



Karl Heinz Kloos und Wilhelm Schneider

Untersuchungen zur Anwendbarkeit feuerverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9

Bericht Nr. 88
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.

Sonderdruck aus VDI-Z 125 (1983) Nr. 19 · Seite S 101 bis S 111

Untersuchungen zur Anwendbarkeit feuerverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9

Von Karl Heinz Kloos und Wilhelm Schneider, Darmstadt

Um den Einfluß der Feuerverzinkung auf die mechanischen Eigenschaften von HV-Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 12.9 beziehungsweise 12 zu erfassen, wurden entsprechende Versuche an unverzinkten und verzinkten Schraubenverbindungen der Abmessungen M16 und M30 durchgeführt. Der Einfluß des Grundwerkstoffs auf die Ausbildung der Eisen-Zink-Legierungsschicht wurde durch die Untersuchung von Schrauben aus mehreren praxisüblichen Vergütungsstählen mitberücksichtigt.

1 Einleitung

Im Stahlbau wurden in den letzten Jahren hochfeste Schrauben in der Festigkeitsklasse 10.9 (HV-Schrauben) sowohl in schwarzer als auch in feuerverzinkter Ausführung mit großem Erfolg eingesetzt. Vor dem Hintergrund der Rohstoff- und Energiesicherung gewinnen dabei insbesondere die feuerverzinkten HV-Schrauben in zunehmendem Maß an Bedeutung [1], da die im Schmelztauchverfahren aufgetragenen Zinkschichten in vielen Fällen für die gesamte Lebensdauer der Verbindungselemente einen ausreichenden Korrosionsschutz gewährleisten [1 bis 3].

Damit in Stahlkonstruktionen die auftretenden Betriebskräfte durch erhöhten Reibschluß beziehungsweise kombinierten Reibschluß und Lochleibung weiter gesteigert werden können, ist der Einsatz von HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 erwünscht. Die dadurch bei gleicher Tragfähigkeit möglichen kleineren Abmessungen vermindern das Gewicht der Gesamtkonstruktion erheblich, vor allem infolge kleinerer Anschlußmaße der verschraubten Teile. Bevor jedoch feuerverzinkte Schraubenverbindungen in der Festigkeitsklasse 12.9 Eingang in die entsprechenden Technischen Regelwerke finden können, ist der Nachweis einer unbedenklichen Verwendung zu erbringen. Hier müssen insbesondere

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 herzlichst gedankt. Dank gilt auch der Firma Peiner Maschinen- und Schraubenwerke AG, Peine, für die Bereitstellung des Schraubenmaterials und der Firma Wirtz & Co., Gelsenkirchen, für die Feuerverzinkung der Teile.

mögliche Beeinträchtigungen hinsichtlich einer Wasserstoffversprödung beim Beizen, einer Verringerung der statischen Tragfähigkeit durch das für die Verzinkung erforderliche größere Gewindenspiel [4] oder eines Abfalls der Dauerhaltbarkeit unter Schwingbeanspruchung näher untersucht werden.

Über das Verfahren der Feuerverzinkung von Kleinteilen wie Schrauben und Muttern wurde in der Vergangenheit im Schrifttum mehrfach berichtet [2; 5 bis 9]. Auch die Vorzüge der Feuerverzinkung und der Einfluß von Schichtdicke und Zinkschichtaufbau gegenüber Korrosionsmedien in der Atmosphäre sind durch zahlreiche Hinweise belegt [2; 5 bis 7; 10 bis 12]. Darüber hinaus existieren umfangreiche Einzeluntersuchungen über die Auswirkungen der Feuerverzinkungsbedingungen auf die Festigkeitseigenschaften hochfester Baustähle und Verbindungselemente [7; 12 bis 16]. Von besonderem Interesse sind hier die Versuchsergebnisse, die an Schraubenverbindungen ermittelt worden sind [7; 17 bis 25].

Nach den Untersuchungen von [17] an feuerverzinkten HV-Schrauben wird durch die Verzinkung weder die Zugfestigkeit noch die Zähigkeit verändert. Amerikanische Untersuchungen [18; 19] an $3/4$ "-Stahlbauschrauben in den Zugfestigkeiten 900 bis 1150 N/mm² und einer Zinkschichtdicke von etwa 100 µm zeigen demgegenüber vor allem im Anziehversuch einen Abfall von Festigkeit, Bruchdehnung und Brucheinschnürung durch das Feuerverzinken. Das Ergebnis gewinnt insbesondere dadurch an Bedeutung, daß der Anziehversuch mehr der tatsächlichen Beanspruchung der Schraube bei der Montage entspricht als der Zugversuch, denn in den meisten Fällen wird die Vorspannkraft durch Drehen der Mutter oder des Bolzens aufgebracht. Dadurch erfahren die Schrauben zusätzlich zur axialen Zugspannung eine durch die Gewindesteigung und die Reibung im Gewinde hervorgerufene Torsionsspannung. Bei vorgegebener Werkstofffestigkeit kann daher bei sehr hohen Torsionsbeanspruchungen infolge hoher Gewindereibung nur noch eine kleine, u.U. wesentlich niedrigere Vorspannkraft als erforderlich übertragen werden [7].

Während bei schwarzen HV-Schrauben im Hinblick auf die erreichbare Vorspannkraft auf eine Schmierung verzichtet werden kann, ist sie bei feuerverzinkten Schrauben unbedingt erforderlich.

Durch eine geeignete Schmierung (z.B. MoS₂) ist das Anziehverhalten feuerverzinkter Schrauben grundsätzlich dem Verhalten schwarzer Schrauben mit entsprechender Schmierung vergleichbar [7; 18 bis 25].

In neueren Arbeiten an feuerverzinkten HV-Schrauben wurde der Einfluß der Verzinkung auf die mechanischen Eigenschaften der Verbindungselemente untersucht [22; 23]. Dabei zeigte sich:

- Das Feuerverzinken von Vergütungsstählen der Festigkeitsklasse 10.9 ruft keine nennenswerten Unterschiede in der Kerbschlagzähigkeit hervor.
- Die im Zugversuch an Schraubenverbindungen ermittelten 0,2%-Dehngrenzen unterliegen einer stärkeren Streuung. Allerdings ergeben sich hinsichtlich der Zugfestigkeit keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu nichtverzinkten Schrauben entsprechender Gewindetoleranz (DIN 267 Teil 10 und DIN 13, Toleranzfeld 6 g).
- Hinweise für eine Wasserstoffversprödung wurden nicht gefunden.
- Im Vergleich zu nicht verzinkten Schraubenverbindungen ergab sich ein Abfall der Dauerhaltbarkeit von etwa 16%.
- Durch Setzerscheinungen betrug der Vorspannkraftabfall bei Schwingbe-

Formelzeichen

A_{eff}	effektiver Spannungsquerschnitt
A_S	Nennspannungsquerschnitt nach DIN 13 Teil 28
A_5	Bruchdehnung
a_k	Kerbschlagzähigkeit
D	Gewindeaußendurchmesser der Mutter
D_{K_m}	Kopfreibdurchmesser
D_1	Kerndurchmesser des Muttergewindes
D_2	Flankendurchmesser des Muttergewindes
d	Außendurchmesser des Bolzensgewindes
d_2	Flankendurchmesser des Schraubengewindes
d_3	Kerndurchmesser des Schraubengewindes
F	Kraft, allgemein
F_A	Ausschlagkraft
F_V	Vorspannkraft der Schraube
$F_{0,2}$	0,2%-Dehngrenzenlast
M_A	Anziehmoment
M_G	Gewindedrehmoment
M_K	Kopfreibmoment
P	Gewindesteigung
R_m	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze
Z	Brucheinschnürung
μ_G	Reibungszahl des Gewindes
μ_K	Reibungszahl der Kopfauflage bzw. Mutterauflage
$\sigma_{A10}, \sigma_{A50}, \sigma_{A90}$	Dauerhaltbarkeit bei 10, 50 und 90% Bruchwahrscheinlichkeit

Tabelle 1. Chemische Analyse von Schrauben- und Mutterwerkstoff.

