

Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben

Von H. Wiegand und W. Thomala

Sonderdruck aus DRAHTWELT 59 (1973) Nr. 12, Fachteil

Schrauben Muttern Formteile, S. 542–551

Vogel-Verlag Würzburg – Düsseldorf, 4 Düsseldorf 1, Talstraße 32a

Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben

Von H. Wiegand und W. Thomala*)

Anschließend an frühere Arbeiten [5] wurden Untersuchungen an unverzinkten und verzinkten HV-Schraubenverbindungen M 30 x 160, DIN 6914, 6915 und 6916, durchgeführt, um den Einfluß der beim Feuerverzinken sowie beim galvanischen Verzinken aufgetragenen Zinkschicht auf die mechanischen Eigenschaften der Schrauben bei zügiger und wechselnder Beanspruchung zu erfassen. Über die Ergebnisse wird berichtet.

1. Einführung

Die Feuerverzinkung ist nicht nur ein kostengünstiger, sondern auch ein wirksamer Korrosionsschutz. Im allgemeinen ist die Schutzwirkung um so besser, je dicker die Zinkschicht ist, die beim Feuerverzinken rd. 40 bis 100 µm beträgt. Galvanisch aufgetragene Zinkschichten haben dagegen nur eine Dicke von rd. 3 bis 10 µm. Der durch das Eintauchen in die Zinkschmelze aufgetragene Überzug haftet an der Oberfläche durch die Bildung von Eisen-Zink-Legierungsschichten.

Seit Jahren werden Bauteile unterschiedlichster Art und Beanspruchung feuerverzinkt, obwohl über die Wirkung des Verzinkens auf die mechanischen Eigenschaften mitunter keine ausreichenden Erfahrungen vorliegen. Bei Schrauben niedriger Festigkeit (unterhalb 10,9) wird die Feuerverzinkung mit Erfolg angewendet. Ein negativer Einfluß der Zinkschicht auf die mechanischen Eigenschaften der Schrauben wurde nicht bekannt.

Bedenken wegen möglicher ungünstiger Auswirkungen verhinderten bisher oftmals den Einsatz feuerverzinkter HV-Schrauben. Es wurde befürchtet, daß die Tragfähigkeit gegenüber zügigen und wechselnden Kräften sowie das Anziehverhalten durch das Feuerverzinken beeinflusst werden könnten. Gründe dafür könnten sein: Versprödung des Werkstoffs durch die Verfahrenstechnik, Veränderung des Reibbeiwertes, größere Setzneigung durch die Zinkauflage und damit Veränderung der Vorspannung.

Entgegen einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1958 [1], aus der hervorgeht, daß sich Festigkeit und Zähigkeit hochfester Schrauben durch das Feuerverzinken nicht wesentlich verändern, zeigen amerikanische Untersuchungen [2, 3] an 3/4"-Stahlbauschrauben (Festigkeit 900 bis 1150 N/mm², Zinkschichtdicke rd. 100 µm) vor allem im Anziehversuch einen Abfall von Festigkeit, Dehnung und Brucheinschnürung durch das Feuerverzinken.

Nach den amerikanischen und australischen Untersuchungen [4] ist der Reibbeiwert bei verzinkten Schrauben zu Be-

ginn des Anziehens kleiner als bei unverzinkten Schrauben. Er vergrößert sich mit zunehmender Flächenpressung durch Freßerscheinungen, so daß der Bruch aufgrund der überlagerten Torsionsspannungen bei kleineren Zugkräften eintritt.

Vor zwei Jahren wurden am Institut für Werkstoffkunde der TH Darmstadt ebenfalls Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben M 16 x 120 – DIN 6914 – durchgeführt [5]. Die Versuche zeigten, daß vor allem folgende Punkte bei feuerverzinkten hochfesten Schraubenverbindungen beachtet werden müssen:

- 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 vermindern.
- Für die Montage der verzinkten Schrauben ist eine geeignete Schmierung der Gewinde notwendig, um ausreichend hohe Vorspannungen erzielen zu können.
- Die Dauerhaltbarkeit der untersuchten feuerverzinkten HV-Verbindungen 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.

Die bisherigen Untersuchungen an der TH Darmstadt waren auf HV-Schraubenverbindungen M 16, DIN 6914, aus dem Stahl 41 Cr 4 beschränkt. Zusätzliche Versuche an HV-Schrauben M 30, DIN 6914, wurden durchgeführt, weil bei diesen Abmessungen ein höher legierter Stahl (42 CrMo 4) verwendet wird, bei dem aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung ein anderer Aufbau der Eisen-Zink-Legierungsschicht zu erwarten ist.

Tafel 1: Chemische Analyse von Schrauben- und Mutterwerkstoff

	C	Si	Mn	P	S	Gehalte in %				Stahl nach DIN 17200
						Cr	Ni	Mo		
Schrauben	10,9	0,415	0,275	0,61	0,009	0,027	1,01	0,11	0,20	42 CrMo 4
Muttern	10	0,442	0,33	0,68	0,007	0,033	0,024	0,03	Spuren	C 45

Untersucht werden sollte weiterhin, mit welcher Dauerhaltbarkeit bei feuerverzinkten HV-Schrauben größerer Durchmesser gerechnet werden kann. Es ist bekannt, daß die Dauerhaltbarkeit von Schrauben mit größer werdendem Durchmesser wegen erhöhter Kerbwirkung abnimmt [6].

Schließlich sollten Setzmessungen Aufschluß darüber geben, inwieweit bei schwingender Beanspruchung der Vorspannungsabfall von der Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst wird.

*) Em. Prof. Dr.-Ing. H. Wiegand und Dipl.-Ing. W. Thomala, Institut für Werkstoffkunde der TH Darmstadt.

Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben

Neben nicht oberflächenbehandelten und feuerverzinkten HV-Schrauben wurden zusätzlich galvanisch verzinkte (saures und alkalisches Bad) HV-Verbindungen in das Versuchsprogramm mit aufgenommen, um u. a. den Einfluß des Beizvorgangs vor dem Verzinken auf die mechanischen Eigenschaften der Verbindung zu erfassen.

2. Versuchsstücke (Anforderungen, Herstellung)

Die Untersuchungen wurden mit HV-Schrauben M 30 x 160, DIN 6914, Festigkeitsklasse 10.9, aus dem Stahl 42 CrMo 4, Muttern M 30, DIN 6915, Festigkeitsklasse 10, aus C 45 und Scheiben nach DIN 6916 durchgeführt*). In *Tafel 1* werden die Ergebnisse der chemischen Analyse von Bolzen- und Mutterwerkstoff wiedergegeben.

*) Die Versuchsstücke wurden von der Peiner Maschinen- und Schraubenwerke AG zur Verfügung gestellt.

