

Prof. Dr.-Ing. H. Wiegand  
und Dr.-Ing. P. Strigens, Darmstadt

# **Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben**

*GAV - Bericht Nr. 70*

# Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben

DK 621.882.1:539.4.016

*Im Stahlbau wird die Verwendung von feuerverzinkten HV-Schrauben angestrebt, weil auf diese Weise ein kostengünstiger Korrosionsschutz erzielt werden kann, der häufig für die gesamte Lebensdauer der Konstruktion ausreicht. Verfahrensfragen des Feuerverzinkens und der Korrosionsbeständigkeit der Zinkschicht sind schon mehrfach untersucht worden, dagegen liegen nur wenige Ergebnisse zum Einfluß des Feuerverzinkens auf die Festigkeitseigenschaften hochfester Schrauben vor. Bedenken wegen möglicher ungünstiger Auswirkungen verhinderten bisher vielfach den Einsatz feuerverzinkter HV-Schrauben. Die vorliegenden Untersuchungen sollen zur Klärung verschiedener, noch offener Fragen beitragen\*.*

## 1. Einführung

Der Einsatz von vergüteten hochfesten Schrauben (HV-Schrauben, Festigkeitsklasse 10.9) im Stahlbau anstelle von Nieten oder Schrauben niedriger Festigkeit ermöglicht eine leichtere Bauweise. Die bei gleicher Tragfähigkeit geringeren Abmessungen der HV-Schrauben vermindern das Gewicht der Gesamtkonstruktion erheblich, vor allem infolge kleinerer Anschlußmaße der verschraubten Teile. Durch Verwendung von feuerverzinkten HV-Schrauben werden häufig teurere Maßnahmen zum Schutz der Verbindungselemente gegen Korrosion überflüssig. Mit relativ geringem Kostenaufwand können durch Feuerverzinken Schichtdicken aufgebracht werden, die in vielen Fällen für die gesamte Lebensdauer der Konstruktion einen hinreichenden Korrosionsschutz gewährleisten.

Verfahrensfragen des Feuerverzinkens von Schrauben und ähnlichen Teilen sowie deren Korrosionsbeständigkeit unter verschiedenen Einsatzbedingungen wurden bereits mehrfach untersucht. Über das Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben liegen jedoch bisher nur wenig verwertbare Ergebnisse vor. Die deshalb bestehende Unsicherheit hinsichtlich der Auswirkung des Feuerverzinkens auf das Festigkeitsverhalten hochfester Schrauben verhindert noch weitgehend deren Anwendung. Bedenken gegen den Einsatz dieser Schrauben im feuerverzinkten Zustand ergaben sich, weil Festigkeitseigenschaften, Anziehverhalten und Haltbar-

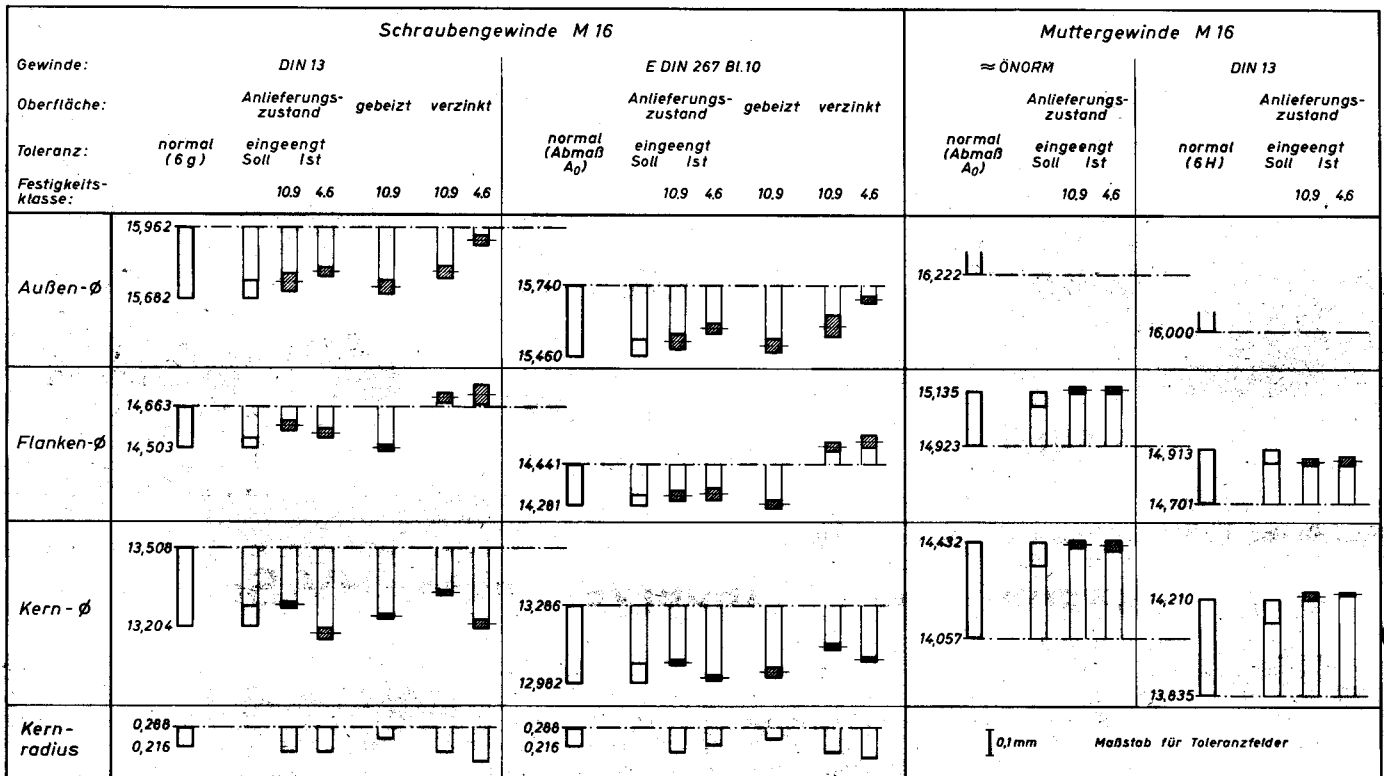
keit hochfester Schrauben infolge des Feuerverzinkens durch folgende Einflüsse verändert werden können:

- Wasserstoffversprödung beim Beizen
- Versprödung der Randzone durch Eisen-Zink-Legierungsschichten
- Veränderung der Reibbeiwerte durch den Zinküberzug
- Veränderung der Tragfähigkeit durch das für die Verzinkung notwendige Gewindenspiel
- Verstärkte Setzerscheinungen in der Zinkschicht und Abfall der Vorspannung
- Veränderung der Dauerhaltbarkeit.

Der Einfluß und das Zusammenwirken der einzelnen Faktoren sollte unter Berücksichtigung bereits bekannter Ergebnisse eingehender untersucht werden. Aus einer älteren Veröffentlichung [1] geht hervor, daß sich Festigkeit und Zähigkeit hochfester Schrauben durch das Feuerverzinken nicht wesentlich verändern. Angaben über die Abmessungen der Schrauben und die Versuchsbedingungen werden jedoch nicht gemacht, so daß diese Aussagen nur sehr begrenzt verwertbar sind. Demgegenüber zeigen neuere amerikanische Versuche [2; 3] mit  $\frac{3}{4}$ "-Stahlbauschrauben (Festigkeit 90...115 kp/mm<sup>2</sup>, Zinkauflage rd. 100 µm) einen Abfall von Festigkeit, Dehnung und Brucheinschnürung infolge des Feuerverzinkens, vor allem im Anziehversuch. Der Anziehversuch entspricht mehr der tatsächlichen Beanspruchung der Schraube bei der Montage als der Zugversuch. Beim Aufbringen der Vorspannung durch Drehen der Mutter oder des Bolzens überlagern sich im Bolzen Zug- und Torsionsspannungen, so daß im Anziehversuch allgemein geringere maximale Zugspannungen erreicht werden als im Zugversuch. Bei verzinkten Schrauben fällt die maximale Zugspannung im Anziehversuch noch weiter ab als bei unverzinkten Schrauben. Nach den erwähnten amerikanischen sowie australischen Untersuchungen [4] ist der Reibungsbeiwert der verzinkten Schrauben zu Beginn des Anziehens kleiner als bei unverzinkten Schrauben. Mit zunehmender Relativbewegung und Flächenpressung kommt es zu Freßerscheinungen im Gewinde. Dabei nimmt der Anteil der Torsionsbeanspruchung an der Gesamtbeanspruchung des Schraubenbolzens zu, und der Bruch tritt bei kleineren Zugspannungen ein. Kann durch geeignete Schmierung das Fressen verhindert werden, dann sind etwa gleiche Zugspannungen zu erreichen wie bei unverzinkten Schrauben. Der Abfall der Duktilität wird auf das Beizen (Wasserstoffversprödung) und die relativ hohe Temperatur des Zinkbades zurückgeführt. Ob die spröden Eisen-

\*Die Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken durchgeführt, über den auch die benötigten und von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen bzw. vom Bundesministerium für Wirtschaft und Finanzen zur Verfügung gestellten Geldmittel geleitet wurden. Die Verfasser danken für die Unterstützung.

**Bild 1**  
*Toleranzfelder und Gewindemaße*



Zink-Legierungsschichten ebenfalls zum Abfall der Duktilität beigetragen haben, geht aus den genannten Berichten nicht hervor.

Zum Aufbringen ausreichend dicker Zinkschichten ist ein vergrößertes Gewindenspiel erforderlich, wodurch sich die Flankenüberdeckung von Schrauben- und Muttergewinde und damit auch die Abstreiffestigkeit der Gewindeverbindung vermindert. Hinsichtlich des notwendigen Gewindespiels bestehen Meinungsverschiedenheiten über die Frage, ob das Gewindenspiel durch Untermaß am Bolzengewinde (nach Entwurf DIN 267 Blatt 10; 5.69) oder durch Übermaß im Muttergewinde (ähnlich ONORM E 4015) erzeugt werden soll. Zur Klärung dieser Fragen wurden beide Gewindeformen in die Versuche miteinbezogen.

Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 und niedriger werden in der Praxis schon seit längerer Zeit im feuerverzinkten Zustand verwendet, ohne daß Schadensfälle bekanntgeworden sind. Andererseits liegen aber keine Untersuchungen darüber vor, wie sich die mechanischen Eigenschaften derartiger Schraubenverbindungen durch eine Feuerverzinkung und die dazu erforderliche Vergrößerung des Gewindspiels verändern. Es sind deshalb auch einige Versuche mit Schraubenverbindungen der Klasse 4.6 mit den beiden oben genannten Gewindeformen im unbehandelten und feuerverzinkten Zustand durchgeführt worden.