Prüfteil	Stahl nach DIN 17200		Chemische Zusammensetzung in Gew.-%							
	Kurzname	Werkstoffnummer	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Schraube M16-12.9	41 Cr 4	1.7035	0,39	0,25	0,73	0,012	0,024	1,10	0,03	0,05
	42 CrMo 4	1.7225	0,43	0,26	0,72	0,011	0,027	1,15	0,24	0,04
Schraube M30-12.9	42 CrMo 4	1.7225	0,41	0,26	0,73	0,015	0,035	1,14	0,25	0,03
	30 CrNiMo 8	1.6580	0,30	0,27	0,53	0,011	0,029	1,97	0,33	1,93
Mutter M16-12	C 45	1.0503	0,43	0,29	0,72	0,009	0,038	0,19	0,02	0,04
Mutter M30-12	C 45	1.0503	0,44	0,29	0,62	0,013	0,032	0,20	0,01	0,04

anspruchung nach $3 \cdot 10^5$ Lastwechsel weniger als 5%.

Die vorliegenden Untersuchungen an feuerverzinkten Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 12.9 sollten unter Berücksichtigung bereits bekannter Ergebnisse zur Klärung der noch offenen Fragen beitragen.

2 Versuchsprogramm

Das Verhalten von feuerverzinkten Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 wurde in Anlehnung an die früheren Arbeiten [22; 23] durch gezielte Einzeluntersuchungen geprüft. Bei den Untersuchungen wurden HV-Schrauben M16 x 120 und M30 x 160 DIN 6914 der Festigkeitsklasse 12.9 in feuerverzinkter und schwarzer Ausführung verwendet. Die schwarze Oberfläche entsteht beim Abschrecken der Teile nach dem Anlassen in einer Anlaßemulsion. Die Schrauben waren dabei jeweils aus zwei in der Praxis üblichen Vergütungsstählen gefertigt:

- Schraube M16: 41 Cr 4 und 42 CrMo 4
- Schraube M30: 42 CrMo 4 und 30 CrNiMo 8.

Dadurch sollte der Einfluß der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffs auf die Ausbildung der Eisen-Zink-Legierungsschicht berücksichtigt werden. Die verwendeten Muttern nach DIN 6915 der Festigkeitsklasse 12 und Unterlegscheiben nach DIN 6916 waren aus C 45 hergestellt.

Tabelle 1 zeigt das Ergebnis der chemischen Analyse der Bolzen- und Mutterwerkstoffe. Die Teile wurden jeweils von einem Drahring gefertigt und in einer Charge wärmebehandelt. Die Verzinkung der entsprechend oberflächenbehandelten Schrauben erfolgte unter einheitlichen Bedingungen (z.B. Zinkbadtemperatur $\vartheta = 470^\circ\text{C}$). Dadurch

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

Die Gewinde der verwendeten schwarzen Schrauben wurden entsprechend den Anforderungen von DIN 13

Teil 20, Toleranzfeld 6g beziehungsweise von DIN 267 Teil 10, Toleranzqualität 6 mit dem Grundabmaß A_0 (M16 : $-315 \mu\text{m}$ und M30 : $-345 \mu\text{m}$) bei den feuerverzinkten Schrauben gefertigt. Die Muttergewinde waren einheitlich nach DIN 13 Teil 20, Toleranz-

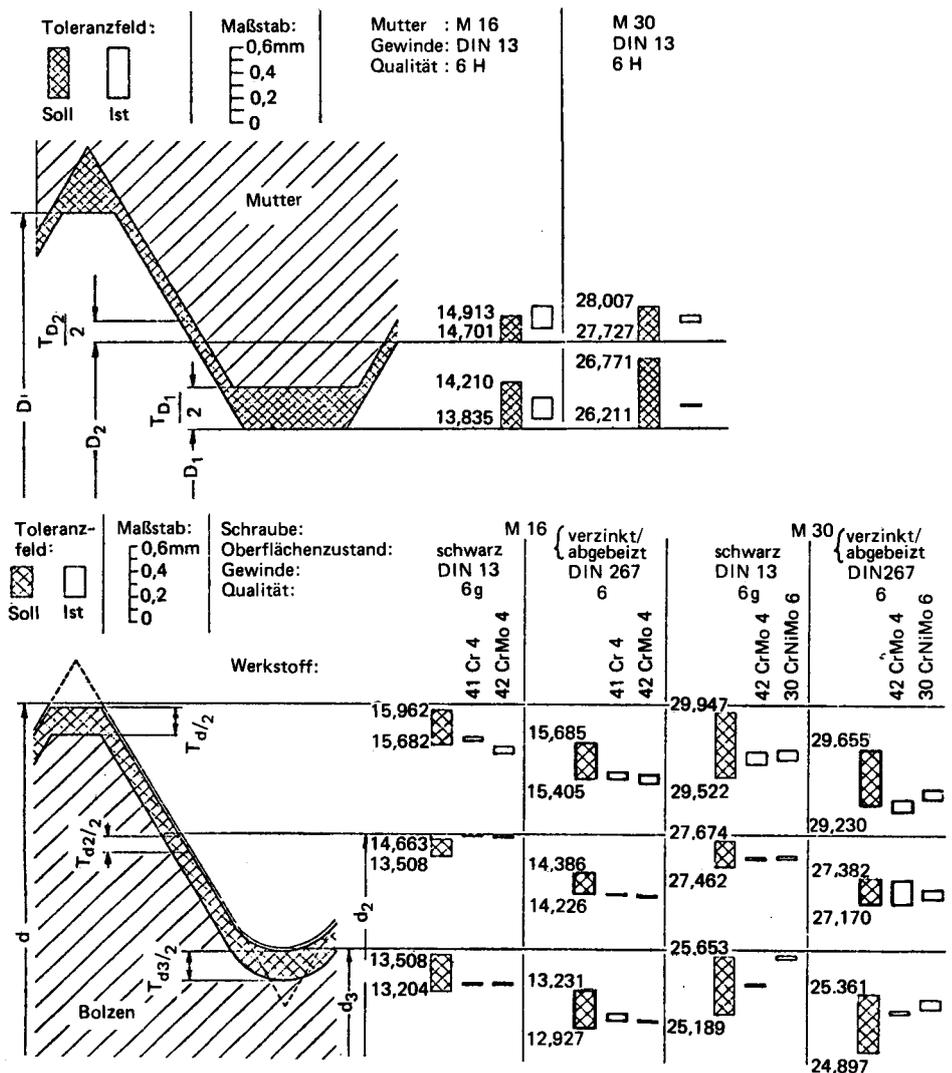


Bild 1. Gewindemaße der untersuchten Versuchsstücke (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils 20 geprüften Teilen) im Vergleich zu den entsprechend von der Norm vorgegebenen Werten.