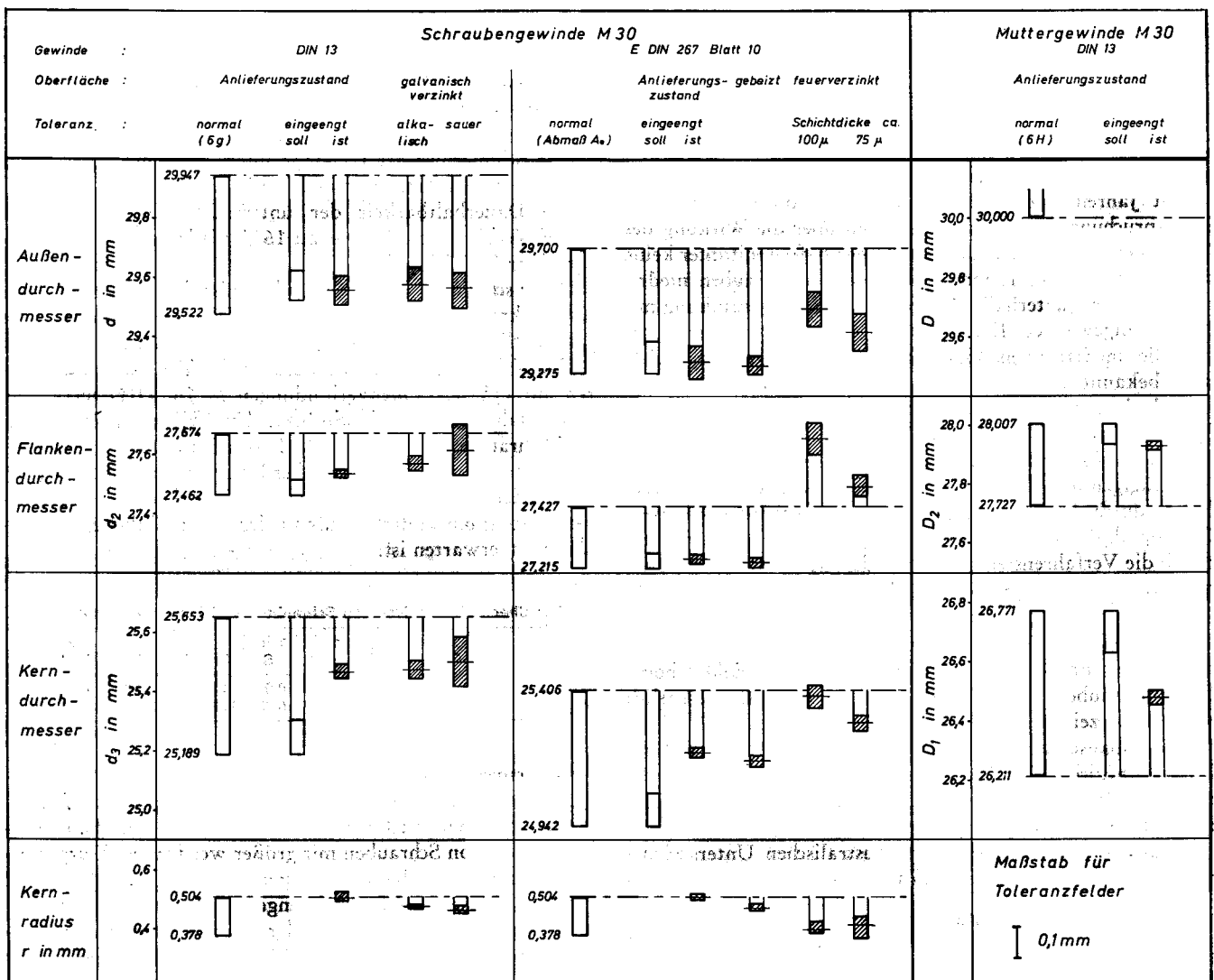
Der Einfluß von Werkstoff, Herstellung und Wärmebehandlung wurde dadurch konstant gehalten, daß die Schrauben und Muttern aus einer Werkstoffcharge in einem Los gefertigt und zusammen wärmebehandelt wurden. Die Gewindetoleranzen wurden eingengt. Damit war sichergestellt, daß allein der Einfluß der Verzinkung auf die mechanischen Eigenschaften der HV-Verbindungen ermittelt werden konnte.

Die Schraubenbolzen wurden in fünf Arbeitsgängen gefertigt:

1. Warmstauchen,
2. Abgraten, Sandstrahlen und Kuppen,
3. Schaben und Schleifen des Reduzierteils,
4. Gewindewalzen,
5. Vergüten (Austenitisierungstemperatur 840 bis 860 °C, Haltezeit 15 min, 45 min Anlassen bei 580 °C).

Die Arbeitsgänge der Verzinkung enthält *Tafel 2*.

Bild 1: Toleranzfelder und Gewindemaße



3. Durchgeführte Versuche

3.1. Gewindemessung, Zinkschichtdicke

Es wurden Schraubenbolzen untersucht mit Gewinde nach DIN 13, Toleranzfeld 6g (Toleranzklasse mittel) und Gewinde nach Entwurf DIN 267, Blatt 10, Toleranzqualität 6 (mittel) mit dem Grundmaß $A_0 = 300 \mu\text{m}$. Die Muttergewinde wurden einheitlich nach DIN 13, Toleranzfeld 6H, geschnitten.

Die Toleranzfelder der Gewindemaße wurden auf etwa $1/3$ der genormten Breite eingeengt, um den Einfluß der Gewindetoleranzen annähernd konstant zu halten. Das verbleibende Toleranzfeld wurde beim Bolzensgewinde zum Kleinstmaß und beim Muttergewinde zum Größtmaß hin gelegt, um das Verhalten der Schraubenverbindungen bei möglichst ungünstiger kleiner Flankenüberdeckung zu prüfen (Gewindemaße in Bild 1).

Um den Einfluß der Dicke der bei der Feuerverzinkung entstehenden Eisen-Zink-Legierungsschicht auf das Verhalten von Schraubenverbindungen unter statischer und dynamischer Beanspruchung zu erfassen, wurden zwei Serien getrennt voneinander feuerverzinkt, wobei durch unterschiedliche Dauer des Tauchvorgangs beim Verzinken zwei verschiedene dicke Zinkauflagen angestrebt wurden, die im weiteren der Einfachheit halber mit „75 μm “ und „100 μm “ bezeichnet werden.

Die Muttergewinde wurden nach dem Feuerverzinken geschnitten.

Tafel 2: Arbeitsgänge bei der Verzinkung der Schraubenbolzen

Feuerverzinkung	Galvanische Verzinkung	
	Alkalisches Bad	Saures Bad
1. In Trichloräthylen entfetten und spülen	1. In Tri bei ca. 90 °C 1 min lang entfetten und spülen	1. Sparbeizen und in Tri bei ca. 90 °C 1 min lang entfetten und spülen
2. Beizen in 8 bis 9% HCl bei Raumtemperatur ca. 2½ h ohne Inhibitor	2. Beizen mit 12 % HCl bei Raumtemperatur ca. 30 min ohne Inhibitor	2. Beizen mit 12 % HCl bei Raumtemperatur ca. 30 min ohne Inhibitor
3. Heiß spülen	3. Zweimal kalt spülen	3. Zweimal kalt spülen
4. Tauchen in Flußmittel (Zink-Ammonium-Chlorid)	4. Elektrolytisch entfetten (anodisch)	4. Elektrolytisch entfetten (anodisch)
5. Trocknen	5. Spülen	5. Spülen
6. Tauchen im Zinkbad ca. 1. min lang bei einer Badtemperatur von 470 °C	6. Ca. 20 min im alkalischen Zinkbad bei Raumtemperatur verzinken	6. Ca. 20 min im sauren Zinkbad bei Raumtemperatur verzinken ($i = 5 \text{ A/dm}^2$ mit Badbewegung)
7. Abschleudern	7. Spülen	7. Spülen
8. Abschrecken in heißem Wasser (80 °C)	8. Gelbchromatieren	8. 2 h bei 200 °C entgasen
	9. 2 h bei 200 °C entgasen	

3.2. Oberflächenzustand, Zinkschicht

Im Gegensatz zu galvanisch aufgetragenen Zinkschichten, die durch atomare Bindungskräfte auf dem Stahluntergrund haften, geschieht die Bindung der Feuerverzinkungsschicht auf der Unterlage durch Eisen-Zink-Legierungen unterschiedlicher Konzentration (Bild 2). Die Grenzen zwischen den einzelnen Phasen sind hier zu erkennen. Dabei weist die Eisen-Zink-Legierungsschicht stellenweise feine Risse auf, die bis zum Grundwerkstoff reichen.

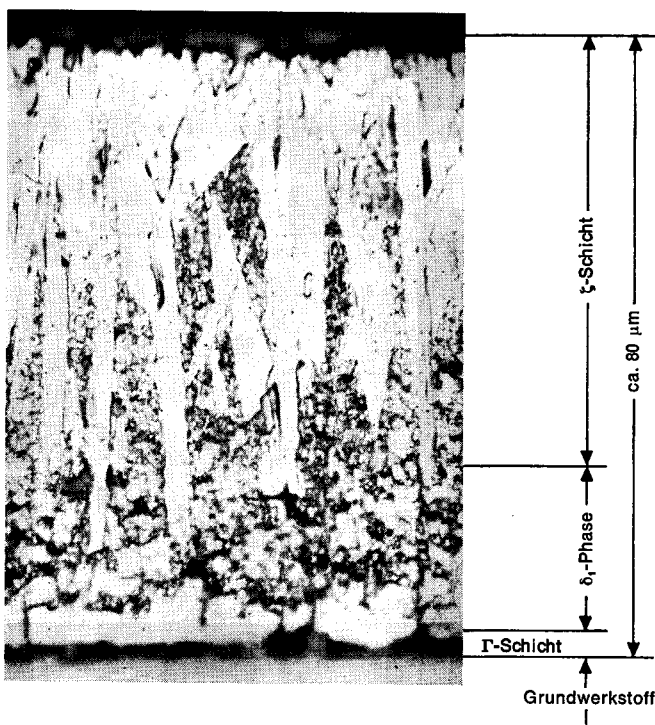
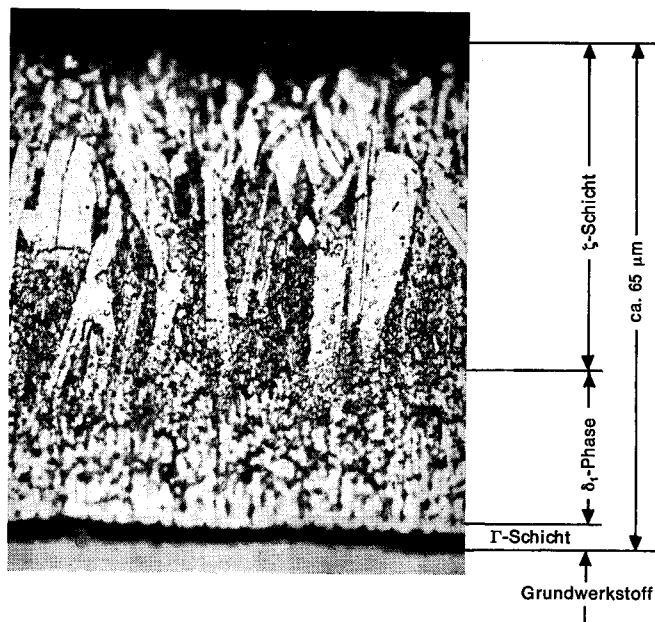


