jetzt abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurde die Zielrichtung verfolgt, durch entsprechende Versuche die Eigenschaften hochtemperaturverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12,9 zu bestimmen und die Beanspruchungsgrenzen derartiger Verbindungselemente aufzuzeigen. Neben den durch das Hochtemperaturverzinken möglichen Änderungen der Materialeigenschaften könnten auch Veränderungen der Oberflächeneigenschaften eintreten, die den Reibbeiwert im Gewinde sowie jenen in der Mutterauflagefläche beeinflussen, so daß der k-Faktor in folgender Gleichung anders ausfällt als bei hochtemperaturverzinkten 10,9-Schrauben.

$$M_A = k \cdot D \cdot P_V$$

M_A = Anziehdrehmoment
D = Schraubennennendurchmesser
P_V = Vorspannkraft

Entscheidend ist ferner die Größe des plastischen Drehwinkels im Hochplateau der Vorspannkraft [3 und 35], der wesentlich zum fehlertoleranten, sicheren Anziehen beiträgt. Hierüber wurden sichere Erkenntnisse zu den folgenden Fragen erarbeitet:

- Welche Anziehdrehmoment-Vorspannkraft-Drehwinkel-Beziehung stellt sich im Vergleich mit den bei «Normaltemperatur» verzinkten 12,9-HV-Schrauben ein?
- Welcher plastische Drehwinkel ist erreichbar?
- Ist das Schmiermittel Molybdändisulfid (MoS₂) geeignet?

Ziel war ferner, im Falle positiver Ergebnisse die Normen entsprechend zu ergänzen und damit die Umsetzung in die Praxis zu ermöglichen.

Für einen möglichen Einsatz von 12,9-Schrauben im Stahlbau sind folgende Untersuchungsergebnisse wichtig (vgl. hierzu die Ausführungen zum typischen Abwürgdiagramm in Bild 1 von [1 und 2]):

- Werkstoffkennwerte
- simultanes M_A- φ -P_V-Diagramm bis zum Schraubenversagen (Abwürgdiagramm)
- Festlegen des linearen Anziehbereichs (Anfangs- und Endpunkt im Abwürgdiagramm)
- Ermittlung des maximalen P_V-Plateaus mit zugehörigem Verdrehungswinkelbereich im Abwürgdiagramm
- Ermittlung des Differenz-Umdrehungswinkels, bei dem die Vorspannkraft unter einen Soll-Wert abfällt
- Festlegen der erforderlichen Mindestvorspannkraft zwecks Einbeziehens in die Vorschriften

- Festlegen der Anziehverfahren zum planmäßigen Vorspannen der Schrauben auf den Soll-Wert
- Festlegen von Kontrollverfahren und -werten
- Festlegen zulässig übertragbarer Kräfte im Stahlhochbau sowie im Stahl-Straßenbrücken- und im Stahl-Eisenbahnbrückenbau für gleitfeste Verbindungen (GV-Verbindungen)

Weiter wären zum Einsatz von 12.9-Schrauben im Stahlbau noch Untersuchungen erforderlich zu

- Scher-Lochleibungs-Verbindungen (SL-Verbindungen)
- Zugverbindungen (Z-Verbindungen)
- Kombinationen von SL- und Z-Verbindungen

Die Zuordnung des gesamten Schraubenmaterials und der Hochtemperaturverzinkung geschah wie folgt:

- Hersteller 1: August Friedberg, Schrauben- und Nietenfabrik, Gelsenkirchen; Großfeurverzinkerei Wirtz & Co., Gelsenkirchen
- Hersteller 2: Peiner Umformtechnik GmbH, Peine; HAKU-Werke, Hannover/Braunschweig

Versuchsprogramm für Abwürguntersuchungen

Das Versuchsprogramm umfaßte Abwürguntersuchungen an den hochtemperaturverzinkten HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 (Tabelle 1). Alle Schraubenverbindungen *Schraube + Mutter + zwei Scheiben* hatten bei der Anlieferung den gleichen Schmierzustand mit Molybdändisulfid (MoS_2), der werkseitig komplett auf die Mutter aufgebracht war und vor dem Versuch nicht verändert wurde, um praxisgerechte Bedingungen zu schaffen.

Materialuntersuchungen

Für die angelieferten Versuchsstücke wurden von beiden Herstellern Ergebnisse aus der eigenen laufenden Materialprüfung für jeden Schrauben- und Mutterndurchmesser zur Verfügung gestellt. Zur Überprüfung dieser Angaben wurden im Labor Zugversuche an Schrauben sowie Härtemessungen an Muttern und Unterlegscheiben gemäß DIN ISO 898, Teile 1 und 2, durchgeführt.

Als Ergebnis kann im wesentlichen mitgeteilt werden, daß bei leicht unterschiedlichen Kennwerten aus den Laborversuchen und den Firmenversuchen die Daten bis auf zwei geringfügige Ausnahmen im Rahmen der Vorschrift liegen. Die Scheiben erreichen die Festigkeitsklasse 12.9 nicht.

Tabelle 1. Zusammenstellung der untersuchten hochtemperaturverzinkten HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9.