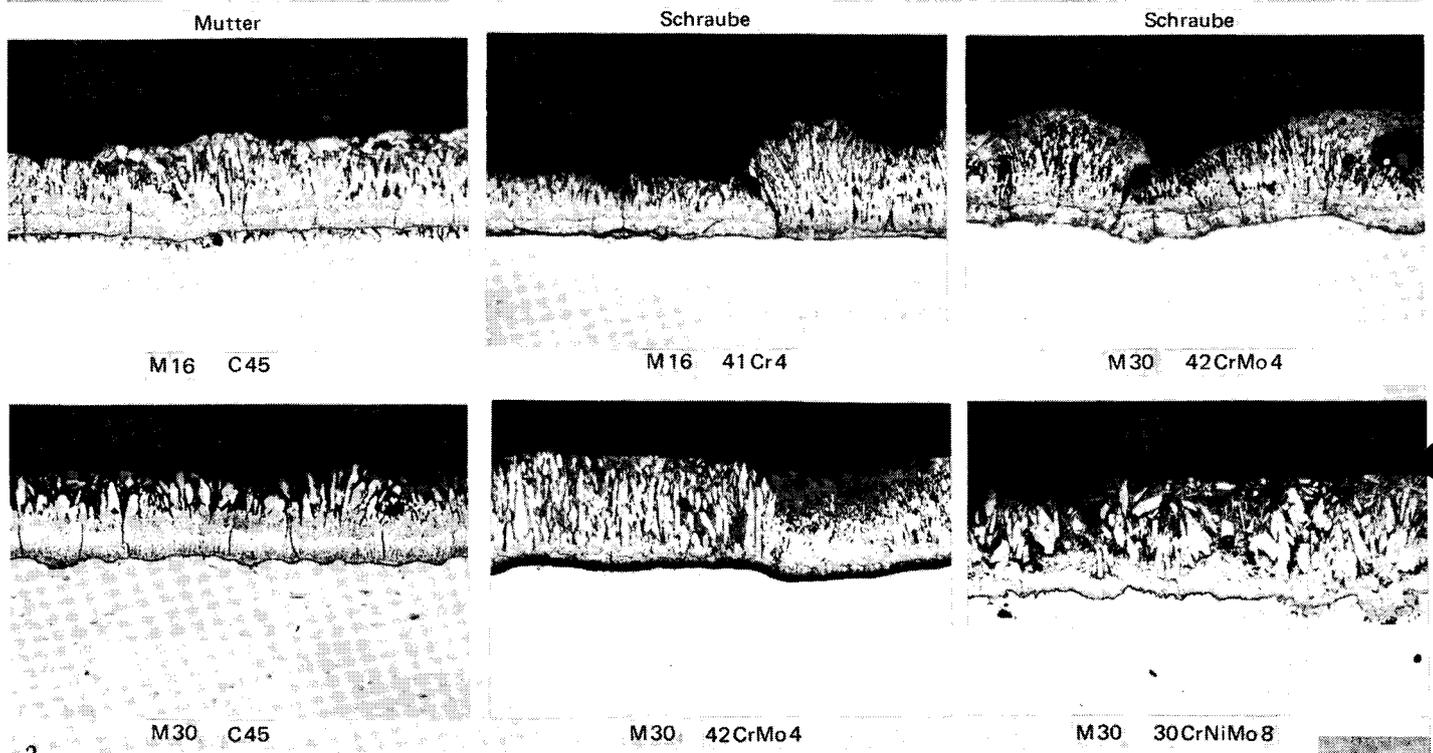


Bild 2. Eisen-Zink-Legierungsschichten der verwendeten Versuchsteile aus unterschiedlichen Werkstoffen ($V = 200 : 1$).

feld 6 H geschnitten. Bild 1 zeigt die tatsächlich vorliegenden Gewindemaße (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils 20 geprüften Teilen) im Vergleich zu den jeweils von der Norm vorgegebenen Werten.

Aufgrund der Meßergebnisse im verzinkten und anschließend abgeätzten Zustand (inhibierte Salzsäure) ergaben sich für die Schrauben die in Tabelle 2 angegebenen mittleren Zinkschichtdicken.

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

Zn-Schichtdicke [μm]	Schraube M16 aus Werkstoff		Schraube M30 aus Werkstoff	
	41 Cr 4	42 CrMo 4	42 CrMo 4	30 CrNi Mo 8
am Gewindeaußendurchmesser d	78	98	77	63
am Gewindeflankendurchmesser d_2	50	69	76	86
am Gewindekerndurchmesser d_3	69	88	47	79
an übrigen Flächen (Kopf, Schaft)	80	92	90	72

ken. Das Muttergewinde wurde entsprechend der betrieblichen Fertigung nach dem Verzinken der Teile geschnitten und besaß deshalb nur auf den Gewindespitzen eine geringe Zinkauflage. Die mittlere Schichtdicke auf den übrigen Flächen der Mutter betrug 70 bis 75 μm . Durch das sofortige Abschleudern des flüssigen Zinks nach Entnahme der Schrauben und Muttern aus dem Zinkbad verbleiben nur die Eisen-Zink-Legierungsschichten an der Oberfläche der Teile. Sie besitzen ein mattglänzendes Aussehen.

Bild 2 zeigt von den untersuchten Teilen die Schliffbilder der jeweiligen Zinkschichten. Ein signifikanter Unterschied und damit ein Einfluß des Grundwerkstoffs auf den Schichtaufbau konnte bei den aus verschiedenen Vergütungsstählen hergestellten Versuchsteilen nicht festgestellt werden. Dies dürfte auf den nahezu konstanten Si-Gehalt bei den verwendeten Werkstoffen (siehe Tabelle 1) und die etwa gleichen Verzinkungsbedingungen zurückzuführen sein.

3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

3.1 Kerbschlagbiegeversuche

Zur Ermittlung der Kerbschlagzähigkeit wurden aus den unterschiedlichen

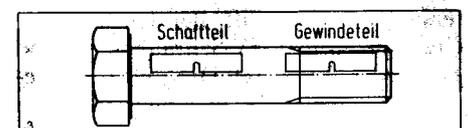


Bild 3. Probenentnahme für die Kerbschlagbiegeversuche bei den M30-Schrauben.

Schrauben ISO-Rundkerbproben herausgearbeitet. Bei den Schrauben der Abmessung M30 wurden dabei Proben sowohl aus dem Schaft- als auch dem Gewindeteil entnommen, Bild 3. Ein Teil der Kerbschlagproben wurde anschließend unter den gleichen Bedingungen wie die Schrauben verzinkt.

Die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche nach DIN 50115 sind Tabelle 3 zu entnehmen. Die aufgeführten a_K -Werte stellen Mittelwerte aus jeweils zehn Versuchen dar. Es zeigt sich, daß das Werkstoffverhalten vom Ort der Probenentnahme nicht beeinflusst wird. Die erzielten Ergebnisse lassen keinen signifikanten Unterschied der Kerbschlagzähigkeit bei den untersuchten Probengruppen im unverzinkten und verzinkten Zustand erkennen.

