

K. H. Kloos und W. Schneider

## **Hochtemperaturverzinkung von 12.9-Schrauben**

„Math.-wiss. u. Werkstofftech.“ 21 (1990) 8, S. 295–304

Bericht Nr. 114  
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.

# Hochtemperaturverzinkung von 12.9-Schrauben

K. H. Kloos und W. Schneider

## 1 Einleitung

Die Feuerverzinkung hat sich bei Konstruktionsteilen unter Atmosphäreinfluß als wirkungsvoller und kostengünstiger Korrosionsschutz bewährt [1]. Dies gilt auch für verzinkte Schrauben und Muttern, obwohl es bei diesen Teilen hinsichtlich der Maßhaltigkeit (Gewindetoleranzen) nach der Oberflächenbehandlung immer wieder zu Schwierigkeiten kam. Denn beim herkömmlichen Verzinken – Normaltemperaturverzinkung (NT-Verzinkung) mit Zinkbadtemperaturen von 450 bis 470 °C – entstehen Eisen-Zink-Legierungsschichten, deren Dicke von der chemischen Zusammensetzung, insbesondere vom Si-Gehalt des zu verzinkenden Stahls, abhängt [2–4] (Abb. 1). Dadurch kann die Paßfähigkeit von Schraube und Mutter beeinträchtigt werden. Dies ist im Hinblick auf das bei der Stahlherstellung überwiegend eingesetzte 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 Zinkschichtdicken hat sich die sogenannte Hochtemperaturverzinkung (HT-Verzinkung) mit Zinkbadtemperaturen von  $\vartheta = 530$  bis 560 °C erwiesen [5–7]. Durch die niedrige 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.

Derartige Überzüge sind unter atmosphärischen Bedingungen korrosionsbeständiger als Reinzinkschichten [8]. Bei entsprechenden Überzugsdicken dürften daher hochtemperaturverzinkte Teile hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens den normaltemperaturverzinkten Teilen überlegen

sein. Die Haftfestigkeit der erzeugten Überzüge ist von gleicher Güte.

Die Hochtemperaturverzinkung hat sich bereits bei HV-Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 10.9 in der Praxis bewährt. Inwieweit diese Verzinkungsart auch bei 12.9-Schrauben vorgenommen werden kann, bei denen die Anlaßtemperatur beim Vergüten unterhalb der des Hochtemperaturverzinkungsbades liegt, sollten die folgenden Untersuchungen zeigen.

## 2 Versuchsprogramm und Versuchsmaterial

In Anlehnung an frühere Arbeiten [9, 11–13] wurden bei den Untersuchungen HV-Schrauben DIN 6914-M12 × 100 und M16 × 120 in der Festigkeitsklasse 12.9 aus dem

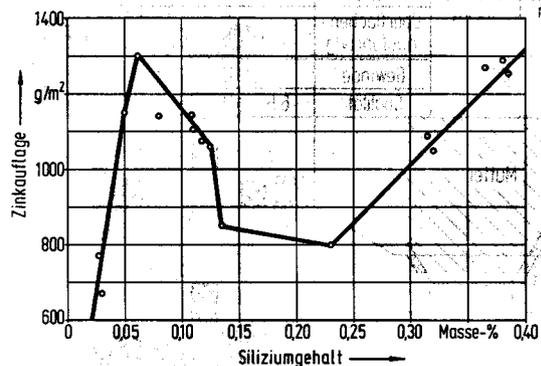


Abb. 1. Einfluß des Siliziumgehaltes (Grundmetall) auf die Zinkauflage und damit die Überzugsdicke [2] (700 g/m<sup>2</sup> = 100 µm)

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung der untersuchten Bolzenwerkstoffe

Prüfteil	Werkstoff (Werkst.-Nr.)			Chemische Zusammensetzung in Gewichts-%									
				C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
Schraube M12 × 100-12.9	41 Cr 4 (1.7035)	Richtanalyse*	min	0,38	0,15	0,50	–	–	0,90	–	–	–	–
			max	0,45	0,40	0,80	0,035	0,035	1,20	–	–	–	–
			Ist-Wert	0,46	0,20	0,63	0,014	0,010	1,16	0,02	0,09	0,13	0,018
Schraube M16 × 120-12.9	41 Cr 4 (1.7035)	Richtanalyse	min	0,38	0,15	0,50	–	–	0,90	–	–	–	–
			max	0,45	0,40	0,80	0,035	0,035	1,20	–	–	–	–
			Ist-Wert	0,47	0,18	0,73	0,017	0,006	1,07	0,01	0,06	0,06	0,026
Schraube M30 × 160-12.9	42 CrMo 4 (1.7225)	Richtanalyse	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	0,40	0,30	0,74	0,017	0,028	1,12	0,22	0,028	0,014	0,025
	34 CrNiMo 6 (1.6582)	Richtanalyse	min	0,30	0,15	0,40	–	–	1,40	0,15	1,40	–	–
			max	0,38	0,40	0,70	0,035	0,035	1,70	0,30	1,70	–	–
			Ist-Wert	0,29	0,30	0,58	0,022	0,023	1,46	0,21	1,47	0,24	0,024

\* Nach 17 200

Vergütungsstahl 41 Cr 4 sowie HV-Schrauben DIN 6914-M30 × 160-12.9 aus dem in dieser Abmessung üblichen Stahl 42CrMo4 und dem etwas höher legierten Stahl 34CrNiMo 6 in vergütungsschwarzer, normaltemperatur- und hochtemperaturverzinkter Ausführung eingesetzt.

Die Muttern nach DIN 6915 der Festigkeitsklasse 12 sowie Unterlegscheiben nach DIN 6916 waren aus C 45 bzw. C 35 hergestellt.

Tabelle 1 zeigt das Ergebnis der chemischen Analyse der verwendeten Bolzenwerkstoffe.

Die Teile wurden jeweils aus einem Drahting gefertigt und in einer Charge wärmebehandelt. Die Arbeitsgänge

bei der Normal- und Hochtemperaturverzinkung waren bis auf die Tauchdauer bei den M30-Schrauben und die Zinkbadtemperaturen identisch [14]:

- NT-Verzinkung bei  $\vartheta \approx 470^\circ\text{C}$  sowie
- HT-Verzinkung bei  $\vartheta \approx 540^\circ\text{C}$

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

Die verwendeten Schrauben, Muttern und Scheiben wurden als Garnituren geliefert und wie in der Praxis üblich hergestellt, d. h. die Gewinde wurden bei der Gewindefertigung einheitlich mit Gewindemaßen nach DIN 13 Teil 20,

