

Günther Valtinat

Anziehverhalten hochtemperaturverzinkter, hochfester Stahlbauschrauben

Bericht Nr. 96
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V.

Sonderdruck aus TECHNISCHE RUNDSCHAU Nr. 4/1985

77 (1985) 4, S. 36/40

Ausgabe: Versuchsausschuß
Technische Rundschau

An der Universität Fridericiana (TH) in Karlsruhe wurden Anziehversuche mit hochtemperaturverzinkten, hochfesten Stahlbauschrauben der Festigkeitsklasse 10.9 durchgeführt. Untersucht wurde folgendes: Beeinflussung der Anziehverhältnisse durch das Hochtemperaturverzinken, geeignetes Schmiermittel, Vorspannkraft- und Deformationsreserven beim Anziehen, Anwendung der Berechnungs-, Konstruktions- und Montageregeln auf hochtemperaturverzinkte HV-Schrauben.

Anziehverhalten hochtemperaturverzinkter, hochfester Stahlbauschrauben

Von Günther Valtinat

Die Hochtemperaturverzinkung (HT-Verzinkung) als neues Verfahren der Feuerverzinkung von Stahlbauteilen setzt sich mehr und mehr durch, seit die wirtschaftlichen und die technologischen Vorteile dieses Verfahrens gegenüber dem herkömmlichen Verzinken

der Stahlbauteile immer deutlicher zutage treten. Die HT-Verzinkung erlaubt schnelleres Verzinken und sichert besonders auch bei nicht glatten Teilen einen gleichmäßigeren Zinküberzug. Letzteres ist für die Gewindebereiche von Schrauben besonders wichtig, da hier früher infolge deutlich unterschiedlicher Zinkschichtdicken der Frage der Passung von Muttern und Schraubengewinden besondere Beachtung geschenkt werden mußte.

Die Auffassungen, welche Abmaße im Schraubengewinde beziehungsweise welche Überschnitte im Muttergewinde notwendig waren, um ein leichtes Aufdrehen der Mutter von Hand zu gewährleisten, waren sehr unterschiedlich, wie sich in den Diskussionen um diese Abmaße in der Working Group 9 von ISO TC2 zeigte. Die Forderungen gingen von 0,3 bis 0,6 mm. Je größer die Abmaße festgelegt werden, um so eher besteht die Gefahr, daß das Anzieh- und das Fertigkeitsverhalten von schwarzen und von feuerverzinkten hochfesten Schrauben zu stark unterschiedlichen Ergebnissen führt. Die Folge wäre, daß schwarze und feuerverzinkte HV-Schrauben nicht mehr mit denselben Anziehmomenten vorgespannt, mit denselben Vorspannkraften berechnet und mit denselben Schwingfestigkeiten verwendet werden könnten. Kompliziertere Regelungen in Berechnungs- und Montagevorschriften könnten die Folge sein.

HT-Verzinkung bringt wirtschaftliche Vorteile

Die neue Technologie des HT-Verzinkens ist ein Schritt zur Vergleichmäßigung. Sie erlaubt auch in Ländern, deren Verzinkungstechnologie bisher nicht optimal war, die genannten Vorteile zu nutzen.

Prof. Dr.-Ing. GÜNTHER VALTINAT, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana (TH) Karlsruhe.