Bild 2: Aufbau der Eisen-Zink-Legierungsschicht. HV-Schraube M 30 x 160. Oben: mittlere Schichtdicke 75 μm ; unten: mittlere Schichtdicke 100 μm ; V = 1000:1

3.3. Kerbschlagbiegeversuche

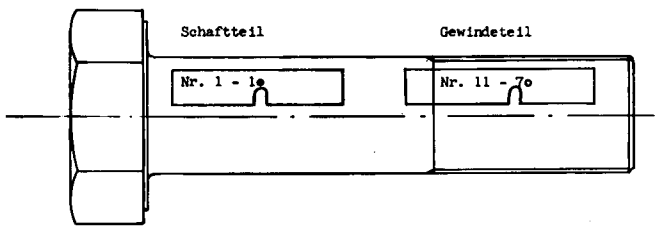
Zur Ermittlung der Kerbschlagzähigkeit unter Berücksichtigung unterschiedlicher Oberflächenzustände wurden aus einigen Schrauben nach Tafel 3 ISO-Rundkerbproben herausgearbeitet, die anschließend der gleichen Oberflächenbehandlung wie die Schrauben in Tafel 2 unterworfen wurden. Die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche in Tafel 3 zeigen, daß

Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben

Tafel 3: Ergebnisse der Kerbschlagversuche (Probenform: ISO-Rundkerbproben, Temperatur: Raumtemperatur (20 bis 25 °C) und - 60 °C)

Oberflächenbehandlung und Probenentnahme	Lfd. Nr.	Temp. (°C)	ak (Joule) $\bar{x} \pm S^*$
unverzinkt (Schaftteil)	1...10	RT	79,45 \pm 5,95
unverzinkt (Gewindeteil)	51...60	RT	75,80 \pm 4,00
feuerverzinkt (Gewindeteil)	11...20	RT	79,00 \pm 3,55
galvanisch verzinkt (Gewindeteil)	31...40	RT	78,70 \pm 4,40
unverzinkt (Gewindeteil)	61...70	- 60	61,30 \pm 8,15
feuerverzinkt (Gewindeteil)	21...30	- 60	64,60 \pm 7,10
galvanisch verzinkt (Gewindeteil)	41...50	- 60	65,30 \pm 5,70

Probenentnahme



*) \bar{x} = Mittelwert aus zehn Versuchen, S = Standardabweichung

die Kerbschlagzähigkeit bei - 60 °C gegenüber Raumtemperatur um etwa 18 % absinkt. Für die Proben mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung sind unter gleichen Temperaturbedingungen keine nennenswerten Unterschiede festzustellen.

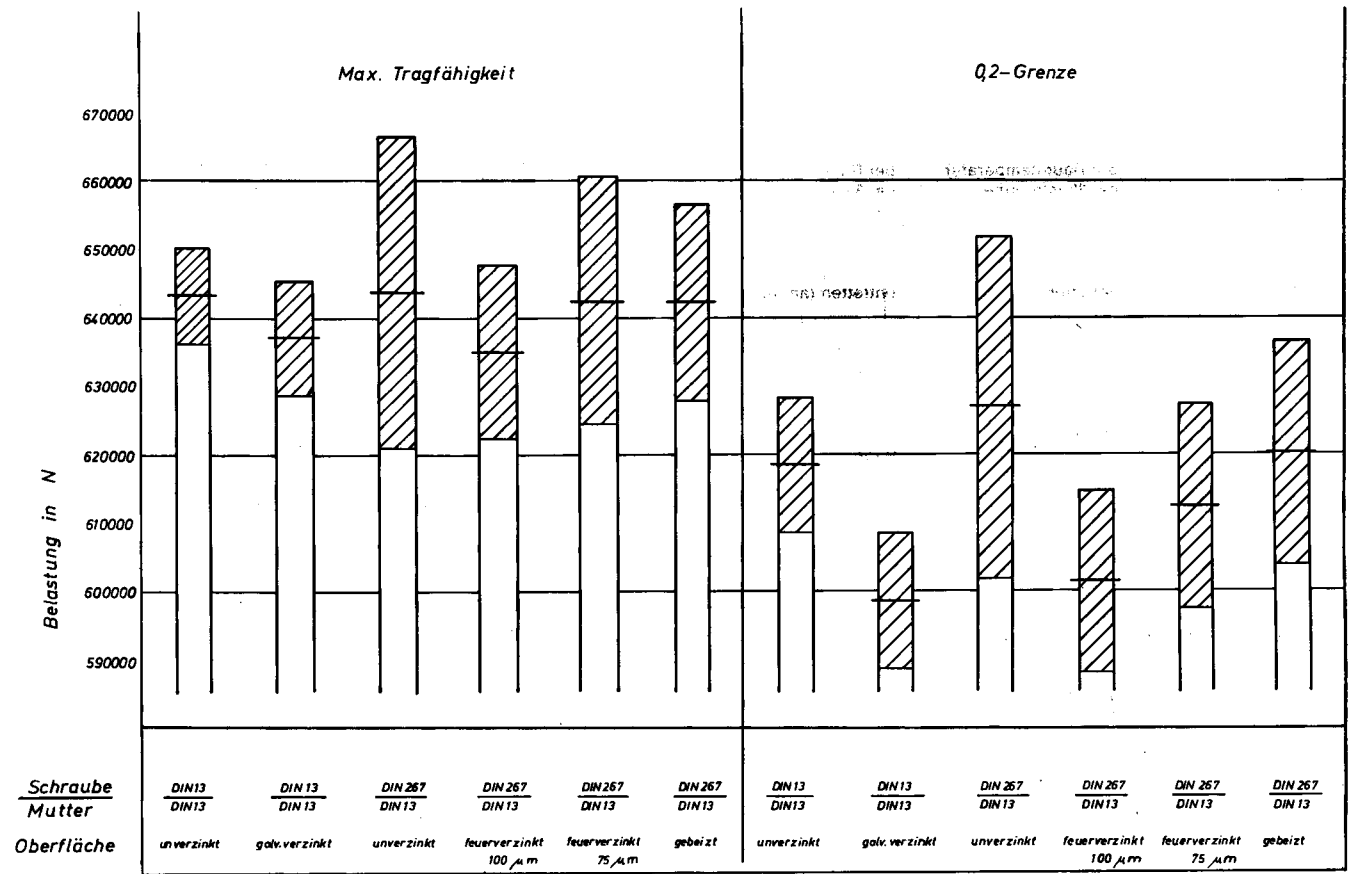
3.4. Zugversuche

Die Zugversuche wurden an Ganzschrauben und an abgedrehten Zugproben nach DIN 267, Blatt 3, durchgeführt, um neben Zugfestigkeit und Streckgrenze bzw. 0,2-Dehngrenze Angaben über Bruchdehnung und Brucheinschnürung machen zu können.

Die Ergebnisse lassen erkennen, daß Zugfestigkeit und 0,2-Dehngrenze (bezogen auf den Nennspannungsquerschnitt) bei den Ganzschrauben höher liegen als bei den glatten Zugproben.