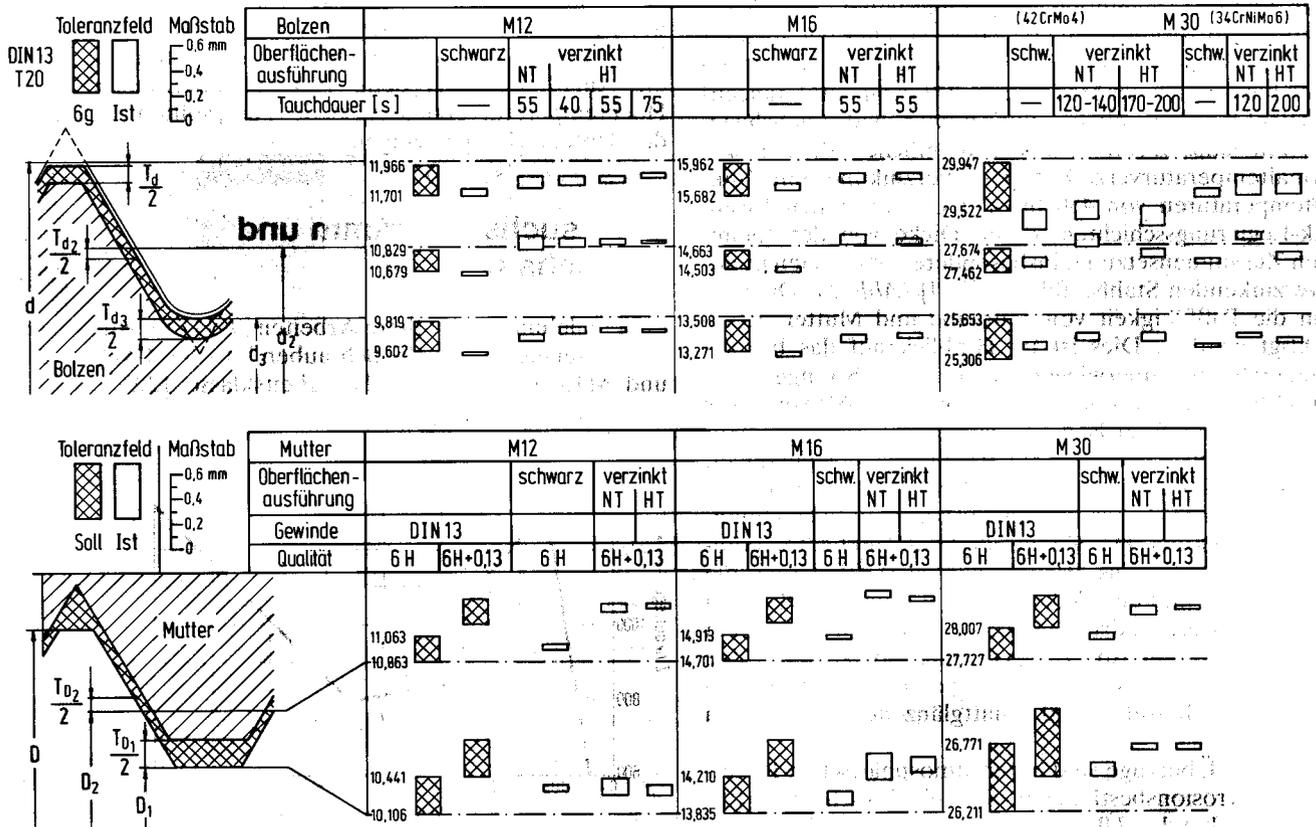


Abb. 2. Gewindemaße der untersuchten Schrauben und Muttern (Streubreite aus jeweils 20 Messungen)

Tabelle 2. Überzugsdicke der untersuchten feuerverzinkten Schrauben (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils 10 geprüften Teilen)

Schraube	Werkstoff	Verzinkungsart	Tauchdauer	Überzugsdicke $\pm S^1)$ in $\mu\text{m}$			
				am Schaft	am Gewinde- außendurch- messer d	am Gewinde- flankendurch- messer $d_2$	am Gewinde- kerndurch- messer $d_3$
M12	41 Cr 4	NT	55	$76 \pm 18$	$65 \pm 13$	$73 \pm 26$	$73 \pm 14$
		HT	40	$86 \pm 8$	$72 \pm 14$	$75 \pm 18$	$90 \pm 9$
		NT	55	$83 \pm 16$	$70 \pm 6$	$73 \pm 13$	$86 \pm 8$
		HT	75	$90 \pm 10$	$75 \pm 11$	$73 \pm 7$	$83 \pm 7$
M16	41 Cr 4	NT	55	$76 \pm 21$	$68 \pm 10$	$78 \pm 20$	$69 \pm 10$
		HT	55	$79 \pm 8$	$75 \pm 7$	$71 \pm 12$	$75 \pm 6$
M30	42 CrMo 4	NT	etwa 130	$75 \pm 16$	$70 \pm 14$	$71 \pm 27$	$46 \pm 11$
		HT	etwa 190	$80 \pm 14$	$38 \pm 25$	$44 \pm 13$	$56 \pm 20$
	34 CrNiMo 6	NT	etwa 130	$75 \pm 17$	$70 \pm 13$	$76 \pm 17$	$65 \pm 7$
		HT	etwa 200	$47 \pm 11$	$38 \pm 7$	$32 \pm 9$	$35 \pm 8$

1) S: Standardabweichung

Toleranzfeld 6 g für die Schraubenbolzen bzw. 6 H für die Muttern, hergestellt. Bei den feuerverzinkten Teilen (NT- und HT-verzinkt) wurde zur Gewährleistung der Aufschraubbarkeit ein Übermaß von einheitlich  $A_0 = 300 \mu\text{m}$  in das Muttergewinde gelegt.

Das Schneiden des Muttergewindes erfolgte nach der jeweiligen Feuerverzinkung. Um bei den Bolzengewinden eine möglichst geringe Maßstreuung zu erzeugen, wurden die Schraubenrohlinge vor dem Gewindewalzen auf Walzdurchmesser geschliffen. Abb. 2 zeigt die tatsächlich vorliegenden Gewindemaße im Vergleich zu den Werten nach DIN 13 Teil 20. Die Überzugsdicken der untersuchten Schrauben in Tabelle 2 ergaben sich aus der Messung der Teile vor und nach dem Abbeizen des Zinküberzugs in inhibierter Salzsäure. Sie stimmen mit den an Axialschliffen der entsprechenden Proben ermittelten Schichtdicken überein.

Den Ergebnissen kann folgendes entnommen werden:

- Bei den Schrauben der Abmessung M12 und M16 sind an nahezu allen Meßstellen die Überzugsdicken der HT-verzinkten Teile größer als die der NT-verzinkten. Bei den Schrauben M30 lagen keine konstanten Tauchdauern vor, so daß hier ein Vergleich wenig aussagefähig ist.
- Die Streuung der Überzugsdicken ist im allgemeinen bei der NT-Verzinkung größer als bei der HT-Verzinkung. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von [9].

- Die Tauchdauer wirkt sich hier kaum auf die Überzugsdicke aus.

Den Aufbau der bei verschiedenen Temperaturen hergestellten Zinkschichten zeigt Abb. 3 beispielhaft anhand der Schrauben M16. Folgendes ist festzustellen:

- Der HT-Zinküberzug ist wesentlich gleichmäßiger ausgebildet als der NT-Überzug.
- Beide Zinküberzüge weisen zahlreiche Risse auf, die zum Teil bis zum Grundmetall reichen.
- Die HT-Überzüge bestehen im wesentlichen aus einer kompakten  $\delta_1$ -Schicht.

### 3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

#### 3.1 Kerbschlagbiegeversuche

Zur Ermittlung der Kerbschlagzähigkeit wurden den Schrauben M16 und M30 ISO-Rundkerbproben aus dem Schaftbereich entnommen.

Ein Teil der Kerbschlagproben wurde unter den gleichen Verzinkungsbedingungen wie die Schrauben verzinkt (NT und HT). Die Kerbschlagbiegeversuche wurden nach DIN 50 115 bei 20°C (Raumtemperatur) und bei -60°C

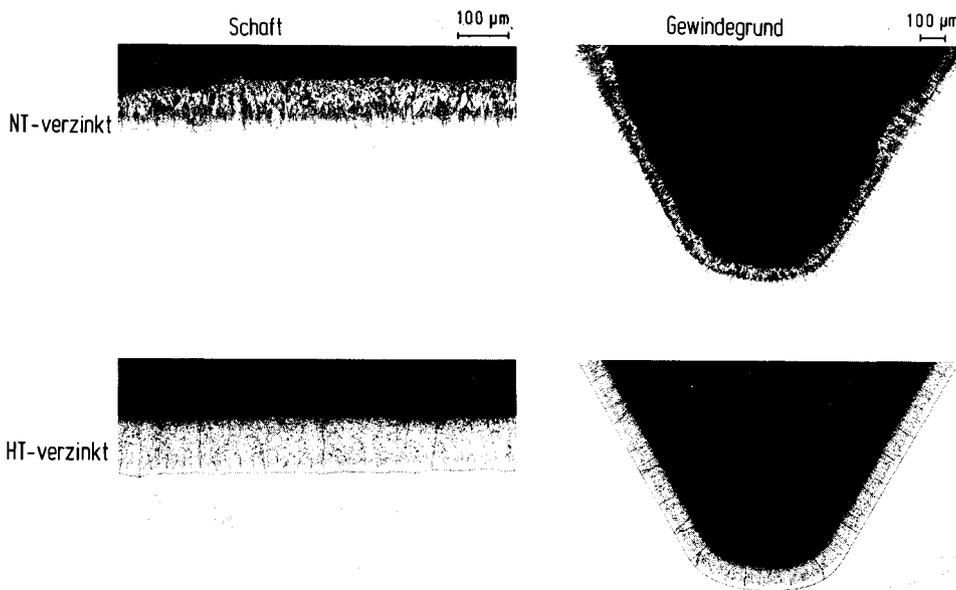


Abb. 3. Zinkschicht am Schaft und im Gewinde von NT- und HT-verzinkten HV-Schrauben DIN 6914-M16  $\times$  120-12.9.