3.2 Zugversuche

An den zu untersuchenden Schrauben unterschiedlicher Abmessung, Werk-

stoffe und Oberflächenausführung wurden Zugversuche nach DIN ISO 898 Teil 1 durchgeführt:

a) 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 zusätzlich Proben geprüft, die aus den schwarzen Schrauben herausgearbeitet und den gleichen Verzinkungsbedingungen wie die feuerverzinkten Schrauben unterworfen wurden. Die Ergebnisse der Zugversuche der abgedrehten Schrauben sind in **Bild 4** dargestellt.

b) Zugversuche an ganzen Schrauben

Die Versuche dienten der Ermittlung der Festigkeit des freien belasteten Gewindeteils. Gemäß der Normvorschrift soll an dieser Stelle bei der Prüfung von ganzen Schrauben im Zugversuch der Bruch eintreten. Zur Bewertung des Zinkschichteinflusses wurden zusätzlich feuerverzinkte Schrauben abgebeizt und untersucht. Um sicherzustellen, daß in allen Untersuchungsfällen der Bruch im freien belasteten Gewinde eintrat, wurden bei den Versuchen zwei Muttern auf das Bolzengewinde aufgeschraubt. Die Anzahl der Gewindegänge vom Gewindeauslauf bis zur Auflagefläche der Mutter wurde dabei jeweils konstant gehalten. Bei der Bestimmung der Zugfestigkeit und 0,2%-Dehngrenze wurden die im Versuch ermittelten Kräfte auf den jeweiligen effektiven Spannungsquerschnitt $A_{S,eff}$ bezogen (bei den feuerverzinkten Schrauben unter Berücksichtigung der Zinkschicht). **Bild 5** zeigt die Ergebnisse dieser Versuche.

c) Zugversuche an der Schrauben-Mutter-Verbindung

Um die Tragfähigkeit der unterschiedlichen HV-Schraubenverbindungen zu ermitteln, wurden Zugversuche an ganzen Schrauben mit einer aufgeschraubten Mutter gleicher Oberflächenausführung durchgeführt. Entsprechend den oben genannten Versuchen wurden zusätzlich Verbindungen geprüft, deren Zinkschichten vorher abgebeizt worden waren. Die Klemmlängen wurden

Tabelle 3. Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche an ISO-Rundkerbproben aus HV-Schrauben DIN 6914 - 12.9 (Mittelwert und Standardabweichung aus jeweils 10 Versuchen).

Oberflächenausführung	Kerbschlagzähigkeit $a_k \pm s$ [J/cm ²]			
	Schraube M16		Schraube M30	
	41 Cr 4	42 CrMo 4	42 CrMo 4	30 CrNiMo 8
blank	53,6 ± 3,0	48,5 ± 2,3	52,6 ± 2,5 54,2 ± 2,6*	49 ± 1,1 50 ± 1,3
feuerverzinkt	55 ± 2,7	53,6 ± 3,1	61 ± 3,6	51,8 ± 2,0

* Kerbschlagbiegeprobe aus Gewindeteil (Bild 3)

den auch bei diesen Versuchen so gewählt, daß jeweils eine konstante Anzahl von freien belasteten Gewindegängen vorlag. Bei den hier 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 Gewindegänge).

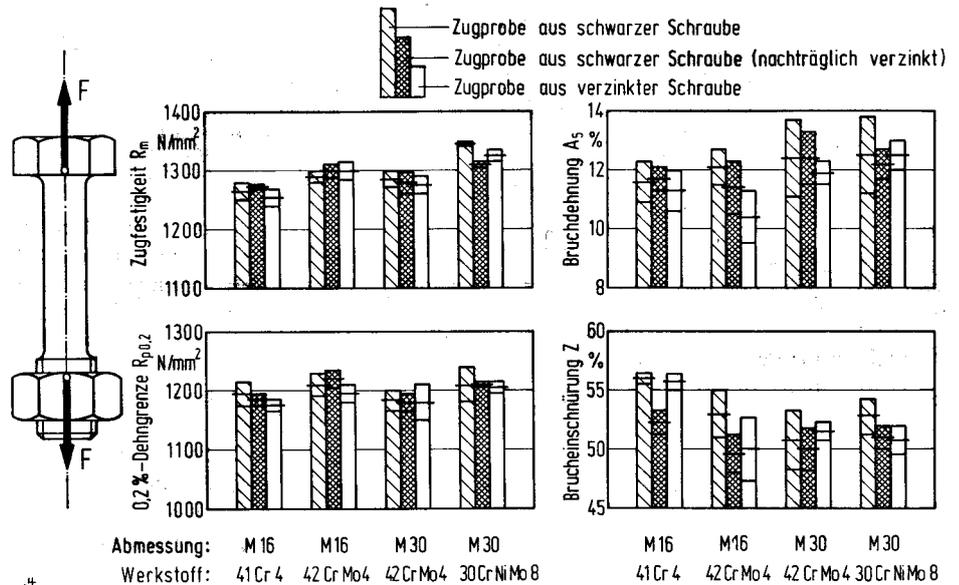


Bild 4. Ergebnisse der Zugversuche an abgedrehten Schrauben (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils sechs geprüften Teilen).

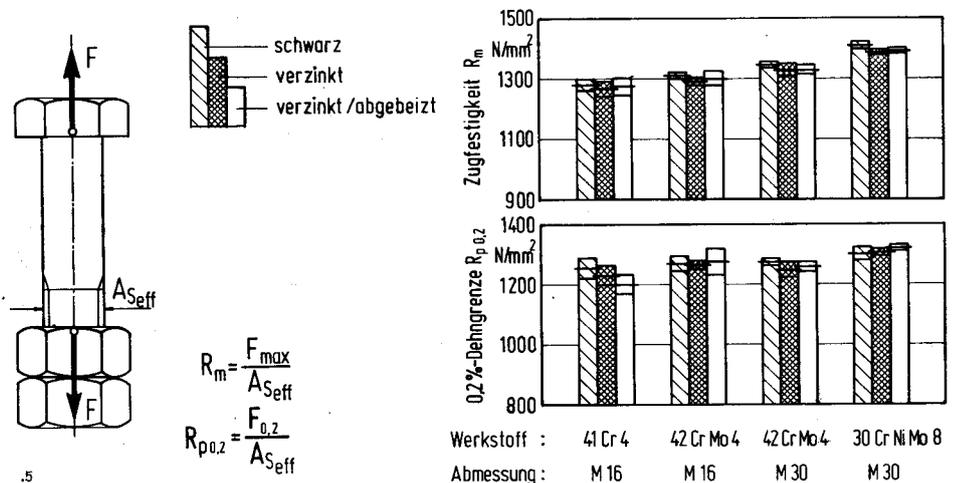


Bild 5. Ergebnisse der Zugversuche an ganzen Schrauben (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils zehn geprüften Teilen).

ben an einer Torsionsprüfmaschine durchgeführt. Dabei wurde die Mutter mit einer konstanten Drehgeschwindigkeit von 1 min^{-1} angezogen. Unter den Sechskantmütern waren Scheiben nach DIN 6916 in entsprechender Oberflächenausführung angeordnet. Bei jedem Anziehversuch wurden jeweils neue Scheiben verwendet.

Das Reibverhalten der unterschiedlichen Verbindungen wurde mit einem speziellen Prüfgerät [26] ermittelt. Es ermöglicht neben dem Gesamtanziehmoment M_A das Gewindedrehmoment M_G und durch eine elektronische Differenzschaltung das Kopfreibmoment M_K getrennt in Abhängigkeit der Vorspannkraft F_V zu messen.

