

Günther Valtinat, Hamburg

Schwingfestigkeit von hochtemperaturverzinkten HV-Schrauben, die bis in den plastischen Bereich angezogen sind

Bericht Nr. 128
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.
Forschungsvorhaben GAV-Nr. FD 19

Aus:

Neue Entwicklungen im konstruktiven Ingenierbau
FESTSCHRIFT

Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. h.c. Otto Steinhardt - 85 Jahre
Prof. Dr.-Ing. Friedrich Mang - 60 Jahre

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Helmut Saal und
Dr.-Ing. Ömer Bucak

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Universität Karlsruhe
Karlsruhe 1994

Kurzfassung aus dem gleichnamigen Forschungsbericht
des Arbeitsbereichs Stahlbau und Holzbau
der Technischen Universität Hamburg-Harburg

Zusammenfassung

Die Feuerverzinkung von HV-Schrauben soll als Hochtemperaturverzinkung bei 530°-560°C durchgeführt werden. Dies bedeutet hohe Temperatur- und Dehnungsgradienten mit Plastizierungen und erhebliche Eigenspannungen im Schaft der Schrauben. Es wird geprüft, ob bei zusätzlichem Anziehen bis in den plastischen Bereich ihre Schwingfestigkeit beeinträchtigt wird.

Summary

The hot dip galvanizing of high strength bolts, quality 10.9, at the high temperature of 530°-560°C has the effect of a high strain gradient in different parts of the bolt shank and of considerable residual stresses with plastification. Fatigue tests have been performed to show, whether this procedure and the preloading of the bolt by the turn-of-the-nut method or by the combined method up to the and into the plastic range influence the fatigue behaviour.

1. Einführung und Problemstellung

Der Temperaturschock beim Feuerverzinken und beim nachfolgenden Abkühlen bewirkt besonders bei HV-Schrauben großen Durchmessers einen steilen Temperaturgradienten über den Schraubenschaft. Mit der instationären Temperaturentwicklung sind auch eine instationäre Dehnungsverteilung und eine instationäre Entwicklung der Eigenspannungen mit Plastizierungen verbunden. Die Änderung dieser Zustände hält so lange an, bis das Durchwärmen der Schraube bzw. das entsprechende komplette Abkühlen abgelaufen sind.

Die Niedertemperaturverzinkung bei 450°-470°C fordert die duktilen Materialeigenschaften weniger heraus als die Hochtemperaturverzinkung bei 530°-560°C, so daß auch unterschiedliche Plastizierungen eintreten.

Darüber hinaus wurde bei der Hochtemperaturverzinkung beobachtet, daß der Angriff der Stahloberfläche durch das Zink anders geartet ist als beim Niedertemperaturverzinken, und es wurden auch Anrisse in der Zinkschicht festgestellt; daher bestand die Vermutung, daß möglicherweise solche Kerben und Anrisse in der harten Eisen-Zinklegierungsschicht auch Ausgangspunkte für Schwingbrüche der Schraube selbst bei Axialbelastung sein könnten.

Das Drehwinkelverfahren beim Vorspannen von HV-Schrauben ist ein Verfahren zum "Anziehen bis an den plastischen Bereich". Wird dieses Anziehverfahren also zusätzlich zur Hochtemperaturverzinkung angewendet, muß mit einer Art doppelten plastischen Inanspruchnahme des Werkstoffs gerechnet werden. Anrisse würden dabei erweitert bzw. vertieft.

