

**Karl-Heinz Kloos, Rainer Landgrebe und Wilhelm Schneider**

## **Untersuchungen zur Anwendbarkeit hochtemperaturverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9**

Bericht Nr. 102  
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V.

Sonderdruck aus **VDI-Z** 128 (1986) Nr. 12 Seite S 98 bis S 108

# Untersuchungen zur Anwendbarkeit hochtemperaturverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9

*Um die Anwendbarkeit der Hochtemperatur(HT-)Verzinkung auf HV-Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 10.9 beziehungsweise 10 zu überprüfen, wurden entsprechend oberflächenbehandelte Teile der Abmessungen M12, M16 und M30 aus in der Praxis üblichen Vergütungsstählen im Vergleich zu normaltemperatur(NT-)verzinkten und schwarzen Ausführungen untersucht. Die durchgeführten Untersuchungen ließen keine Nachteile der HT-verzinkten gegenüber den NT-verzinkten Schraubenverbindungen erkennen. Die Hochtemperaturverzinkung führt ebenso wie die Normaltemperaturverzinkung im Vergleich zu den schwarzen Schrauben zu einer verminderten Dauerhaltbarkeit und zu einem ungünstigeren Anziehverhalten im Anlieferungszustand. Die Beeinträchtigungen liegen dabei in derselben Größenordnung. Der Vorteil der Hochtemperaturverzinkung liegt jedoch in der gleichmäßigeren Ausbildung des Zinküberzugs, die eine größere Sicherheit für die Paßfähigkeit von Bolzen- und Muttergewinden gewährleistet.*

Von Karl Heinz Kloos,  
Rainer Landgrebe  
und Wilhelm Schneider, Darmstadt

Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinrich Wiegand zum  
80. Geburtstag gewidmet.

## 1 Einführung

Für die Langzeitwerterhaltung von Konstruktionsteilen aus dem Gesamtbereich des Stahl-, Maschinen- und Apparatebaus hat sich die Feuerverzinkung als ein wirkungsvoller und zugleich kostengünstiger Korrosionsschutz gegenüber Industrie- und Stadtluft bewährt [1; 2].

Die Anwendung des Feuerverzinkungsverfahrens auf Bauteile, zum Beispiel Schrauben und Muttern, bei denen es auf eine hohe Maßhaltigkeit (Gewindetoleranzen) ankommt, bereitet jedoch immer wieder Schwierigkeiten. Beim herkömmlichen Verzinken – Normaltemperaturverzinkung (NT-Verzinkung) mit Zinkbadtemperaturen  $\vartheta$  von etwa 450 bis 470 °C – entstehen Eisen-Zink-Legierungsschichten, deren Dicke von der chemischen Zusammensetzung, insbesondere vom Si-Gehalt des zu verzinkenden Stahls, abhängt [3 bis 5]. Bild 1. Dadurch kann die Paßfähigkeit von Schraube und Mutter beeinträchtigt werden. Dies ist im Hinblick auf das bei der Stahlherstellung zunehmend einge-

Dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V. (GAV) und der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AIF) wird für die wirkungsvolle Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung sowie für die Finanzierung der Forschungsarbeit herzlich gedankt. Dank gilt auch den Firmen Peiner Maschinen- und Schraubenwerke AG, Peine, und August Friedberg GmbH, Gelsenkirchen, für die Bereitstellung des Versuchsmaterials und den Firmen Wirtz & Co., Gelsenkirchen, und HARO Feuerverzinkerei GmbH, Braunschweig, für die Verzinkung der Teile.

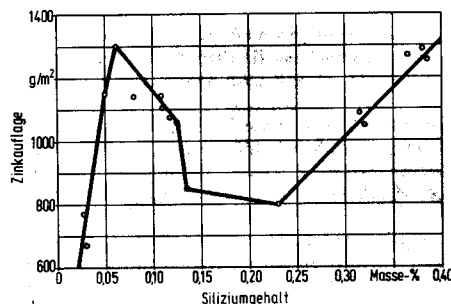


Bild 1. Einfluß des Siliziumgehaltes (Grundmetall) auf die Zinkauflage und damit die Zinkschichtdicke [3] (700 g/m<sup>2</sup>  $\approx$  100 µm).

setzte Stranggußverfahren, bei dem der Stahl stets beruhigt (Si; Al) vergossen wird, von besonderer Bedeutung.

Als geeignetste Methode zur Erzeugung gleichmäßiger, vom Si-Gehalt des Grundwerkstoffs weitgehend unabhängiger Schichtdicken, hat sich die sogenannte Hochtemperaturverzinkung (HT-Verzinkung) mit Zinkbadtemperaturen von  $\vartheta = 530$  bis 560 °C erwiesen [6 bis 8]. Durch die niedrigere Viskosität des Zinks in diesem Temperaturbereich ist ein verbessertes Abschleudern des flüssigen Metalls am Ende des Verzinkungsprozesses möglich, so daß der fertige Überzug nahezu vollständig aus einer Eisen-Zink-Legierungsschicht besteht und mattglänzendes Aussehen besitzt. Er ist unter atmosphärischen Bedingungen korrosionsbeständiger als eine Reinzinkschicht [9].

Bei entsprechenden Überzugsdicken sind daher hochtemperaturverzinkte Teile hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens den herkömmlichen normaltemperaturverzinkten Teilen mindestens ebenbürtig. Das Haftvermögen der erzeugten Zinküberzüge ist ebenfalls vergleichbar.

## 2 Versuchsprogramm und Versuchsmaterial

Bisher beschränkt sich die Anwendung feuerverzinkter HV-Schraubenverbindungen bis einschließlich der Festigkeitsklasse 10.9 beziehungsweise 10 nur auf die Normaltemperaturverzinkung. Um auch die Anwendbarkeit der Hochtemperaturverzinkung auf HV-Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 10.9 beziehungsweise 10 nachzuweisen und damit eine Aufnahme derart oberflächenbehandelter Teile in entsprechende schon bestehende Normen und Richtlinien (zum Beispiel DIN 267 Teil 10, DASt-Richtlinie 010) zu ermöglichen, wurden in Anlehnung an die früheren Arbeiten [10 bis 12] die nachfolgenden Versuche durchgeführt:

- Kerbschlagbiegeversuche
- Zugversuche

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung der untersuchten Schrauben- und Mutterwerkstoffe.

Prüfteil	Werkstoff	Werkstoff-nummer	Chemische Zusammensetzung in Gew.-%								
					C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Schraube M12-10.9	41 Cr 4	1.7035	Richt-analyse <sup>1)</sup>	min	0,38	0,15	0,50	—	—	0,90	—
				max	0,45	0,40	0,80	0,035	0,035	1,20	—
			Ist-Wert		0,43	0,24	0,76	0,032	0,022	1,104	n.n.
Schraube M16-10.9	41 Cr 4	1.7035	Richt-analyse <sup>1)</sup>	min	0,38	0,15	0,50	—	—	0,90	—
				max	0,45	0,40	0,80	0,035	0,035	1,20	—
			Ist-Wert		0,41	0,19	0,78	0,024	0,018	1,097	n.n.
Schraube M30-10.9	42 CrMo 4	1.7225	Richt-analyse <sup>1)</sup>	min	0,38	0,15	0,50	—	—	0,90	0,15
				max	0,45	0,40	0,80	0,035	0,035	1,20	0,30
			Ist-Wert		0,43	0,25	0,75	0,033	0,020	1,129	0,20
Mutter M12-10	Cq 35	1.1172	Richt-analyse <sup>2)</sup>	min	0,32	0,15	0,50	—	—	—	—
				max	0,39	0,35	0,80	0,035	0,035	—	—
			Ist-Wert		0,34	0,008	0,54	0,025	0,011	0,073	n.n.
Mutter M16-10	Cq 45	1.1192	Richt-analyse <sup>2)</sup>	min	0,42	0,15	0,50	—	—	—	—
				max	0,50	0,35	0,80	0,035	0,035	—	—
			Ist-Wert		0,43	0,27	0,72	0,023	0,020	0,069	n.n.
Mutter M30-10	Cq 45	1.1192	Richt-analyse <sup>2)</sup>	min	0,42	0,15	0,50	—	—	—	—
				max	0,50	0,35	0,80	0,035	0,035	—	—
			Ist-Wert		0,43	0,29	0,68	0,026	0,023	0,16	0,04

<sup>1)</sup>nach DIN 17200

<sup>2)</sup>nach DIN 1654 Teil 4

n.n. = nicht nachweisbar

- Anziehversuche
- Langzeitverspannversuche und
- Dauerschwingversuche.