Tabelle 3. Ergebnis der Kerbschlagbiegeversuche an ISO Rundkerbproben aus HV-Schrauben M16  $\times$  120 - 12.9 und M30  $\times$  160-12.9 (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils 10 Versuchen)

Oberflächen- ausführung	Kerbschlagarbeit $A_V \pm S^1$ ) in Joule					
	Schraube M16 (41 Cr 4)		Schraube M30 (42 Cr Mo 4)		Schraube M30 (34 Cr Ni Mo 6)	
	20°C	-60°C	20°C	-60°C	20°C	-60°C
unverzinkt (blank)	27,5 $\pm$ 1,5	18,1 $\pm$ 1,2	22,2 $\pm$ 1,0	14,4 $\pm$ 1,9	15,6 $\pm$ 0,7	11,3 $\pm$ 2,3
NT-verzinkt	29,5 $\pm$ 1,5	19,1 $\pm$ 1,2	23,3 $\pm$ 1,3	16,3 $\pm$ 1,5	16,0 $\pm$ 0,7	10,0 $\pm$ 2,5
HT-verzinkt	32,3 $\pm$ 2,0	19,7 $\pm$ 1,4	24,5 $\pm$ 1,1	16,8 $\pm$ 0,9	20,0 $\pm$ 2,2	14,2 $\pm$ 0,9

<sup>1)</sup> S: Standardabweichung

durchgeführt. *Tabelle 3* enthält die Ergebnisse der Versuche:

- Die Kerbschlagarbeit der untersuchten Proben wird sowohl bei Raumtemperatur als auch bei  $-60^{\circ}\text{C}$  insbesondere durch die Hochtemperaturverzinkung erhöht. Hier dürfte sich ein zusätzlicher Anlaßeffect infolge der hohen Zinkbadtemperatur auf das Ergebnis auswirken (siehe auch Kap. 3.2).
- Die bei Raumtemperatur ermittelten Kerbschlagarbeiten von den Schrauben M30 aus dem Werkstoff 42CrMo 4 liegen deutlich höher als die von den Schrauben aus dem höher legierten Stahl 34CrNiMo 6. Alle Proben erfüllen den von DIN ISO 898 Teil 1 geforderten Wert von 15 Joule.
- Bei  $-60^{\circ}\text{C}$  ist die Kerbschlagarbeit aller untersuchten Proben deutlich geringer als bei Raumtemperatur.

### 3.2 Zugversuche

Die zu untersuchenden Schrauben unterschiedlicher Abmessung, Werkstoffe und Oberflächenausführungen wurden im Zugversuch nach DIN ISO 898 Teil 1 geprüft. Dabei stand die Ermittlung des Einflusses vom Hochtemperaturverzinkungsbad auf die Schrauben im Vordergrund.

#### Zugversuch an abgedrehten Schrauben

Mit diesen Versuchen sollten die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften der verwendeten Schraubenwerkstoffe

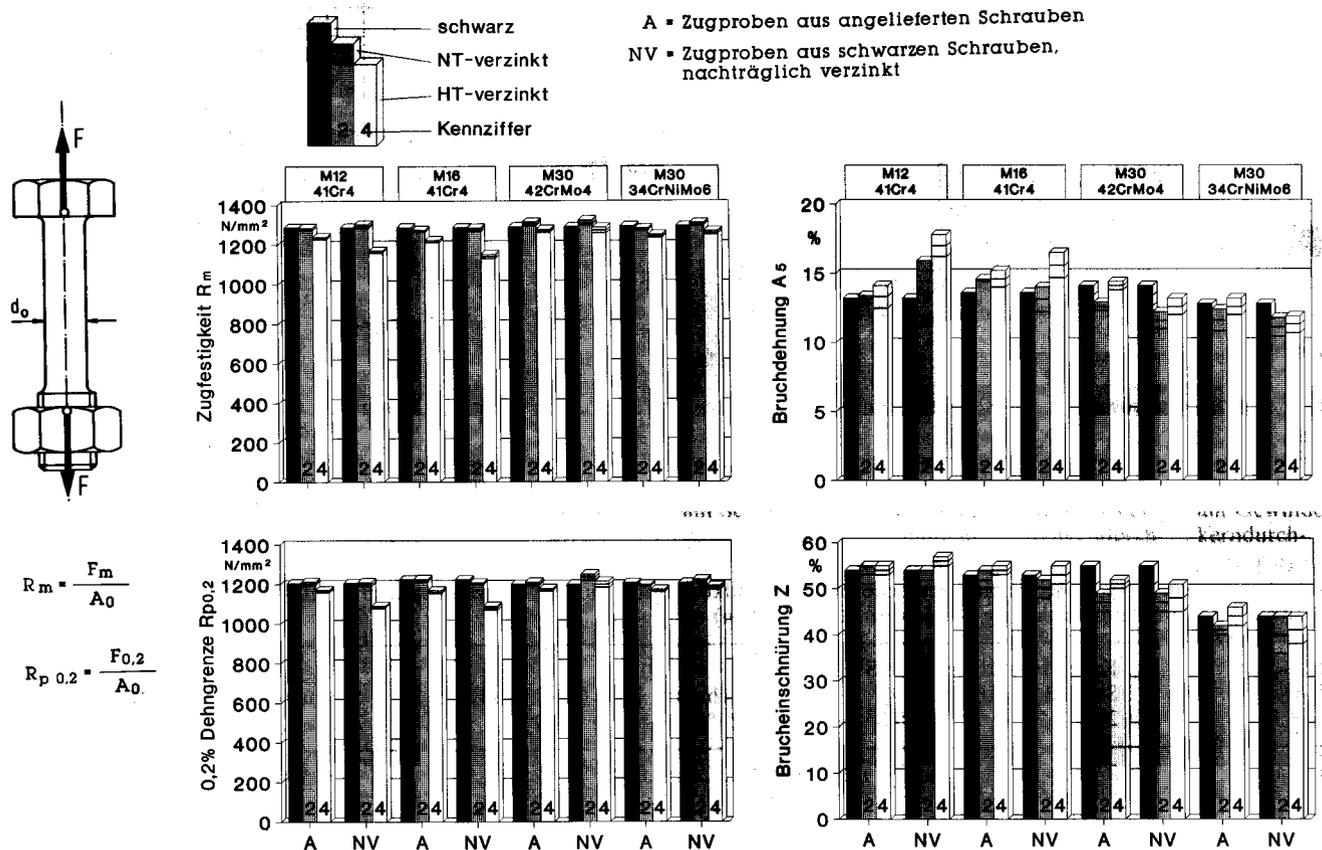
ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in *Abb. 4* zusammengefaßt.

- Die Zugfestigkeitswerte der Proben aus den schwarzen Schrauben zeigen, daß die Schrauben verschiedener Abmessungen nahezu in der gleichen Vergütungsfestigkeit (unteres Drittel des Festigkeitsbereichs von 12.9-Schrauben) vor der Oberflächenbehandlung vorlagen.
- Die Festigkeit wird infolge der NT-Verzinkung nicht signifikant verändert. Durch die HT-Verzinkung tritt dagegen eine zum Teil erhebliche Verminderung ein. Dies trifft insbesondere auf die nachträglich verzinkten Schrauben der Abmessung M12 und M16 zu. Hier war bei der Verzinkung wegen nicht ausreichender Überzugsdicken ein zweimaliges Tauchen erforderlich.
- Bei den Zähigkeitskennwerten (Bruchdehnung  $A_5$  und Brucheinschnürung  $Z$ ) verhält es sich umgekehrt. Während sich bei den NT-verzinkten Teilen die Zähigkeit teilweise sogar vermindert (Schrauben der Abmessung M30) führt die HT-Verzinkung fast durchweg zu einer Erhöhung.