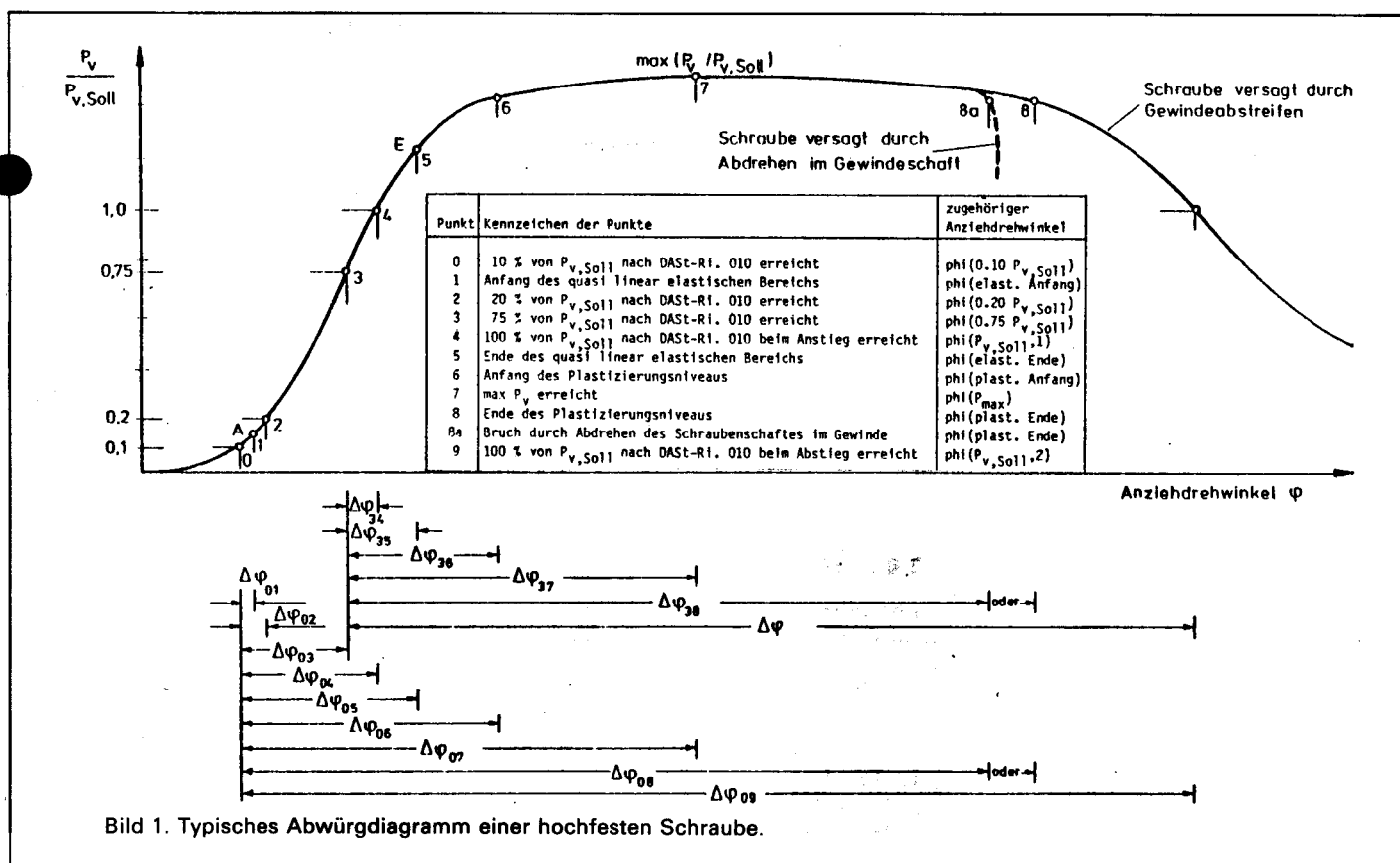


Bild 1. Typisches Abwürgdiagramm einer hochfesten Schraube.

Zusammenstellung der untersuchten HV-Schrauben, Festigkeitsklasse 10.9, mit Hochtemperaturverzinkung.