Bei den Untersuchungen wurden HV-Schrauben M12 × 100, M16 × 120 DIN 6914-10.9 aus dem Vergütungsstahl 41 Cr 4 sowie Schraubenbolzen M30 × 160 DIN 6914-10.9 aus dem etwas höher legierten Vergütungsstahl 42 CrMo 4 in schwarz (die schwarze Oberfläche entsteht beim Abschrecken der Teile nach dem Anlassen in einer Anlaßemulsion),

#### Formelzeichen:

Formelzeichen	Bedeutung	Formelzeichen	Bedeutung
$A_{seff}$	effektiver Spannungsquerschnitt	$F$	gewindes Kraft, allgemein
$A_s$	Nennspannungsquerschnitt nach DIN 13 Teil 28	$F_A$	Schwingkraft
$A_5$	Bruchdehnung	$F_V$	Vorspannkraft der Schraube
$A_v$	Kerbschlagarbeit	$F_{0,2}$	Kraft an der 0,2-%-Dehngrenze
$D$	Gewindeaußendurchmesser der Mutter	$M_A$	Anziehdrehmoment
$D_1$	Kerndurchmesser des Muttergewindes	$M_G$	Gewindedrehmoment
$D_2$	Flankendurchmesser des Muttergewindes	$M_K$	Kopfreibungsmoment
$d$	Außendurchmesser des Bolzengewindes	$R_m$	Zugfestigkeit
$d_2$	Flankendurchmesser des Bolzengewindes	$R_{p0,2}$	0,2-%-Dehngrenze
$d_3$	Kerndurchmesser des Bolzen-	$Z$	Brucheinschnürung
		$\mu_G$	Reibungszahl im Gewinde
		$\mu_K$	Reibungszahl in der Kopf- bzw. Mutterauflage
		$\sigma_{A10, 50, 90}$	Dauerhaltbarkeit bei 10, 50, 90% Bruchwahrscheinlichkeit

beitzgänge bei der Normal- und Hochtemperaturverzinkung der Teile waren bis auf die Zinkbadtemperatur 9 identisch:

- NT-Verzinkung bei 9 ≈ 470 °C sowie
- HT-Verzinkung bei 9 ≈ 540 °C.

Dadurch konnten werkstoff- und fertigungsbedingte Unterschiede zwischen den einzelnen Proben weitgehend ausgeschlossen werden.

Bei den Untersuchungen wurden Schrauben, Muttern und Scheiben verwendet, die als Garnitur geliefert und wie in der Praxis üblich hergestellt wurden, das heißt, die Gewinde wurden bei der Fertigung einheitlich mit Gewindemaßen nach DIN 13 Teil 20, Toleranzfeld 6g für die Schraubenbolzen beziehungsweise 6H für die Muttern, hergestellt. Bei den feuerverzinkten Teilen (NT- und HT-verzinkt) wurde zur Gewährleistung der Aufschraubbarkeit ein Übermaß von einheitlich  $A_0 = 300 \mu m$  in das Muttergewinde gelegt. Das Gewindeschneiden erfolgte nach der jeweiligen Feuerverzinkung. Um bei den Bolzen- und Muttergewinden eine möglichst geringe Maßstreuung zu erzeugen, wurden die Schraubenrohlinge vor dem Gewindewalzen auf Walzdurchmesser geschliffen.

**Bild 2** zeigt die tatsächlich vorliegenden Gewindemaße im Vergleich zu den gemäß DIN 13 Teil 20 vorgegebenen Werten. Aufgrund der Meßergebnisse bei den verzinkten und anschließend in inhibierter Salzsäure abgeätzten Schrauben ergaben sich die in **Tabelle 2** aufgeführten Zinkschichtdicken. Sie stimmen mit den an Axialschliffen der entsprechenden Proben ermittelten Schichtdicken überein. Den Ergebnissen kann folgendes entnommen werden:

- Bei entsprechender Tauchdauer besteht zwischen den durch NT- und HT-Verzinkung erzeugten Schichtdicken kein gravierender Unterschied.
- Die Streuung der Schichtdicken ist im allgemeinen bei der NT-Verzinkung größer als bei der HT-Verzinkung.
- Mit zunehmender Tauchdauer nimmt die Zinkschichtdicke zu. Dies wird insbesondere bei den gezielt durchgeführten Untersuchungen der HT-verzinkten M12-Schrauben deutlich.

**Bild 3** zeigt mittels metallographischer Schläffe die Ausbildung der Zinkschicht am Schaft und im Gewindegrund der untersuchten NT- und HT-verzinkten Schrauben M12. Folgendes ist festzustellen:

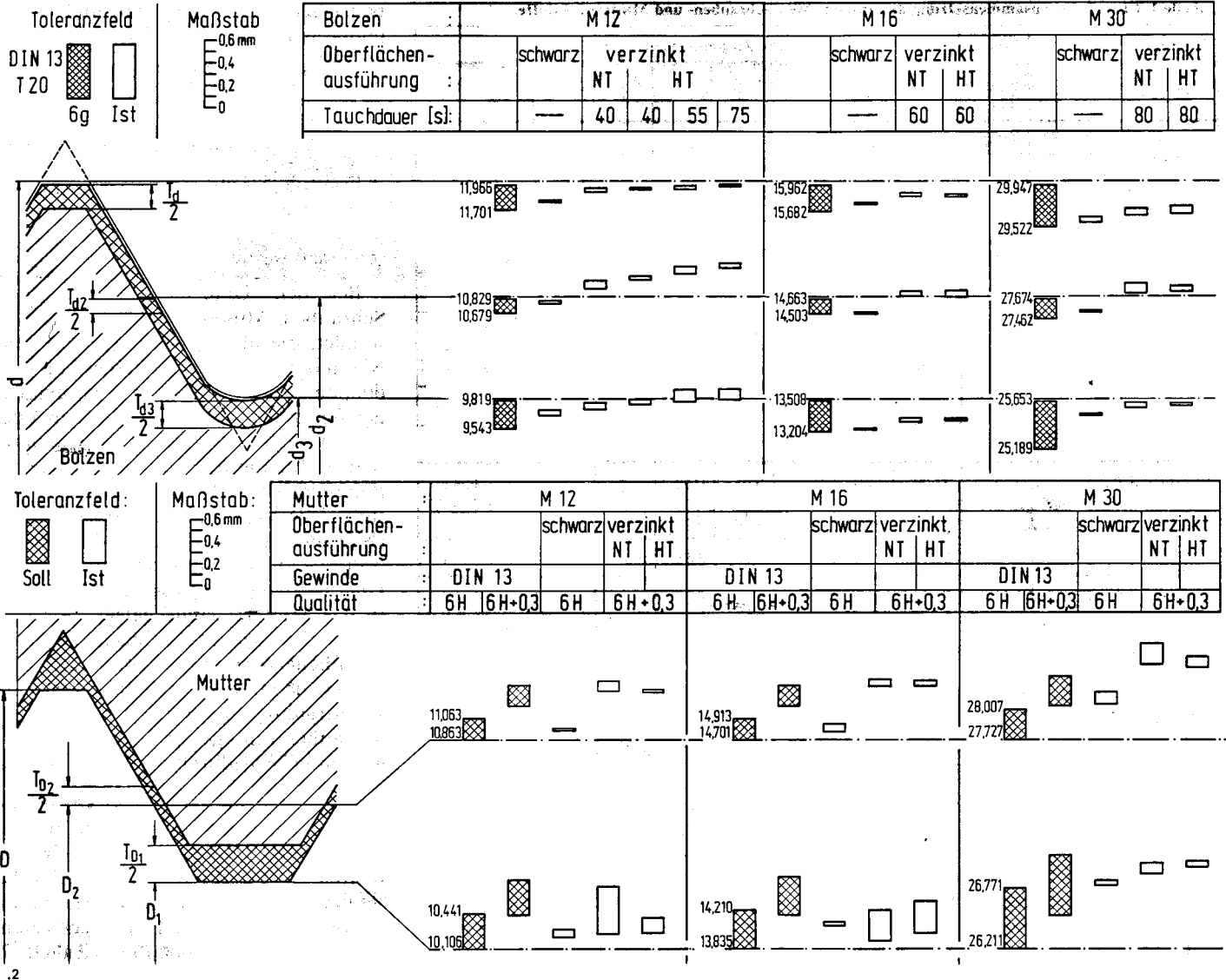


Bild 2. Gewindemaße der untersuchten Versuchsstücke (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils 20 geprüften Teilen) im Vergleich zu den von der Norm vorgegebenen Werten.