Die Verminderung der Festigkeit und Erhöhung der Zähigkeit ist auf einen zusätzlichen Anlaßeffect bei der hohen Zinkbadtemperatur zurückzuführen. Sie lag mit etwa  $540^{\circ}\text{C}$  deutlich über den Anlaßtemperaturen für die verschiedenen Schrauben bzw. Schraubenwerkstoffe.

- M12 und M16 (41 Cr 4)  $\vartheta_A = 465^{\circ}\text{C}$
- M30 (42 CrMo 4)  $\vartheta_A = 500^{\circ}\text{C}$
- M 30 (34 CrNiMo 6)  $\vartheta_A = 490^{\circ}\text{C}$

Die Verminderung der Festigkeit hat zur Folge, daß die Schrauben nur noch Festigkeiten im Bereich - bei den



**Abb. 4.** Ergebnis der Zugversuche an abgedrehten Schrauben (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils fünf geprüften Teilen).

nachträglich verzinkten Schrauben M12 und M16 sogar darunter (siehe oben) – der geforderten Mindestwerte nach DIN ISO 898 Teil 1 ( $R_{\min} = 1220 \text{ N/mm}^2$ ) aufweisen.

Für die Herstellung von HT-verzinkten 12.9-Schrauben sollten daher die Teile auf Festigkeiten von mindestens  $1300 \text{ N/mm}^2$  vergütet werden, damit sie nach der Oberflächenbehandlung noch die von der Norm geforderten Mindestwerte erfüllen.

### Zugversuche an ganzen Schrauben

Die Versuche dienten der Ermittlung der Festigkeit des freien belasteten Gewindes. Zur Bewertung des Zinkschichteinflusses wurden zusätzlich feuerverzinkte Schrauben abgebeizt und geprüft. Um in allen Fällen einen Bruch im freien belasteten Gewinde sicherzustellen, wurden bei den Versuchen zwei Muttern auf das Bolzengewinde aufgeschraubt. Die Anzahl der Gewindegänge vom Gewindeauslauf bis zur Mutterauflagefläche wurde für jede Abmessung wegen des Übergangseffektes [15, 16] jeweils konstant gehalten. Auf die Prüfung der M30-Schrauben wurde verzichtet, da hier nur vier freie belastete Gewindegänge vorlagen.

Bei der Bestimmung der Festigkeitskennwerte wurden die im Versuch ermittelten Kräfte auf den jeweiligen effektiven Spannungsquerschnitt  $A_{\text{seff}}$  bezogen, wobei bei den feuerverzinkten Schrauben die Zinkschichtdicke mit berücksichtigt wurde.

Der Ergebnisdarstellung in Abb. 5 können folgende Sachverhalte entnommen werden:

- Die Tragfähigkeit der Schrauben in vergütungsschwarzer und NT-verzinkter Oberflächenausführung ist gleich.
- Infolge der HT-Verzinkung findet nur eine geringfügige Festigkeitsverminderung (etwa 3%) statt.
- Die Tragfähigkeit der feuerverzinkten Teile (NT- und HT-Verzinkung) im freien belasteten Gewinde entspricht jeweils der der abgebeizten, d. h. die Zinkschicht nimmt nicht an der Kraftübertragung teil.

Für die Festigkeitsbestimmung ist es daher nicht sinnvoll, die im Zugversuch ermittelten Kräfte auf die effektiven Querschnitte der verzinkten Schrauben zu beziehen. In diesem Fall werden zu geringe Festigkeitswerte berechnet. Die Abweichung entspricht dem Querschnittsunterschied.

### Zugversuche an Schrauben-Muttern-Verbindungen

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 Gewindegängen vorlag.

Bei den erzielten Ergebnissen (Abb. 6) war die Art des Schadensereignisses von Bedeutung (Bruch im freien belasteten Gewinde oder Abstreifen der ineinandergreifenden Gewindegänge):

- Die Tragfähigkeit der Schrauben in vergütungsschwarzer Ausführung wird überwiegend durch die Haltbarkeit des freien belasteten Gewindes bestimmt.

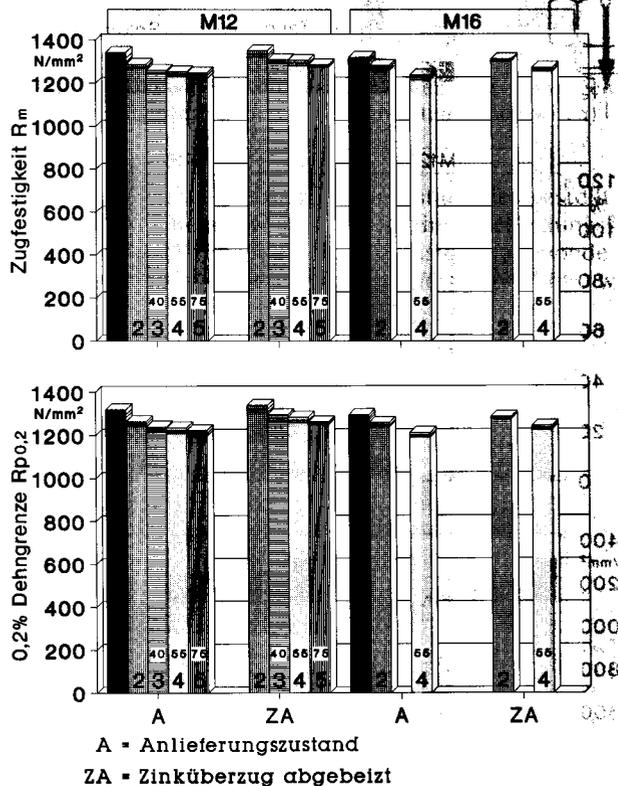
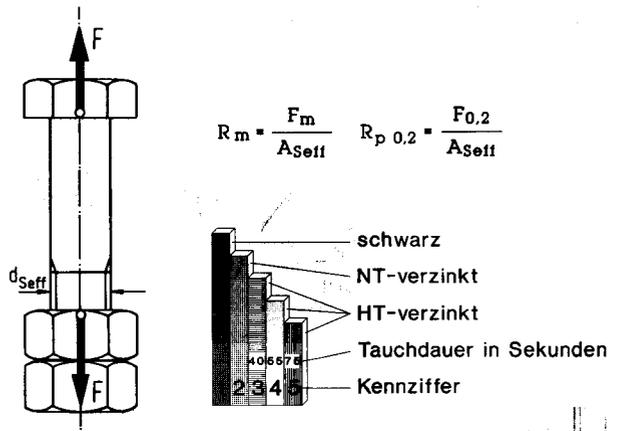


Abb. 5. Ergebnis der Zugversuche an ganzen Schrauben (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils zehn geprüften Teilen)

- Die Tragfähigkeit sowohl der NT- als auch der HT-verzinkten Schraubenverbindungen ist dagegen in den meisten Fällen durch die Abstreiffestigkeit gegeben.
- Von den Verbindungen in schwarzer Ausführung werden die größten, von den HT-verzinkten die niedrigsten Kräfte übertragen. Die geringere Tragfähigkeit der HT-verzinkten Schrauben dürfte auf den oben beschriebenen Anlaßeffekt zurückzuführen sein. Die von DIN ISO 898 Teil 1 geforderten Mindestbruchkräfte werden von den vergütungsschwarzen Schrauben erfüllt. Die verzinkten Ausführungen erreichen dagegen nicht in allen Fällen die Mindestbruchkräfte, wie sie nach den Berechnungen von DIN 267 Teil 10 [17] für die Festigkeitsklasse 12.9 zu fordern wären (DIN 267 Teil 10 macht keine Angaben über Schrauben und Muttern der Festigkeitsklasse 12.9 bzw. 12).

- Bei der Mehrzahl der feuerverzinkten Verbindungen wird die Tragfähigkeit durch das Abbeizen des Zinküberzugs vermindert. Da hier fast ausschließlich Versagen durch Gewindeabstreifen auftritt (Abb. 6), ist dieses

Verhalten eindeutig auf die geringere Flankenüberdeckung zurückzuführen.

### 3.3 Anziehversuche

Der Anziehversuch wird zur Ermittlung des Anziehverhaltens und zur Bestimmung der Grenzbeanspruchbarkeit der Schraubenverbindungen bei der Montage durchgeführt. Er ist von Bedeutung, da er im Vergleich zum Zugversuch mehr der tatsächlichen Beanspruchung der Schraube bei der Montage entspricht. Beim Aufbringen der Vorspannung durch Drehen der Mutter überlagern sich im Schraubenbolzen Zug- und Torsionsspannungen, so daß im Anziehversuch geringere maximale Zugspannungen erreicht werden als im Zugversuch.