Schraubenabmessungen	Nr.	Stückzahl	Oberflächenzustand ¹	Schmierzustand ²
HV M 16 × 80	001-010	10	s	M
HV M 16 × 80	011-020	10	HT	M
HV M 16 × 120	021-030	10	s	M
HV M 16 × 120	031-040	10	HT	M
HV M 20 × 80	061-070	10	s	M
HV M 20 × 80	071-080	10	HT	M
HV M 20 × 120	081-090	10	s	M
HV M 20 × 120	091-100	10	HT	M
HV M 24 × 120	141-150	10	s	M
HV M 24 × 120	151-160	10	HT	M
HV M 24 × 200	161-170	10	s	M
HV M 24 × 200	171-180	10	HT	M
HV M 27 × 100	181-190	10	s	M
HV M 27 × 100	191-200	10	HT	M
HV M 27 × 185	201-210	10	s	M
HV M 27 × 185	211-220	10	HT	M
HV M 30 × 100	241-250	10	s	M
HV M 30 × 100	251-260	10	HT	M
HV M 30 × 190	261-270	10	s	M
HV M 30 × 190	271-280	10	HT	M

¹s = schwarz, Anlieferungszustand, HT = hochtemperaturverzinkt.
²M = mit Molybdändisulfid geschmiert.

Die HT-Verzinkung spart nach englischen Untersuchungen bei Erfüllung der Schichtdickenforderungen bis zu 30 % an Zink ein und bietet deshalb trotz höheren Energieeinsatzes wirtschaftliche Vorteile.

Die HT-Verzinkung erfolgt bei Temperaturen über 530 bis etwa 560 °C. Man überschreitet damit die kritische Phase zwischen 490 und 520 °C, bei der im Zinkbad besonders viel Eisen in Lösung geht [1]. Die Spezialverzinkereibetriebe, die auf die HT-Verzinkung umgestellt haben, wollen ihre Bäder nicht auf 460 °C, der bisherigen Verzinkungstemperatur, herunterfahren, wenn die Feuerverzinkung von hochfesten Schrauben ansteht. Andererseits kommt eine Temperatur von 560 °C schon sehr nahe an die Anlaßtemperatur des hochfesten Schraubenwerkstoffes heran, so daß zahlreiche Fragen, ob eine gegenseitige Beeinflussung stattfindet, beantwortet werden mußten. Die wichtigsten sind:

1. Welcher Einfluß ergibt sich hieraus auf die Werkstoffeigenschaften des hochfesten, vergüteten Schraubenmaterials ($\sigma_{0,2}$ -Grenze, Bruchfestigkeit, Scherfestigkeit, Dauerstand- und Dauerschwingfestigkeit, Kerbschlagzähigkeit, Sprödbbruchempfindlichkeit)? Können Ausgangswerkstoff und Vergütungsprozedur beibehalten werden?
2. Welche Oberflächengüte ergibt sich?
3. Welche Schichtdicken ergeben sich, und wie wirkt sich die Schichtdickenverteilung auf die Maßhaltigkeit aus?

4. Welche Anziehdrehmoment-Vorspannkraft-Drehwinkel-Beziehung stellt sich im Vergleich mit den bei «Normaltemperatur» verzinkten HV-Schrauben ein?
5. Welches Schmiermittel ist das geeignetste?
6. Mit welchen Vorspannkraftverlusten ist über längere Zeitdauer zu rechnen?
7. Kann die Anwendung HT-verzinkter HV-Schrauben in gleicher Weise erfolgen, wie sie in DIN 18 800 (Teil 1) für die normaltemperaturverzinkten HV-Schrauben festgelegt ist?

Während die ersten sechs Fragen mehr die Eigenschaften von HT-verzinkten hochfesten Schrauben im Auge haben, zielt die letzte Frage wesentlich darauf ab, ihre Anwendung möglichst in gleicher Weise wie für die bisherigen feuerverzinkten HV-Schrauben zu regeln, sonst hätte sich eine nicht erwünschte Verkomplizierung der Anwendungs- und Berechnungsvorschriften ergeben.