- Der HT-Zinküberzug ist wesentlich gleichmäßiger als der NT-Zinküberzug.
- Der HT-Zinküberzug weist eine erheblich größere Anzahl von Rissen auf, die im Gegensatz zur NT-Verzinkung bei allen untersuchten Proben bis zum Grundwerkstoff reichen und in den meisten Fällen senkrecht zur Oberfläche verlaufen.
- Die HT-Zinküberzüge bestehen im wesentlichen aus einer kompakten  $\delta_1$ -Schicht. Bei den NT-verzinkten Teilen konnte darüber hinaus in der äußersten Randschicht vereinzelt Reinzink festgestellt werden.

### 3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

#### 3.1 Kerbschlagbiegeversuche

Zur Ermittlung der Kerbschlagzähigkeit wurden den vergüteten Schrauben

Tabelle 2. Zinkschichtdicken der untersuchten Schrauben (Mittelwert und Standardabweichung aus jeweils 20 geprüften Teilen).

Schraube	Verzinkungsart	Tauchdauer $t$ s	Zinkschichtdicke $\pm s$ [ $\mu\text{m}$ ]				
			an der Schlüssel- fläche	am Schaft	am Gewinde- außendurch- messer $d$	am Gewinde- flankendurch- messer $d_2$	am Gewinde- kerndurch- messer $d_3$
M12	NT	40	$30 \pm 12$	$73 \pm 12$	$52 \pm 14$	$47 \pm 21$	$51 \pm 13$
		55	$60 \pm 12$	$76 \pm 13$	$59 \pm 6$	$65 \pm 6$	$73 \pm 7$
	HT	40	$65 \pm 8$	$84 \pm 8$	$60 \pm 9$	$78 \pm 15$	$92 \pm 11$
		75	$90 \pm 10$	$101 \pm 9$	$77 \pm 8$	$95 \pm 10$	$109 \pm 13$
M16	NT	ca. 60	$62 \pm 9$	$63 \pm 6$	$58 \pm 12$	$61 \pm 13$	$59 \pm 9$
	HT	ca. 60	$58 \pm 6$	$72 \pm 11$	$52 \pm 6$	$53 \pm 10$	$52 \pm 6$
M30	NT	ca. 80	$93 \pm 24$	$81 \pm 37$	$65 \pm 13$	$70 \pm 25$	$67 \pm 12$
	HT	ca. 80	$79 \pm 16$	$62 \pm 19$	$70 \pm 14$	$68 \pm 15$	$65 \pm 6$

ISO-Rundkerbproben aus dem Schaft (M16 und M30) und dem Gewindeteil (M16) gemäß den Forderungen von DIN ISO 898 Teil 1 entnommen.

Ein Teil der Kerbschlagproben wurde anschließend unter den gleichen Bedingungen wie die Schrauben verzinkt (NT-beziehungsweise HT-Verzinkung). Die Kerbschlagbiegeversuche wurden nach DIN 50115 bei 20 °C (Raumtemperatur) und bei -60 °C durchgeführt. **Tabelle 3** enthält die Ergebnisse der Versuche:

- Das Werkstoffverhalten wird nicht vom Ort der Probenentnahme beeinflusst.
- Ein Unterschied zwischen den unverzinkten (blanken), NT- und HT-verzinkten Proben ist nicht festzustellen.
- Die Kerbschlagarbeit sinkt bei -60 °C gegenüber Raumtemperatur unabhängig von der Oberflächenausführung bei Proben aus 42 CrMo 4 (M30) um etwa 10% und bei den Proben aus 41 Cr 4 (M16) um etwa 35 bis 40% ab.
- Die in DIN ISO 898 Teil 1 für 10.9-Schrauben geforderte Mindest-Kerbschlagarbeit (20 J) wurde in allen Fällen überschritten.

### 3.2 Zugversuche

An den zu untersuchenden Schrauben unterschiedlicher Abmessungen, Werkstoffe und Oberflächenausführungen wurden Zugversuche nach DIN ISO 898 Teil 1 durchgeführt. Bei den Schrauben der Abmessung M12 sollte zusätzlich der Einfluß der Tauchdauer auf die Festigkeits-Zähigkeitseigenschaften untersucht werden, da die Anlaßtemperatur zum Erreichen der erforderlichen Festigkeit bei dem verwendeten Werkstoff 41 Cr 4 unterhalb der Zinkbadtemperatur liegt und damit bei dieser Schraubenabmessung je nach Tauchdauer eine vollständige Durchwärmung möglich ist.

#### Zugversuche an abgedrehten Schrauben:

Mit diesen Versuchen sollten die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften der verwendeten Werkstoffe ermittelt werden. Um weitere Informationen über den Einfluß der Verzinkung auf die mechanischen Werkstoffeigenschaften zu erhalten, wurden hier zusätzliche Proben geprüft, die aus den schwarzen Schrauben herausgearbeitet und den gleichen Verzinkungsbedingungen wie die feuerverzinkten Schrauben unterworfen wurden.

Das Ergebnis dieser Zugversuche ist in **Bild 4** zusammengefaßt:

**Tabelle 3.** Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche an ISO-Rundkerbproben aus HV-Schrauben DIN 6914-10.9 (Mittelwert und Standardabweichung aus jeweils zehn Versuchen).

Oberflächenausführung	Kerbschlagarbeit $A_V \pm s$ (Joule)			
	Schraube M16 (41 Cr 4)		Schraube M30 (42-CrMo 4)	
	20 °C	-60 °C	20 °C	-60 °C
unverzinkt (blank)	37,2 ± 3,8 33,7 ± 4,3*	23,5 ± 2,6 24,5 ± 1,7	38,6 ± 3,5	34,6 ± 1,7
NT-verzinkt	35,3 ± 1,3 37,5 ± 1,2*	23,6 ± 1,3 23,0 ± 1,6*	42,0 ± 1,3	37,3 ± 1,6
HT-verzinkt	37,8 ± 1,3 37,6 ± 0,7*	24,6 ± 1,8 25,2 ± 1,0*	36,7 ± 2,9	33,9 ± 1,7

\* Kerbschlagbiegeprobe aus Gewindeteil

- Die bei der Prüfung verwendeten Schrauben der Abmessungen M12, M16 und M30 liegen in geringfügig unterschiedlichen Vergütungsfestigkeiten vor (Ergebnis aus dem Zugversuch an schwarzen Schrauben).
- Zwischen den Proben verschiedener Oberflächenausführung sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen.
- Ein deutlicher Einfluß der Tauchdauer ist bei den M12-Schrauben nicht erkennbar.
- Der bei Normaltemperatur (NT) und Hochtemperatur (HT) aufgebrachte Zinküberzug nimmt nicht an der Kraftübertragung teil. Dies zeigen die Versuche an den entsprechend nachträglich verzinkten Proben. Die Zugfestigkeit (flächenbezogene Größe) nimmt jeweils etwa um den Betrag ab, um den der Zinküberzug den Ausgangsquerschnitt vergrößert. Teilweise unterschreiten dadurch die Zugfestigkeitswerte sogar den nach DIN ISO 898 Teil 1 geforderten Mindestwert (siehe Bild 4, M12 und M16).

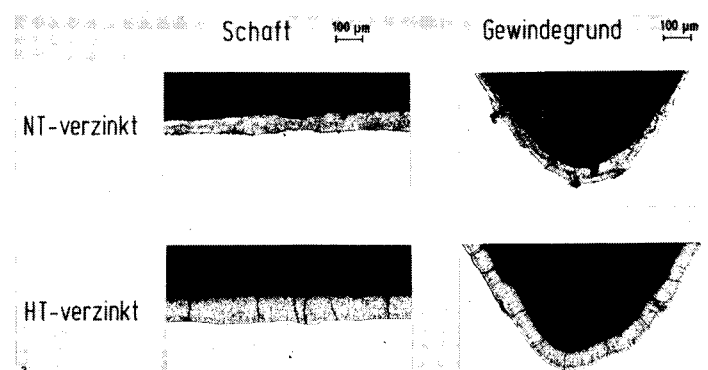
#### Zugversuche an ganzen Schrauben:

Die Versuche dienen der Ermittlung der Festigkeit des freien belasteten Gewindes. Gemäß der Normvorschrift soll bei der Prüfung von ganzen Schrauben im Zugversuch an dieser Stelle der Bruch eintreten. Zur Bewertung des

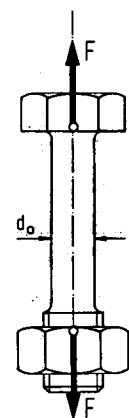
Zinkschichteinflusses wurden zusätzlich feuerverzinkte Schrauben abgebeizt und untersucht. Um in allen Fällen einen Bruch im freien belasteten Gewinde sicherzustellen, wurden bei den Versuchen zwei Muttern auf das Bolzenende aufgeschraubt. Die Anzahl der Gewindegänge vom Gewindeauslauf bis zur Auflagefläche der Mutter wurde für jede Abmessung jeweils konstant gehalten.