Schraube	Nr.	Stückzahl	Oberflächen- und Schmierzustand	Hersteller	Versagensart	
					A	B
HV M20 × 80	001 bis 015	15	htz + MoS_2	1	6	9
HV M20 × 80	016 bis 028	13	htz + MoS_2	2	13	0
HV M20 × 80	001 bis 028	28	htz + MoS_2	1 + 2	19	9
HV M20 × 120	101 bis 110	10	htz + MoS_2	1	3	7
HV M20 × 120	111 bis 120	10	htz + MoS_2	2	10	0
HV M20 × 120	101 bis 120	20	htz + MoS_2	1 + 2	13	7
HV M24 × 120	201 bis 210	10	htz + MoS_2	1	3	7
HV M24 × 120	211 bis 220	10	htz + MoS_2	2	6	4
HV M24 × 120	201 bis 220	20	htz + MoS_2	1 + 2	9	11
HV M24 × 200	301 bis 310	10	htz + MoS_2	1	6	4
HV M24 × 200	311 bis 319	9	htz + MoS_2	2	8	1
HV M24 × 200	301 bis 319	19	htz + MoS_2	1 + 2	14	5
HV M30 × 100	401 bis 410	10	htz + MoS_2	1	10	0
HV M30 × 100	411 bis 420	10	htz + MoS_2	2	10	0
HV M30 × 100	401 bis 420	20	htz + MoS_2	1 + 2	20	0
HV M30 × 190	501 bis 510	10	htz + MoS_2	1	10	0
HV M30 × 190	511 bis 520	10	htz + MoS_2	2	9	1
HV M30 × 190	501 bis 520	20	htz + MoS_2	1 + 2	19	1

htz = Hochtemperaturverzinkung

Versagensart:

A: Abstreifen der Gewindegänge von Mutter und Schrauben

B: Abdrehen im Gewindeschäft

Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Die Versuchsdurchführung ist in [1 bis 4] detailliert beschrieben.

Die Versuchsergebnisse sind ausführlich in [4] in Tabellenform, in Säulendiagrammen und in Abwürgdiagrammen dargestellt. Stellvertretend hierfür werden im folgenden die Untersuchungsergebnisse zur hochtemperaturverzinkten 12.9-Schraube M 24 × 120 diskutiert. Bild 1 stellt im oberen Teil das bezogene Abwürgdiagramm (ϕ - P_V -Diagramm) mit Mittelwert, 5%- und 95%-Fraktile dar. Die Ergebnisse von je zehn Schrauben der beiden Hersteller wurden hierzu zusammengebracht und statistisch verarbeitet. In Anlehnung an Bild 1 in [1 und 2] wurden in dieses Diagramm folgende speziellen Punkte eingetragen:

- 0 = 10 % von $P_{V,\text{Soll}}$ erreicht
- 1 = A = Anfang des linear elastischen Bereichs
- 2 = 20 % von $P_{V,\text{Soll}}$ erreicht
- 3 = 75 % von $P_{V,\text{Soll}}$ erreicht
- 4 = 100 % von $P_{V,\text{Soll}}$ erreicht
- 5 = E = Ende des linear elastischen Bereichs
- 6 = Anfang des plastischen Bereichs
- 7 = Maximum P_V erreicht
- 8 = Ende des plastischen Bereichs

Hierbei ist mit $P_{V,\text{Soll}} = 220 \text{ kN}$ der in DIN 18800, Teile 1 und 7, für HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9

festgeschriebene Wert eingeführt worden. Aus diesem Diagramm können folgende wichtige Ergebnisse festgehalten werden:

- Ungefähr zwischen $P_V = 60$ und 360 kN besteht über etwa 120° eine lineare Beziehung zwischen Anziehdrehwinkel und Vorspannkraft.
- Der plastische Bereich, in dem trotz des Weiterziehens die Vorspannkraft etwa auf gleicher Höhe bleibt, dehnt sich über einen Anziehdrehwinkel von rund 180° aus; dies ist deutlich weniger, als bei 10.9-Schrauben beobachtet wurde.
- Der Beginn des plastischen Bereichs liegt bei diesen 20 hochtemperaturverzinkten 12.9-Schrauben mit durchschnittlich 398 kN beim etwa 1,8fachen Wert der Soll-Vorspannung für 10.9-Schrauben.
- Die maximale Vorspannkraft für diese 20 Schrauben liegt mit $P_V = 415 \text{ kN}$ beim ungefähr 1,9fachen der Soll-Vorspannkraft für 10.9-Schrauben.

Im unteren Teil des Bildes 1 ist das M_A - P_V -Diagramm mit Mittelwert, 5%- und 95%-Fraktile dargestellt. Hier wird ein gewisser Nachteil deutlich, der sich auch bei den anderen 12.9-Schrauben mit Hochtemperaturverzinkung eingestellt hat: Mit dem nach DIN 18800, Teil 7, für 10.9-Schrauben mit MoS_2 -Schmierung vorgeschriebenen Anziehmoment (hier 800 Nm) erreicht man die Soll-Vorspannkraft nicht sicher. Sowohl der Verlauf der Mittelwerte als auch besonders der Verlauf

der unteren Fraktillinie liegen deutlich unter dem Punkt 1,0/1,0. Darüber hinaus kann erkannt werden, daß etwa ab dem 1,5fachen Wert des vorgeschriebenen Anziehmoments die M_A - P_V -Beziehung unbrauchbar wird und somit das Anziehmoment nicht mehr als Steuergröße für die zu erreichende Vorspannkraft dienen kann; in diesem hohen Lastbereich ist nur noch der Drehwinkel als Steuergröße zu benutzen. Die Bilder 2 bis 4 zeigen die Säulendiagramme für