Zusammenarbeit in der Forschung

In bewährter Zusammenarbeit zwischen dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V. (GAV, Düsseldorf), den HV-Schrauben-Herstellern Peiner Maschinen- und Schraubenwerke AG (Peine), der Schrauben- und Nietenfabrik August Friedberg GmbH (Gelsenkirchen), den speziellen Verzinkereibetrieben Niedax-Werke GmbH (Linz), Wirtz & Co. (Gelsenkirchen) und den Haku-

Werken (Braunschweig) sowie dem Institut für Werkstoffkunde der Technischen Hochschule Darmstadt (Materialprüfungsanstalt) und der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe (TH) wurde ein zum großen Teil von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF, Köln) finanziell getragenes Forschungsprogramm entwickelt und durchgezogen, das auf die sieben Fragen weitgehend Antworten geben sollte.

Im folgenden wird über die Untersuchungsergebnisse aus der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe berichtet. Diese sollten die Beantwortung der Fragen 2, 4, 5 und 7 erlauben. Die Untersuchungsergebnisse aus den Darmstädter Versuchen sind in [2] und [3] veröffentlicht; auf diese wird hier Bezug genommen.

Versuchsmaterial

Nach Voruntersuchungen wurden die notwendigen Versuchsmaterialien aus den gleichen Schraubenlosen schwarz und HT-verzinkt in die beiden Forschungsinstitute geliefert. Damit waren die Ausgangswerte gleich.

Die Untersuchungen in Karlsruhe lagen hauptsächlich in der Ermittlung der Relationen zwischen Anziehdrehmoment (M_A), Drehwinkel (φ) und Vorspannkraft (P_v) der Schrauben bei Veränderung folgender Parameter:

- Schraubendurchmesser
- Schraubenlänge
- Oberfläche (schwarz und HT-verzinkt)



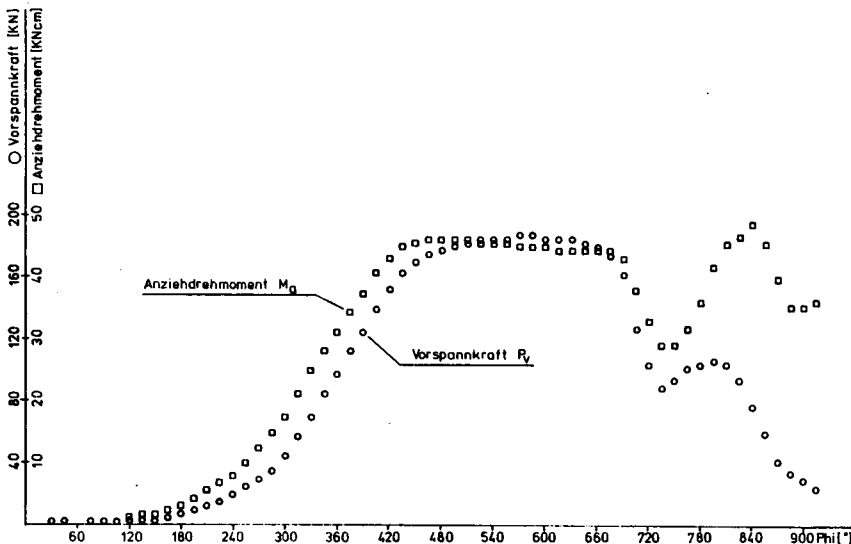
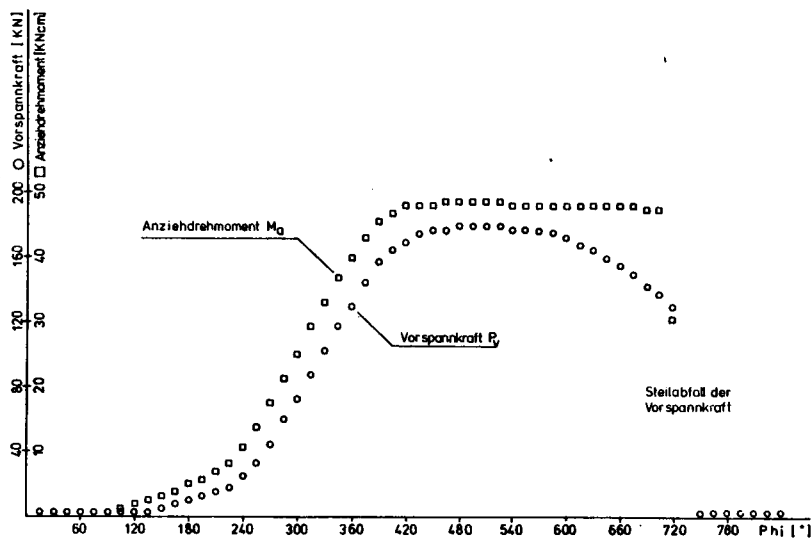