## 2. Versuchsstücke (Anforderungen, Herstellung)

Für die Untersuchungen wurden HV-Schrauben M 16×120 DIN 6914 der Festigkeitsklasse 10.9 aus dem dafür üblichen Stahl 41Cr4 sowie Muttern der Festigkeitsklasse 10 nach DIN 6915 und Unterlegscheiben nach DIN 6916 verwendet. Die Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6, die Muttern der Klasse 4 und die dazugehörigen Unterlegscheiben entsprechen den gleichen Maßnormen.

jedoch waren die Schrauben aus dem Stahl UQSt 36-2 hergestellt. Die Muttern der Klassen 4 und 10 waren aus dem Stahl C45 gefertigt und durch eine entsprechende Wärmebehandlung auf die erforderliche Festigkeit gebracht worden. **Tabelle 1** enthält die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs der Schrauben und Muttern. Die Teile wurden jeweils von einem Drahring gefertigt, in einer Charge wärmebehandelt und unter gleichen Bedingungen feuerverzinkt, um werkstoff- und fertigungsbedingte Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsstücken weitgehend auszuschließen.

Die Versuchsstücke wurden vor dem Verzinken alkalisch entfettet, heiß gespült, 80 Minuten gebeizt (Beize: 8,65% HCl, ohne Inhibitor), zweimal kalt und einmal heiß nachgespült, in Flußmittel (Zink-Ammonium-Chlorid) getaucht und getrocknet. Sie sind bei einer Zinkbadtemperatur von 472 °C ( $\pm 2$  °C) mit einer Tauchzeit von 45 Sekunden verzinkt, unmittelbar anschließend geschleudert und in heißem Wasser (rd. 80 °C) abgeschreckt worden.

### 3. Versuche

### 3.1. Gewindemaße, Zinkschichtdicke

Für die Gewindemaße entsprechend Entwurf DIN 267 Blatt 10, DIN 13 und ONORM E 4015 war eine Einengung der Toleranzfelder auf  $\frac{1}{4}$  der genormten Breite vorgesehen. Das verbleibende Toleranzfeld sollte beim Bolzengewinde am Kleinstmaß und beim Muttergewinde am Größtmaß liegen, um so eine möglichst kleine, aber noch zulässige Flankenüberdeckung zu erhalten und eine Beeinträchtigung der Meßergebnisse durch eine größere Streuung der Gewindemaße möglichst zu vermeiden. Beim Muttergewinde nach ONORM E 4015 wurde das gleiche Abmaß vorgesehen wie beim Bolzengewinde nach DIN 267 Blatt 10, damit für die beiden Gewindekombinationen mit vergrößertem Spiel (DIN 267/DIN 13, DIN 13/ONORM) jeweils die gleiche Flankenüberdeckung erzielt wird. Es zeigte sich, daß die geforderten engen Toleranzen in der Fertigung nicht ganz einzuhalten waren. Die effektiven Gewindemaße entsprechen beim Bolzengewinde etwa einer Einengung des Toleranzfeldes auf  $\frac{1}{3}$  der genormten Breite (Bild 1).

Aufgrund der Gewindemessungen ergab sich bei den Schrauben rechnerisch eine mittlere Dicke der Zinkschicht von 30...40 µm am Außendurchmesser des Gewindes, von 50...55 µm am Flankendurchmesser und von 45...50 µm am Kerndurchmesser des Gewindes. Das Muttergewinde ist erst nach dem Verzinken der Teile geschnitten worden und hatte deshalb nur auf den Gewinde-

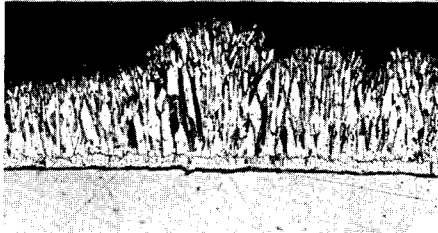
### Tabelle 1

#### Werkstoffanalysen

		Gehalte in %							Stahl
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	
Schrauben	10,9 4,6	0,41 0,145	0,31 <0,01	0,70 0,58	0,023 0,039	0,024 0,031	0,91 0,03	0,07 0,06	41 Cr4 UQSt 36-2
Muttern	10,9 4,6	0,455	0,30	0,69	0,015	0,028	0,12	—	C 45



**Bild 2**  
Eisen-Zink-Legierungsschichten ( $V = 500:1$ )  
(a) 10.9-Schraube  
(b) 4.6-Schraube



(a)

(b)

**Bild 3**  
Verteilung der Eisen-Zink-Legierungsschicht im Gewinde (10.9-Schraube,  $V = 50:1$ )



spitzen eine geringe Zinkauflage. Die mittlere Schichtdicke auf den übrigen Flächen der Schrauben und Muttern betrug  $70 \mu\text{m}$ .