Die Untersuchungen über das Reibverhalten beschränkten sich auf Schraubenverbindungen der Abmessung M16, wobei je zehn Schrauben im Anlieferungszustand (leicht geölt) und zehn weitere Schrauben im geschmierten Zustand geprüft wurden. Geschmiert wurde jeweils im Gewinde und an der Mutterauflagefläche mit einem bei HV-Schraubenverbindungen üblichen Schmierstoff auf MoS_2 -Basis (sumidera 09).

Aus dem einschlägigen Schrifttum [27] ist die mathematische Beziehung zwischen Anziehmoment und Vorspannkraft hinreichend bekannt. Sie lautet für Regelgewinde:

$$M_A = F_V [0,159 \cdot P + 0,578 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} \mu_K]$$

Durch Aufspalten der Gleichung in den Momentanteil unter Kopf- beziehungsweise Mutterauflage (M_K) und den Momentanteil im Gewinde (M_G) gemäß

$$M_A = M_K + M_G = F_V \cdot \frac{D_{Km}}{2} \mu_K + F_V [0,159 \cdot P + 0,578 \cdot d_2 \cdot \mu_G]$$

und Auflösen nach den zugehörigen Reibungszahlen konnten aus den Meßwerten für M_A und M_G die Werte μ_K und μ_G bestimmt werden. Bei der Berechnung wurden die Momente eingesetzt, die zum Erreichen einer Vorspannkraft von 70% der 0,2%-Dehngrenzenlast $F_{0,2}$ erforderlich waren.

Die Ergebnisse der Anziehversuche sind in Bild 7 dargestellt:

— Im ungeschmierten Zustand zeigen die feuerverzinkten Schrauben fast doppelt so hohe Reibungszahlen wie die schwarzen Schrauben. Infolge der

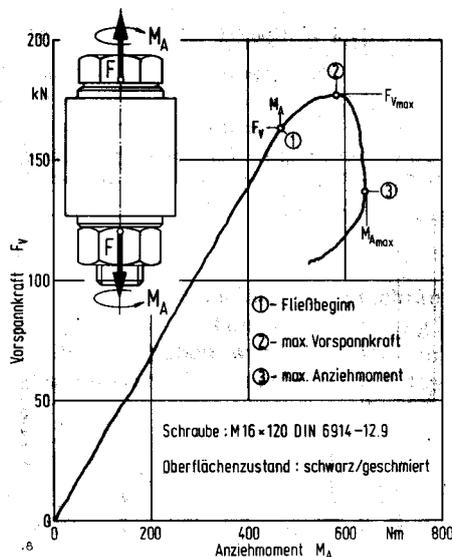


Bild 8. Abwürgversuch an HV-Schraubenverbindung M16-12.9.

hier vorliegenden Gewindereibung ($\mu_G = 0,25 \div 0,30$) werden somit die Schrauben beim Anziehen nahezu genau so hoch durch Torsion wie durch Zug beansprucht [28]

— Durch eine wirkungsvolle Schmierung wird das Reibverhalten feuerverzinkter Schrauben entscheidend verbessert. Die Reibungszahlen werden erheblich kleiner und in ihrer Streubreite enger, so daß feuerverzinkte Schrauben die μ -Werte schwarzer Schrauben sogar unterschreiten können.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die unterschiedlichen Schraubenverbindungen bis zum Bruch angezogen. Hier sollte in 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 Vorspannkraft dabei jeweils erreicht werden können. Bild 8 zeigt einen typischen Verlauf in Form eines F_V - M_A -Diagrammes. In Bild 9 ist das Ergebnis der durchgeführten Anziehbeziehungsweise Abwürgversuche zusammengestellt.

Unter den hierbei angegebenen Maximalwerten wird die beim Anziehversuch größte auftretende Vorspannkraft F_{Vmax} beziehungsweise das größte Anziehmoment M_{Amax} verstanden. Der Fließbeginn stellt einen Grenzwert im M_A - F_V -Diagramm dar, bei dem die Kurve den linearen Verlauf verläßt und aufgrund einsetzender plastischer Verformungen abknickt (Bild 8). Der Ort des höchsten Anziehmomentes ist aufgrund des Kurvenverlaufs nicht identisch mit dem Ort der höchsten Vorspannung. Aus den Versuchsergebnissen ergeben sich folgende Sachverhalte:

— Bei den im Anlieferungszustand geprüften Schraubenverbindungen erreichte die Mehrzahl der untersuchten Schrauben im Anziehversuch nur

Oberflächenzustand in Mutterauflage und Gewinde:

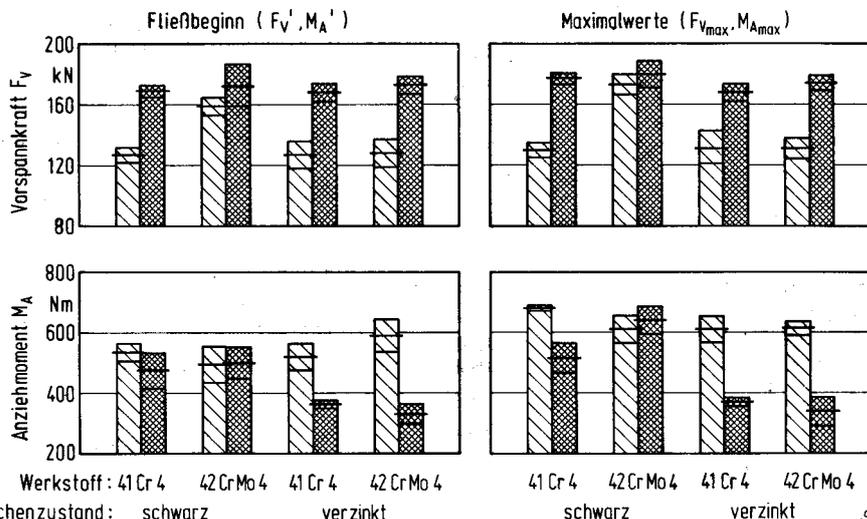


Bild 9. Ergebnisse der Abwürgversuche an HV-Schraubenverbindungen M16-12.9 (Mittelwert und Standardabweichung aus jeweils zehn Versuchen).

etwa 70% der Vorspannkraften, die im Zugversuch ermittelt wurden (vgl. Bild 6). Eine Ausnahme bilden hier die schwarzen Schrauben aus 42 CrMo 4. Offensichtlich lagen hier im Anlieferungszustand günstigere Reibverhältnisse vor (stärker geölt), so daß etwa 85% der im Zugversuch erreichten Vorspannkraften erzielt werden konnten.

- Bei den zusätzlich geschmierten Schrauben-Mutter-Verbindungen konnten deutlich höhere Vorspannkraften erzielt werden. Die Vorspannkraft lag sowohl bei den feuerverzinkten als auch bei den schwarzen Schrauben jeweils etwa nur 5 bis 10% unter den Zugkräften, die im Zugversuch erzielt wurden.
- Die feuerverzinkten Schrauben versagten alle durch Gewindeabstreifen. Bei den schwarzen Schrauben gab es sowohl Bolzenbrüche als auch Gewindeabstreifer.

Das Abwürgverhalten dieser Schrauben ($M_A - F_V - \varphi$ - Beziehung) wurde im Hinblick auf die besonderen Montagebedingungen des Stahlbaus an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität (TH) Karlsruhe untersucht. Hier liegen inzwischen umfangreiche Versuchsergebnisse vor [29].