- Vorspannkraft P_V (Bild 2)
- Anziehdrehmoment M_A (Bild 3)
- Anziehdrehwinkel φ , $\Delta\varphi$ (Bild 4)

Pro Block sind fünf Säulen aufgetragen, von welchen die erste die Versuchsergebnisse des Herstellers 1, die zweite die des Herstellers 2 und die dritte jene, die sich aus der Zusammenlegung der Ergebnisse der Hersteller 1 und 2 ergeben, als Mittelwerte zeigt. Die vierte Säule zeigt Versuchsergebnisse aus [3], die an normaltemperaturverzinkten HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 mit MoS_2 -Schmierung erzielt wurden. Die fünfte Säule zeigt entsprechende Versuchsergebnisse an schwarzen 12.9-Schrauben mit MoS_2 -Schmierung. Man erkennt, daß alle diese Vorspannkraft für einige der oben beschriebenen Punkte des Abwürgdiagramms etwa die gleiche Größe haben.

Bild 3 zeigt jene Anziehmomente, die erforderlich sind, um die Vorspannkraft an den oben bezeichneten Punkten des Abwürgdiagramms zu erreichen. Hier stellt man im Vergleich zu den früheren Untersuchungen an normaltemperaturverzinkten und an schwarzen 12.9-Schrauben fest, daß bei Hochtemperaturverzinkung die Anziehmomente signifikant höher sind. Besonders die drei ersten Säulen im Säulenblock M_4 zeigen die im Zusammenhang mit Bild 1 diskutierte Tatsache, daß im Vergleich zu früheren Untersuchungen höhere M_A -Werte als die vorgeschriebenen erforderlich sind, um die Soll-Vorspannung zu erreichen. Das bedeutet, daß man mit den vorgeschriebenen Werten für diese Schrauben nur eine zu geringe Vorspannkraft erzielt.

Bild 4 stellt die Weiterziehwinkel $\Delta\varphi_{i,k}$ dar, die erforderlich sind, um die Vorspannkraft vom Punkt i auf dem Abwürgdiagramm zum Punkt k zu erhöhen. Beispielsweise ist der Wert $\Delta\varphi_{36}$ jener Weiterziehwinkel, der erforderlich ist, um die Vorspannkraft vom Punkt 3 (75 % der Soll-Vorspannkraft) bis zum Punkt 6 (Anfang des plastischen Bereichs) zu erhöhen.

Aus Bild 4 kann abgelesen werden, daß die Weiterziehwinkel im linearen φ - P_V -Bereich bis hin zum Anfang des plasti-

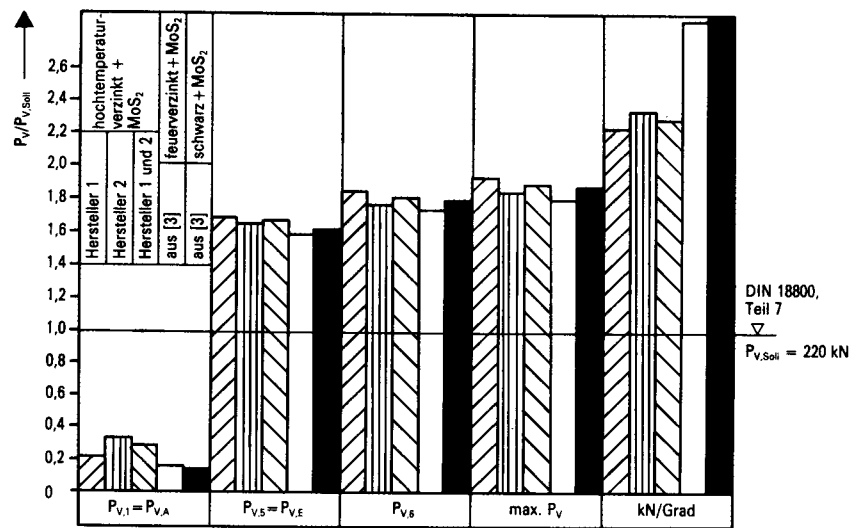


Bild 2. Vorspannkraft P_V (HV M 24 x 120, 12.9, hochtemperaturverzinkt, MoS_2).

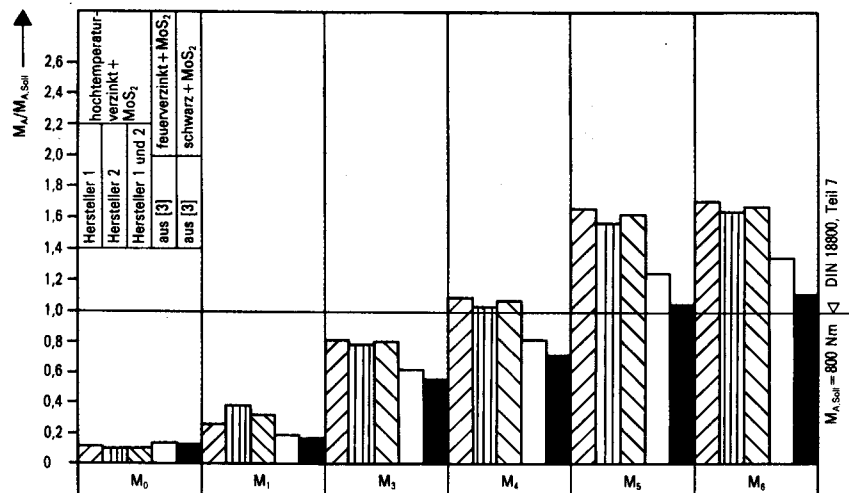


Bild 3. Anziehdrehmoment M_A (HV M 24 x 120, 12.9, hochtemperaturverzinkt, MoS_2).