Die Versuchsergebnisse in Bild 3 weisen darauf hin, daß maximale Tragfähigkeit und 0,2-Grenze der Schrauben mit Gewinde nach DIN 267, Blatt 10, nicht kleiner sind als die der Schrauben mit Gewinde nach DIN 13, obwohl der errechnete mittlere Spannungsquerschnitt der Gewinde nach DIN 13 mit 552 mm² um etwa 2 % größer ist als der des Gewindes nach DIN 267, Blatt 10 (540 mm²). Der Grund dafür, daß die Ergebnisse der Zugversuche mit Schrauben unterschiedlicher Gewindetoleranzen keine nennenswerten Unterschiede zeigen und die Versuche an Ganzschrauben höhere Werte ergeben als an abgedrehten Proben, liegt darin, daß die Schrauben, bei denen Bolzenbrüche auftraten, nicht im freien belasteten Gewindeteil brachen, sondern wegen der verschärften Kerbwirkung im Gewindeauslauf, hervorgerufen durch die herstellungsbedingte Gestaltung des Gewindeauslaufs. Deshalb ist es eigentlich nicht zulässig, die im Zugver-

Bild 3: Zugversuche mit HV-Schrauben M 30 x 160, DIN 6914—10.9 (Mittelwerte aus zehn Versuchen und Standardabweichung)



Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben

sich an Ganzschrauben ermittelten Werte auf den Spannungsquerschnitt des Gewindes zu beziehen. Geeigneter wäre in diesem Falle ein dem Querschnitt des Gewindeauslaufs zugeordneter fiktiver Querschnitt.

Nur bei den unbehandelten Schrauben mit Gewinde nach DIN 13 traten ausschließlich Bolzenbrüche auf.

Bei den anderen Gewindepaarungen und Oberflächenzuständen wurden neben Bolzenbrüchen auch Brüche festgestellt, bei denen das Bolzengewinde abgestreift wurde.

Eine wesentliche Änderung der Zugfestigkeit und der auf die Klemmlänge bezogenen 0,2-Dehngrenze durch das Feuerverzinken und der damit verbundenen Vergrößerung der Flankenüberdeckung ist nicht zu erkennen. Das bedeutet, daß die Zinkschicht die Tragfähigkeit bei zügiger Beanspruchung der Schraubenverbindung nicht beeinflußt.

3.5. Anziehversuche

Je zehn Schraubenverbindungen beider Gewindeformen (DIN 13 und DIN 267, Blatt 10) wurden unverzinkt und verzinkt, sowohl ungeschmiert (entfettet) wie mit MoS₂ (Molybdädisulfidpaste) geschmiert, bis zum Bruch angezogen.

Zwischen dem Anziehmoment M_A und der Vorspannkraft F_V besteht die mathematische Beziehung:

$$M_A = F_V \left[\frac{d_2}{2} \cdot \tan(\varphi + \varphi') + \frac{D_{km}}{2} \cdot \tan \varrho \right] \quad (1)$$

Daraus abgeleitet ergibt sich:

$$M_A = F_V \left[0,159 \cdot P + 0,578 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{km}}{2} \cdot \mu_K \right] \quad (2)$$

Hierin bedeuten:

- d_2 = Gewinde-Flankendurchmesser,
- D_{km} = mittlerer Reibungsdurchmesser der Kopf- bzw. Mutterauflage,
- F_V = Vorspannkraft,
- M_A = Anziehmoment,
- M_G = Gewindeanteil des Anziehmomentes,
- M_K = Kopf- bzw. Mutterauflageanteil des Anziehmomentes,
- P = Gewindesteigung,
- μ_G = Gewindereibbeiwert,
- μ_K = Kopf- bzw. Mutterauflagereibbeiwert,
- φ = Reibungswinkel = $\arctan \mu$,
- φ' = Steigungswinkel des Gewindes.

Unter der Voraussetzung gleicher Schraubenabmessungen und unter der vereinfachenden Annahme, daß $\mu_G = \mu_K = \mu$ sei, läßt sich Gleichung (2) wie folgt schreiben:

$$M_A = F_V [C_1 + \mu \cdot C_2] \quad (3)$$

oder
$$\frac{M_A}{F_V} = C_1 + C_2 \cdot \mu$$

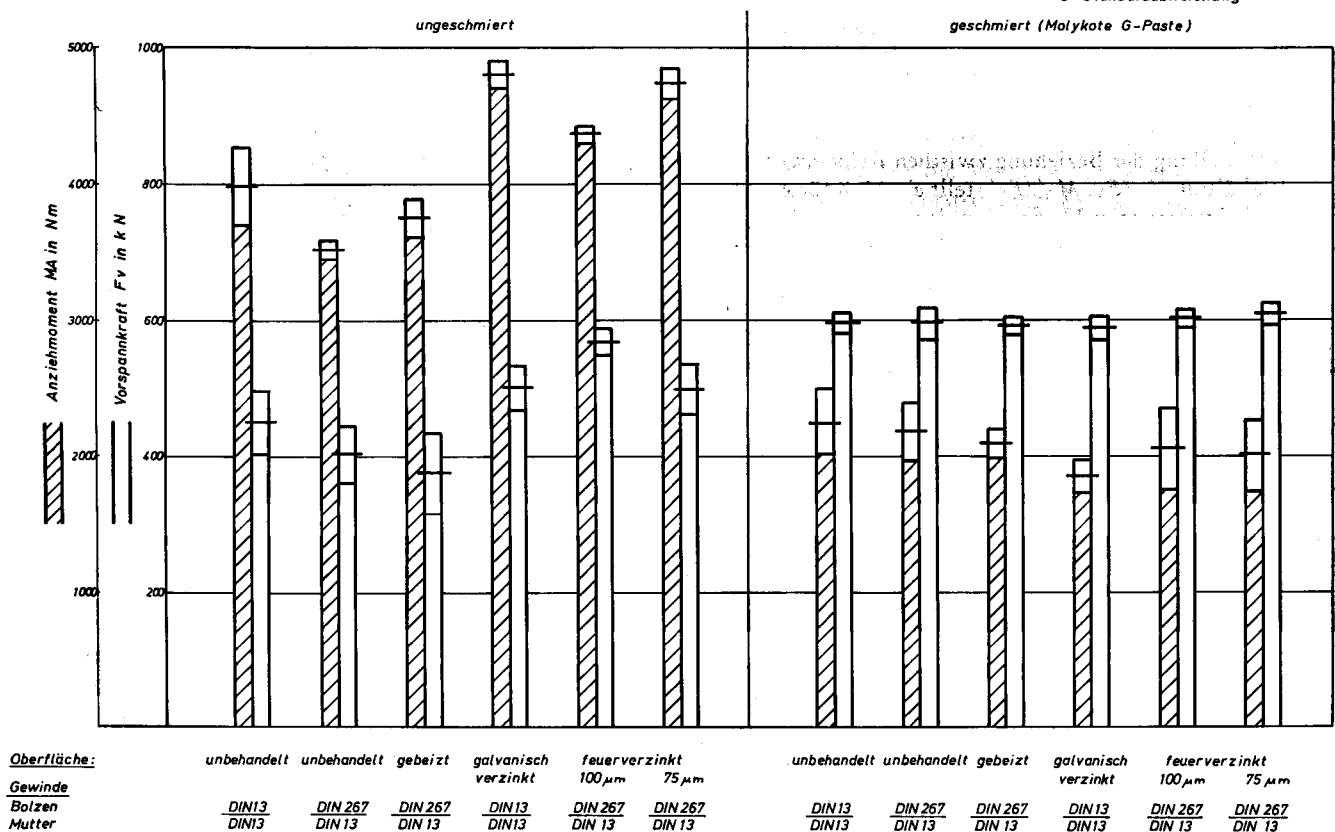
Daraus ergibt sich

$$\frac{M_A}{F_V} \sim \mu \quad (4)$$

Bild 4: Anziehversuche an HV-Schrauben M 30 x 160, DIN 6914

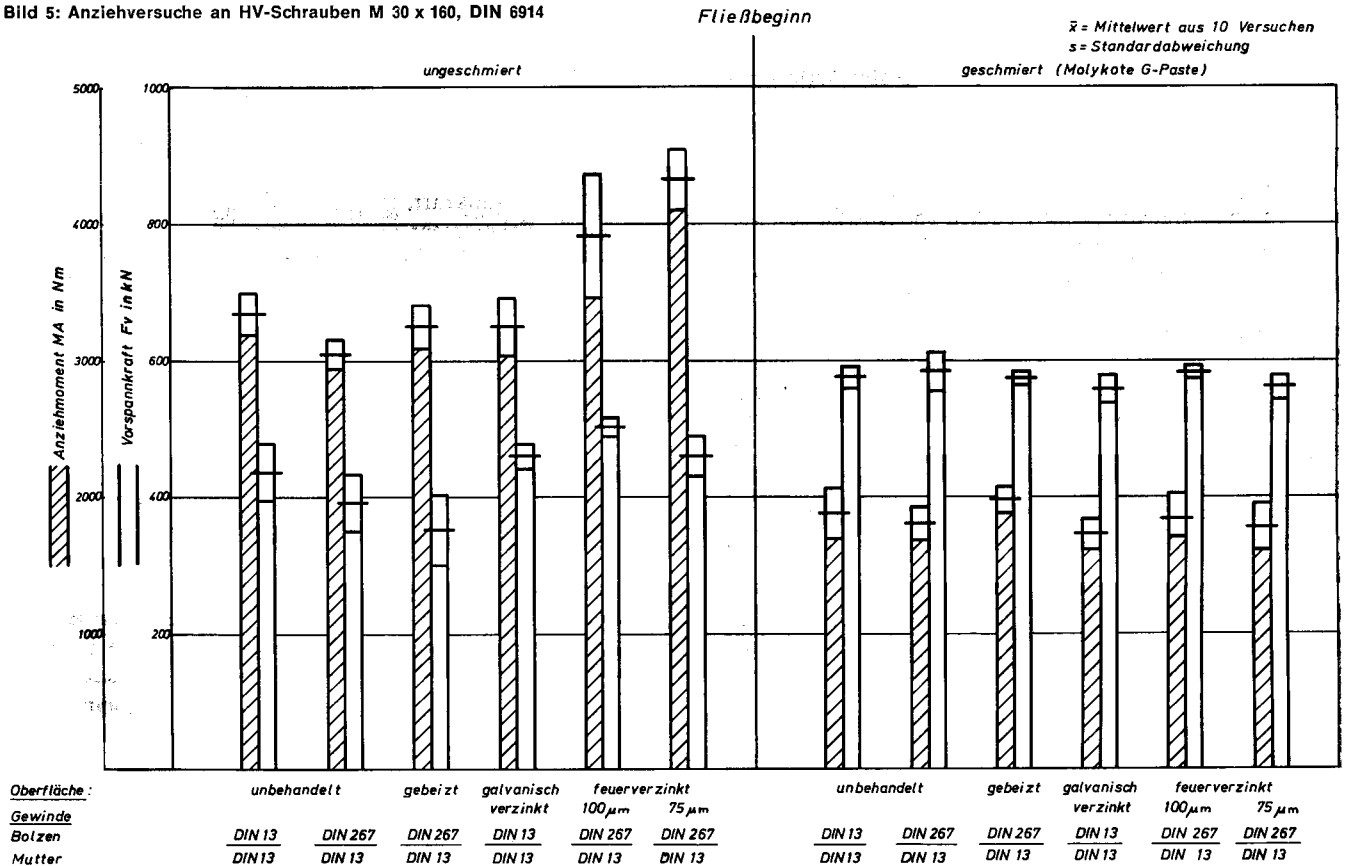
Maximalwerte

\bar{x} = Mittelwert aus 10 Versuchen
s = Standardabweichung



Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben

Bild 5: Anziehversuche an HV-Schrauben M 30 x 160, DIN 6914



Diese Vereinfachung mußte getroffen werden, weil Mutterauflagemoment und Gewindemoment nicht getrennt voneinander gemessen werden konnten. Sie ermöglicht die einfache Darstellung der Beziehung zwischen Reibbeiwert μ und dem Verhältnis M_A/F_V . M_A'/F_V' stellt ein Maß für die Größe des Reibbeiwertes beim Fließbeginn dar.

In den Bildern 4 und 5 sind die Begriffe Maximalwert und Fließbeginn verwendet worden. Unter Maximalwert wird hierbei die beim Anziehversuch größte auftretende Vorspannkraft bzw. das größte Anziehmoment verstanden, während der Fließbeginn den Punkt im M_A - F_V -Diagramm darstellt, bei dem die Kurve den linearen Verlauf verläßt und aufgrund einsetzender plastischer Verformungen abknickt. Beim Fließbeginn liegen die Werte für M_A und F_V auf einem Punkt des M_A - F_V -Diagramms. Das trifft für die Maximalwerte nicht zu. Der Ort des höchsten Anziehmomentes ist aufgrund des Kurvenverlaufs nicht identisch mit dem Ort der höchsten Vorspannung.

Ein typischer Kurvenverlauf für ein Anziehmoment-Vorspannkraft-Diagramm ist in Bild 6 als Beispiel dargestellt.

3.5.1. Anziehversuche ohne Schmierung

Für die Anziehversuche ohne Schmierung ist typisch, daß grundsätzlich Bolzenbruch eintritt, wobei die Bruchstelle sowohl im ersten tragenden Gewindegang wie im Gewindeauslauf liegen kann. Der Bruch wird durch überlagerte Torsionsspannung bei Vorspannkraften verursacht, die bis zu 40 %

unterhalb der im Zugversuch ermittelten Bruchlasten liegen. Anziehmoment und Vorspannkraft sind für die verschiedenen Oberflächenzustände aufgrund stark voneinander abweichender Reibbeiwerte (Faktor M_A'/F_V') sehr unterschiedlich (Bild 4 und 5).

Günstigere Reibeigenschaften scheinen bei feuerverzinkten Schrauben durch die etwas dickere Zinkauflage gegeben zu sein. Bei Schrauben mit der dickeren Zinkschicht (100 μm) setzt das Fließen bei niedrigeren Anziehmomenten und höhe-

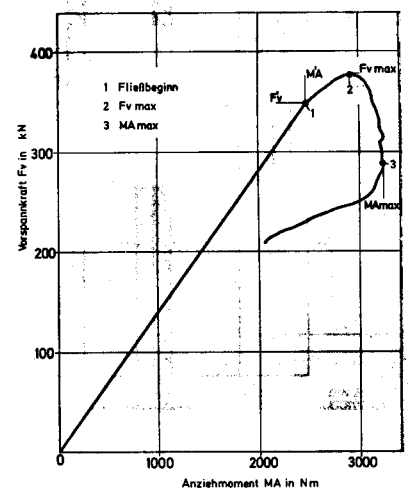


Bild 6: F_V - M_A -Diagramm (Beispiel)

ren Vorspannkraften ein als bei Schrauben mit der dünneren Zinkschicht ($75 \mu\text{m}$). Die bis zum Fließbeginn erzielbaren Vorspannkraften sind bei ungeschmierten verzinkten Schraubenverbindungen mindestens so hoch wie bei ungeschmierten (entfetteten) unverzinkten Schraubenverbindungen.

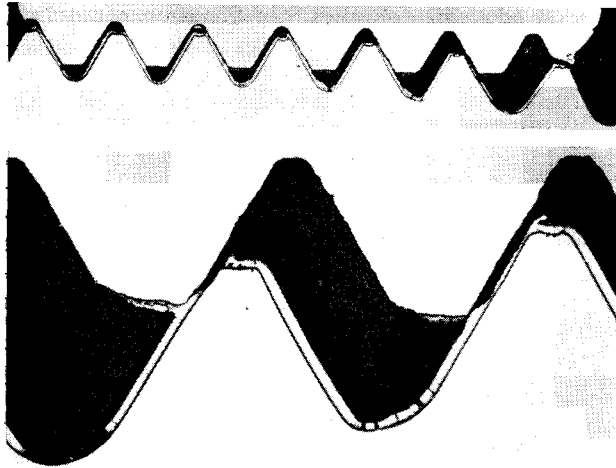


Bild 7: Bolzen- und Muttergewinde nach dem Bruch der Verbindung im Gewindeauslauf beim Anziehversuch. Feuerverzinkte ungeschmierte HV-Verbindung M 30 x 160, DIN 6914 (mittlere Schichtdicke $100 \mu\text{m}$). Durch plastische Verformung der Bolzen- und Muttergewindegänge reißt die Eisen-Zink-Legierungsschicht bis zur Oberfläche des Grundwerkstoffs ein (oben: $V = 3:1$, unten: $V = 10:1$)

In Bild 7 (oben) ist in dreifacher Vergrößerung der Eingriff von Bolzen und Mutter einer feuerverzinkten Schraubenverbindung ($100 \mu\text{m}$) dargestellt. Der Schraubenbolzen brach hier im Anziehversuch bei höheren Anziehmomenten und Vorspannungen als die unverzinkte Verbindung im Gewindeauslauf. Die plastische Verformung der Bolzen- und Muttergewindegänge an Stellen höchster Beanspruchung und die Mutteraufweitung an der Auflagestelle sind deutlich zu erkennen. An verschiedenen Stellen der Ausrundung des Bolzen- und Muttergewindekerns befindet sich Reinzink auf der Eisen-Zink-Legierungsschicht (Bild 7 oben). In zehnfacher Vergrößerung (Bild 7, unten) wird deutlich, wie die Eisen-Zink-Legierungsschicht durch die plastische Verformung des Grundwerkstoffs aufreißt und abplatzt.