3.4 Langzeit-Verspannversuch

Um eine eventuelle Schädigung der Schrauben infolge fertigungsbedingter Wasserstoffversprödung auszuschließen,

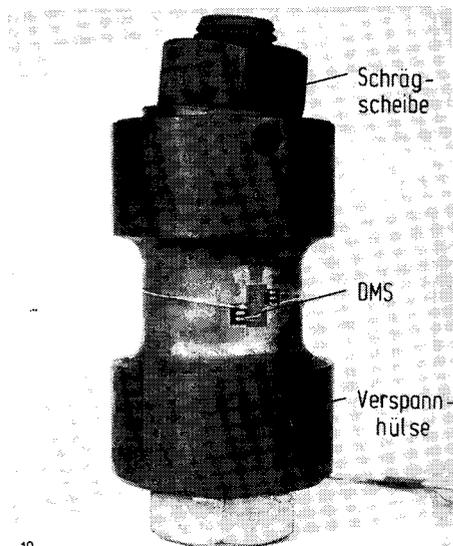


Bild 10. Verspanneinheit mit 5°-Schrägscheibe in der Mutterauflagefläche zur Durchführung der Langzeitverspannversuche.

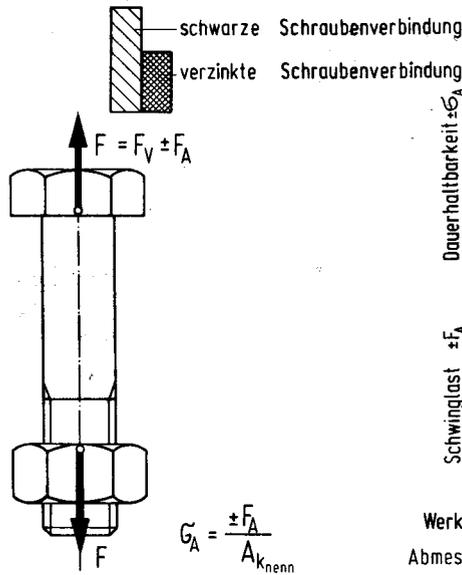
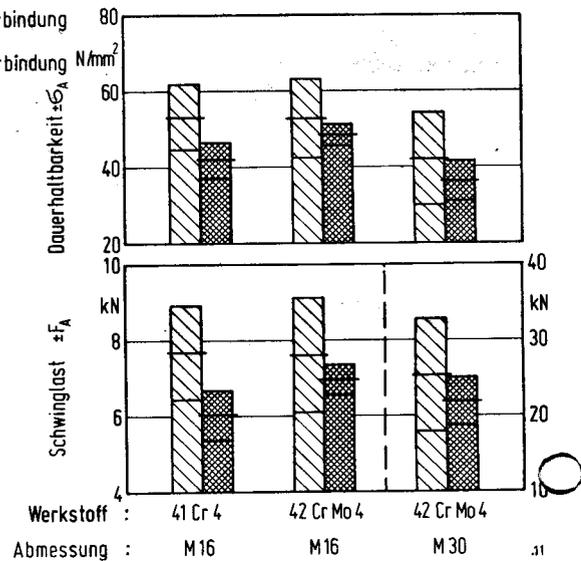


Bild 11. Ergebnisse der Dauerschwingversuche an HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 bei 10, 50 und 90% Bruchwahrscheinlichkeit.



wurden Langzeit-Verspannversuche an den verzinkten und unverzinkten (schwarzen) Schrauben durchgeführt. Dabei wurden jeweils bis zu zehn Schrauben gleicher Oberflächenbehandlung in Hülsen verspannt. Die Hülsen waren mit Dehnungsmeßstreifen beklebt, so daß die Vorspannkraft kontrolliert aufgebracht und während des Versuchs überwacht werden konnte, Bild 10. Die Verspannversuche wurden mit einer Laufzeit von drei Tagen bei einer Vorspannkraft von 70% der 0,2%-Dehngrenze $F_{0,2}$ durchgeführt.

Um in den Schrauben einen besonders kritischen Spannungszustand zu erzeugen, waren bei einem Teil der Versuche Schrägscheiben mit einem Neigungswinkel von 5° unter der Mutterauflage angeordnet (Bild 10). Dadurch wurden unter der wirkenden Vorspannkraft in der Biegezugseite der Schrauben Zugspannungen im plastischen Bereich hervorgerufen. Verzögerte Sprödbrüche, die auf eine Wasserstoffversprödung hindeuten, wurden bei keinem der Versuche beobachtet.

3.5 Dauerschwingversuche

Die Dauerschwingversuche an den schwarzen und feuerverzinkten Schrauben wurden in Anlehnung an DIN ISO 3800 Teil 1 im geschmierten Oberflächenzustand bis zu einer Grenzlastspielzahl von $N_G = 5 \cdot 10^6$ durchgeführt. Die Vorspannkraft betrug dabei einheitlich für alle untersuchten Varianten 70% des

genormten Mindestwertes der 0,2%-Dehngrenze in der Festigkeitsklasse 12.9, bezogen auf den Nennspannungsquerschnitt A_S nach DIN 13. Die Dauerschwingversuche an den Schraubenverbindungen wurden statistisch nach dem Abgrenzungsverfahren durchgeführt und ausgewertet [30].

Für jede Schraubenserie wurden jeweils auf zwei Lasthorizonten 15 Proben untersucht. Die Bruchwahrscheinlichkeit wurde mit der Schätzfunktion

$$p = \frac{3r-1}{3n+1}$$

ermittelt. Dabei beschreibt r die Anzahl der gebrochenen Schrauben und n die Gesamtzahl der auf einem Lasthorizont geprüften Proben. 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 Nennkernquerschnitt bezogenen Spannungen σ_A :

- Für die schwarzen Schrauben der Abmessung M16 ist für die beiden untersuchten Werkstoffe der Dauerhaltbarkeitsunterschied vernachlässigbar.
- Bei den Schrauben in feuerverzinkter Oberflächenausführung zeigen dagegen die Schrauben aus dem höher legierten Werkstoff 42 CrMo 4 die eindeutig besseren Werte.
- Gegenüber dem nicht verzinkten Zustand liegt die Dauerhaltbarkeit σ_{A50}

feuerverzinkter Schrauben für die untersuchten Schrauben eindeutig niedriger. Die Unterschiede betragen bei den M16-Schrauben 8% für den Werkstoff 42 CrMo 4 beziehungsweise 21% für den Werkstoff 41 Cr 4 und bei den Schrauben der Abmessung M30 aus 42 CrMo 4 13%.

— Die Schrauben der Abmessung M30 zeigen im Vergleich zu den M16-Schrauben gleichen Werkstoffs deutlich geringere Dauerhaltbarkeitswerte σ_{A50} . Dies gilt sowohl für die schwarzen als auch für die feuerverzinkten Schrauben. Die Schwingfestigkeitsminderung dürfte dabei in erster Linie auf den spannungsmechanischen Größeneinfluß zurückzuführen sein [31].

— Die Streubreite zwischen den σ_{A10} - und σ_{A90} -Werten ist bei den feuerverzinkten Schrauben kleiner als bei den nicht verzinkten. Dies gilt sowohl für die Schrauben der Abmessung M16 als auch M30. Vergleicht man die Versuchsergebnisse hinsichtlich der σ_{A10} -Werte, so sind die Dauerhaltbarkeitswerte der feuerverzinkten Schrauben aus 42 CrMo 4 (M16 und M30) im Vergleich zu schwarzen Schrauben nahezu gleich. Lediglich die feuerverzinkten M16-Schrauben aus 41 Cr 4 wiesen auch bei einer Bruchwahrscheinlichkeit von 10% niedrigere Dauerhaltbarkeitswerte auf.