Bei der Bestimmung der Zugfestigkeit wurden die im Versuch ermittelten Kräfte auf den jeweiligen effektiven Spannungsquerschnitt  $A_{s,eff}$  bezogen, wobei bei den feuerverzinkten Schrauben die Zinkschichtdicke berücksichtigt wurde. Das Ergebnis der Versuche für alle Abmessungen ist in **Bild 5** dargestellt:

- Wie bei den Zugversuchen an den abgedrehten Proben ergeben sich auch bei den schwarzen Schrauben aller untersuchten Abmessungen für das freie belastete Gewinde nur geringe Unterschiede in der Zugfestigkeit.
- Die zügige Haltbarkeit des freien belasteten Gewindes ist bei den NT-verzinkten Schrauben durchweg kleiner als bei den schwarzen Schrauben. Mit zunehmendem Gewindedurchmesser nimmt sie weiter ab.
- Die Zugfestigkeit der HT-verzinkten M12-Schrauben ist geringfügig kleiner als die der schwarzen beziehungsweise NT-verzinkten Schrauben. Mit



**Bild 3.** Zinkschicht am Schaft und im Gewindegrund von NT- und HT-verzinkten HV-Schrauben M12-10.9.



$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

$$R_{p,0.2} = \frac{F_{0.2}}{A_0}$$

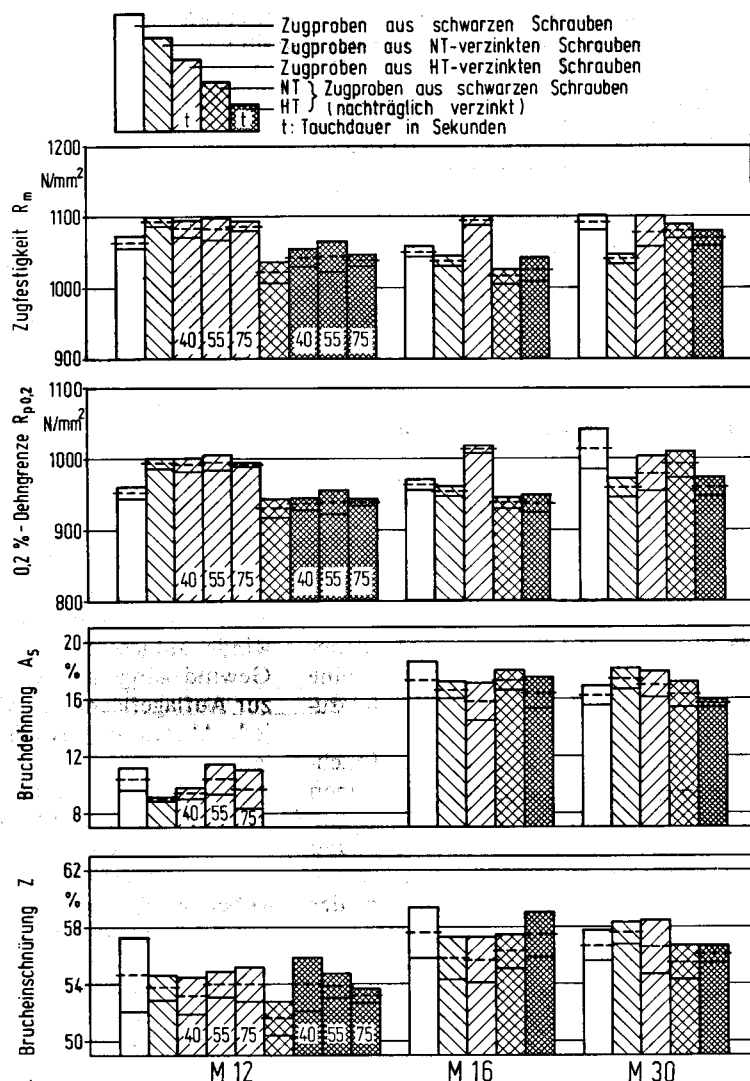
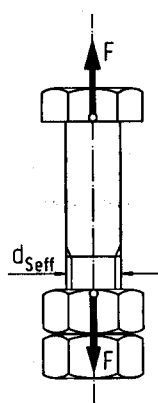


Bild 4. Ergebnisse der Zugversuche an abgedrehten Schrauben (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils sechs geprüften Teilen).



$$R_m = \frac{F_m}{A_{Seff}}$$

$$\text{mit: } A_{Seff} = \frac{\pi \cdot d_{Seff}^2}{4}$$

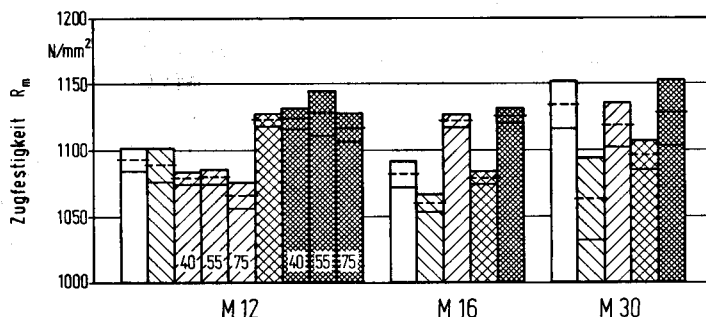
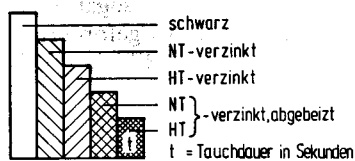


Bild 5. Ergebnisse der Zugversuche an ganzen Schrauben (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils zehn geprüften Teilen).

zunehmender Tauchdauer zeigt sie eine weitere, schwach abnehmende Tendenz. Diese Verringerung der Zugfestigkeit dürfte auf eine geringe Anlaßwirkung infolge der höheren

Zinkbadtemperatur zurückzuführen sein.

Die hochtemperaturverzinkten Schrauben der Abmessung M16 und M30 besitzen im freien belasteten

Gewinde eine um etwa 5% höhere Zugfestigkeit als die normaltemperaturverzinkten Schrauben. Im Vergleich zu den schwarzen Schrauben liegen dabei die Zugfestigkeitswerte der M16-Schrauben etwas höher und die der M30-Schrauben etwas niedriger.

- Entsprechend den Zugversuchsergebnissen an den abgedrehten Proben ist auch im freien belasteten Gewinde ein Mittragen des Zinküberzugs nicht festzustellen. Dies verdeutlichen die Ergebnisse der Zugversuche an den abgebeizten Schrauben. Die hierbei ermittelte Zunahme der Zugfestigkeitswerte infolge der verminderten Querschnittsflächen entspricht jeweils in etwa dem Verhältnis von Ausgangsquerschnitt zum Querschnitt nach Entfernen des Zinküberzugs.

### Zugversuche an der Schraube-Mutter-Verbindung:

Um die Tragfähigkeit der unterschiedlichen HV-Schraubenverbindungen zu ermitteln, wurden Zugversuche an ganzen Schrauben mit einer aufgeschraubten Mutter gleicher Oberflächenausführung durchgeführt. In Anlehnung an die oben beschriebenen Versuche wurden zusätzlich Verbindungen geprüft, deren Zinküberzüge vorher abgebeizt worden waren. Die Klemmlängen wurden bei diesen Versuchen so gewählt, daß jeweils eine Anzahl von sechs freien belasteten Gewindengängen vorlag.