2. Zielsetzung der Untersuchungen

Derartige Schädigungen würden sich tragfähigkeitsmindernd auf die HV-Schrauben auswirken, und daraus resultiert die Zielsetzung: Tritt eine Schädigung der vorgenannten Art ein und, wenn ja, in welche Maße. Am geeignetsten erschienen hierzu Schwingfestigkeitsuntersuchungen an HV-Schrauben mit großem Durchmesser unter axialer Belastung, wobei einer relativ hohen Grundvorspannung in der Höhe der Sollvorspannkraft F_v ein Schwingausschlag um ± 30 bis $\pm 50 \text{ N/mm}^2$ überlagert werden sollte. Forschungsvorhaben und Forschungsergebnisse sind in Lit. /1/ zusammengestellt.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1 Die Feuerverzinkung

Die Vorbereitung zur Feuerverzinkung der HV-Schrauben führte bereits im Schrauben-Herstellerwerk dazu, daß durch besondere Maßnahmen (z.B. Strahlen) die zum Verzinken benötigte metallische Oberfläche der Schrauben vorbereitet wurde. Die weiteren Verfahrensschritte bei der Feuerverzinkung sind folgende:

1. Entfettung (dieser Vorgang kann je nach Vorbereitung der Oberfläche im Schrauben-Herstellerwerk unter Umständen entfallen)
2. Beizbad
3. Spülbad
4. Fluxbad
5. Trocknen an der Luft (ca. 10 Minuten)
6. Trocknen im Trocknerofen (ca. 20 Minuten bei 150°C)
7. Verzinkungsbad
8. Abschleudern
9. Abkühlen im Heißwasserbad

Die Temperatur des Verzinkungsbades und die Tauchdauer betragen

- bei den HT-verzinkten Schrauben ca. 530-560°C und ca. 15 sec,
- bei den NT-verzinkten Schrauben ca. 450-470°C und ca. 65 sec.

Der Vergütungszustand wird nicht beeinflusst, da die Temperaturen unterhalb der Anlaß-Temperatur liegen und auch nur kurzzeitig einwirken.

Die erzielten Zink-Schichtdicken betragen

- bei den HT-verzinkten Schrauben ca. 70 µm,
die Zinkschicht ist mattgrau und glatt,
- bei den NT-verzinkten Schrauben ca. 80 bis 100 µm,
die Zinkschicht ist leicht glänzend silbergrau und rau.

3.2 Werkstoffkennwerte der HV-Schrauben

Die Zugversuche an abgedrehten Schrauben nach DIN ISO 898 Teil 1 ergaben folgende Werkstoffkennwerte:

Werkstoff- kennwert	Schraube-Nr., (Verzinkungsart)				
	1 (HT)	2 (HT)	3 (HT)	4 (NT)	5 (NT)
$R_{p0,2}$ N/mm ²	1011	996	1000	987	986
R_m N/mm ²	1120	1115	1113	1082	1085
A_5 %	12.4	12.1	12.4	12.9	13.7

Die vom Schraubenlieferanten im Rahmen der Abnahmeprüfung nach DIN 50049-3.1B durchgeführten Untersuchungen erfüllten die Anforderungen gemäß DIN ISO 898 Teil 1.

3.3 Vorbereitung und Durchführung

Es wurden jeweils 25 niedertemperaturverzinkte HV M 30 x 200 DIN 6914 (Kopfprägung Serie 04) und 25 hochtemperaturverzinkte HV M 30 x 200 DIN 6914 (Kopfprägung Serie 22) mit den entsprechenden Muttern und Scheiben zunächst einem Anziehvorgang nach dem Drehwinkelverfahren unterworfen, wobei sämtliche Schrauben aufgrund von Voruntersuchungen in zwei Anziehphasen wie folgt vorgespannt wurden:

1. Anziehphase: Teilvorspannkraft von $0,1 F_{v,soll} = 35 \text{ kN}$
2. Anziehphase: Weiterdrehwinkel von 240° .

Die Teilvorspannung von 10 % der Sollvorspannkraft wurde mittels Kraftmeßdose bis auf ca. 1 kN Genauigkeit erreicht. Der von diesem Zustand aus in der 2. Phase exakt aufgebrachte Weiterzieh Winkel bewirkte die Vorspannkraft des Bildes 1, niedertemperaturverzinkte HV-Schrauben (Mittelwert: $F_{v,m} = 506 \text{ kN}$, Standardabweichung: 16 kN) und hochtemperaturverzinkte HV-Schrauben (Mittelwert: $F_{v,m} = 514 \text{ kN}$, Standardabweichung: 21,1 kN) unterschieden sich hier nur wenig. Darüber hinaus liegen die erzielten Werte mit relativ geringer Streuung (Variationskoeffizient 0,03 bzw. 0,04) deutlich und definiert im plastischen Bereich.