### 3.2. Oberflächenzustand, Zinkschicht

Die verzinkten Schrauben zeigten nicht die bei verzinkten Teilen sonst übliche hellglänzende Oberfläche aus Reinzink mit sog. „Zinkblumen“. Bedingt durch das sofortige Abschleudern des flüssigen Zinks nach Entnahme der Schrauben aus dem Zinkbad entstanden nur Eisen-Zink-Legierungsschichten von mattglänzendem Aussehen (**Bilder 2a, b**), die nahezu vollständig aus der Delta-Phase (7...11% Fe, Rest Zn) bestehen. Die büschelartigen Ungleichmäßigkeiten der Schicht in Bild 2b gehen auf die etwas größere Oberflächenrauheit der 4.6-Schrauben zurück. In den Bildern 2a, b ist erkennbar, daß die Legierungsschicht nicht vollkommen zusammenhängend ist, sondern in unregelmäßigen Abständen „Trennungen“ aufweist, die durch die ganze Schicht bis zum Grundwerkstoff reichen. Es handelt sich hier offensichtlich um feine Risse in der Zinkschicht oder um die Korngrenzen größerer Dendriten. Für den Werkstoff St37 ist bekannt, daß dessen Dauerfestigkeit hierdurch nicht beeinflusst wird (vgl. M. Hempel, D. Horstmann in Stahl und Eisen 82 (1962) S. 1769/1781). Bei dem hochvergüteten Schraubenstahl 41Cr4 fehlen bisher entsprechende Untersuchungen im Zusammenhang mit der Feuerverzinkung über die Bedeutung solcher „Trennungen“ für die Dauerfestigkeit. Im Gewinde der Schrauben war die Eisen-Zink-Legierungsschicht relativ gleichmäßig verteilt (**Bild 3**). Das Gefüge des Grundwerkstoffs der Schrauben ist durch die Feuerverzinkung nicht erkennbar beeinflusst worden.

### 3.3. Kerbschlagbiegeversuche

Vor dem Verzinken sind aus den Schrauben Kerbschlagproben herausgearbeitet worden, die teilweise zugleich mit den Schrauben gebeizt und verzinkt wurden. Kerbschlagbiegeversuche an unbehandelten, an nur gebeizten sowie an gebeizten und verzinkten Proben bei Raumtemperatur und bei  $-60^\circ\text{C}$  ergaben keine signifikanten Unterschiede für die verschiedenen Oberflächenzustände (**Tabelle 2**).

### 3.4. Zugversuche

Jeweils 6 gleichartige Zugversuche wurden an unverzinkten Schraubenverbindungen mit normalem Gewindenspiel zwischen

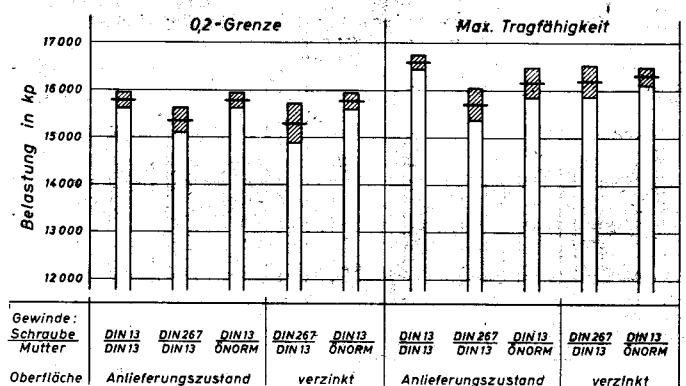
**Tabelle 2**  
Kerbschlagbiegeversuche

Festigkeitsklasse	Oberfläche	$a_k \pm s$ [kpm/cm <sup>2</sup> ]	
		+20°C	-60°C
10.9	Anlieferungszustand	$8,9 \pm 0,3$	$6,8 \pm 0,4$
	gebeizt	$9,1 \pm 0,6$	$6,8 \pm 0,5$
	verzinkt	$8,3 \pm 0,6$	$7,2 \pm 0,4$
4.6	Anlieferungszustand	$12,7 \pm 1,3$	$8,4 \pm 1,0$
	verzinkt	$12,4 \pm 0,9$	$8,7 \pm 0,6$

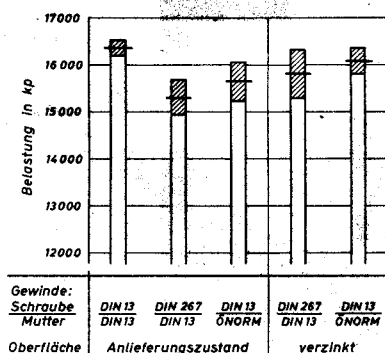
(Mittelwert  $a_k$  und Standardabweichung  $s$  aus je 6 Versuchen)

Schraube und Mutter sowie an Schraubenverbindungen mit vergrößertem Gewindenspiel (entsprechend DIN 267 bzw. ONORM) in unverzinktem und verzinktem Zustand durchgeführt. Bei Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 10.9/10 mit normalem Gewindenspiel trat der Bruch in der Regel im freien, belasteten Teil des Schraubenbolzens auf, während bei vergrößertem Gewindenspiel und dementsprechend kleinerer Flankenüberdeckung sowohl bei verzinkten als auch bei nicht verzinkten Schraubenverbindungen mit wenigen Ausnahmen die ineinandergreifenden Gewindegänge abgesichert wurden. Bei Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 4.6 ergaben sich in den Zugversuchen ausschließlich Bolzenbrüche.