Bei den erzielten Ergebnissen, Bild 6, war neben der Höhe der Tragfähigkeit auch die Art des Schadensereignisses von Bedeutung (Bruch im freien belasteten Gewinde oder Abstreifen der ineinandergreifenden Gewindengänge):

- Die Tauchdauer und damit die Überzugsdicke hat bei den M12-Schrauben keinen erkennbaren Einfluß auf die Tragfähigkeit. Deshalb wurde in Bild 6 der besseren Übersicht wegen auf eine differenzierte Darstellung verzichtet.
- Die maximale Tragfähigkeit der schwarzen Schraubenverbindungen M12 und M16 wird vornehmlich durch die Haltbarkeit des freien belasteten Gewindes bestimmt. Bei der Mehrzahl der Versuche trat an dieser Stelle der Bruch auf. Die entsprechenden Verbindungen der Abmessung M30 sowie alle normal- und hochtemperaturverzinkten Ausführungen (M12, M16 und M30) versagten dagegen überwiegend durch Abstreifen der ineinandergreifenden Gewindengänge. Bei ungünstiger Paa-

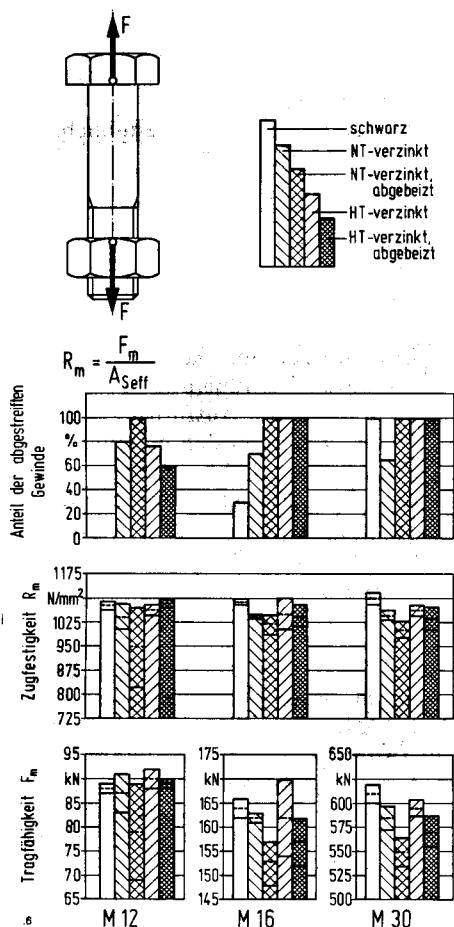


Bild 6. Ergebnisse der Zugversuche an HV-Schraubenverbindungen 10.9 (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils zehn geprüften Verbindungen).

von Bolzen- und Muttergewinde (zu geringe Flankenüberdeckung) wurden sowohl bei den normal- als auch hochtemperaturverzinkten Verbindungen die nach der Norm geforderten Zugfestigkeitswerte teilweise

nicht ganz erreicht. Bei den HT-verzinkten Schrauben ist diese Tragfähigkeitseinbuße mit etwa 20% gegenüber den schwarzen Schrauben durchweg etwas geringer als bei den NT-verzinkten Schrauben mit etwa 50%.

### 3.3 Anziehversuche

Der Anziehversuch wird zur Ermittlung der Reibungsverhältnisse in den relativ zueinander bewegten Kontaktflächen (Gewinde, Auflagefläche) und zur Bestimmung der Grenzbeanspruchbarkeit von Schraubenverbindungen bei der Montage durchgeführt. Er ist von Bedeutung, da er im Vergleich zum Zugversuch mehr die tatsächliche Beanspruchung der Schraube bei der Montage (Zug und Torsion) berücksichtigt. Die Anziehversuche wurden an einer Torsionsprüfmaschine mit schwarzen, NT- und HT-verzinkten Garnituren M12 und M16 durchgeführt. Dabei wurden die Muttern mit einer konstanten Anziehdrehgeschwindigkeit von 1 U/min angezogen. Bei jedem Anziehvorgang wurden neue Teile verwendet. Die Prüfungen erfolgten sowohl mit Garnituren im Anlieferungszustand (leicht geölt) als auch im zusätzlich geschmierten Oberflächenzustand. Geschmiert wurde jeweils im Gewinde und in der Mutterauflagefläche mit einem bei HV-Schrauben üblichen Schmierstoff auf MoS<sub>2</sub>-Basis. Das Reibverhalten der unterschiedlichen Verbindungen wurde mit einem speziellen Prüfgerät [13] ermittelt. Dieses ermöglicht, neben dem Anziehdrehmoment  $M_A$  das Gewindedrehmoment  $M_G$  und durch eine elektronische Differenzschaltung das Kopfreibungsmoment

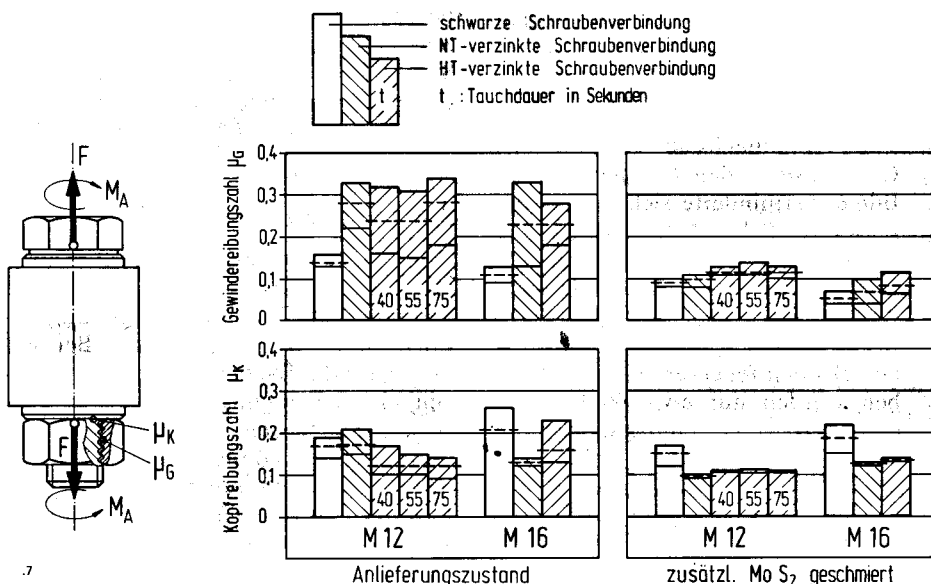


Bild 7. Ergebnisse der Anziehversuche an HV-Schraubenverbindungen M12 und M16-10.9 (Mittelwert und überlagertes Streuband aus mindestens zehn Versuchen).

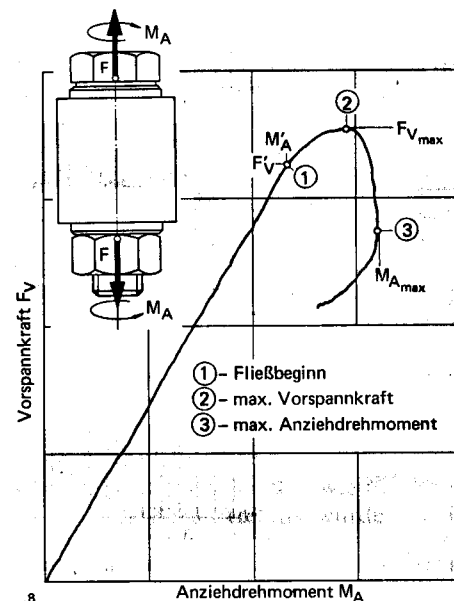


Bild 8.  $F_V$ - $M_A$ -Verlauf beim Abwürgen einer HV-Schraubenverbindung (schematisch).

$M_K$  getrennt in Abhängigkeit von der Vorspannkraft  $F_V$  zu messen.

Mit den aus dem Schrifttum [14] bekannten Rechenbeziehungen zwischen den Drehmomenten und der Vorspannkraft ließen sich hieraus die Reibungszahlen im Gewinde ( $\mu_G$ ) und in der Auflagefläche der Mutter ( $\mu_K$ ) bestimmen.

Bild 7 zeigt die Ergebnisse der Auswertung, die jeweils bei einer Gesamtbeanspruchung der Schraube von 90% der genormten 0,2-%-Dehngrenze  $R_{p0,2}$  vorgenommen wurde:

- Bei den Schraubenverbindungen im Anlieferungszustand sind die Gewindefreibungszahlen  $\mu_G$  bei den feuerverzinkten Ausführungen zum Teil erheblich größer als bei den schwarzen Schraubenverbindungen und unterliegen größeren Streuungen. Geringfügig kleinere Reibungszahlen gegenüber den schwarzen Ausführungen ergeben sich bei den feuerverzinkten Teilen dagegen in der Mutterauflagefläche (Kopfreibungszahl  $\mu_K$ ). Hier liegen die Streuungen in der gleichen Größenordnung wie bei den schwarzen Schrauben.
- Die zusätzliche Schmierung der Verbindungen mit MoS<sub>2</sub> verbessert das Reibverhalten vor allem der feuerverzinkten Teile entscheidend. Die Reibungszahlen werden kleiner, und die Streubandbreite verringert sich. Im geschmierten Zustand besteht hinsichtlich des Reibverhaltens in der Mehrzahl der Fälle kaum noch ein nennenswerter Unterschied zwischen den verschiedenen Oberflächenausführungen der untersuchten Schraubenverbindungen.