— Die eigenen Ergebnisse an M16-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 aus 41 Cr 4 in schwarzer Ausführung stimmen gut mit früheren Werten überein, die an HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 des gleichen Werkstoffs ermittelt wurden [22]. Für feuerverzinkte Schrauben ergab sich hier eine etwa 10% geringere Dauerhaltbarkeit. Schraubenverbindungen der Abmessung M30 aus 42 CrMo 4 im feuerverzinkten und schwarzen Oberflächenzustand ergaben dagegen in der Festigkeitsklasse 12.9 bis zu 25% niedrigere Dauerhaltbarkeitswerte.

3.6 Vorspannkraftabfall unter Schwingbeanspruchung

In Schraubenverbindungen können aufgrund hoher Flächenpressungen in den Auflageflächen von Schraubenkopf und Mutter und im Gewinde plastische Verformungen eintreten, die zum Abfall

der Vorspannkraft in der Verbindung führen. Dieser Effekt ist unter dem Begriff des Setzens bekannt. Durch Setzmessungen an schwarzen und feuerverzinkten HV-Schrauben sollte geklärt werden, wie sich die Verzinkung von Schraubenverbindungen auf den Vorspannkraftabfall unter Schwingbeanspruchung auswirkt.

Die Untersuchungen beschränkten sich auf Schrauben der Abmessung M16. Die Schrauben wurden hierbei im geschmierten Zustand (MoS₂) mit den ent-

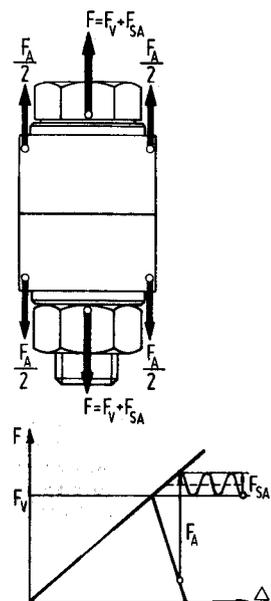
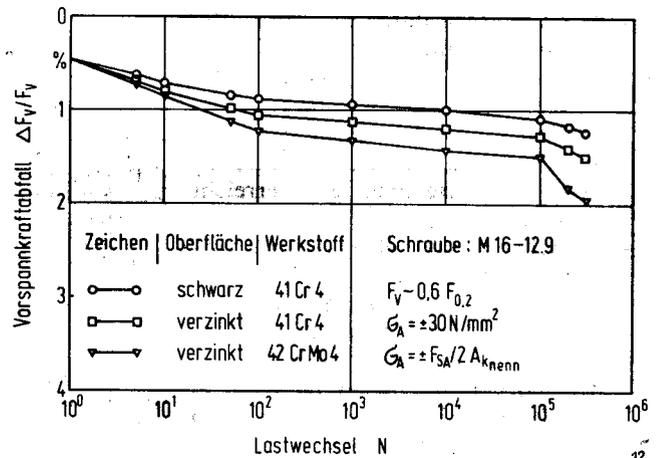


Bild 12. Vorspannkraftabfall von HV-Schraubenverbindungen M16-12.9 unter Schwingbeanspruchung.

sprechenden Scheiben nach DIN 6916 unter Schraubenkopf und Mutter in einer Meßhülse durch Anziehen der Mutter vorgespannt. Die Vorspannkraft entsprach bei den Schwingversuchen 60% der 0,2%-Dehngrenze. Über die Meßhülse wurde unter Berücksichtigung ihrer Nachgiebigkeit eine Schwinglast in die Schraubenverbindung eingeleitet. Die Beanspruchung war dabei so gewählt, daß sie geringfügig unter der Dauerhaltbarkeit der feuerverzinkten 12.9-Schrauben lag, um Dauerbrüche der Schrauben in der Meßdose zu vermeiden. Der Abfall der Vorspannkraft infolge der Schwingbeanspruchung konnte über die Meßhülse bestimmt werden. Bild 12 zeigt die Versuchsergebnisse. Jeder Kurvenpunkt entspricht dem Mittelwert aus je fünf gleichartigen Versuchen.

Während des ersten Lastwechsels fällt die Vorspannung um den relativ größten Betrag ab (etwa 0,5% der Anfangsvorspannkraft). Ein Einfluß der Oberflächenausführung ist hier nicht zu erkennen. In den folgenden $3 \cdot 10^5$ Lastwechseln steigt der Vorspannkraftabfall auf etwa 1 bis 2% an. Die feuerverzinkten Schrauben zeigen dabei mit zunehmender Lastspielzeit etwas größere Werte (ΔF_V). Deutliche Unterschiede für die verschiedenen Oberflächenausführungen sind jedoch wegen der Streuung der Einzelwerte nicht festzustellen.



4 Zusammenfassung

Um den Einfluß der Feuerverzinkung auf die mechanischen Eigenschaften von HV-Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 12.9 beziehungsweise 12 zu erfassen, wurden entsprechende Versuche an unverzinkten und verzinkten Schraubenverbindungen der Abmessung M16 und M30 durchgeführt. Der Einfluß des Grundwerkstoffs auf die Ausbildung der Eisen-Zink-Legierungsschicht wurde durch die Untersuchung von Schrauben aus mehreren praxisüblichen Vergütungsstählen mitberücksichtigt. Die durchgeführten Versuche führten zu folgenden Ergebnissen:

- Die Kerbschlagzähigkeit wird durch das Feuerverzinken nicht nachteilig beeinflusst.
- Die Bruchdehnungs- und Bruchein-

schnürwerte werden durch die Feuerverzinkung geringfügig vermindert.

- Die Haltbarkeit der feuerverzinkten Schrauben im freien belasteten Gewindeteil gegenüber Zugbeanspruchung ist nur geringfügig niedriger im Vergleich zu Schrauben in schwarzer Oberflächenausführung. Der Haltbarkeitsunterschied dürfte hier auf die unterschiedlich tragenden Querschnitte zurückzuführen sein.
- Zugversuche an ganzen Schrauben mit jeweils einer aufgeschraubten Mutter zeigten, daß die maximale Tragfähigkeit der unverzinkten Schraubenverbindungen M16 vornehmlich durch die Haltbarkeit des freien belasteten Gewindeteils bestimmt wird. Bei der entsprechenden Verbindung der Abmessung M30 und allen feuerverzinkten Ausführungen ist sie dagegen durch die Abstreifefestigkeit des eingeschraubten Gewindes vorgegeben. Dies kann bei ungünstiger Paarung von Bolzen- und Muttergewinde dazu führen, daß die von der Norm geforderten statischen Festigkeitswerte nicht ganz erreicht werden.
- Anziehversuche ließen die Notwendigkeit einer geeigneten Schmierung sowohl der schwarzen als auch der feuerverzinkten Schraubenverbindungen bei der Montage erkennen. Mit den Verbindungen im Anlieferungszustand konnten etwa nur 75% der Vorspannkraft erzielt werden. Die erreichbare Vorspannkraft der mit MoS₂ geschmierten Schraubenverbindungen in feuerverzinktem Oberflächenzustand lag dagegen auf dem Niveau schwarzer Schrauben.
- Die Dauerhaltbarkeit der feuerverzinkten HV-Schrauben 12.9 ist etwas niedriger als die unverzinkter Schrauben. Der Abfall bis zu 20% dürfte auf die Wirkung der spröden Eisen-Zink-Legierungsschichten zurückzuführen sein.
- Unter schwingender Beanspruchung ist der Vorspannkraftabfall bei feuerverzinkten HV-Verbindungen kaum größer als bei unverzinkten Verbindungen.