Die Anziehversuche wurden an einer Torsionsprüfmaschine mit schwarzen, NT- und HT-verzinkten M16 Garnituren durchgeführt.

Dabei wurden die Muttern mit einer konstanten Drehgeschwindigkeit von 1 U/min angezogen. Bei jedem Anziehversuch wurden jeweils neue Teile verwendet. Die Prüfungen erfolgten sowohl mit Garnituren im Anlieferungszustand als auch im zusätzlich geschmierten Oberflächenzustand. Geschmiert wurde im Gewinde und in der Auflagefläche mit einem bei HV-Schrauben üblichen Schmierstoff auf MoS<sub>2</sub>-Basis.

Das Reibverhalten der unterschiedlichen Verbindungen wurde mit einem hierfür geeigneten Prüfgerät ermittelt [18]. Abb. 7 zeigt das Ergebnis der Auswertung, die jeweils bei einer Gesamtbeanspruchung der Schraube von 90% der

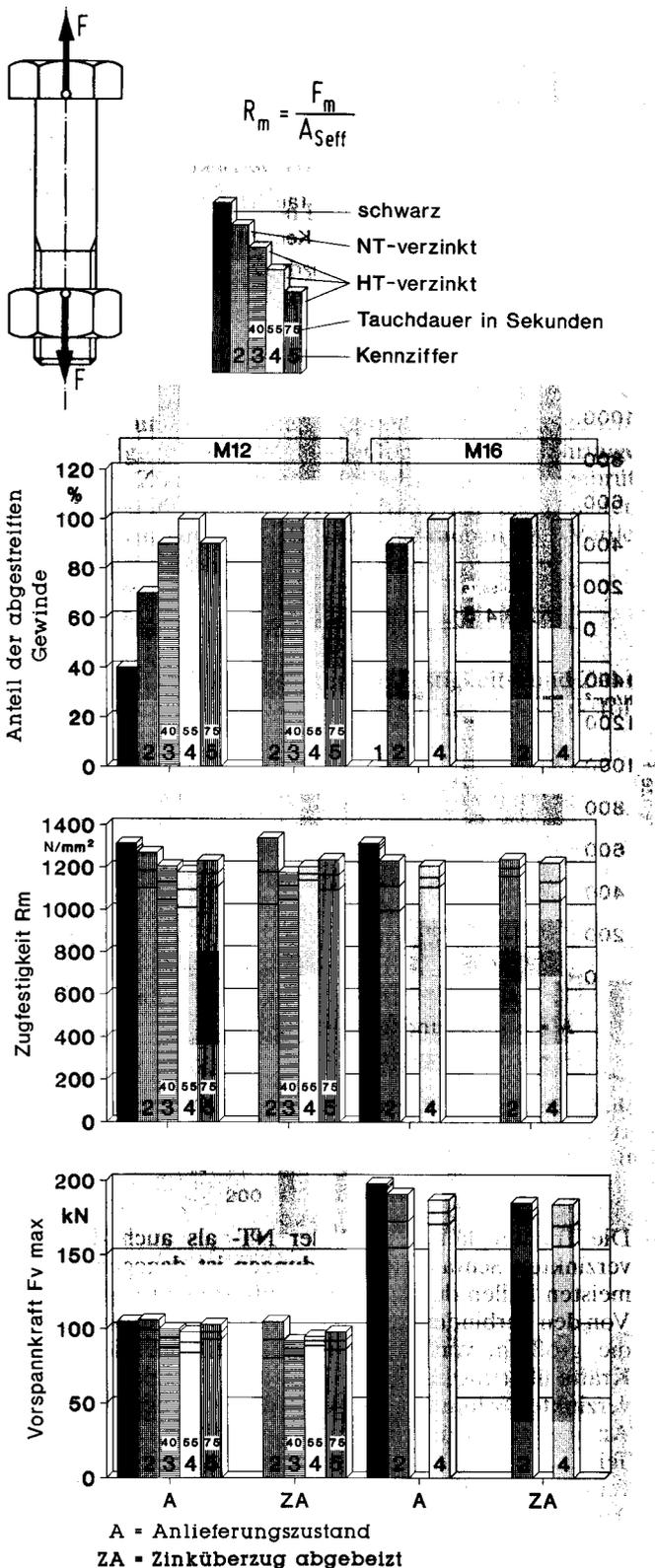


Abb. 6. Ergebnis der Zugversuche an HV-Schraubenverbindungen 12.9 (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils zehn geprüften Verbindungen).

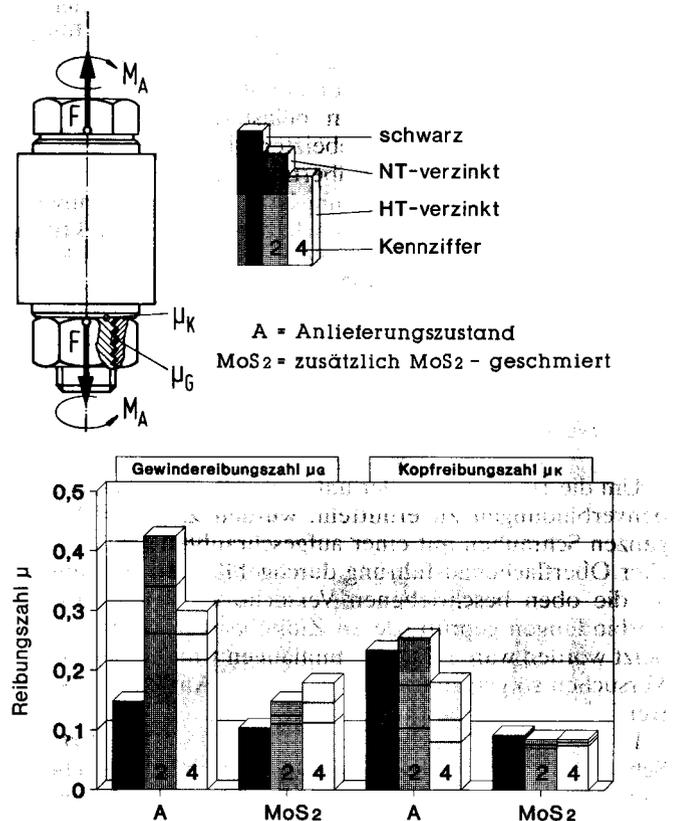


Abb. 7. Ergebnis der Anziehversuche an Schraubenverbindungen der Abmessung M16 (Mittelwert und überlagertes Streuband von jeweils zehn Versuchen).

genormten 0,2%-Dehngrenze  $R_{p0,2}$  vorgenommen wurde:

- Bei den Schraubenverbindungen im Anlieferungszustand sind die Gewindereibungszahlen  $\mu_G$  bei den feuerverzinkten Ausführungen (NT und HT) erheblich größer als bei den schwarzen Ausführungen und unterliegen größeren Streuungen. In der Auflagefläche sind dagegen die Reibungszahlen ( $\mu_K$ ) bei den verschiedenen Oberflächenausführungen in der gleichen Größenordnung. Die Streubreiten sind hier etwas größer als bei den Gewindereibungszahlen.
- Die zusätzliche Schmierung der Verbindungen mit  $MoS_2$  verbessert das Reibverhalten vor allem der feuerverzinkten Teile entscheidend. Die Reibungszahlen werden kleiner, und die Streubandbreite verringert sich. Während im Gewinde nach wie vor für die Schraubenverbindungen in schwarzer Oberflächenausführung die kleinsten Reibungszahlen ermittelt werden, liegen in der Mutterauflagefläche Reibungszahlen  $\mu_K$  von der gleichen Größenordnung für alle untersuchten Oberflächenausführungen vor.

Die erzielten Ergebnisse bestätigen frühere Untersuchungen, z. B. [9].