Die 0,2-Grenze der Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 wird durch die Feuerverzinkung nicht merklich verändert (**Bild 4**). Sie liegt jedoch bei Schrauben mit Gewinde nach DIN 267 Blatt 10 etwas tiefer als bei Schrauben mit Gewinde nach DIN 13. Der Unterschied entspricht etwa der Differenz des Spannungsquerschnitts der beiden Gewindearten. Gegenüber Schraubenverbindungen mit normalem Gewindenspiel (DIN 13/DIN 13) ist infolge der für das Verzinken notwendigen Vergrößerung des Gewindespisls bei unverzinkten Schraubenverbindungen (Anlieferungszustand) die Tragfähigkeit herabgesetzt, und zwar bei Gewindenspiel nach DIN 267 um 5,4% und bei Gewindenspiel nach ONORM um 2,6%. Durch das Verzinken wird das Gewindenspiel verkleinert und damit die Flankenüberdeckung vergrößert. Infolgedessen ergibt sich eine Erhöhung der Tragfähigkeit um rd. 1% bis 3% gegenüber dem unverzinkten Zustand. Damit ist die Tragfähigkeit der feuerverzinkten HV-Verbindungen (Festigkeitsklasse 10.9) im Vergleich zu unverzinkten HV-Verbindungen mit normalem Gewindenspiel nur etwa 2% kleiner. Der Unterschied in der Tragfähigkeit feuerverzinkter HV-Verbindungen mit Gewinde nach ONORM ist im Vergleich zu



**Bild 4**  
Zugversuche mit 10.9-Schrauben (Mittelwerte und Standardabweichung)



**Bild 5**  
Gewindeverformung belasteter HV-Verbindungen  
(Mittelwerte und Standardabweichung)

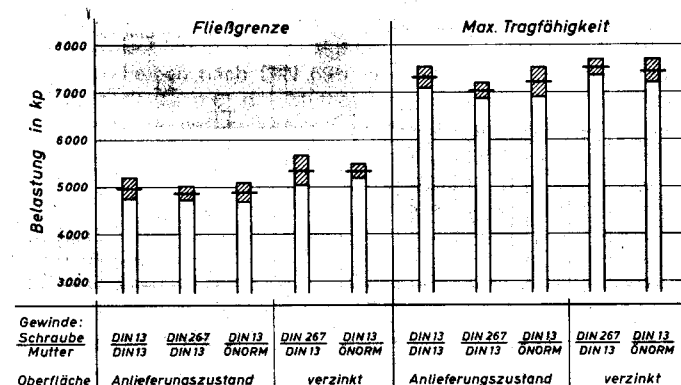
Verbindungen mit Gewinde nach DIN 267 unter Berücksichtigung der üblichen Streuung der Meßwerte unerheblich.

Der Einfluß der Zinkauflage auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten der Schraubenverbindung wird auch aus **Bild 5** deutlich. In diesem Bild ist die Belastung angegeben, bei welcher sich die Mutter auf dem Bolzensgewinde infolge plastischer Verformung der ineinandergreifenden Gewindegänge um 5% der Gewindesteigung verschoben hat. Der Abfall der Belastung bei 5% Mutterverschiebung ist bei unverzinkten Schrauben mit vergrößertem Gewindespiel gegenüber Schrauben mit normalem Gewindespiel relativ groß, wird aber durch die Zinkauflage zur Hälfte wieder kompensiert.

Die Fließgrenze von Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 (**Bild 6**) steigt durch die Feuerverzinkung etwas an, offensichtlich wegen der im Vergleich zum duktilen Schraubenwerkstoff relativ spröden Eisen-Zink-Legierungsschichten. Hinsichtlich der maximalen Tragfähigkeit verhalten sich Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 4.6 ähnlich denen der Festigkeitsklassen 10.9. Ersichtlich ist jedoch, daß die Tragfähigkeit durch das vergrößerte Gewindespiel prozentual weniger abfällt als bei Schrauben 10.9 und daß die Tragfähigkeit der verzinkten Schraubenverbindungen sogar geringfügig über der Tragfähigkeit der unverzinkten Schraubenverbindungen mit normalem Gewindespiel liegt. Der kleinere Einfluß des Gewindespiels ist auf die höhere Duktilität des Schrauben- und Mutterwerkstoffs und die dadurch bedingte gleichförmigere Lastverteilung im eingeschraubten Gewinde zurückzuführen. Zugleich wirkt sich hier, ebenso wie bei der Fließgrenze, die spröde Eisen-Zink-Legierungsschicht stärker aus als bei Schrauben hoher Festigkeit und geringerer Duktilität.

### 3.5. Anziehversuche

Schraubenverbindungen beider Gewindeformen (DIN 267, ÖNORM) und beider Festigkeitsklassen (10.9, 4.6) wurden un-



**Bild 6**  
Zugversuche mit 4.6-Schrauben (Mittelwerte und Standardabweichung)

(a)

Schraube Mutter

(b)

Schraube Mutter

**Bild 7**

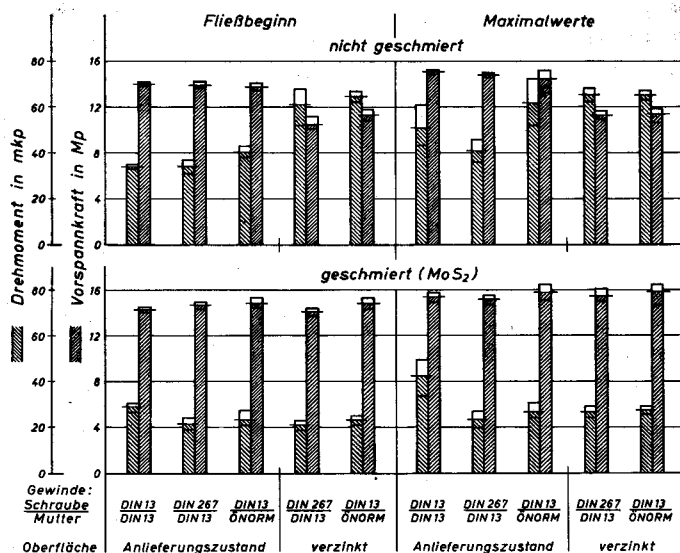
Zerstörung des Gewindes im Anziehversuch bei ungeschmierten HV-Verbindungen ( $V = 20:1$ )  
(a) normales Gewindespiel, Anlieferungszustand; (b) vergrößertes Gewindespiel, verzinkt