Bild 2. P_v - M_A - ϕ -Diagramm (Computerplot) für eine HV-Schraube. a Versagen durch Abdrehen im Gewindefschaff, b Versagen durch Gewindeabstreifen.

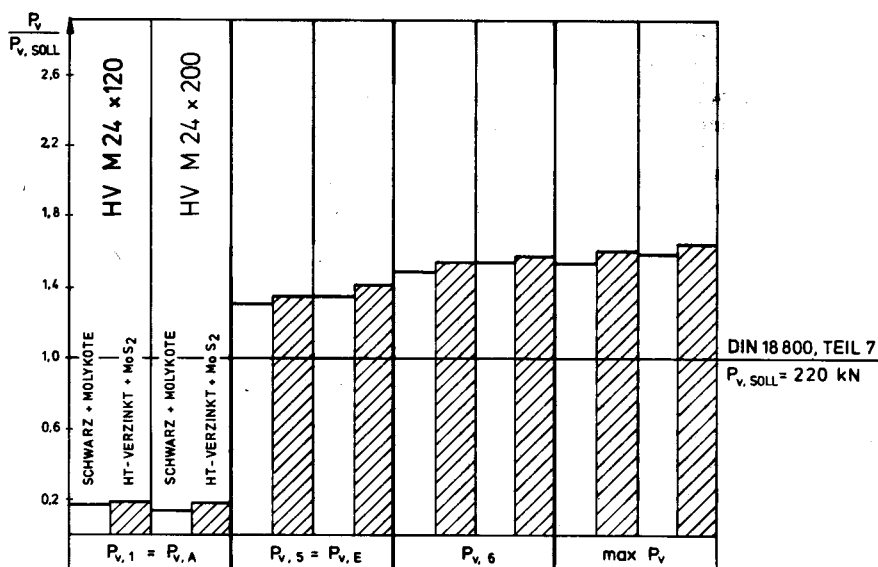


Bild 3. Vorspannkraftverteilung, die an einzelnen Punkten des Diagramms nach Bild 1 erreicht werden.

Die Schmierung erfolgte auf beiden Oberflächen durch MoS_2 (Molykote), und zwar durch Einsprühen des Schraubengewindes und jener Scheibe, auf der gedreht wird. Die Tabelle zeigt, welche Schrauben zum Versuch kamen.

Forschungsziel

Das allgemeine Forschungsziel mußte für den Stahlbau präzisiert werden. Dies erfolgt anhand des Bildes 1, dem typischen Abwürgdiagramm einer hochfesten Schraube. Die ϕ - P_v -Beziehung kann in vier Bereiche eingeteilt werden:

- Bereich 1: Nichtlineares Verhalten bis zum satten Anliegen aller verspannten Teile.
- Bereich 2: Lineares Verhalten zwischen Anziehdrehwinkel ϕ und Vorspannkraft P_v , Anfangs- und Endpunkt (= linearer Bereich).
- Bereich 3: Horizontales Plateau (= plastischer Bereich) mit zugehöriger Drehwinkelreserve.
- Bereich 4: Versagensbereich, in dem P_v abfällt.

Hieraus können die notwendigen Kenndaten für das Anziehen mit dem Drehmomentverfahren und für jenes mit dem Drehwinkelverfahren ermittelt werden. Ferner können Tragfähigkeitsreserven gegenüber der Soll-Vorspannung nach DIN 18 000 und plastische Reserven beim Anziehen erkannt werden. Man kann das unterschiedliche Anziehverhalten von schwarzer und von HT-verzinkter HV-Schraube bei ein- und derselben Schmierung feststellen.