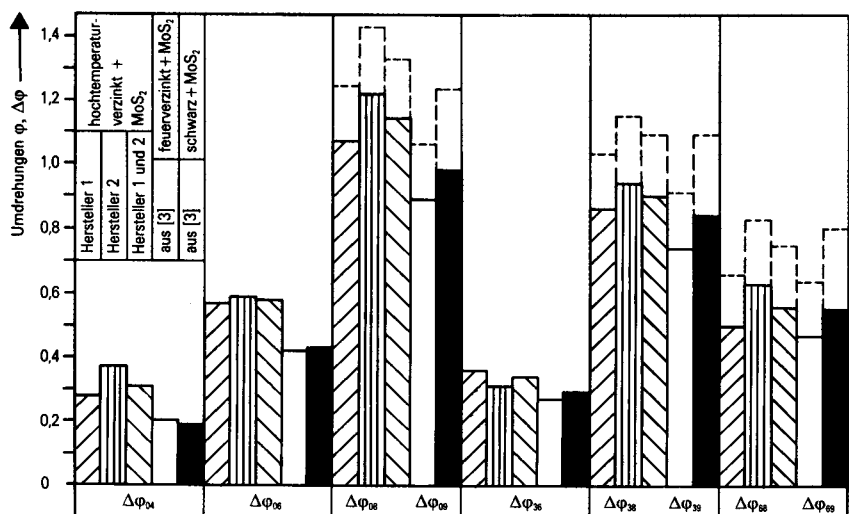


Bild 4. Weiterziehwinkel φ , $\Delta\varphi$ (HV M 24 x 120, 12.9, hochtemperaturverzinkt, MoS_2).

schen Bereichs etwa im gleichen Größenfeld liegen wie bei früheren Versuchen an 12.9-Schrauben.

Beurteilung der Ergebnisse

Maximale Vorspannkkräfte, linearer ϕ - P_V -Bereich

In bezug auf die maximalen Vorspannkkräfte und auf den linearen ϕ - P_V -Bereich des Anziehdiagramms kann ausgesagt werden, daß sich hochtemperaturverzinkte 12.9-Schrauben mit MoS₂-Schmierung nicht anders verhalten als normaltemperaturverzinkte 12.9-Schrauben mit MoS₂-Schmierung.

Anwendbarkeit des Drehmomentverfahrens

Es wäre ungünstig, wenn in einer möglichen späteren Vorschrift zur Anwendung von 12.9-Schrauben für solche mit hochtemperaturverzinkter Auflage andere Anziehmomente zum Erreichen eines bestimmten Vorspannwerts vorgeschrieben werden müßten als für normaltemperaturverzinkte, denn für den Laien sind diese beiden Verzinkungsarten an der Oberfläche kaum zu erkennen. Aus diesem Grund werden gleiche Anziehmomente angestrebt. Leider bestehen jedoch hinsichtlich des zum Erreichen der Soll-Vorspannung nach DIN 18800, Teil 7, erforderlichen Drehmoments deutliche Unterschiede: Für die erstgenannten Schrauben sind zwischen 105 und 125 % des vorgeschriebenen Anziehmoments erforderlich, um die Soll-Vorspannkraft zu erreichen, für die zweitgenannten Schrauben dagegen nur zwischen 80 und 90 %. Benutzt man zu diesem Vergleich anstelle der Mittelwerte die Fraktilewerte, ergibt sich ein noch ungünstigeres Bild. Diese Diskrepanz könnte eventuell beseitigt werden, indem die Schmierung aller Flächen, in welchen relative Bewegungen der Teile gegeneinander stattfinden, verbessert wird, oder es kann

Tabelle 2. Varianten des Drehwinkelverfahrens für das Anziehen von HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9.

Variante	Lit.	Voranziehen mit $M_{A,V}$ auf	Klemmlänge l_k Paketdicke t [mm]	Weiterzieh Winkel $\Delta\phi$
1	[8]	$\sim 0,1 \cdot P_{V,Soll}$	$l_k \leq 50$ $50 < l_k \leq 100$ $100 < l_k \leq 170$ $170 < l_k \leq 240$	180° 240° 270° 360°/270°
2	[9]	$0,75 \cdot P_{V,Soll}$	alle	$90^\circ + \Sigma t + d$
3	[10]	$2/3 P_{V,Soll}$	$t < 2d$ $2d \leq t < 6d$ $6d \leq t \leq 10d$	60° 90° 120°

d = Schraubendurchmesser

das Drehwinkelverfahren zum Anziehen verwendet werden.