3.5.2. Anziehversuche mit Schmierung

Für die Anziehversuche mit Schmierung (MoS_2) ist im Gegensatz zu den Versuchen ohne Schmierung typisch, daß der Bruch der Verbindung hauptsächlich durch Abstreifen des Bolzen- und Muttergewindes auftritt.

Lediglich bei den feuerverzinkten Schraubenverbindungen kam es bei ein bzw. zwei von jeweils zehn Anziehversuchen zum Bolzenbruch.

Wegen des verringerten Reibbeiwertes durch das Schmiermittel können bei relativ niedrigen Anziehmomenten Vorspannkraften erzielt werden, die nur unwesentlich unter den Bruchkräften liegen, die im Zugversuch gemessen wurden (Bilder 4 und 5). Die Abstreifkraft des Bolzen- und Muttergewindes wird überschritten, bevor der Bruch im freien belasteten Gewindeteil eintreten kann. Die Meßwerte für Anziehmoment

und Vorspannkraft unterscheiden sich bei verzinkten und unverzinkten Schraubenverbindungen wegen der durch die Schmierung mit MoS_2 erzielten, für alle Oberflächenzustände fast gleichen, niedrigen Reibbeiwerte nur unwesentlich.

Die Reibbeiwerte sind bei geschmierten Schraubenverbindungen nur etwa halb so groß wie bei ungeschmierten (M_A'/F_V). Damit wird deutlich, warum im ungeschmierten Zustand bis zu 100% größere Anziehmomente nötig sind, um gleiche Vorspannkraften zu erzielen.

Die Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit einer guten Schmierung vor dem Anziehen von HV-Verbindungen nicht nur bei verzinkter, sondern auch bei unverzinkter Oberfläche. Gute Schmierung bedeutet relativ geringe Anziehmomente bei hoher Vorspannung und wegen der geringen Streuung gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Bild 8 zeigt in dreifacher Vergrößerung die beim Anziehen von unverzinkten und verzinkten HV-Schraubenverbindungen im geschmierten Zustand abgesicherten Bolzen- und Muttergewinde.

3.6. Langzeit-Verspannungsversuche

Um eine etwaige Schädigung der verzinkten Schrauben durch Wasserstoffversprödung nachzuweisen, wurden jeweils drei Schrauben gleicher Oberflächenbehandlung bis zur Streckgrenze durch Anziehen der Mutter vorgespannt und in diesem verspannten Zustand drei Tage lang belassen. Ein verzögerter Sprödbrech, der auf eine Wasserstoffversprödung hindeuten kann, wurde nicht beobachtet.

3.7. Dauerschwingversuche

Der Einfluß der Verzinkung auf die Haltbarkeit von HV-Verbindungen unter schwingender Beanspruchung wurde durch Dauerschwingversuche überprüft, wobei die Schwingbeanspruchung einer zügigen Vorspannung der Schrauben von 70% der genormten Mindeststreckgrenze überlagert wurde. Da mit dem für die Versuche zur Verfügung stehenden 20-Mp-Pulser die Vorspannung $F_V = 0,7 \cdot \sigma_{0,2 \text{ min}} \cdot A_{s \text{ norm}} = 0,7 \cdot 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 561 \text{ mm}^2 = 350 \text{ kN}$ nicht aufgebracht werden

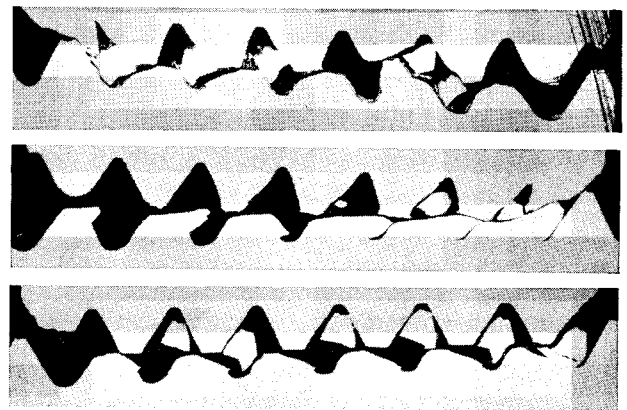


Bild 8: Im Anziehversuch abgestreiftes Bolzen- und Muttergewinde. HV-Verbindung M 30 x 160, DIN 6914, geschmiert mit MoS_2 . Oben: unverzinkt, Bolzen- und Muttergewinde nach E DIN 267, Blatt 10, $V = 3:1$; Mitte: galvanisch verzinkt (alkalisches Bad), Bolzen- und Muttergewinde nach DIN 13, $V = 3:1$; unten: feuerverzinkt (mittlere Schichtdicke $100 \mu\text{m}$), Bolzen- und Muttergewinde nach E DIN 267, Blatt 10, $V = 3:1$

Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben

konnte, wurde eine entsprechende Vorrichtung konstruiert, die das beliebig hohe Vorspannen der Schraubenverbindung mit Hilfe einer Spindel gestattet, ohne die Prüfmaschine zu belasten.

Schwingkraft und Mittellast wurden mit einem geeichten Meßbolzen gemessen, der direkt im Anschluß an den oberen Einspannkopf der Schraube angebracht war. Die Ergebnisse der Versuche wurden nach der Abgrenzungsmethode statistisch ausgewertet [7]. Für jede Schraubenserie wurden jeweils auf zwei Lasthorizonten zehn Proben gefahren. Die Bruchwahrscheinlichkeit wurde mit der Schätzfunktion $p = \frac{3r-1}{3n+1}$ ermittelt, wobei r die auf dem jeweiligen Lasthorizont erzielte Anzahl der gebrochenen Schrauben und n die Gesamtzahl der auf einem Lasthorizont gefahrenen Proben darstellt (hier $n = 10$).

G_A = Ohne Bruch bis zu einer Lastwechselzahl $N = 5 \cdot 10^6$ ertragener Spannungsausschlag, bezogen auf den Nennkernquerschnitt
 $A_{Kern} = 519 \text{ mm}^2$
 $G_{A10,50,90} = G_A$ für 10%, 50% und 90% Bruchwahrscheinlichkeit

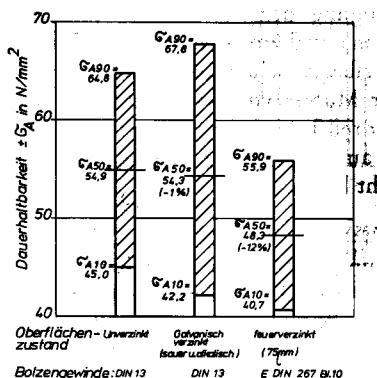


Bild 9: Ergebnisse der Dauerschwingversuche an HV-Schrauben M 30 x 160, DIN 6914

Trat bis zu einer Grenzlasterlastspielzahl $N_G = 5 \cdot 10^6$ kein Bruch ein, wurde die Probe als Durchläufer bezeichnet. Die Prüffrequenz betrug etwa 45 Hz. In Bild 9 sind die Ergebnisse der Dauerschwingversuche aufgetragen. Der bis N_G ohne Bruch der Schraube ertragene Spannungsausschlag $\pm \sigma_A$ wurde auf den Nennkernquerschnitt nach DIN 13 für das Gewinde M 30 bezogen.

Da die gemessenen Kernquerschnitte der untersuchten Schrauben mit Gewinden nach DIN 13 und DIN 267, Blatt 10, um etwa 2% voneinander abweichen, wird auf diese Weise nicht exakt der effektive Spannungsausschlag $\pm \sigma_A$ in den Schrauben wiedergegeben. Der Nennkernquerschnitt stellt zwar nicht die wirkliche Bezugsgröße für die Dauerhaltbarkeit der Schrauben dar, er gestattet jedoch einen Vergleich der ermittelten Werte.