Schließlich kann zur Beantwortung der Frage 7 überprüft werden, inwieweit die zulässigen übertragbaren Kräfte im Stahlhochbau sowie im Straßen- und im Eisenbahnbrückenbau für gleitfeste Verbindungen (GV-Verbindungen), Scher-Lochleibungs-Verbindungen (SL-Verbindungen), Zugverbindungen und Verbindungen mit kombinierten Beanspruchungen so beibehalten werden können, wie sie in den zuständigen Vorschriften festgelegt sind.

Die gesamten Ermittlungen der obengenannten Kenndaten erfolgten auf statistischer Basis; deshalb kam die relativ große Anzahl von Schrauben zum Versuch.

Versuchsdurchführung

Die Abwürgversuche wurden auf eigens für diesen Zweck entwickelten Abwürganlagen durchgeführt. Die Aufzeichnung der Meßdaten (hier M_A und P_v) erfolgte elektronisch auf den Impuls hin, der alle 15° vom Drehwinkelgeber gegeben wurde. Die Aufzeichnung erfolgte durch die Meßdatenerfassungs- und

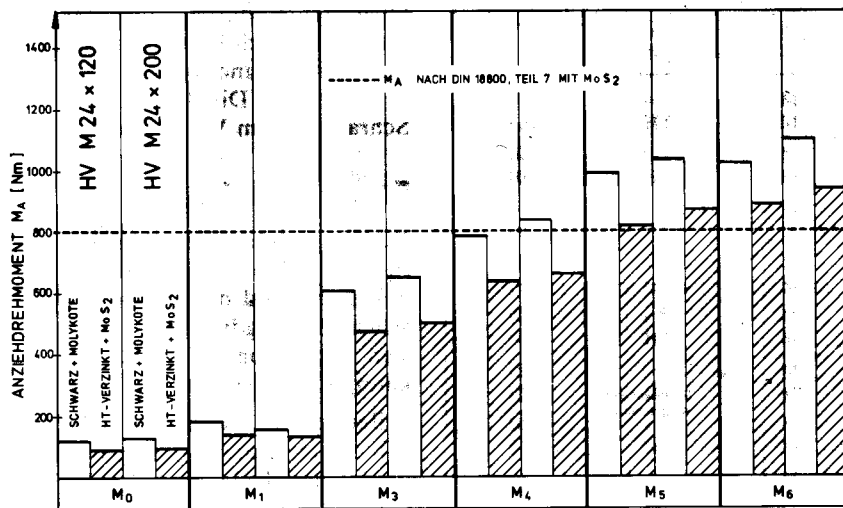


Bild 4. Anziehdrehmomente, die zum Erreichen der Vorspannkraften an den einzelnen Punkten des Diagramms nach Bild 1 erforderlich sind.

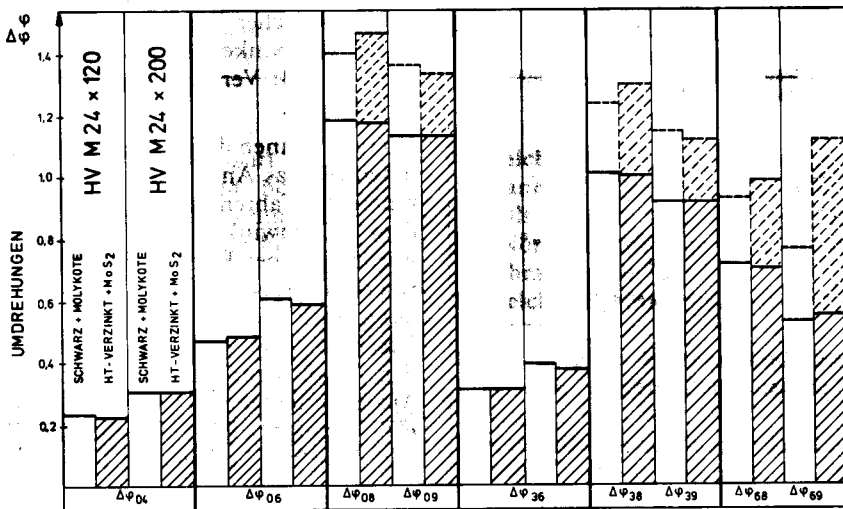


Bild 5. Weiterziehewinkel $\Delta\phi_{ik}$ zwischen den einzelnen Punkten des Diagramms nach Bild 1.