verzinkt und verzinkt sowohl im Anlieferungszustand (leicht geölt) als auch nach Schmierung mit  $\text{MoS}_2$  bis zum Bruch angezogen. Bei unverzinkten Schraubenverbindungen im Anlieferungszustand werden in der Regel die Gewinde abgesichert, während bei verzinkten Schraubenverbindungen die Gewinde fressen und der Bolzen im freien, belasteten Gewindeteil bricht. Die bis zum Bruch erreichte Vorspannkraft ist wesentlich geringer als bei unverzinkten Verbindungen (**Bilder 7, 8, 9**). Nach Schmierung mit  $\text{MoS}_2$  werden sowohl bei nicht verzinkten als auch bei verzinkten Schraubenverbindungen die Gewinde abgesichert. Die Unterschiede der maximal erreichten Vorspannkraft zwischen unverzinkten und verzinkten Verbindungen sind nur noch gering. Die Absolutwerte der maximalen Vorspannkraft liegen bei diesen Versuchsbedingungen unterhalb der im Zugversuch ermittelten maximalen Tragfähigkeit.

Insbesondere am Fließbeginn der 10.9-Schrauben (**Bild 8**) zeigt sich die Bedeutung einer hinreichenden Schmierung bei der Montage von feuerverzinkten Schrauben. Im ungeschmierten Zustand setzt das Fließen infolge der Überlagerung der Zug- und Torsionsspannungen merklich früher ein als im geschmierten Zustand. Dies wird durch die beträchtlichen Unterschiede bei den Drehmomenten ohne weiteres deutlich. Sowohl der Fließbeginn als auch die maximal erreichbare Vorspannkraft liegen bei verzinkten, ungeschmierten Schraubenverbindungen etwa 25% unterhalb der Werte für die unverzinkten Schraubenverbindungen mit normalem Gewindespiel. Im geschmierten Zustand jedoch ist keine entscheidende Differenz vorhanden. Für Schraubenverbindungen 4.6 (**Bild 9**) gilt das gleiche, jedoch ist dort der Einfluß der verschiedenen Gewindekombinationen stärker. Diese Ergebnisse zeigen deutlich die Notwendigkeit einer geeigneten Schmierung von feuerverzinkten Schrauben.

### 3.6. Dauerschwingversuche

Die Dauerhaltbarkeit der Schraubenverbindungen wurde statisch nach dem „Treppenstufenverfahren“ durch jeweils 15 Versuche bei konstanter Vorspannung ermittelt. Die Vorspannkraft betrug einheitlich für alle untersuchten Varianten 70% des genormten Mindestwertes der 0,2-Grenze (Fließgrenze) für die entsprechende Festigkeitsklasse, bezogen auf den theoretischen Spannungsquerschnitt. Die unterschiedliche Werkstoffbeanspruchung durch gleiche Vorspannkraft bei etwas verschiedenen Spannungsquerschnitten infolge der beiden Gewindetoleranzlagen ist vernachlässigbar, da bekannt ist, daß sich bei Schrauben der untersuchten Festigkeit die Vorspannung nicht oder nur unwesentlich auf die Dauerhaltbarkeit auswirkt. Die statistische Auswertung liefert den Mittelwert und die Standardabweichung der Dauerhaltbarkeit. Die **Bilder 10 und 11** zeigen die Versuchsergebnisse. Der Mittelwert der Dauerhaltbarkeit ist jeweils angegeben, der Bereich der Standardabweichung ist schraffiert. Die Dauerhaltbarkeit von Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 10.9 wurde bei 3 Oberflächenzuständen ermittelt. Gebeizte Schraubenverbindungen wurden untersucht, um den Einfluß einer möglichen Wasserstoffversprödung getrennt von der Auswirkung der Zinkschicht zu erfassen. Die Dauerschwingversuche geben jedoch keinen Hinweis auf eine derartige Versprödung. Die Dauerhaltbarkeit der gebeizten Schrauben liegt sogar etwas über der Dauerhaltbarkeit der un-