In einer weiteren Versuchsreihe wurden zur Bestimmung der Beanspruchungsgrenzen bei der Montage die Schraubenverbindungen bis zum Bruch angezogen. Hier sollte in

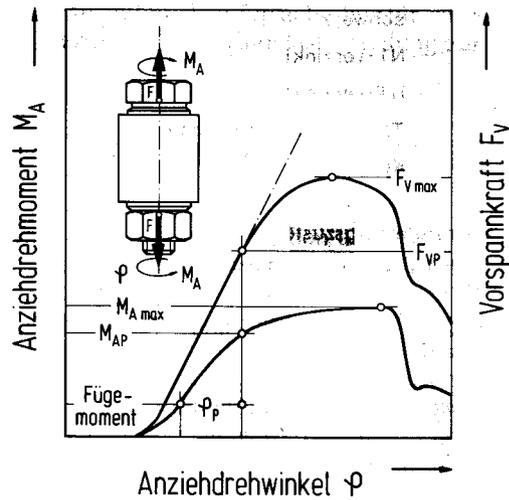
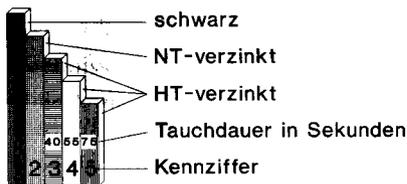


Abb. 8.  $M_A$ - $F_V$ - $\phi$ -Kurven beim Anziehen bzw. Abwürgen einer HV-Schraubenverbindung mit Kennwerten (schematisch)

Abhängigkeit vom Oberflächenzustand festgestellt werden, mit welchem Schadensereignis im Überlastungsfall zu rechnen ist (Bruch im freien belasteten Gewinde oder Abstreifen des eingeschraubten Gewindes) und welche



A = Anlieferungszustand

$MoS_2$  = zusätzlich  $MoS_2$  - geschmiert

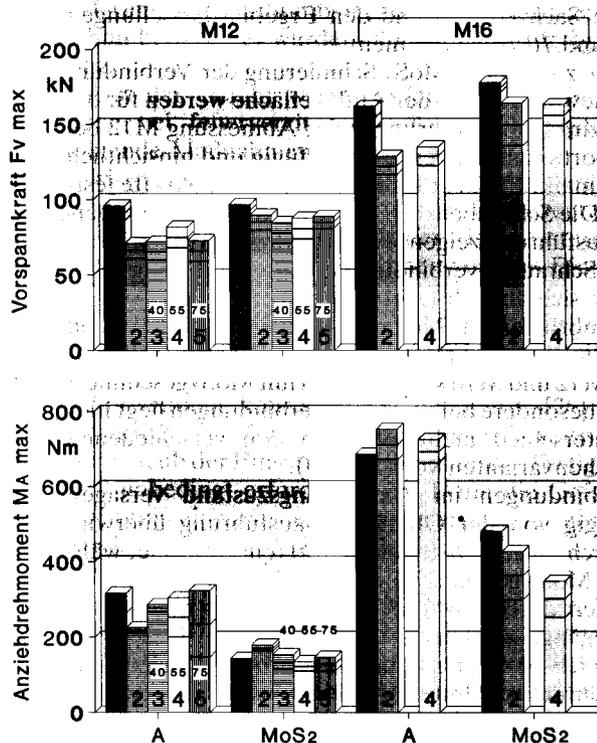
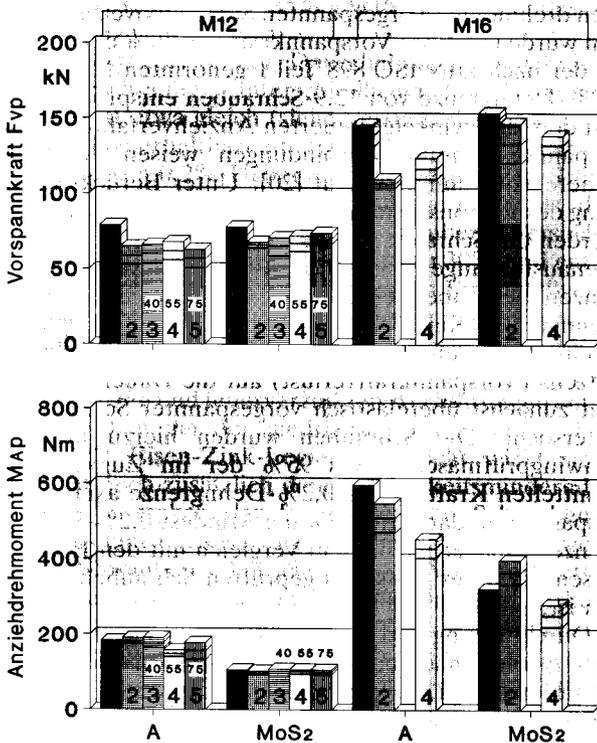
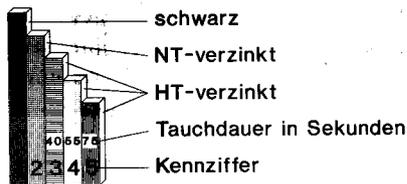


Abb. 9. Ergebnis der Abwürgversuche an HV-Schraubenverbindungen M12 und M16-12.9 (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils zehn Versuchen).



A = Anlieferungszustand  
 MoS<sub>2</sub> = zusätzlich MoS<sub>2</sub> - geschmiert

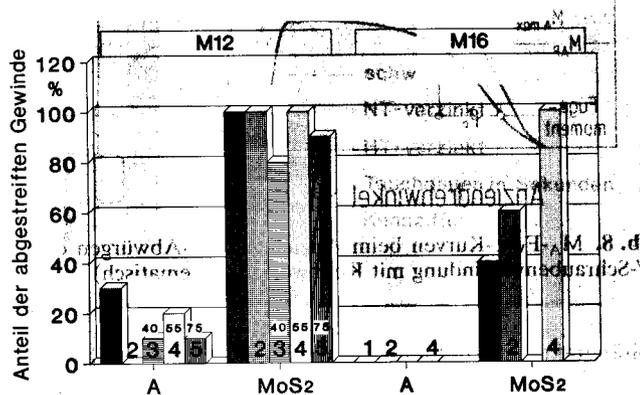


Abb. 10. Anteil der abgestreiften Gewinde beim Abwürgerversuch

Vorspannkraft und Anziehdrehmomente dabei jeweils erreicht werden können.

Abb. 8 zeigt ein typisches  $M_A$ - $F_V$ - $\varphi$ -Diagramm mit den für die Auswertung maßgeblichen Größen. Die mit dem Index „P“ gekennzeichneten Meßgrößen markieren das Ende des proportionalen (linearen) Bereichs zwischen Belastung und Drehwinkel.

Folgende Sachverhalte sind den Ergebnisdarstellungen in Abb. 9 und 10 zu entnehmen:

- Durch die zusätzliche MoS<sub>2</sub>-Schmierung der Verbindungen im Gewinde und in der Auflagefläche werden für die feuerverzinkten Ausführungen der Abmessung M12 bei der Proportionalitätsgrenze geringfügig und hinsichtlich der Maximalkräfte deutlich größere Vorspannkraft festgestellt. Die Schraubenverbindungen in schwarzer Oberflächenausführung zeigen jeweils etwa die gleichen Kräfte. Die Schraubenverbindungen der Abmessung M16 verhalten sich ähnlich (Abb. 9).
- Die aufzubringenden Momente werden sowohl bei den schwarzen als auch feuerverzinkten Schraubenverbindungen M12 und M16 kleiner, wenn mit MoS<sub>2</sub> geschmiert wird. Insbesondere bei den M12-Verbindungen liegt hier kein Unterschied mehr zwischen den verschiedenen Oberflächenvarianten vor (Abb. 9).
- Die Verbindungen im Anlieferungszustand versagen unabhängig von der Oberflächenausführung überwiegend durch Bruch im freien belasteten Gewinde, während die MoS<sub>2</sub>-geschmierten Verbindungen in den meisten Fällen durch Abstreifen der ineinandergreifenden Gewindegänge ausfallen (Abb. 10).

Im Vergleich zu den Ergebnissen von Kap. 3.2 „Zugversuche an Schrauben-Muttern-Verbindungen“ läßt sich folgendes feststellen:

- Die im Anziehversuch erreichbaren Maximalkräfte liegen bei den feuerverzinkten Ausführungen im Anlieferungszustand um etwa 30% unter denen beim Zugver-

such. Bei den schwarzen Schraubenverbindungen ist der Unterschied etwas geringer. Dies dürfte auf die wirkungsvolle Ölschmierung der schwarzen Schrauben im Anlieferungszustand zurückzuführen sein.