ben jenseits $\phi = 660^\circ$ abspielt, ist Zerstörung, was sich zwischen 420° und 660° abspielt, ist Plastizieren.

Versuchsergebnisse

Die Bedeutung der Markierungspunkte 0 bis 9 bei dem typischen Abwürgdiagramm ist in Bild 1 angegeben. Zur Beantwortung der oben gestellten Fragen interessieren speziell die Punkte

- 1 = A = Anfang des linear elastischen Bereichs
- 3 = 75 % von $P_{v,soll}$ erreicht
- 4 = 100 % von $P_{v,soll}$ erreicht
- 5 = E = Ende des linear elastischen Bereichs
- 6 = Anfang des plastischen Bereichs
- 7 = max. P_v erreicht

Stellvertretend für alle anderen Schraubendurchmesser und -längen zeigt Bild 3 die an den Markierungspunkten erreichten Vorspannkraften für HV-Schrauben M24 x 120 und M24 x 200. Grundsätzlich kann man aussagen, daß bis auf Streuungen kein Unterschied zwischen den Oberflächen- und Schmierzuständen schwarz + MoS₂ und HT-verzinkt + MoS₂ besteht. Der lineare Bereich, der natürlich von der Paketdicke und der Anzahl Fugen abhängt, wurde bei 20 % von $P_{v,soll}$ nach DIN 18 800 (Teil 7) erreicht. Die Soll-Vorspannkraft liegt im elastischen Bereich; dessen Ende $P_{v,5}$ ist um etwa 30 % über $P_{v,soll} = 220$ kN. Beim Beginn des plastischen Bereichs erreicht die Vorspannkraft rund 50 % mehr als der Soll-Wert.

Inserat

-verarbeitungsanlage so schnell, daß man von einer simultanen Registrierung der beiden genannten Werte sprechen darf. Die statistische Auswertung aller Daten gleichartiger Schrauben wurde auf der Rechenanlage «Univac 1108» der Universität Karlsruhe vorgenommen.

Die Versuchsdurchführung war immer gleichartig. Ein auf die Schraubenlänge abgestimmtes Stahlpaket mit der Testschraube wurde eingebaut. Innerhalb des Klemmpaketes befand sich eine spezielle flache, auf den jeweiligen Schraubendurchmesser ausgelegte und auf die Vorspannkraft geeichte Meßdose. Das Paket wurde mit dem Schraubenkopf in einen Sechskant eingelegt; das Paket selbst wurde am Mitdrehen gehindert. Der Antrieb für die Mutterumdrehung kam von einem Elektromotor mit Getriebe; die Umdrehungsgeschwindigkeit der Mutter lag konstant bei 10 min^{-1} .

Ausführlichere Beschreibungen der Versuchsvorrichtung, Meßdatenerfassung und Meßdatenverarbeitung sind in [4] enthalten.

Die Druckerplots der P_v - M_A - ϕ -Beziehungen in den Bildern 2a und 2b zeigen zwei verschiedene Verhaltensweisen der HV-Schrauben im Versagenszustand. Während im Bild 2a der Schaft im Gewinde abgedreht wurde und daher der plötzliche P_v -Abfall bei ungefähr $\phi = 720^\circ$ bedingt ist, liegt nach Bild 2b «Gewindeabstreifen» vor. Hier bleiben Restklemmkraften wirksam, und durch die Anhäufung abgestreifter Gewindegänge in der Mutter tritt nochmals ein deutlicher Drehmomentanstieg auf. Alles, was sich bei diesen beiden Schrau-

ben jenseits $\phi = 660^\circ$ abspielt, ist Zerstörung, was sich zwischen 420° und 660° abspielt, ist Plastizieren.