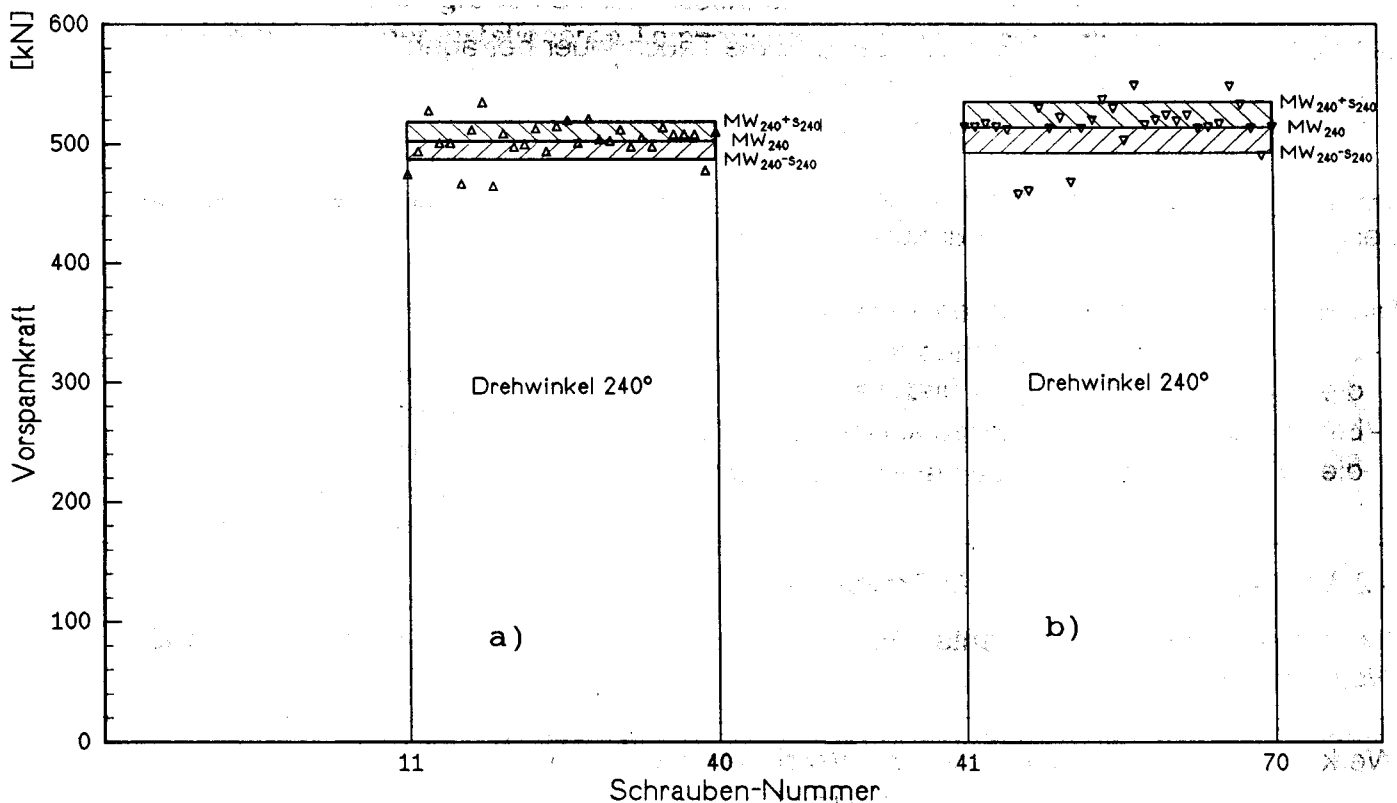


Bild 1: Erreichte Vorspannkraft beim Anziehen nach dem Drehwinkelverfahren in den plastischen Bereich ($0,1 F_v + 240^\circ$) für
a) niedertemperaturverzinkte HV M 30 x 200 - 10.9
b) hochtemperaturverzinkte HV M 30 x 200 - 10.9

Nach Lit. /2/ ist für schlußvergütete HV-Schrauben mit einem Schaftdurchmesser von 30 mm eine Dauerschwingfestigkeit von ± 30 bis $\pm 40 \text{ N/mm}^2$ zu erwarten.