Anwendbarkeit des Drehwinkelverfahrens

Das planmäßige Anziehen von HV-Schrauben auf vorgeschriebene Vorspannkkräfte kann neben dem Drehmomentverfahren auch nach dem Drehwinkelverfahren erfolgen. Hierzu sind in den nationalen Vorschriften der europäischen Länder, in den European Recommendations [9] und im Eurocode 3 [10], verschiedene Varianten entwickelt worden. Das Gemeinsame aller Varianten ist, daß das Anziehen nach dem Drehwinkelverfahren in zwei Phasen durchgeführt wird:

- Phase 1: Voranziehen der Schrauben mit einem definierten Anziehmoment $M_{A,V}$, um klaffende Fugen zu schließen und alle Teile satt aufeinanderzulegen; Aufgabe des Voranziehmoments ist es, so weit vorzuspannen, daß man praktisch im linearen ϕ - P_V -Bereich des Anziehdiagramms liegt.
- Phase 2: Es wird ein von der Klemmlänge und möglicherweise auch vom Schraubendurchmesser abhängiger Drehwinkel vorgeschrieben, der als Relativdrehwinkel zwischen der Schraube und der Mutter zu erzeugen ist. Die Aufgabe dieses Weiterzieh-

winkels ist es, von der in der Phase 1 erreichten Vorspannkraft zu einer solchen Vorspannkraft zu kommen, die sicher über dem Soll-Wert liegt und die den plastischen Bereich möglichst nur in geringfügiger Weise anschnidet. Die verschiedenen obengenannten Varianten unterscheiden sich darin, daß zum einen das Voranziehmoment für die erste Phase unterschiedlich ist und zum zweiten der Weiterzieh Winkel in der zweiten Phase davon abhängig und ebenfalls unterschiedlich ist. In Tabelle 2 sind drei Varianten aufgeführt

Die Variante 3 wurde erst im Jahr 1989 in die letzte, überarbeitete Fassung des Eurocode 3 aufgenommen.

Das Drehwinkelverfahren führt zu den höchstmöglichen Flächenpressungen in den einzelnen Pressungsflächen unter dem Kopf, der Mutter und den Scheiben. Da die Kräfte bei 12.9-Schrauben erheblich höher sind als bei 10.9-Schrauben, muß auch mit einem größeren Vorspannkraftabbau ΔP_V und gegebenenfalls mit einem höheren Eindruck unter der Unterlegscheibe gerechnet werden. Aus Erfahrung kann jedoch gesagt werden, daß die Restklemmkkräfte nach Abschluß des Kriechens immer noch deutlich größer bleiben als beim Anziehen mit der Drehmomentmethode auf den elastischen P_V -Wert.

Tabelle 3. Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und dem Drehwinkelverfahren in der Variante 1 für 10.9-Schrauben.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Schraube	Voranziehmoment für $0,1 P_{V,Soll}$		Weiterzieh Winkel $\Delta\phi_i$ hochtemperaturverzinkt Mittelwerte und Standardabweichung						erforderliches $\Delta\phi$ nach [8] für 10.9
	$M_{A,V}$ [Nm]	$\frac{M_{A,V}}{M_{A,Soll}}$	$\Delta\phi_{04}$	$S_{\Delta\phi_{04}}$	$\Delta\phi_{05}$	$S_{\Delta\phi_{05}}$	$\Delta\phi_{06}$	$S_{\Delta\phi_{06}}$	
M20 x 80	64	0,142	109	13	147	15	188	15	180°
M20 x 120	59	0,131	153	10	232	20	260	18	240°
M24 x 120	90	0,113	112	18	177	17	210	15	240°
M24 x 200	119	0,149	127	22	223	19	252	18	270°
M30 x 100	233	0,141	90	11	128	12	183	14	140°
M30 x 190	252	0,153	121	13	182	11	245	20	270°

Tabelle 4. Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und dem Drehwinkelverfahren in der Variante 2 für 10.9-Schrauben.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Schraube	Voranziehmoment für 0,75 P _{V,Soll}		Weiterziehwinkel Δφ _{3i} hochtemperaturverzinkt						erforderliches Δφ nach [9] für 10.9
	M _{A,V} [Nm]	$\frac{M_{A,V}}{M_{A,Soll}}$	Mittelwerte und Standardabweichung						
			Δφ ₃₄	S _{Δφ34}	Δφ ₃₅	S _{Δφ35}	Δφ ₃₆	S _{Δφ36}	
M20 × 80	426	0,95	27	4	65	7	106	10	157°
M20 × 120	381	0,85	37	2	116	14	144	11	195°
M24 × 120	636	0,80	24	1	89	7	122	11	195°
M24 × 200	673	0,84	30	1	125	7	154	13	275°
M30 × 100	1296	0,79	20	1	58	9	113	7	175°
M30 × 190	1463	0,89	29	1	90	12	153	10	264°

Tabelle 5. Weiterzieh Winkel vom Anfang bis zum Ende des plastischen Bereichs, Mittelwerte, Streuung und Fraktilewerte.