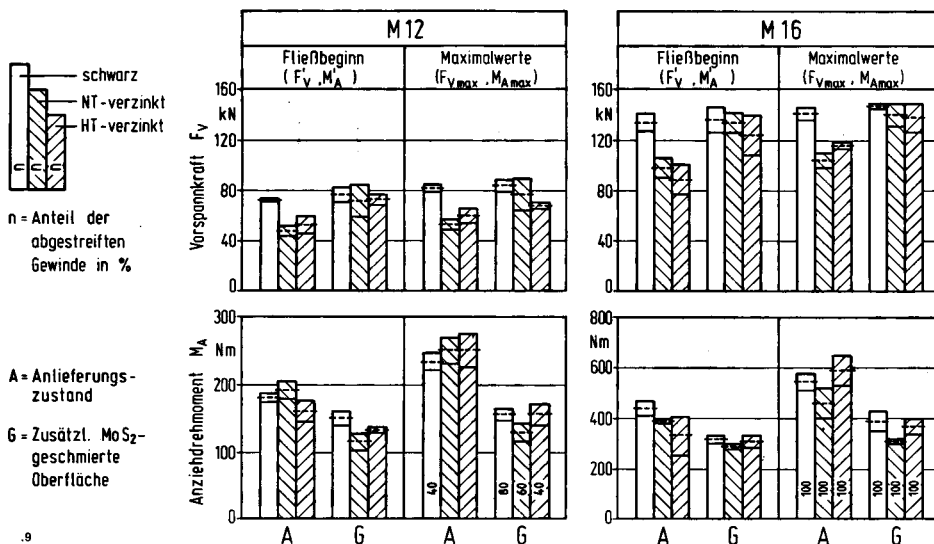


Bild 9. Ergebnisse der Abwürgversuche an HV-Schraubenverbindungen M12 und M16-10.9 (Mittelwert und Standardabweichung aus jeweils zehn Versuchen).

- Die Tauchdauer und damit die Überzugsdicke hat auf das Anziehverhalten der Schraubenverbindungen keinen signifikanten Einfluß. Dies trifft sowohl für die Verbindungen im Anlieferungs-zustand als auch für die zusätzlich geschmierten Verbindungen zu (M12, HT-verzinkt).

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die unterschiedlichen Schraubenverbindungen bis zum Bruch angezogen (Grenzbeanspruchung). Hier sollte in Abhängigkeit vom Oberflächenzustand festgestellt werden, mit welchem Schadensereignis im Überlastungsfall zu rechnen ist (Bruch im freien belasteten Gewinde oder Abstreifen des einge-

schraubten Gewindes) und welche Vorspannkkräfte bzw. Anziehdrehmomente dabei jeweils erreicht werden können. Bild 8 zeigt ein typisches  $F_V$ - $M_A$ -Diagramm.

In Bild 9 ist das Ergebnis der durchgeführten Anzieh- beziehungsweise Abwürgversuche zusammengestellt. Die hier angegebenen Maximalwerte sind jeweils die größten beim Anziehversuch aufgetretenen Vorspannkkräfte  $F_{Vmax}$  beziehungsweise Anziehdrehmomente  $M_{Amax}$ .

Der Fließbeginn stellt einen Grenzwert im  $F_V$ - $M_A$ -Diagramm dar, bei dem die Kurve den linearen Verlauf verläßt und aufgrund einsetzender plastischer Verformungen abknickt, Bild 8. Der Ort des höchsten Anziehdrehmoments ist, wie der Kurvenverlauf zeigt, nicht identisch mit dem Ort der höchsten Vorspannung. Aus den Versuchsergebnissen ergeben sich folgende Sachverhalte:

- Verbindungen im Anlieferungs-zustand (Kennbuchstabe A in Bild 9): Gegenüber den Zugversuchen, Bild 6, verminderte sich die bei den schwarzen Schrauben ermittelte maximale Zugkraft um etwa 7 bis 14%. Dabei trat das Versagen wie beim Zugversuch überwiegend durch Bruch im freien belasteten Gewinde auf. Bei den feuerverzinkten Schrauben wurden nur etwa 60 bis 70% (NT-verzinkt) beziehungsweise 67 bis 72% (HT-verzinkt) der im Zugversuch ermittelten maximalen Kräfte erreicht. Hier versagten die Schrauben ausschließlich durch Bruch im freien belasteten Gewinde, während es beim Zugversuch überwiegend zum Gewindeabstreifen kam. Dies

traf sowohl für die Schraubenverbindung mit NT- als auch mit HT-verzinkter Oberflächenausführung zu.

- Verbindungen mit zusätzlicher  $MoS_2$ -Schmierung (Kennbuchstabe G in Bild 9):

Mit den zusätzlich geschmierten Schraubenverbindungen konnten deutlich höhere Vorspannkkräfte mit wesentlich kleineren Anziehdrehmomenten erzielt werden. Die Vorspannkkräfte lagen bei den Schrauben in schwarzer Oberflächenausführung um etwa 5 bis 10% und bei denen in feuerverzinkter Ausführung um etwa 10 bis 15% unter den maximalen, im Zugversuch, Bild 6, erreichten Werten. Das Versagen der schwarzen Schraubenverbindungen erfolgte im Gegensatz zum Zugversuch überwiegend durch Abstreifen des Gewindes.

Bei den feuerverzinkten Ausführungen der Abmessung M12 trat wie im Zugversuch das Versagen sowohl durch Bruch des Bolzens im freien belasteten Gewinde als auch durch Abstreifen der ineinandergreifenden Gewindegänge ein. Die Schraubenverbindungen der Abmessung M16 versagten ausschließlich durch Gewindeabstreifen.

- Ein qualitativer Vergleich der im Anziehversuch ermittelten Ergebnisse für die unterschiedlichen Schraubenausführungen ergibt hinsichtlich der Werte  $F_V$  beziehungsweise  $M_A$  bei Fließbeginn, Bild 8, und der jeweils erreichten Maximalwerte  $F_{Vmax}$  beziehungsweise  $M_{Amax}$  in nahezu allen Fällen dasselbe Bild.

Das Abwürgverhalten der verschiedenen Schraubenverbindungen ( $F_V$ - $M_A$ - $\varphi$ -Beziehung) wurde im Hinblick auf die besonderen Montagebedingungen des Stahlbaus an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität (TH) Karlsruhe untersucht. Hier liegt inzwischen das Versuchsergebnis vor [15].

### 3.4 Langzeitverspannversuche

Mit Hilfe von Langzeitverspannversuchen wurde untersucht, inwieweit die Schrauben allein durch das fertigungsbedingte Wasserstoffangebot (zum Beispiel aus der Oberflächenvorbereitung, Beizen) eine Schädigung in Form einer wasserstoffinduzierten verzögerten Rißbildung erleiden können. Hierzu wurden jeweils zehn Schrauben von jeder Art messung und Oberflächenausführung in Verspannhülsen auf 70% der 0,2-% Dehngrenze vorgespannt.

Während des Versuchs wurde die Vorspannkraft über Dehnungsmeßstreife

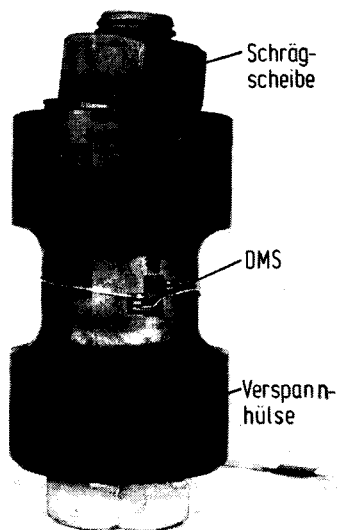


Bild 10. Verspanneinheit mit 5°-Schrägscheibe in der Mutterauflagefläche zur Durchführung der Langzeitverspannversuche.



kontrolliert, die auf den Hülzen angebracht waren. Die Prüfdauer betrug mindestens 200 h. Die Verspannungsversuche mit planparallelen Einspannbedingungen wurden ergänzt durch Versuche, bei denen unter der Mutterauflagefläche eine Schrägscheibe mit 5° Neigungswinkel angeordnet wurde. In der Schraube lag somit ein besonders kritischer Spannungszustand vor, der auf der Biegezugseite zu deutlichen Plastifizierungen führte. Diese Bereiche stellen einen Ort erhöhter Anfälligkeit gegenüber wasserstoffinduzierter Rißbildung dar [16].