Die Schwingbeanspruchungen in diesem Programm wurden deshalb für die Schrauben aus beiden Verzinkungsverfahren wie folgt festgelegt:

1. Mittelspannung $\sigma_m = 713 \text{ N/mm}^2$ (das entspricht $F_{v,m} = 400 \text{ kN}$)

2. Schwingbelastung

- 2.1 $\sigma_a = \pm 50 \text{ N/mm}^2$, $R = 0,87$ (10 Versuche),
 2.2 $\sigma_a = \pm 40 \text{ N/mm}^2$, $R = 0,89$ (10 Versuche),
 2.3 $\sigma_a = \pm 35 \text{ N/mm}^2$, $R = 0,90$ (5 Versuche).

Die statische Vorlast lag damit im Mittel bei 80 % der beim Anziehen nach dem Drehwinkelverfahren erreichten Zugkräfte von ca. 500 kN.

Diese Schwingversuche wurden auf einer servohydraulischen INSTRON-Prüfmaschine bei 20 bis 25 Hz gefahren.

Die Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt im σ_a - N-Diagramm im log-log-Koordinatensystem. Der Vergleich der Schwingfestigkeiten von hochtemperatur- und niedertemperaturverzinkten HV-Schrauben erfolgt dann anhand der jeweiligen Regressionsgeraden in dem vorgenannten Diagramm.

3.4 Versuchsergebnisse

Das Bild 2 zeigt die Versuchsergebnisse der Schwingfestigkeitsuntersuchungen an hochtemperaturverzinkten und niedertemperaturverzinkten HV M 30 x 200, die mit Hilfe des Drehwinkelverfahrens bis in den plastischen Bereich angezogen worden sind ($0,1 F_{V,soll} + 240^\circ$)