**Bild 8**  
Anziehversuche mit 10.9-Schrauben (Mittelwerte und Streubreite)

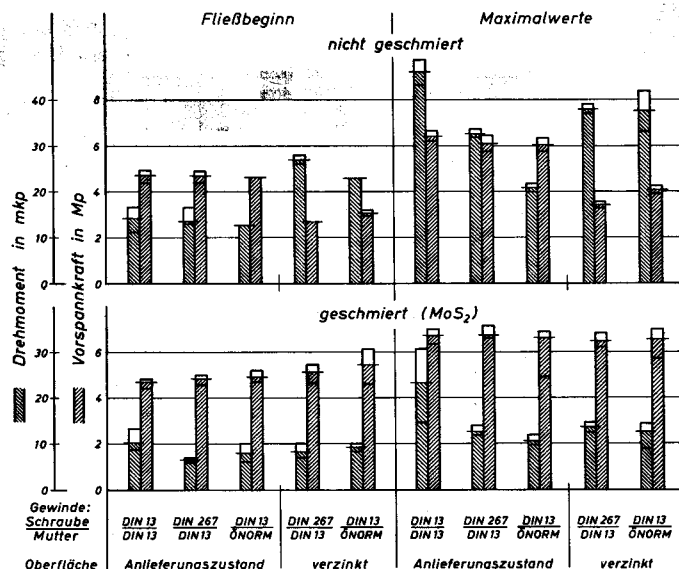
behandelten Schrauben (Anlieferungszustand), zugleich ist allerdings auch die Streuung beträchtlich größer. Es wird angenommen, daß dieser leichte Anstieg der Dauerhaltbarkeit auf das Abbeizen des Zunders von der Oberfläche zurückgeht, der sich wegen seiner Sprödigkeit ungünstig auswirken kann. Die größere Streuung der Meßwerte ist durch die Zunahme der Oberflächenrauheit infolge des Beizens (Beizgruben) bedingt.

Gegenüber dem Anlieferungszustand fällt die Dauerhaltbarkeit der verzinkten Schraubenverbindungen um 13% bis 19% ab. Dieser Abfall kann durch den Einfluß der Zinkschicht begründet werden. Zusätzlich zu den schon vorhandenen Fehlstellen in der spröden Eisen-Zink-Legierungsschicht (Bild 2) können weitere Schädigungen (Risse) in dieser Schicht beim Vorspannen oder während der Wechselbeanspruchung insbesondere unmittelbar im Gewindegrund auftreten, weil dort der Werkstoff durch Kerbwirkung des Gewindes in der Regel über die Fließgrenze hinaus beansprucht wird. Diese örtliche plastische Verformung ist bei duktilem Schraubenwerkstoff zwar im allgemeinen unschädlich, kann sich jedoch bei den feuerverzinkten Schrauben wegen der Sprödigkeit der Legierungsschicht ungünstig auswirken.

Schraubenverbindungen der Klasse 4.6 zeigen ein ähnliches Verhalten wie die der Klasse 10.9. Gegenüber dem Anlieferungszustand liegt die Dauerhaltbarkeit der feuerverzinkten Schrauben um 12% bis 15% tiefer. Dieser Abfall ist ebenfalls durch die oben genannten Ursachen bedingt. Die Unterschiede zwischen den beiden Gewindekombinationen gehen wahrscheinlich auf den Einfluß der Gewindetoleranzen zurück.

### 3.7. Vorspannkraftabfall unter schwingender Beanspruchung

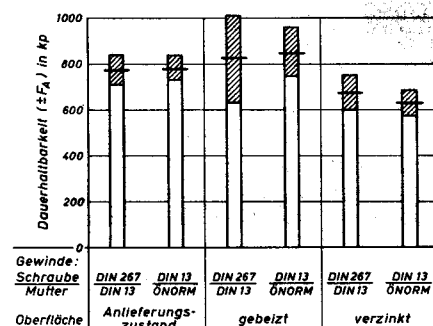
Es wurde angenommen, daß bei feuerverzinkten HV-Verbindungen der Abfall der anfangs eingebrachten Vorspannkraft durch Setzerscheinungen in den kräfteübertragenden Flächen (Auflage, Gewinde) insbesondere unter schwingender Beanspruchung wesentlich größer ist als bei unverzinkten Verbindungen. Zur Überprüfung dieser Annahme sind einige Versuche durchgeführt worden. Unverzinkte und verzinkte HV-Verbindungen (mit je einer Unterlegscheibe unter Kopf und Mutter) wurden in einer Kraftmeßdose durch Anziehen der Mutter ebenso stark vorgespannt wie für die Dauerschwingversuche (s. Abschnitt 3.6.). Über die Meßdose ist unter Berücksichtigung ihrer Steifigkeit eine schwingende Beanspruchung in die Schraubenverbindung eingeleitet worden. Die Beanspruchung war so gewählt, daß sie etwas unter der Dauerhaltbarkeit feuerverzinkter 10.9-Schrauben lag (s. Bild 10), um Dauerbrüche der Schrauben in der Meßdose zu vermeiden. Der Abfall der Vorspannkraft infolge der schwingenden Beanspruchung konnte über die Meßdose bestimmt werden. **Bild 12** zeigt die Versuchsergebnisse (Mittelwert und Streubreite aus je 4 gleichartigen Versuchen).