- Bei den MoS<sub>2</sub>-geschmierten Verbindungen ist der Unterschied der im Anzieh- und Zugversuch ermittelten Maximalkräfte insbesondere bei den feuerverzinkten Oberflächenausführungen deutlich kleiner.

Die Anzieh- bzw. Abwürgerversuche machen deutlich, daß nur im zusätzlich geschmierten Oberflächenzustand hohe Vorspannkraft bei feuerverzinkten Schrauben erzielbar sind. Im Anlieferungszustand treten dagegen Freierscheinungen im Gewinde und in der Mutterauflagefläche auf.

Die höchsten Vorspannkraft wurden stets bei den Schraubenverbindungen in schwarzer Oberflächenausführung erreicht. Der Unterschied zu den feuerverzinkten, geschmierten Verbindungen ist jedoch gering. Für die HT-verzinkten Schraubenverbindungen konnten keine Nachteile gegenüber den NT-verzinkten Ausführungen festgestellt werden.

Das Abwürgerverhalten der verschiedenen Schraubenverbindungen ( $F_V$ - $M_A$ - $\varphi$ -Beziehung) wurde im Hinblick auf die besonderen Montagebedingungen des Stahlbaus am Institut für Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg untersucht. Hier liegt inzwischen das Versuchsergebnis vor [19].

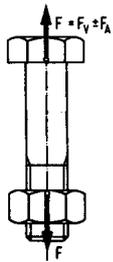
### 3.4 Dauerschwingversuche

Die Dauerschwingversuche wurden in Anlehnung an DIN ISO 3800 Teil 1 bis zu einer Grenzlastspielzahl von  $N_G = 5 \cdot 10^6$  durchgeführt. Um der Montagepraxis nach DIN 18800 gerecht zu werden, wurden zwei Mittelspannungsniveaus berücksichtigt.

- A) Den drehmomentvorgespannten Schraubenverbindungen wurde mit einer Vorspannkraft von 70% der Kraft an der nach DIN ISO 898 Teil 1 genormten Mindest-0,2%-Dehngrenze von 12.9-Schrauben entsprochen.
- B) Mit dem drehwinkelgesteuerten Anziehverfahren vorgespannte Schraubenverbindungen weisen deutlich höhere Vorspannkraft auf [20]. Unter Berücksichtigung des Torsionsspannungsanteils beim Anziehen [21] wurden die Schrauben in den verschiedenen Oberflächenvarianten bis 90% der im Zugversuch an ganzen Schrauben ermittelten Kraft an der 0,2%-Dehngrenze (Kap. 3.2) vorgespannt.
- C) In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluß des Setzens (Vorspannkraftverlust) auf die Dauerhaltbarkeit zunächst überelastisch vorgespannter Schrauben untersucht. Die Schrauben wurden hierzu in der Schwingprüfmaschine bis 95% der im Zugversuch ermittelten Kraft an der 0,2%-Dehngrenze axial vorgespannt und dann auf 70% der Mindest-0,2%-Dehngrenze entlastet, so daß ein Vergleich mit den Ergebnissen der unter Punkt A) geprüften Schrauben möglich ist.

Die Durchführung und Auswertung der Dauerschwingversuche erfolgte nach dem Treppenstufenverfahren. Für die Ermittlung der Dauerhaltbarkeit wurden für

- die Versuchsserie A jeweils 20 bis 30 Proben und
- die Versuchsserie B und C jeweils 12 bis 15 Proben (hier sollte nur der Medianwert  $\sigma_{A50}$  ermittelt werden) eingesetzt.



$$\sigma_A = \frac{\pm F_A}{A_{\text{Kern}}}$$

Vorspannkraft:

A:  $F_v = 0,7 \cdot F_{0,2 \text{ min}}$

B:  $F_v = 0,9 \cdot F_{0,2 \text{ eff}}$

C:  $F_v = 0,7 \cdot F_{0,2 \text{ min}}$  (vorgereckt)

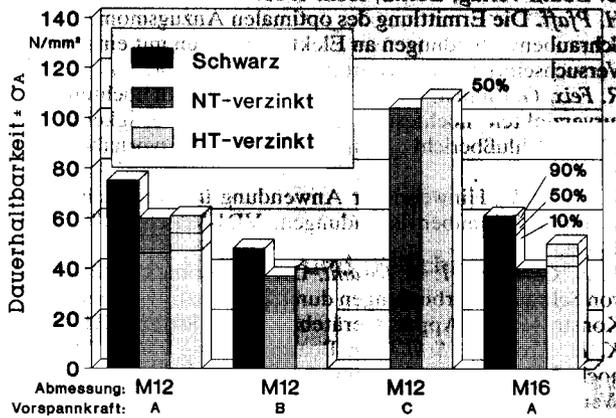


Abb. 11. Ergebnis der Dauerschwingversuche an HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9

Den Ergebnissen in Abb. 11 kann folgendes entnommen werden:

- Die Dauerhaltbarkeit der mit 70% der Kraft an der Mindest-0,2%-Dehngrenze vorgespannten feuerverzinkten Schrauben liegt bei den NT-Ausführungen um 20 (M12) bzw. 35% (M16) und bei den HT-Ausführungen um 18 (M12) bzw. 25% (M16) unterhalb des Wertes schwarzer Schrauben.
- Die Streubreite der Dauerhaltbarkeitsergebnisse von den Schrauben unterschiedlicher Oberflächenausführung ist etwa gleich (siehe Versuchsreihe A).
- Die Dauerhaltbarkeit der mit 90% der Kraft an der effektiven 0,2%-Dehngrenze vorgespannten Schrauben (Versuchsreihe B) ist deutlich geringer als die mit  $0,7 \cdot F_{0,2 \text{ min}}$  vorgespannten Schrauben (Versuchsreihe A). Die Abweichung beträgt bis zu 30% und entspricht den Ergebnissen von [22], wo auch für schlußvergütete Schrauben bei sehr hohen Vorspannkraften eine Dauerhaltbarkeitsminderung festgestellt wurde.

- Der Dauerhaltbarkeitsunterschied zwischen den schwarzen und feuerverzinkten Ausführungen entspricht etwa dem bei der niedrigen Vorspannkraft, d. h. die spröde Eisen-Zink-Legierungsschicht wirkt sich hier nicht noch zusätzlich dauerhaltbarkeitsmindernd aus.
- Das Vorrecken der feuerverzinkten Schrauben (Versuchsreihe C), das z. B. in der Praxis bei hochvorgespannten Schrauben mit anschließendem Vorspannkraftverlust vorliegen kann, hat eine enorme Dauerhaltbarkeitssteigerung zur Folge (etwa 100%).

Die Dauerhaltbarkeit der geprüften NT- und HT-verzinkten Schrauben war jeweils doppelt so hoch wie die der in Reihe A untersuchten Schrauben. Das Ergebnis stimmt mit den Untersuchungen von [20, 22, 24] überein, die bei schwarzen Schrauben durch Vorrecken eine ähnlich große Steigerungsrate bei der Dauerhaltbarkeit

feststellten. Die Ursache hierfür ist vor allem auf eine verbesserte Gewindelastverteilung zurückzuführen.

### 3.5 Langzeitverspannversuch

Mit Hilfe von Langzeitverspannversuchen wurde untersucht, inwieweit Schrauben allein durch das fertigungsbedingte Wasserstoffangebot (z. B. aus der Oberflächenvorbereitung, Beizen) eine Schädigung in Form einer wasserstoffinduzierten Ribbildung erleiden können. Hierzu wurden von jeder untersuchten Schraubenabmessung sowohl NT- als auch HT-verzinkte Ausführungen in Hülsen verspannt [9]. Um möglichst hohe Zugspannungen in den Schrauben zu erzeugen – die Gefahr für einen wasserstoffinduzierten verzögerten Sprödbbruch nimmt mit größer werdender Zugspannung bzw. Ausnutzungsgrad zu [25] – wurden die Verbindungselemente

- mit einer Schrägscheibe unter dem Schraubenkopf mit 5° Neigungswinkel versehen und
- überelastisch nach dem drehwinkelgesteuerten Anziehverfahren vorgespannt.