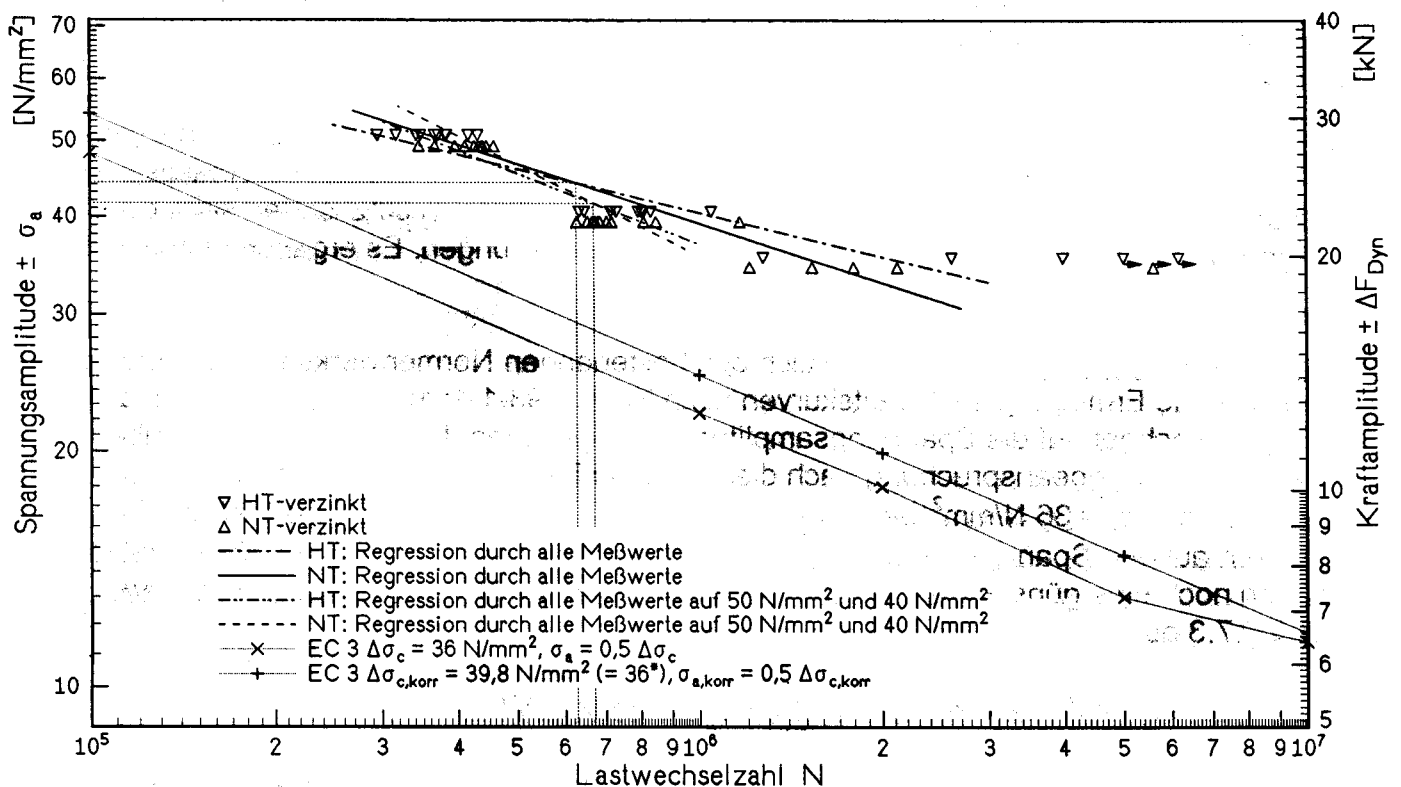


Bild 2: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche an hochtemperatur- und niedertemperaturverzinkten HV-Schrauben M 30 x 200 - 10.9, die nach dem Drehwinkelverfahren bis in den plastischen Bereich vorgespannt wurden ($0,1 F_v + 240^\circ$)

Die vier dargestellten Regressionsgeraden haben die folgenden Gleichungen:

1. Für HT-verzinkte HV-Schrauben M 30 x 200 mit
 - je 10 Versuchspunkten auf $\sigma_a = \pm 50 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_a = \pm 40 \text{ N/mm}^2$,
 - 5 Versuchspunkten auf $\sigma_a = \pm 35 \text{ N/mm}^2$:

$$\log N = - 5,390 \log \sigma_a + 14,664$$

2. Für NT-verzinkte HV-Schrauben M 30 x 200 mit
 - je 10 Versuchspunkten auf $\sigma_a = \pm 50 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_a = \pm 40 \text{ N/mm}^2$,
 - 5 Versuchspunkten auf $\sigma_a = \pm 35 \text{ N/mm}^2$:

$$\log N = - 3,979 \log \sigma_a + 2,344$$

3. Für HT-verzinkte HV-Schrauben M 30 x 200 mit nur
 - je 10 Versuchspunkten auf $\sigma_a = \pm 50 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_a = \pm 40 \text{ N/mm}^2$:

$$\log N = - 3,339 \log \sigma_a + 11,233$$

4. Für NT-verzinkte HV-Schrauben M 30 x 200 mit nur
 - je 10 Versuchspunkten auf $\sigma_a = \pm 50 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_a = \pm 40 \text{ N/mm}^2$

$$\log N = - 2,609 \log \sigma_a + 10,051.$$

4. Beurteilung der Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse und die dargestellten Regressionsgeraden zeigen, daß hochtemperaturverzinkte und niedertemperaturverzinkte HV-Schrauben M 30, die bis in den plastischen Bereich angezogen wurden, hinsichtlich der Schwingfestigkeit gleich einzustufen sind, die geringfügigen Unterschiede liegen im Bereich der Versuchsstreuungen. Es ergaben sich damit leichte Abminderungen gegenüber Lit. /3/.