Der Einfluß der Zinkschichtdicke blieb zur Ermittlung des Bezugsquerschnitts unberücksichtigt. Aus früheren Untersuchungen [3] ist bekannt, daß die Eisen-Zink-Legierungsschicht eine geringe Festigkeit aufweist und nur unwesentlich die Tragfähigkeit der Verbindung beeinflusst.

Der effektive Kernquerschnitt konnte als Bezugsmaß für die Dauerhaltbarkeit der Schraubenverbindungen nicht benutzt werden, weil der weitaus größte Teil der Schrauben-

bolzen nicht wie erwartet im ersten tragenden Gewindegang, sondern im Gewindeauslauf brach.

Die Ergebnisse der Dauerschwingversuche (Bild 9) an unverzinkten, galvanisch verzinkten und an mit einer mittleren Schichtdicke von 75 µm feuerverzinkten Schrauben zeigen, daß eine galvanische Verzinkung, gleichgültig, ob sie im sauren Bad oder im alkalischen Bad vorgenommen wurde, kaum einen Einfluß auf die Dauerhaltbarkeit der HV-Schrauben erkennen läßt. Dagegen fällt die Dauerhaltbarkeit der feuerverzinkten Schrauben gegenüber den unverzinkten Schrauben um etwa 12% ab.

Obwohl mikroskopische Untersuchungen nicht den Beweis dafür bringen konnten, daß sich Anrisse der spröden Eisen-Zink-Legierungsschicht als Dauerbrucharis in den Grundwerkstoff fortpflanzen, darf mit großer Wahrscheinlichkeit angenommen werden, daß feine Risse in der Eisen-Zink-Legierungsschicht den Dauerbrucharis begünstigen, da sie als zusätzliche feine Kerben wirken.

3.8. Setzmessungen

An Stellen hoher Flächenpressungen treten beim Überschreiten der Werkstoffstreckgrenze örtlich plastische Verformungen auf, die sich bei Schraubenverbindungen im Eindringen und Verbiegen der Gewindegänge und im plastischen Verformen von Oberflächenrauigkeiten in Trennfugen und Kopfauf- bzw. Mutterauflageflächen äußern. Man nennt dies Setzen der Verbindung.

Setzerscheinungen haben einen Vorspannkraftabfall zur Folge. Es sollte versucht werden, herauszufinden, in welcher Weise sich die Verzinkung von Schraubenverbindungen auf den Vorspannkraftabfall unter schwingender Beanspruchung auswirkt.

Untersuchungen an HV-Schrauben M 16 x 120 [5] haben keine eindeutigen Aussagen liefern können. Dennoch wurden einige Versuche an unverzinkten, galvanisch verzinkten und feuerverzinkten HV-Verbindungen M 30 x 160 durchgeführt.

Die Schrauben wurden im geschmierten Zustand mit den entsprechenden Scheiben nach DIN 6916 in einer Meßdose durch Anziehen der Mutter vorgespannt.

Die Vorspannkraft wurde wegen des Zusammenhangs zwischen der von der Prüfmaschine aufzubringenden Schwingkraft und der Steifigkeit der Meßdose auf 60% der genormten Mindeststreckgrenze begrenzt. Es gilt die Beziehung

$$\pm F_{ap} = \pm F_{as} \cdot (1 + C_M/C_S)$$

Hierin sind:

F_{ap} = Schwingkraft der Prüfmaschine
 (begrenzt auf $\pm 200 \text{ kN}$),

F_{as} = auf die Schraube wirkende Schwingkraft,

C_M = Steifigkeit der Meßdose,

C_S = Steifigkeit der Schraube.

Die vorgespannten Schrauben wurden einer schwingenden Beanspruchung von $\pm 30 \text{ N/mm}^2$, bezogen auf den Nennkernquerschnitt des Gewindes M 30 nach DIN 13, unterworfen. Damit war sichergestellt, daß die Schwingbeanspruchung unterhalb der Dauerhaltbarkeit lag und kein Dauerbruch zu erwarten war. Der Abfall der Vorspannkraft wurde nach 1, 5, 10, 20, 10^4 und 3×10^5 Lastwechseln gemessen. Aus zeitlichen Gründen, die Prüffrequenz betrug etwa 4 Hz, wurde

auf das Messen des Vorspannkraftabfalls nach größeren Lastwechselzahlen verzichtet. Die Ergebnisse der Versuche sind Bild 10 zu entnehmen.

Aufgetragen sind die Mittelwerte aus jeweils vier Versuchen und die gemessenen Höchst- und Tiefstwerte.

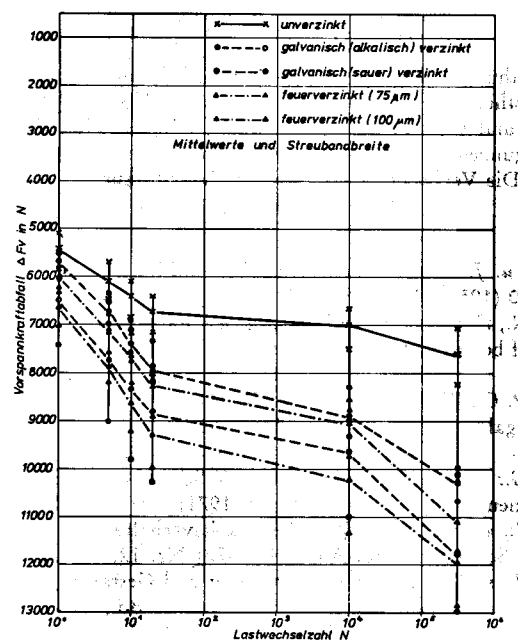


Bild 10: Vorspannkraftabfall unter schwingender Beanspruchung

Beim ersten Lastwechsel wird für sämtliche untersuchten Schraubenverbindungen ein mittlerer Vorspannkraftabfall von etwa 5500 bis 6500 N gemessen (ca. 2% der Anfangsvorspannkraft), wobei kein wesentlicher Einfluß der Zinkschicht wegen der sich teilweise überdeckenden Streubänder erkennbar ist. Der geringste Vorspannkraftabfall wird für unverzinkte Schraubenverbindungen gemessen.

Während mit zunehmender Lastspielzahl die die Mittelwerte des Vorspannkraftverlustes verbindenden Kurven bei verzinkten Schrauben annähernd parallel verlaufen, divergiert die Kurve für unverzinkte Schrauben. Der Abstand der Meßwerte von verzinkten und unverzinkten Schrauben wird größer.

Während der mittlere Vorspannkraftabfall bei unverzinkten Schraubenverbindungen zwischen dem 1. und 300 000. Lastwechsel von 5500 N auf 7500 N ansteigt, nimmt er bei verzinkten Schraubenverbindungen von etwa 5700 bis 6400 N auf 10 200 bis 12 000 N zu, wobei zwischen galvanisch verzinkten und feuerverzinkten Schrauben kein deutlicher Unterschied zu erkennen ist.

Das Ergebnis der Setzmessungen lautet zusammengefaßt:

1. Der größte Vorspannkraftabfall tritt bereits beim ersten Lastwechsel auf (ca. 2% der Anfangsvorspannkraft). Ein deutlicher Einfluß der Zinkschicht ist hier noch nicht zu erkennen.
2. Nach dem ersten Lastwechsel nimmt der Vorspannkraftabfall bei unverzinkten Schraubenverbindungen bis zum

300 000. Lastwechsel um ca. 50% des beim ersten Lastwechsel gemessenen Betrages zu, während er sich bei verzinkten Schraubenverbindungen etwa verdoppelt.

3. Der größte gemessene Vorspannkraftverlust beträgt nach $3 \cdot 10^5$ Lastwechseln 13 000 N, das entspricht nur etwa 4% der Anfangsvorspannkraft.

Daß nach den ersten Lastwechseln zwischen verzinkten und unverzinkten Schraubenverbindungen bezüglich des Vorspannkraftabfalls lediglich geringe Unterschiede erkennbar sind, liegt vermutlich daran, daß in der ersten Phase die teilweise schon beim Anziehen eingeebneten Oberflächenrauheiten des Grundwerkstoffs zum großen Teil für den Vorspannungsverlust verantwortlich gemacht werden müssen, wohingegen der Einfluß der sich setzenden Oberflächenschicht geringerer Festigkeit erst später überwiegt.