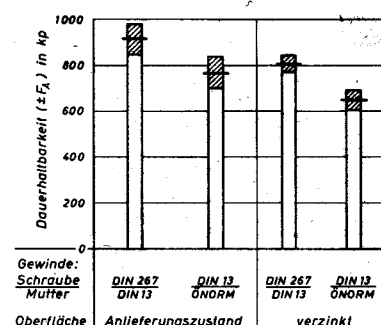
**Bild 9**  
Anziehversuche mit 4.6-Schrauben (Mittelwerte und Streubreite)

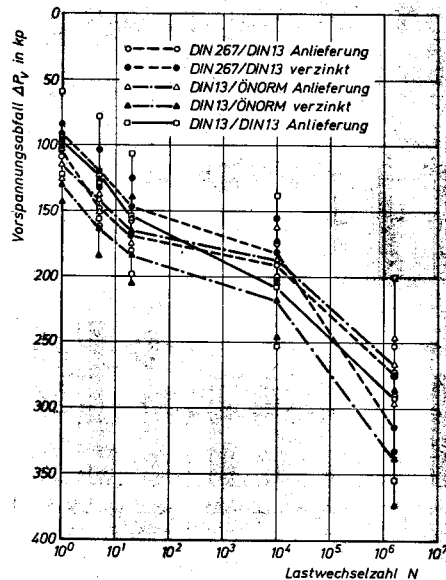
Während des ersten Lastwechsels fällt die Vorspannung um den größten Betrag ab. Durch die folgenden 10<sup>6</sup> Lastwechsel wird der Abfall nur etwa verdreifacht. Signifikante Unterschiede für die verschiedenen Gewindepaarungen und Oberflächenzustände sind wegen der relativ großen Streuung der Meßwerte nicht festzustellen. Lediglich für große Lastwechselzahlen zeigt sich ein etwas stärkerer Vorspannkraftabfall bei den verzinkten HV-Verbindungen. Die geringen Unterschiede zwischen unverzinkten und verzinkten Schraubenverbindungen sind darauf zurückzuführen, daß sich bei den verzinkten Schrauben nur eine harte und spröde Eisen-Zink-Legierungsschicht gebildet hat, jedoch keine weiche Reinzinkauflage (s. oben), die wahrscheinlich zu größeren Setzträgen und damit einem größeren Vorspannkraftabfall geführt hätte. Unterschiedliche Oberflächenrauheiten der unverzinkten und verzinkten Schraubenverbindungen haben sich ebenfalls kaum auf

**Bild 10**  
Dauerhaltbarkeit von 10.9-Schrauben (Mittelwerte und Standardabweichung)



**Bild 11**  
Dauerhaltbarkeit von 4.6-Schrauben (Mittelwerte und Standardabweichung)





**Bild 12**

Abfall der Vorspannkraft von HV-Verbindungen unter schwingender Beanspruchung (Mittelwerte und Streubreite)

den gemessenen Abfall der Vorspannkraft auswirken können, da sie bereits beim Anziehen weitgehend eingeebnet und kompensiert wurden. Die unter praxisnahen Bedingungen gewonnenen Versuchsergebnisse deuten darauf hin, daß bei feuerverzinkten HV-Verbindungen nicht mit einem wesentlich größeren Abfall der Vorspannkraft zu rechnen ist als bei unverzinkten HV-Verbindungen.

#### 4. Zusammenfassung

Zur Klärung der Frage, ob durch Feuerverzinken die mechanischen Eigenschaften von HV-Schrauben (Festigkeitsklasse 10.9) beeinflußt werden, sind Untersuchungen an Schraubenverbindungen M 16 DIN 6914, 6915 und 6916 durchgeführt worden. Das zum Aufbringen der Zinkschicht erforderliche Gewindenspiel zwischen Schrauben- und Muttergewinde wurde durch zwei verschiedene Gewindekombinationen erreicht: durch vergrößertes Abmaß am Bolzensgewinde (nach Entwurf DIN 267 Blatt 10) und durch ein entsprechendes Abmaß am Muttergewinde (ähnlich ÖNORM E 4015). Vergleichende Untersuchungen an unverzinkten und verzinkten Schraubenverbindungen führten zu folgenden Ergebnissen: Die Kerbschlagzähigkeit ist durch das Feuerverzinken nicht abgefallen. Die maximale Tragfähigkeit feuerverzinkter HV-Verbindungen wird durch das für die Feuerverzinkung erforderliche vergrößerte Gewindenspiel nur um etwa 2% gegenüber gleichartigen Schraubenverbindungen mit normalem Gewindenspiel herabgesetzt. Die Unterschiede in der Tragfähigkeit von Schraubenverbindungen mit Gewindenspiel nach Entwurf DIN 267 Blatt 10 und nach ÖNORM sind unerheblich. Eine geeignete Schmierung zur Montage von feuerverzinkten HV-Schrauben ist erforderlich, da sonst nur etwa 75% der Vorspannkraft einer unverzinkten Verbindung erreicht werden. Die Dauerhaltbarkeit feuerverzinkter HV-Schrauben 10.9 liegt etwa 16% niedriger als die unverzinkter HV-Schrauben. Unter schwingender Beanspruchung ist der Abfall der Vorspannkraft bei feuerverzinkten HV-Verbindungen nicht wesentlich größer als bei unverzinkten Verbindungen. Das Verhalten von feuerverzinkten Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 ist sehr ähnlich dem der HV-Schrauben.

#### Schrifttum

1. Bablik, H., und Krystof, J.: Feuerverzinkte hochfeste Schrauben. Industrie-Anzeiger 80 (1958) 15, S. 17/18.
2. Divine, J. R.; Chesson, E., und Munse, W. H.: Static and dynamic properties of bolted galvanized structures. University of Illinois, Annual Report, April 1966.
3. Birkemoe, P. C.; Couch, W. D., und Munse, W. H.: Design criteria for joining galvanized structurals. University of Illinois, Annual Report, April 1969.
4. Ritchie, J. G.: Einsatz feuerverzinkter HV-Schrauben bei Stahlkonstruktionen in Australien. Draht 22 (1971) 4, S. 204/210.