Der geringe Abfall der Vorspannkraft vollzieht sich dabei im wesentlichen während der ersten Lastwechsel.

- Verspannversuche ergaben keine Hinweise auf eine Wasserstoffversprödung infolge der Oberflächenbehandlung.
- Gefügeuntersuchungen an feuerverzinkten Schraubenverbindungen aus verschiedenen Werkstoffen wiesen keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Aufbaus der Eisen-Zink-Legierungsschichten auf.

Schrifttum

- [1] Kleingarn, J. P.: Korrosionsschutz durch Feuerverzinken — gestern, heute und morgen. *Industrie-Anzeiger* Bd. 97 (1975) Nr. 60, S. 1324/26.
- [2] Böttcher, H.-J.: Feuerverzinkung — ein vorteilhafter Korrosionsschutz. *Maschinenmarkt* (1970) Nr. 24.
- [3] Eijnsbergen, J.-F. H. van: Die Zuverlässigkeit der Korrosionsverhütung durch Feuerverzinken. *Draht* (1978) Nr. 3, S. 122.
- [4] Limpert, G., u. H. Gut: Neuere Erfahrungen mit HV-Schrauben im Stahlbau. *Schweizerische Bauzeitung* Bd. 88 (1970) Nr. 10.
- [5] Hall, W. L.: Der Korrosionsprozeß und die Schutzwirkung von Zinküberzügen. 9. Internationale Verzinkertagung von 7. bis 12. Juni 1970 in Düsseldorf.
- [6] Kleingarn, J.-P.: Korrosionsschutz durch Zink in Überzügen und Beschichtungen — Begriffe und Verfahren. *Draht* (1980) Nr. 5, S. 360/62.
- [7] Illgner, K. H.: Einfluß der Oberflächenbehandlung auf die Eigenschaften von HV-Schraubenverbindungen und ihre Anwendung. *Der Stahlbau* (1979) Nr. 1.
- [8] Benninghoff, H.: Verzinken von Schrauben und anderen Kleinteilen. *Drahtwelt* (1978) Nr. 8, S. 287/89.
- [9] Friedrich, E.: Korrosionsschutz durch Feuerverzinken. *Industrie-Anzeiger* Bd. 98 (1976) Nr. 5, S. 1511/14.
- [10] Horstmann, D., u. F.-K. Peters: Der Angriff von eisengesättigten Zinkschmelzen auf Eisen im Temperaturbereich vom 540 bis 740 °C. *Arch. Eisenhüttenwes.* Bd. 40 (1969) Nr. 8, S. 621/25.
- [11] Wiegand, H., u. F. Nieth: Festigkeitswerte von Eisen-Zink-Legierungsschichten. *Metalloberfläche* Bd. 20 (1966) S. 393/99.
- [12] Hershmann, A. A., u. D. T. Collins: Die Verzinkungseigenschaften von Stählen und ihren Schweißverbindungen. *International Lead Zinc Research Organization Inc., New York.*
- [13] Wiegand, H.: Verhalten verzinkter Werkstoffe bei mechanischer Beanspruchung. *Maschinenmarkt* (1975) Nr. 7, S. 103/06.
- [14] Horstmann, D.: Untersuchungen zum Einfluß des Feuerverzinkens auf die mechanischen Ei-

genschaften mikrolegierter Feinkornstähle. *Arch. Eisenhüttenwes.* Bd. 47 (1976) Nr. 12, S. 737/39.

- [15] Nieth, F., u. H. Wiegand: Das Verhalten von Baustählen höherer Festigkeit nach dem Feuerverzinken bei dynamischer Beanspruchung. *Arch. Eisenhüttenwes.* Bd. 46 (1975) Nr. 9, S. 589/93.
- [16] Wiegand, H., u. F. Nieth: Untersuchungen über das Verhalten feuerverzinkter Stähle und Bauteile. *Stahl u. Eisen* (1964) Nr. 2.
- [17] Bablik, H., u. J. Krystof: Feuerverzinkte hochfeste Schrauben. *Industrie-Anzeiger* Bd. 80 (1958) Nr. 15, S. 17/18.
- [18] Divine, J. R., u. E. Chenon: Static and dynamic properties of bolted galvanized structures. *Univ.-Illinois, Annal Rep.* 1966.
- [19] Birkemoe, P. C., W. D. Louch u. W. H. Munse: Design criteria for joining galvanized structures. *Univ.-Illinois, Annal Rep.* 1969.
- [20] Ritchie, J. G.: Einsatz feuerverzinkter HV-Schrauben bei Stahlkonstruktionen in Australien. *Draht* (1971) Nr. 4.
- [21] Birkemoe, P. C., u. D. C. Herrschaft: Bolted galvanized bridges — engineering acceptance near. *Civil Engineering ASCE, Apr.* 1970. *Internat. Lead Research Organization Inc., New York.*
- [22] Wiegand, H., u. P. Strigens: Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben. *Industrie-Anzeiger* Bd. 43 (1972) Nr. 12.
- [23] Wiegand, H., u. W. Thomala: Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben. *Drahtwelt* Bd. 59 (1973) Nr. 12, S. 542/51.
- [24] Valtinat, G.: Neue Entwicklungen und Vorschriften in der HV-Verbindungstechnik. *Industrie-Anzeiger* Bd. 44 (1973) Nr. 89.
- [25] Valtinat, G.: Der Einsatz der Feuerverzinkung im Stahlbau im Hinblick auf Schraubenverbindungen. *Draht* (1978) Nr. 1, S. 32/35.
- [26] Pfaff, H.: Die Ermittlung des optimalen Anzugsmomentes für Schraubenverbindungen an Elektroarmaturen mit einer neuen Versuchseinrichtung. *Draht* (1975) Nr. 10, S. 467/74.
- [27] VDI 2230: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen. Oktober 1977. *Berlin: Beuth-Verlag GmbH.*
- [28] Kellermann, R., u. H. Ch. Klein: Untersuchungen über den Einfluß der Reibung auf Vorspannung und Anzugsmoment von Schraubenverbindungen. *Konstruktion* Bd. 7 (1955) S. 54/68.
- [29] Valtinat, G., u. P. Frey: Abwürguntersuchungen an hochfesten Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 in feuerverzinkter und schwarzer Ausführung. *Bericht Nr. 89 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V., Karlsruhe* 1983.
- [30] Maennig, W.: Bemerkungen zur Beurteilung des Dauerschwingfestigkeitsverhaltens von Stahl und einige Untersuchungen zur Bestimmung des Dauerschwingfestigkeitsbereiches. *Mat.-Prüfung* Bd. 12 (1970) Nr. 4, S. 124/31.
- [31] Kloos, K. H.: Einfluß des Oberflächenzustandes und der Probengröße auf die Schwingfestigkeitseigenschaften. *VDI-Berichte* Nr. 268. *Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH* 1976.

A 30 106

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