Zur Abschätzung der Ergebnisse hinsichtlich des bestehenden Normenwerks wurden im Bild 2 exemplarisch die Ermüdungsfestigkeitskurven nach ENV 1993-1-1: 1992, Teil 1.1 § 9 und § 9.7.3, umgerechnet auf die Spannungsamplituden, eingetragen. Die geprüften Schrauben wären mit axialer Zugbeanspruchung nach dieser Vorschrift, Tabelle 9.8.1 in die Kerbgruppe 36 (das heißt $\Delta\sigma = 2 \sigma_a = 36 \text{ N/mm}^2$ bei 2 Mio. Lastwechseln) einzuordnen, wobei sich die Zugspannungen auf den Spannungsquerschnitt beziehen. Die vorgenannte Vorschrift erlaubt für Schrauben noch eine günstigere Einstufung in die korrigierten Ermüdungsfestigkeitskurven gemäß § 9.7.3 auf

$$\Delta\sigma_{c,korr} = 39,8 \text{ N/mm}^2 \quad \text{bzw.} \quad \sigma_a = \pm 19,9 \text{ N/mm}^2 \text{ bei 2 Mio. LW.}$$

Die Versuchsergebnisse liegen damit deutlich oberhalb der in der europäischen Vorschrift angegebenen Ermüdungsfestigkeitskurven.

Die ursprünglich geäußerte Befürchtung, daß die Hochtemperaturverzinkung von HV-Schrauben Anrisse erzeugt, die bei Betriebsbeanspruchung möglicherweise Ausgangspunkte für Ermüdungsbrüche sein könnten, hat sich nicht bewahrheitet. Dies konnte insbesondere an solchen Schrauben geprüft werden, die nach dem Drehwinkelverfahren bis in den plastischen Bereich an-

gezogen worden waren. Hochtemperaturverzinkte und niedertemperaturverzinkte HV-Schrauben M 30 können demnach sowohl im Anziehverhalten als auch unter Schwingbelastung in gleicher Weise eingesetzt werden. Aussagen über das Verhalten beim Hochtemperaturverzinken selbst können anhand dieser Untersuchungen nicht gemacht werden, siehe hierzu Lit. /4/.

Die vorgenannten Untersuchungen wurden durch kostenlose Lieferungen der feuerverzinkten HV-Schrauben durch die Firma Peiner Umformtechnik GmbH, Peine, ermöglicht. Die fachliche und finanzielle Betreuung erfolgte durch den Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Düsseldorf. Die Finanzierung stellten die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Köln, und das Bundeswirtschaftsministerium, Bonn, zur Verfügung. Für diese breite Unterstützung bedanken wir uns bestens.

Literatur:

- /1/ Valtinat, G. und J. Ansorge: Schwingfestigkeit hochtemperaturverzinkter HV-Schrauben, die bis in den plastischen Bereich angezogen sind. Bericht über das AiF-Forschungsvorhaben Nr. 8522, GAV-Nr. FD 20. Arbeitsbereich für Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Hamburg 1993.
- /2/ Wiegand, H., K.-H. Kloos und W. Thomala: Schraubenverbindungen. 4. Auflage 1988. Konstruktionsbücher Band 5, Springer-Verlag.
- /3/ Kloos, K.-H., R. Landgrebe und W. Schneider: Untersuchungen zur Anwendbarkeit hochtemperaturverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9. Bericht Nr. 102 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V., Düsseldorf. VDI-Z 128 (1986), Nr. 12, S. 98/108.
- /4/ Beyer, St., V. Dünkel und R. Landgrebe: Dehnungsinduzierte Spannungsrißkorrosion in der Flüssigzinkphase bei der Hochtemperaturverzinkung von HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 mit großen Abmessungen. Mat.-Wiss. u. Werkstofftechnik (1994), Nr. 25, S. 158 -166. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.