Interessant ist die Beobachtung, daß der nach $3 \cdot 10^5$ Lastwechseln maximal gemessene Vorspannkraftabfall mit 13 000 N nur etwa 4% der Anfangsvorspannkraft beträgt ($F_{v0} = 300\,000\text{ N}$).

Das deutet darauf hin, daß bereits beim Anziehen der Verbindung die Oberflächenrauheiten der verspannten Teile weitgehend eingeebnet werden.

Die durch die plastische Verformung des Gewindes und der Oberflächenunebenheiten der verspannten Teile hervorgerufenen Setzbeträge und die damit verbundenen Vorspannkraftverluste werden also bereits während des Anziehvorganges wieder ausgeglichen.

4. Zusammenfassung und Ergebnisse der Untersuchungen

Anschließend an frühere Arbeiten [5] wurden Untersuchungen an unverzinkten und verzinkten HV-Schraubenverbindungen M 30 x 160, DIN 6914, 6915 und 6916, durchgeführt, um den Einfluß der beim Feuerverzinken sowie beim galvanischen Verzinken (saures und alkalisches Bad) aufgetragten Zinkschicht auf die mechanischen Eigenschaften der Schrauben bei zügiger und wechselnder Beanspruchung zu erfassen.

Für die Versuche wurden Schrauben aus dem Stahl 42 CrMo 4 und Muttern aus dem Stahl C 45 verwendet, die jeweils aus einer Werkstoffcharge in einem Los gefertigt und wärmebehandelt wurden.

Die Gewinde der für die Feuerverzinkung vorgesehenen Schraubenbolzen wurden mit Gewindetoleranzen nach Entwurf DIN 267, Blatt 10 (1969), Toleranzqualität 6, gefertigt. Sämtliche Gewindetoleranzen wurden auf etwa $\frac{1}{3}$ der genormten Breite eingengt. Bei den feuerverzinkten Schrauben wurden zwei unterschiedliche Zinkschichtdicken angestrebt (75 μm und 100 μm) und in etwa auch erzielt.

Bereits bei den noch nicht mechanisch beanspruchten Schraubenverbindungen waren feine Risse in der Eisen-Zink-Legierungsschicht zu erkennen, die senkrecht zur Oberfläche verliefen und im allgemeinen bis zur Oberfläche des Grundwerkstoffs reichten.

Als Ursache für das Entstehen dieser Risse werden Wärmespannungen vermutet, die beim Abschrecken der Schrauben in heißem Wasser nach dem Feuerverzinken entstehen.

Die Eisen-Zink-Legierungsschicht bei den feuerverzinkten Schrauben bestand zum größten Teil aus der ζ -Phase (Zeta-Phase mit 6 bis 6,2% Fe).

Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben

Ergebnisse:

1. Die *Kerbschlagzähigkeit* fällt bei -60°C gegenüber Raumtemperatur (20 bis 25°C) um ca. 18% ab, wobei in beiden Temperaturbereichen kein nennenswerter Einfluß der Zinkschicht festzustellen ist.
2. Bei den *Zugversuchen* wurden neben Bolzenbrüchen, bei denen der Bruch im Gewindeauslauf eintrat, auch Gewindeabstreifer registriert. Besonders bei Verbindungen mit Gewinde nach DIN 267, Blatt 10, wurden sowohl im unverzinkten wie im verzinkten Zustand die Bolzengewinde wegen der verminderten Flankenüberdeckung abgestreift. Aufgrund der unterschiedlichen Bruchformen ergaben sich relativ große Streuungen der Ergebnisse, die sich teilweise überdeckten und keine signifikanten Unterschiede der Tragfähigkeit bzw. 0,2-Grenze von Gewinden mit Toleranzen nach DIN 13 und DIN 267 im unverzinkten und verzinkten Zustand erkennen ließen.
3. Bei den *Anziehversuchen mit ungeschmierten* HV-Verbindungen tritt grundsätzlich ein Bolzenbruch ein, wobei die beim Bruch ermittelten Zugkräfte wegen der überlagerten Torsionsspannungen bis zu 40% unterhalb der im Zugversuch gemessenen liegen. Die Meßwerte für Anziehmoment und Vorspannkraft sind für die verschiedenen Oberflächenzustände aufgrund stark voneinander abweichender Reibbeiwerte sehr unterschiedlich.
Bei *Anziehversuchen mit Schmierung* (MoS_2 -Paste) versagt die Verbindung in der Regel durch Abstreifen der Bolzengewindegänge, da durch die verringerten Reibbeiwerte bei relativ niedrigen Anziehmomenten Vorspannkraft erzielt werden können, die nur unwesentlich unter den im Zugversuch gemessenen Bruchkräften liegen. Die Abstreiffestigkeit des Bolzengewindes wird überschritten.
Die Meßwerte für Anziehmomente und Vorspannkraft bei verzinkten und unverzinkten Schraubenverbindungen unterscheiden sich wegen der durch die Schmierung erzielten ähnlichen Reibbeiwerte nur unwesentlich.
4. Vorspannungsversuche konnten keinen Hinweis auf eine mögliche Wasserstoffversprödung, insbesondere bei galvanisch verzinkten Schrauben, geben.
5. Durch die galvanische Verzinkung (saures und alkalisches Bad) konnte keine Verminderung der *Dauerhaltbarkeit* der Schraubenverbindungen nachgewiesen werden, während die Dauerhaltbarkeit der mit einer mittleren Schichtdicke von $75\text{ }\mu\text{m}$ feuerverzinkten HV-Schrauben gegenüber den unverzinkten Schrauben um etwa 12% abfällt.
6. Unter schwingender Beanspruchung tritt ein großer Teil des *Vorspannkraftabfalls* bereits beim ersten Lastwechsel

auf (ca. 2% der Anfangsvorspannkraft), wobei ein deutlicher Einfluß der Zinkschicht noch nicht erkennbar wird. Bis zum 300 000. Lastwechsel verdoppelt sich der Betrag des Vorspannkraftverlustes bei verzinkten Schraubenverbindungen, während er bei unverzinkten Schrauben nur noch um die Hälfte zunimmt.

*

Die Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V. durchgeführt, über den auch die benötigten und von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V. zur Verfügung gestellten Geldmittel geleitet wurden. Die Verfasser danken für die Unterstützung.

Schrifttum

1. Bablik, H., u. J. Krystof: Feuerverzinkte hochfeste Schrauben. Ind.-Anz. 80 (1958) Nr. 15, S. 17/18.
2. Divine, J. R., E. Chesson u. W. H. Munse: Static and dynamic properties of bolted galvanized structures. Univ. Illinois, Annual Rep. 1966.
3. Birkemoe, P. C., W. D. Couch u. W. H. Munse: Design criteria for joining galvanized structurals. Univ. Illinois, Annual Rep. 1969.
4. Ritchie, J. G.: Einsatz feuerverzinkter HV-Schrauben bei Stahlkonstruktionen in Australien. Draht 22 (1971) Nr. 4, S. 204/10.
5. Wiegand, H., u. P. Strigens: Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben. Ind.-Anz. 94 (1972) Nr. 12, S. 247/52.
6. Wiegand, H., u. K.-H. Illgner: Berechnung und Gestaltung von Schraubenverbindungen. Konstruktionsbücher 5. Bd., S. 91/93. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1962.
7. Maennig, W.-W.: Bemerkungen zur Beurteilung des Dauerschwingfestigkeitsverhaltens von Stahl und einige Untersuchungen zur Bestimmung des Dauerfestigkeitsbereichs. Mater.-Prüf. 12 (1970) Nr. 4, S. 124/31.
8. Wiegand, H., u. F. Nieth: Festigkeitswerte von Eisen-Zink-Legierungsschichten. Metalloberfläche 20 (1966) Nr. 9, S. 393/99.

Ergebnisse von Untersuchungen an feuerverzinkten HV-Schraubenverbindungen hinsichtlich des Einflusses der Zinkschicht bei zügiger und wechselnder Beanspruchung: Versuchsstücke (Anforderungen und Herstellung), durchgeführte Versuche (Gewindemessung, Zinkschichtdicke, Oberflächenzustand, Zinkschicht, Kerbschlagbiegeversuche, Zugversuche, Anziehversuche ohne und mit Schmierung, Langzeit-Vorspannungsversuche, Dauerschwingversuche, Setzmessungen).