Bild 10 zeigt eine verspannte Schraubenverbindung M30, bei der die Durchbiegung des Bolzens infolge mütterseitig mitverspannter Schrägscheibe deutlich erkennbar ist. Verzögerte Sprödbrüche, die auf eine Werkstoffschädigung durch Wasserstoff hindeuten, wurden bei keinem der Versuche beobachtet.

### 3.5 Dauerschwingversuche

In Anlehnung an DIN ISO 3800 Teil 1 wurden an den schwarzen und feuerverzinkten Schrauben im MoS<sub>2</sub>-geschmierten Oberflächenzustand Dauerschwingversuche bis zu einer Grenzlasterzahl von  $N_G = 5 \cdot 10^6$  durchgeführt. Die Vorspannkraft betrug dabei für alle untersuchten Varianten einheitlich 70% des genormten Mindestwertes der Kraft an der 0,2%-Dehngrenze bei der Festigkeitsklasse 10.9, bezogen auf den Nennspannungsquerschnitt  $A_s$  nach DIN 13 Teil 28. Die Dauerschwingversuche an den Schraubenverbindungen wurden statistisch nach dem Treppenstufenverfahren durchgeführt und ausgewertet. Für die Bestimmung der Dauerhaltbarkeit kamen jeweils mindestens 20 Proben zum Einsatz.

Die in Bild 11 dargestellten Ergebnisse der Dauerschwingversuche zeigen die für 10, 50 und 90% Bruchwahrscheinlichkeit ertragenen Schwingkräfte  $F_A$  sowie die auf den jeweiligen Nennkerndurchschnitt bezogenen Spannungen  $\sigma_A$ :

- Die Dauerhaltbarkeit  $\sigma_{A50}$  der feuerverzinkten Schrauben ist eindeutig niedriger als die der schwarzen Schrauben. Sie fällt bei den Abmessungen M12 und M30 in HT- und NT-verzinkter Oberflächenausführung um jeweils etwa den gleichen Betrag ab (80% beziehungsweise 18%). Bei den M16-Schrauben beträgt der Unterschied 19% (NT-) beziehungsweise 3% (HT-verzinkt).
- Die Streubreite zwischen den  $\sigma_{A10}$ - und  $\sigma_{A90}$ -Werten ist bei den feuerverzinkten Schrauben zum Teil erheblich kleiner als bei den unverzinkten.

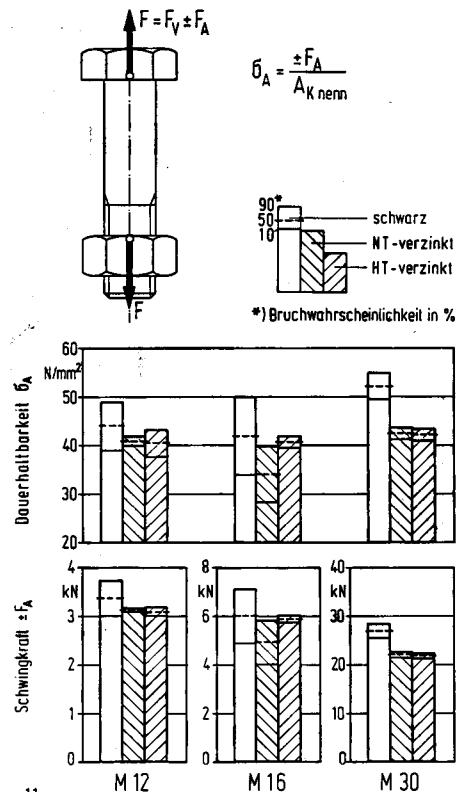


Bild 11. Ergebnisse der Dauerschwingversuche an HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 bei 10, 50 und 90% Bruchwahrscheinlichkeit.

Dies trifft insbesondere auf die Abmessung M12 und auf die HT-verzinkten Schrauben M16 zu.

Die Dauerhaltbarkeitswerte  $\sigma_{A10}$  liegen hier für die feuerverzinkten Schrauben auf dem gleichen Niveau wie die der jeweiligen schwarzen Ausführung (M12, HT-verzinkt) beziehungsweise sogar darüber (M12, NT- und M16, HT-verzinkt).

- Die erzielten Ergebnisse stimmen mit denen vergleichbarer früherer Untersuchungen weitestgehend überein [10 bis 12].

Bei der metallographischen Untersuchung zeigten die HT- im Gegensatz zu den NT-Zinküberzügen eine deutlich stärkere Rißbildung, wobei die Risse überwiegend bis auf den Grundwerkstoff reichten, Bild 3. Dies gab Anlaß zu ergänzenden Untersuchungen, in denen folgende Fragen geklärt werden sollten:

- Schreiten schon vorhandene Risse in einer feuerverzinkten Schraubenverbindung beim Aufbringen der Vorspannung bis ins Grundmaterial fort?
- Kann eine solche Rißbildung bis hinein ins Grundmaterial die Dauerhaltbarkeit beeinträchtigen?
- Besteht ein Zusammenhang zwischen dem Ort des Anrisses im Dauerschwingversuch und bereits vorhandenen Rissen im Zinküberzug?

Für die Untersuchungen wurden NT- und HT-verzinkte Schrauben der Abmessung M12 verwendet, die mit 70% beziehungsweise 80% der 0,2%-Dehngrenzkraft vorgespannt wurden. Ein Teil der Schrauben wurde zusätzlich im Zeitfestigkeitsgebiet bis zum Bruch schwingbeansprucht.

Nach den Versuchen wurde im Rasterelektronenmikroskop eine Überprüfung aller Proben auf Risse im Zinküberzug beziehungsweise im Grundmetall vorgenommen. Zum Erkennen einer Grundwerkstoffschädigung mußte zuvor der Zinküberzug abgebeizt werden. Die Lage eventuell vorhandener Risse in bezug zur Restbruchfläche sowie die Häufigkeit des Rißauftretens wurden registriert. Das Ergebnis der Untersuchung kann wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die rein statische Beanspruchung (Vorspannung) führte bei NT- und HT-verzinkten Proben weder im Zinküberzug noch im Grundmaterial zu einer zusätzlichen Rißbildung.
- Die im Zeitfestigkeitsgebiet bis zum Bruch geprüften Schrauben zeigten sowohl im Zinküberzug als auch im Grundmaterial Risse, die sich jedoch überwiegend auf der dem Anriß gegenüberliegenden Seite im Bereich des Restbruchs befanden. Die Häufigkeit der Risse nahm dabei in axialer und radialer Entfernung vom Restgewaltbruch deutlich ab. Die Ursache für diese Rißbildung läßt deshalb auf einen direkten Zusammenhang mit dem Ablauf des Restgewaltbruchs schließen.
- Die Rißhäufigkeit und die Rißausdehnung ist bei den HT-verzinkten Schrauben größer als bei den NT-verzinkten Schrauben. Dies bewirkt jedoch keine Verschlechterung der Dauerhaltbarkeit im Vergleich zur NT-verzinkten Ausführung, wie die Ergebnisse der entsprechenden Dauerschwingversuche, Bild 11, zeigen.

### 3.6 Vorspannkraftabfall unter Schwingbeanspruchung

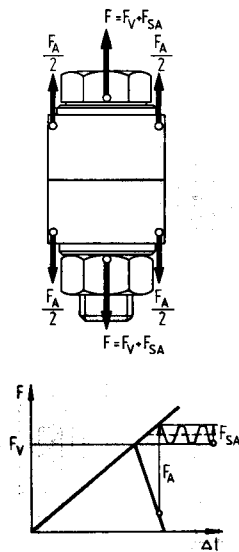
In Schraubenverbindungen können aufgrund hoher Flächenpressungen in den Auflageflächen von Schraubenkopf und Mutter sowie im Gewinde plastische Verformungen auftreten, die zum Abfall der Vorspannkraft in der Verbindung führen. Dieser Effekt ist unter dem Begriff des Setzens bekannt. Durch Setzmessungen an schwarzen, NT- und HT-verzinkten HV-Schrauben sollte geklärt werden, wie sich die Verzinkungsart, die Mikrogeometrie der Trennfugen (Unterlegscheiben) sowie die Größe der an-

fänglichen Vorspannkraft auf den Vorspannkraftabfall in einer Schraubenverbindung unter Schwingbeanspruchung auswirken.