1	2	3	4	5	6	7
12.9-Schraube	12.9-Schrauben htz plastischer Weiterzieh Winkel $\Delta\phi_{68}$			12.9-Schrauben tz ¹ plastischer Weiterzieh Winkel $\Delta\phi_{68}$		
	Mittelwert	Standard- abweichung	untere 5%-Fraktile	Mittelwert	Standard- abweichung	untere 5%-Fraktile
HV M20 × 80	168	50	86	122	38	59
HV M20 × 120	185	38	122	136	34	80
HV M24 × 120	202	39	137	170	35	112
HV M24 × 200	171	46	95	175	28	129
HV M30 × 100	113	17	85	89	18	59
HV M30 × 190	126	32	73	101 ²	24	62

¹ Die Werte der Spalten 5 bis 7 sind aus [3] entnommen

² Vergleichsschraube HV M30 × 160

In Tabelle 3 werden die Versuchsergebnisse (Spalten 2 bis 9) mit der Variante 1 aus [8] verglichen (Spalte 10). Hierbei wird angegeben, welches Voranziehmoment M_{A,V} zum Erreichen von 10 % der Soll-Vorspannung erforderlich ist. Danach werden die Weiterzieh Winkel zwischen dem Punkt 0 und den Punkten 4, 5 und 6 des Bildes 1 angegeben. In der Spalte 10 ist der Weiterzieh Winkel für 10.9-Schrauben aufgelistet, der für die Klemmlängen der Versuchsschrauben anzuwenden wäre.

Nach diesen Versuchsergebnissen kann das Drehwinkelverfahren in der Variante 1 nicht ohne Anpassung auf 12.9-Schrauben übertragen werden, da mit $\Delta\phi_{06}$ besonders für die Schrauben M 30 die Phase 2 in einigen Fällen schon einen Teilbetrag der plastischen Duktilität vorweg verbraucht, so daß für das Prüfen und das eventuelle spätere Nachdrehen nur noch wenig Drehwinkelreserve verbleibt.

Für das Drehwinkelverfahren in der Variante 2 sind in Tabelle 4 die Versuchsergebnisse und die aus den European Recommendations [9] für diese Schraubenlängen abgeleiteten Kenndaten der Combined Method aufgelistet.

Aus diesen Ergebnissen ist zu folgern, daß das Drehwinkelverfahren in der Variante 2 nicht ohne weiteres auf 12.9-Schrauben übertragen werden kann, da mit dem Weiterzieh Winkel nach [9] bei allen Schrauben bereits deutliche plastische Reserven in Anspruch genommen werden.

Das Drehwinkelverfahren in der Variante 3 nach dem Eurocode 3 in der neuesten Fassung [10] konnte nicht direkt mit den Versuchsergebnissen verglichen werden, da ein Markierungspunkt, der zwei Drittel der erforderlichen Vorspannkraft repräsentiert, nicht in die Berechnungen und die Auswertungen eingeführt wurde. Dies muß noch nachgeholt werden. Erste Voruntersuchungen in dieser Richtung deuten an, daß sich hier möglicherweise eine

Variante des Drehwinkelverfahrens ergibt, die auch für 12.9-Schrauben geeignet ist.

Plastische Drehwinkelreserve

Die Frage, welche Drehwinkelreserven im plastischen Bereich vorhanden sind, kann mit Hilfe des Bildes 1 und zahlenmäßig mit Hilfe der Säulendiagramme (Bild 4) beantwortet werden. Plastische Drehwinkelreserven von gewisser Größe sind erforderlich, damit das oben beschriebene Drehwinkelverfahren fehler tolerant und sicher angewendet werden kann, denn es zieht die Schrauben planmäßig über den elastischen Bereich bis an den plastischen Bereich beziehungsweise bis in dessen vordere Zone vor. Außerdem werden bei der Inspektion von eingebauten HV-Schrauben unter Umständen Weiterzieh Winkel aufgebracht. Bei einem solchen Weiterzieh Winkel von 0 bis 30° bis zum Ausklinken des Prüfschlüssels darf bisher nach den Prüfvorschriften die Schraube im Bauwerk verbleiben, also müßte ein solcher Weiterzieh Winkel ohne Schädigung ertragen werden können. Hierzu liefern die Untersuchungen das Ergebnis (Bild 1 oben), daß im Mittel etwa mit plastischen Drehwinkeln von 120 bis 180° gerechnet werden kann. Für den großen Durchmesser M 30 liegen die Werte an

der unteren Grenze. Tabelle 5 gibt hierzu neben dem Weiterzieh Winkel zwischen den Punkten 6 und 8 $\Delta\phi_{68} = \phi_{\text{plast. Ende}} - \phi_{\text{plast. Anfang}} = \phi_8 - \phi_6$ auch dessen Streuung und Fraktile an.

Will man sichergehen, daß man beim Weiterziehen nicht zu weit in den plastischen Bereich hineinkommt, so wäre die untere 5%-Fraktile der Weiterzieh Winkel $\Delta\phi_{68}$ zu beachten. Man kann folgern, daß dieser Wert bei hochtemperaturverzinkten 12.9-Schrauben bis M 24 sicher über 90° und bei M 30 sicher über 60° liegt. Bei normaltemperaturverzinkten 12.9-Schrauben ist diese Aussage auch möglich, wenngleich der Wert von 90° bei M 20 nicht erreicht wurde.