In den Schrauben lag somit ein besonders kritischer Spannungszustand vor, der auf der Biegezugseite zu deutlichen Plastifizierungen führte. Diese Bereiche stellen einen Ort erhöhter Anfälligkeit gegenüber wasserstoffinduzierter Ribbildung dar [25].

Die Vorspannkraft wurde beim Aufbringen und während des Verspannversuchs über Dehnmeßstreifen kontrolliert, die auf den Hülsen aufgebracht waren. Die Prüfdauer des Versuchs betrug jeweils 1000 h.

Verzögerte Sprödbüche, die auf eine Werkstoffschädigung durch Wasserstoff hindeuten, wurden bei keinem der Versuche beobachtet. Auch Anrisse, wie sie infolge Wärmeigenspannungen unter Mitwirkung von Wasserstoff bei HT-verzinkten Schrauben größerer Abmessung (> M30) schon beobachtet wurden, konnten nicht festgestellt werden.

Um der Gefahr wasserstoffinduzierter Sprödbuchbildung bei feuerverzinkten Teilen zu begegnen, sollten folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Möglichst kurze Beizdauer z. B. durch vorgeschaltetes mechanisches Reinigen und/oder Zwischentempnen.
- Einhaltung möglichst kleiner Temperaturdifferenzen z. B. durch höheres Vorwärmen vor dem Eintauchen ins Zinkbad.
- Wahl möglichst milder Abschreckbedingungen nach dem Verzinken (z. B. Abschreckmitteltemperatur 80–90 °C).
- Verwendung konzentrierter Beizsäuren [26].

Darüber hinaus sollte in jedem Fall kritisch geprüft werden, ob der Einsatz von Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 unbedingt erforderlich ist. Denn die Gefahr für das Auftreten eines wasserstoffinduzierten verzögerten Sprödbuchs nimmt mit höherer Festigkeit deutlich zu [27].

*Dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken (GAV) und der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) wird für die wirkungsvolle Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung beziehungsweise für die Finanzierung der Forschungsarbeit herzlich gedankt. Dank gilt auch den Firmen August Friedberg GmbH, Gelsenkirchen, und Peiner Umformtechnik GmbH, Peine, für die Bereitstellung des Versuchsmaterials sowie dem HAKU-*

## Literatur

1. H.-J. Bötcher, Feuerverzinkung – ein wirtschaftlicher Korrosionsschutz für Eisen- und Stahlerzeugnisse. *Bleche Rohre Profile Bd. 20* (1973) 53–57.
2. R. W. Sandelin, Galvanizing characteristics of different types of steel. *Wire and Wire Products Bd. 15* (1940) 655–676, 721–749 u. Bd. 16 (1941) 28–35.
3. D. Horstmann, Das Feuerverzinken siliciumhaltiger Stähle. *Schrift III des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.*, S. 9–33, Düsseldorf 1974.
4. F. Nilmen, Über das Feuerverzinkungsverhalten siliziumhaltiger Stähle bei Zinkbadtemperaturen unter 460°C und bei Vorwärmung des Verzinkungsgutes. *Metall Bd. 35* (1981) 857–864.
5. S. Harper, R. S. Browne, 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.
6. U. Heubner, F. Nilmen, Die Feuerverzinkung siliciumhaltiger Stähle – Problem und Lösungsmöglichkeiten. *Werkstoffe und Korrosion Bd. 30* (1979) 169–179.
7. S. Harper, R. S. Brown, High Temperature galvanizing on silicon-killed steels. *Proceedings, 12th International Galvanizing Conference, Paris 1979*, S. 175–180. Hrsg. Zinc Development Association, London 1981.
8. H. Wiegand, K. H. Kloos, Werkstoff- und Korrosionsverhalten verzinkter Feinbleche unter besonderer Berücksichtigung der Erzeugungs- und Weiterverarbeitungsverfahren. *Bänder Bleche Rohre 9* (1968) 291–298 und 321–326.
9. K. H. Kloos, R. Landgrebe, W. Schneider, Untersuchungen zur Anwendbarkeit hochtemperaturverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9. *VDI-Z. 128* (1986) S 98–S 108.
10. G. Valtinat, Anziehverhalten hochtemperaturverzinkter hochfester Stahlbauschrauben. *Technische Rdsch. 77* (1985) 36–40.
11. H. Wiegand, P. Strigens, Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben. *Ind. Anz. 43* (1972) 247–252.
12. H. Wiegand, W. Thomala, Zum Festigkeitsverhalten von feuerverzinkten HV-Schrauben. *Draht-Welt 79* (1972) 742–551.
13. K. H. Kloos, W. Schneider, Untersuchungen zur Anwendbarkeit feuerverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9. *VDI-Z. 125* (1983) S 101–S 111.
14. K. H. Kloos, B. Kaiser, W. Schneider, Hochtemperaturverzinkung von 12.9-Schrauben. *Schlußbericht zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 6503 I, Institut für Werkstoffkunde, TH Darmstadt 1989.*
15. R. Kellermann, H.-Ch. Klein, Untersuchungen über den Einfluß der Reibung auf Vorspannung und Anzugsmoment von Schraubenverbindungen. *Konstr. Masch. Appar. Gerätebau 7* (1955) 54–68.
16. W. Schneider, W. Thomala, Hinweise zur Anwendung des Spannungsquerschnitts von Schraubengewinden. *VDI-Z 126* (1984) S 84–S 91.
17. DIN 267 Teil 10, Ausgabe 01.88, Mechanische Verbindungselemente; Technische Lieferbedingungen; Feuerverzinkte Teile. Beuth Verlag, Berlin, Köln 1988.
18. H. Pfaff, Die Ermittlung des optimalen Anzugsmomentes für Schraubenverbindungen an Elektroamaturen mit einer neuen Versuchseinrichtung. *Draht 20* (1975) 467–474.
19. R. Feix, G. Valtinat, Abwürguntersuchungen an hochtemperaturverzinkten hochfesten Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9. *Schlußbericht zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 6503/II.*
20. W. Thomala, Hinweise zur Anwendung überelastisch vorgespannter Schraubenverbindungen. *VDI-Vericht 478* (1983) 43–53.
21. E. A. Cornelius, F. O. Kwami, Die Steigerung der Sicherheit von Schraubenverbindungen durch überelastisches Anziehen. *Konstr. Masch. Appar. Gerätebau 18* (1966) 117–124.
22. K. H. Kloos, W. Schneider, Beanspruchung und Haltbarkeit hochvorgespannter Schraubenverbindungen. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 19* (1988) 349–355.
23. K. H. Illgner, K. H. Beelich, Einfluß überlagerter Biegung auf die Haltbarkeit von Schraubenverbindungen. *Konstr. Masch. Appar. Gerätebau 18* (1966) 117–124.
24. K. H. Kloos, W. Schneider, Dauerhaltbarkeit hochvorgespannter Schraubenverbindungen. *VDI-Berichte 766* (1989) 95–116.
25. K. H. Kloos, R. Landgrebe, H. Speckhardt, Einfluß unterschiedlicher Wärmebehandlungsverfahren auf die wasserstoffinduzierte Sprödbildung bei Vergütungsstählen für die Schraubenfertigung. *Z. f. Werkstofftech. 18* (1987) 411–422.
26. D. Horstmann, Untersuchungen über die Wasserstoffversprödung an hochfesten feuerverzinkten Schrauben. *Vortrags- und Diskussionsveranstaltung des GAV, Stuttgart 1983*, S. 83–110. Hrsg. Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Düsseldorf, 1983.
27. K. H. Kloos, R. Landgrebe, H. Speckhardt, Untersuchungen zur wasserstoffinduzierten Rißbildung bei hochfesten Schrauben aus Vergütungsstählen. *VDI-Z 127* (1985) S 92–S 102.

Anschrift: Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Kloos, Institut für Werkstoffkunde der TH Darmstadt, Grafenstraße 2, 6100 Darmstadt, und Dipl.-Ing. Wilhelm Schneider, wissenschaftlicher Mitarbeiter des Deutschen Schraubenverbandes e.V., Düsseldorf, im selben Institut.

[T 417]