Die Untersuchungen zum Einfluß der Verzinkung wurden an Schrauben der Abmessung M12 und M16 durchgeführt. Die Schrauben wurden hierbei im zusätzlichen MoS<sub>2</sub>-geschmierten Zustand mit den entsprechenden Scheiben nach DIN 6916 unter Schraubenkopf und Mutter in einer Meßhülse durch Anziehen der Mutter vorgespannt. Die Vorspannkraft betrug bei den Schwingversuchen 70% der 0,2-%-Dehngrenzkraft. Über die Meßhülse wurde unter Berücksichtigung ihrer Nachgiebigkeit eine Schwingkraft in die Schraubenverbindung eingeleitet. Diese war so gewählt, daß die daraus resultierende Beanspruchung jeweils unter der Dauerhaltbarkeit der feuerverzinkten 10.9-Schrauben lag, um Dauerbrüche der Schrauben in der Meßdose zu vermeiden. Der Abfall der Vorspannkraft infolge der Schwingbeanspruchung konnte über die Meßhülse bestimmt werden.

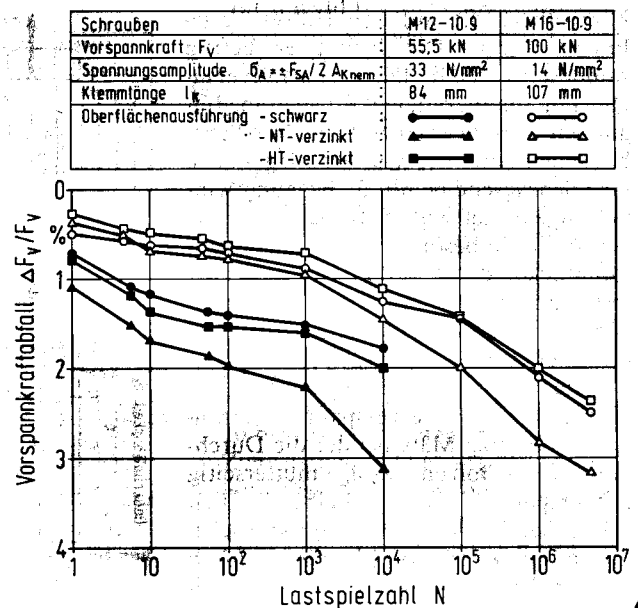
Das Ergebnis der Versuche ist in Bild 12 exemplarisch für die Abmessung M16 dargestellt. Jeder Kurvenpunkt entspricht bis zur Lastspielzahl  $N = 10^4$ , dem Mittelwert aus acht Versuchen, bis  $N = 10^6$  dem aus fünf und darüber dem aus drei Versuchen:

- Während des ersten Lastwechsels fällt die Vorspannkraft um den relativ größten Betrag ab (etwa 0,3 bis 0,5% der Anfangsvorspannkraft). Ein gravierender Einfluß der Oberflächenausführung ist nicht zu erkennen. Während der folgenden  $5 \cdot 10^6$  Lastwechsel steigt der Vorspannkraftabfall auf etwa 2,5% bei den schwarzen und HT-verzinkten Schraubenverbindungen an und erreicht bei den NT-verzinkten im Mittel etwa 3,2%. Die maximalen Vorspannkraftverluste aus den Einzelversuchen liegen nach  $5 \cdot 10^6$  Lastwechseln in keinem Fall über 4% der Anfangsvorspannung.
- Bei den ergänzenden Versuchen mit Schrauben der Abmessung M12 führte eine deutliche Erhöhung der Schwingbeanspruchung auf  $\sigma_a = 33 \text{ N/mm}^2$  (gegenüber  $\sigma_a = 14 \text{ N/mm}^2$  bei M16) während des ersten Lastwechsels zu einem Vorspannkraftverlust von etwa 1% und nach  $N = 10^4$  von etwa 2 bis 3%. Die in diesem Fall etwa doppelt so große Schwingbeanspruchung verursacht somit auch einen etwa doppelt so großen Vorspannkraftverlust.
- Eine Verringerung der Vorspann-



12

Bild 12. Vorspannkraftabfall von HV-Schraubenverbindungen M12 und M16-10.9 unter Schwingbeanspruchung.



kraft bei den Schrauben der Abmessung M16 von  $F_V = 100 \text{ kN}$  auf  $F_V = 64 \text{ kN}$  zeigte, daß der relative Vorspannkraftverlust etwa um den Faktor ansteigt, um den die Anfangsvorspannkraft erniedrigt wurde. Für  $F_V = 64 \text{ kN}$  (100 kN) ergab sich nach  $10^4$  Lastwechseln ein maximaler Vorspannkraftabfall von 2,5% (1,5%).

- Die Versuche mit und ohne Verwendung von Scheiben nach DIN 6916 unter Schraubenkopf und Mutter zeigen bei den schwarzen, NT- und HT-verzinkten Schrauben hinsichtlich des Vorspannkraftverlustes keine gravierenden Unterschiede.

#### Schrifttum

- [1] Böttcher, H.-J.: Feuerverzinkung — ein wirtschaftlicher Korrosionsschutz für Eisen- und Stahlerzeugnisse. Blech Rohre Profile Bd. 20 (1973) Nr. 2, S. 53/57.
- [2] Oeteren, K. A. von: Korrosionsschutz im Industrie-Montagebau. VDI-Z Bd. 125 (1983), Nr. 12, S. 495/99.
- [3] Sandelin, R. W.: Galvanizing characteristics of different types of steel. Wire and Wire Products Bd. 15 (1940) Nr. 11, S. 655/76 (Teil I), Nr. 12, S. 721/49 (Teil II) u. Bd. 16 (1941) Nr. 1, S. 28/35 (Teil III).
- [4] Horstmann, D.: Das Feuerverzinken siliciumhaltiger Stähle. Schrift III des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., S. 9/33, Düsseldorf 1974.
- [5] Nilmen, F.: Über das Feuerverzinkungsverhalten siliciumhaltiger Stähle bei Zinkbadtemperaturen unter 460 °C und bei Vorwärmung des Verzinkungsgutes. Metall Bd. 35 (1981) Nr. 9, S. 857/64.
- [6] Harper, S., u. R. S. Brown: The range of alternative practices in galvanizing steels containing silicon with some developments in high temperature galvanizing. Proceedings 11th International Galvanizing conference, Madrid 1976, S. 11/17. Hrsg. Zinc Development Association, London 1978.
- [7] Heubner, U., u. F. Nilmen: Die Feuerverzinkung siliciumhaltiger Stähle — Problem und Lösungsmöglichkeiten. Werkstoffe u. Korrosion Bd. 30 (1979) Nr. 3, S. 169/79.
- [8] Harper, S., u. R. S. Brown: High temperature galvanizing of silicon-killed steels. Proceedings, 12th International Galvanizing Conference, Paris 1979, S. 175/80. Hrsg. Zinc Development Association, London 1981.
- [9] Wiegand, H., u. K. H. Kloos: Werkstoff- und Korrosionsverhalten verzinkter Feinbleche unter besonderer Berücksichtigung der Erzeugungs- und Weiterverarbeitungsverfahren. Bänder Bleche Rohre Bd. 9 (1968) Nr. 5, S. 291/98 u. Nr. 6, S. 321/26.
- [10] Wiegand, H., u. P. Strigens: Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben. Ind.-Anz. Bd. 94 (1972) S. 247/52.
- [11] Wiegand, H., u. W. Thomala: Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben. Drahtwelt Bd. 59 (1973) Nr. 12, S. 542/51.
- [12] Kloos, K. H., u. W. Schneider: Untersuchungen zur Anwendbarkeit feuerverzinkter Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9. VDI-Z. Bd. 125 (1983) Nr. 19, S. 101/11.
- [13] Pfaff, H.: Die Ermittlung des optimalen Anzugsmomentes für Schraubenverbindungen an Elektroarmaturen mit einer neuen Versuchseinrichtung. Draht (1975) Nr. 10, S. 467/74.
- [14] VDI 2230: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen. Berlin und Köln: Beuth-Verlag GmbH.
- [15] Valinat, G.: Anziehverhalten hochtemperaturverzinkter hochfester Stahlbauschrauben. Technische Rdsch. Bd. 77 (1985) Nr. 4, S. 36/40.
- [16] Kloos, K. H., R. Landgrebe u. H. Speckhardt: Untersuchungen zur wasserstoffinduzierten Ribbildung bei hochfesten Schrauben aus Vergütungsstählen. VDI-Z Bd. 127 (1985) Nr. 19, S. 92/102.

A 30 668