Abrundung der Erkenntnisse

Das abgeschlossene Forschungsvorhaben *Abwürgverfahren von hochtemperaturverzinkten hochfesten Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9* hat insofern eine Abrundung der Erkenntnisse gebracht, als nunmehr dieses Verhalten für folgende Produkte der beiden deutschen Hersteller von HV-Schrauben für den Stahlbau und der von ihnen eingeschalteten Feuerverzinkereien bekannt ist:

- normaltemperaturverzinkte hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9

- hochtemperaturverzinkte hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9
- normaltemperaturverzinkte hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9
- hochtemperaturverzinkte hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9

Die entscheidende Frage aber, ob die Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 in analoger Weise, wie die Stahlbaunorm DIN 18800 Teil 7 dies für die 10.9-Schrauben vorschreibt, angezogen werden können, kann nicht durchweg mit Ja beantwortet werden. Als Vorteile gegenüber 10.9-Schrauben sind zu werten:

- höhere Festigkeit
- höhere Ausnutzbarkeit auf Abscheren

- höhere maximale Vorspannkräfte
- höhere nutzbare Vorspannkräfte
- infolge der höheren Festigkeit ausgeprägter linearer P_V - ϕ -Bereich mit höheren elastischen Grenzlasten

Als Nachteile gegenüber 10.9-Schrauben, wenn man dies aus dem Wunsch einer gleichartigen Anwendung betrachtet, sind zu nennen:

- Die erforderlichen Anziehmomente in der Drehmomentmethode zum Erreichen der gleichen Vorspannung wie die Soll-Vorspannung von 10.9-Schrauben sind bei hochtemperaturverzinkten 12.9-Schrauben etwa 5 bis 25 % höher; sie liegen bei normaltem-

peraturverzinkten 12.9-Schrauben nur bei rund 80 bis 90 %. Inwieweit hier eine Vergleichmäßigung durch einheitlichere Schmierung möglich ist, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

- Die vorzuziehenden Weiterziehwinkel beim Drehwinkelverfahren streuen stark zwischen den beiden Verzinkungsarten und gegenüber 10.9-Schrauben, es müßten spezifische Weiterziehwinkel für 12.9-Schrauben zumindest für die Drehwinkelverfahren 1 und 2 erarbeitet werden.
- Erwartungsgemäß ist die plastische Drehwinkelreserve kleiner als bei 10.9-Schrauben. [7] [3] [8]

Literatur

- 1 Valtinat G.: Anziehverhalten hochtemperaturverzinkter, hochfester Stahlbauschrauben. Bericht Nr. 96 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V. Technische Rundschau Nr. 4., 1985, S. 36-40.
- 2 Valtinat G.: Anziehverhalten hochtemperaturverzinkter, hochfester Schrauben. Bericht Nr. 101 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V. Technische Rundschau Nr. 12, 1986, S. 62-67.
- 3 Valtinat G., Frey P.: Abwürguntersuchungen an hochfesten Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 in feuerverzinkter und schwarzer Ausführung. AIF-Nr. 4255/II. Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana (TH) in Karlsruhe, 4. Folge, Heft 8, Karlsruhe, 1983, Bericht Nr. 89 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V., Düsseldorf.
- 4 Valtinat G., Feix R.: Abwürguntersuchungen an hochtemperaturverzinkten hochfesten Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9. DAST-Gemeinschaftsprogramm SCHRAUBEN-VERBINDUNGEN, Programm Nr. 1.29. AIF-Nr. 6503/II, GAV-Kenn-Nr. FD 16. Bericht des Arbeitsbereichs Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg vom 15. 6. 1989.
- 5 Bauer C. O.: Oberflächenschutz für Verbindungselemente. VDI-Z (1981) 8, S. 53/63.
- 6 DAST-Ri 010: Anwendung hochfester Schrauben im Stahlbau. Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbau (DAST), Köln, 1974 und 1976.
- 7 DIN 267, Teil 10 (3.77): Mechanische Verbindungselemente; Technische Lieferbedingungen; Feuerverzinkte Teile.
- 8 DIN 18800, Teil 1 (3.81): Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion; und Teil 7 (5.83): Stahlbauten, Herstellen, Eignungsnachweise zum Schweißen.
- 9 European Recommendations for Bolted Connections in Constructional Steelwork. Fourth Edition. ECCS-Technical Committee 10 - Bolted and Welded Connections, Publication no. 38, Brussels, March 1985.
- 10 EUROCODE Nr. 3. Design of Steel Structures. Part 1 - General Rules and Rules for Buildings. Vol. 1, Chapters 1-9, Vol. 2, Annexes. Final Draft (December 1988). Issued to Liaison Engineers, February 1989 by the Eurocode 3 Editorial Group.
- 11 Wiegand H., Strigens P.: Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben. Industrie-Anzeiger 94 (1972), 12, S. 247/252.
- 12 Wiegand H., Thomala W.: Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben. Drahtwelt, Nr. 12, 1973, S. 542/551.
- 13 Valtinat G.: Abwürg-Untersuchungen an feuerverzinkten und schwarzen HV-Schrauben. Bericht Nr. 6193 der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine an der TH Karlsruhe, 1973.
- 14 Valtinat G.: Neue Entwicklungen und Vorschriften in der HV-Verbindungstechnik. Industrie-Anzeiger 95 (1973), 89, S. 2051/2054, und 95 (1973), 92, S. 2091/2094.
- 15 Wiegand H., Thomala W.: Festigkeitsverhalten feuerverzinkter hochfester Schrauben. Umschau in Wissenschaft und Technik 74 (1974), 111, S. 344/345.
- 16 Valtinat G.: Der Einsatz der Feuerverzinkung im Stahlbau im Hinblick auf Schraubenverbindungen. Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Köln, Deutscher Stahlbauverband, Köln, Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V., Düsseldorf, und Verband Deutscher Feuerverzinker e. V., Hagen, 1976. Kurzfassungen in Der Konstrukteur 7 (1976), 10, S. 6/13; Draht 29 (1978), 1, S. 32/35; Verzinken 6 (1977), 2, S. 29/34.
- 17 Valtinat G.: Die Feuerverzinkung im Stahlbau. Buch «25 Jahre GAV», S. 109/136. Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V., Düsseldorf, 1977.
- 18 Kloos K. H., Landgrebe R., Schneider W.: Untersuchungen zur Anwendbarkeit hochtemperaturverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9. Bericht Nr. 102 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V., VDI-Z 128 (1986), Nr. 12, S. 98-108.
- 19 Horstmann D.: Der Ablauf der Reaktionen zwischen Eisen und Zink. Schrift I des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V., Düsseldorf, 1974 (Auswertung von 241 internationalen Fachbeiträgen).
- 20 Horstmann D.: Der Ablauf der Reaktionen zwischen Eisen und aluminiumhaltigen Zinkschmelzen. Schrift II des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V., Düsseldorf, 1975 (Auswertung von 138 internationalen Fachbeiträgen).
- 21 Proceedings «Seminar on galvanizing of silicon containing steels», Lüttich, 1975. Veranstalter waren die International Lead Zinc Research Org. (ILZRO), New York, und das Centre de Recherches Métallurgiques (CRM), Lüttich (15 Fachbeiträge, 326 Seiten).
- 22 Hänsel G.: Development work in hot dip galvanizing of steels containing on to 0.4 % silicon. Proceedings 12th International Galvanizing Conference, S. 163/174. Hrsg. Zinc Development Association (ZDA), London, 1981.
- 23 Hänsel G.: Beitrag zur Feuerverzinkung von aluminiumberühigten, unlegierten Stählen. METALL 37 (1983), 9, S. 883/890.
- 24 Horstmann D.: Fehlererscheinungen beim Feuerverzinken. Hrsg. Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH und Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V., Verlag Stahlwissenschaften, Düsseldorf, 2. Auflage, 1983.
- 25 Nieth F.: Ursachen fehlerhafter Überzüge beim Feuerverzinken. Bänder - Bleche - Rohre 23 (1982), 2, S. 37/40 (Teil 1).
- 26 Nieth F.: Analyse der Oberflächenfehler feuerverzinkter Bauteile. Bänder - Bleche - Rohre 23 (1982), 3, S. 67/70 (Teil 2).
- 27 Nilmen F.: Über das Feuerverzinkungsverhalten siliziumhaltiger Stähle bei Zinkbadtemperaturen unter 460 °C und bei einer Vorwärmung des Verzinkungsgutes. Metall 35 (1981), 9, S. 857/864.
- 28 Pelerin J., Hoffmann J., Leroy V.: The influence of silicon and phosphorus on the commercial Galvanization of mild steels. Metall 35 (1981), 9, S. 870/873.
- 29 Harper S., Browne R. S.: High temperature galvanizing of silicon-killed steel. Proceedings 12th International Galvanizing Conference, Paris, 1979, S. 175/180. Hrsg. Zinc Development Association, London, 1981.
- 30 Herrschaft D. C., Radtke S. F.: Salt bath economics: American Metal Market, Galvanizing Supplement vom 30. 6. 1981.
- 31 Radtke S. F.: Neue Wege des diskontinuierlichen Verzinkens siliziumhaltiger Stahlsorten. Metall 34 (1980), 9, S. 865/867.
- 32 Warnecke W., Meyer L., Selige A.: Stückverzinken von Warmband aus Strangguß. Thyssen Technische Berichte 14 (1982), 2, S. 154/160.
- 33 Frappa Al. L.: Hot dip galvanizing constructional steels by the Technigalva or zinc/nickel procedure. Bericht im Rahmen der Jahreshauptversammlung der EGGA, Como, 1983.
- 34 Kloos K.-H.: Hochtemperaturverzinkung von 10.9-Schrauben, Teil I: Mechanische Eigenschaften (AIF-Nr. 5228). Schlußbericht.
- 35 Valtinat G.: Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben (Festigkeitsklasse 10.9) bei Anwendung der Hochtemperaturverzinkung, Teil II: Anzieh- und Abwürgverhalten. AIF-Nr. 5228/II, Bericht Nr. 81513 der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe. Kurzveröffentlichung siehe [15].
- 36 Kloos K. H., Schneider W.: Untersuchungen zur Anwendbarkeit feuerverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9. VDI-Z 125 (1983), 19, S. 101/111.
- 37 Valtinat G.: Schraubenverbindungen im Stahlbau. VDI-Berichte Nr. 478 (1983), S. 73/84.
- 38 Kloos K. H., Kaiser B., Schneider W.: Hochtemperaturverzinkung von 12.9-Schrauben. Bericht des Instituts für Werkstoffkunde der Technischen Hochschule Darmstadt vom 19. 7. 1989 zum gleichnamigen AIF-Forschungsvorhaben Nr. 6503/1.
- 39 Horstmann D.: Untersuchungen über die Wasserstoffversprödung an hochfesten feuerverzinkten Schrauben (AIF-Nr. 4578). Bericht über die Vortrags- und Diskussionsveranstaltung 1983 des GAV am 2. Februar 1982, S. 83/110.
- 40 Institut für Werkstoffkunde der Technischen Hochschule Darmstadt: Einfluß wichtiger Legierungselemente und des Gefügestands auf die Versprödungsempfindlichkeit wasserstoffbelasteter Schraubenverbindungen aus Vergütungsstählen (AIF-Nr. 4644).