Bild 4 zeigt die zum Erreichen der Vorspannkraft an den einzelnen Punkten erforderlichen Anziehmomente M_A . HT-verzinkte HV-Schrauben mit MoS_2 verhalten sich bei höheren Vorspannkraften deutlich günstiger als schwarze mit MoS_2 . Mit dem Soll-Anziehmoment von 800 Nm erreicht man bei HT-verzinkten Schrauben Vorspannkraften, die deutlich über den Soll-Werten, in der Regel knapp unter $P_{V,5}$, liegen. Im Falle der HV M24 \times 200 schwarz + MoS_2 erreicht man die Soll-Vorspannung nicht ganz. Die etwa gleich hohen Anziehmomente für $P_{V,5}$ und $P_{V,6}$ zeigen an, daß die Benutzung des Drehmomentes als stellvertretende Meß- und Steuergröße für die Vorspannkraft im plastischen Bereich kritisch wird; aus dem genauen Studium wissen wir, daß sie hier sogar aufgegeben werden muß. Das Drehmomentverfahren eignet sich deshalb für das Anziehen in den plastischen Bereich nicht.

Bild 5 schließlich gibt Auskunft über die Weiterzieh Winkel $\Delta \varphi_{ik}$, die notwendig sind, um vom Punkt i auf dem Abwürgdiagramm zum Punkt k zu kommen. Sie werden für das Anziehen nach dem Drehwinkelverfahren benötigt. Die DIN 18 800 (Teil 7) schreibt vor, daß bei Schrauben M24 \times 120 nach Aufbringen von 10 % der Soll-Vorspannkraft mit einem Voranziehmoment (Punkt 0) noch ein Weiterzieh Winkel von $\frac{2}{3}$ Umdrehung, bei Schrauben HV M24 \times 200 ab diesem Punkt ein Weiterzieh Winkel von $\frac{3}{4}$ Umdrehung notwendig ist, um mit Sicherheit die Soll-Vorspannkraft $P_{V,4}$ zu erreichen. Die gemessenen $\Delta \varphi_{04}$ -Werte liegen deutlich darunter, das heißt, man bewegt sich bei Anwendung

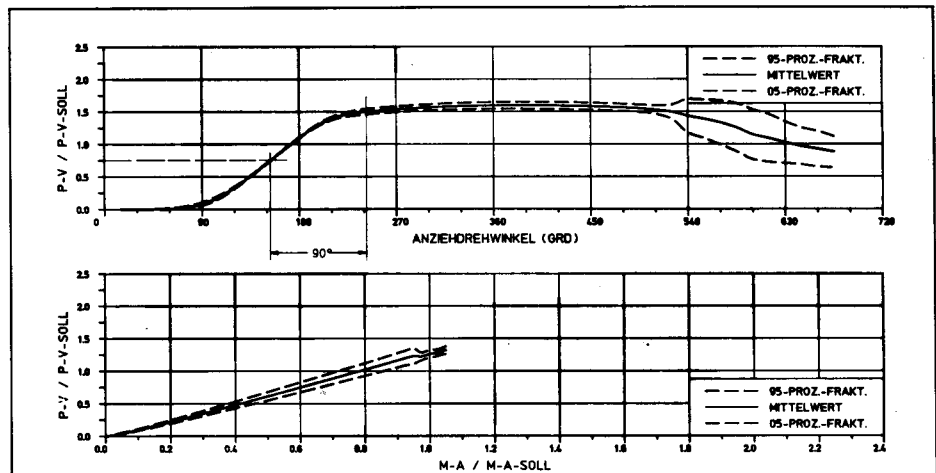


Bild 6. Statistische Auswertung der Untersuchungen an HV M24 \times 120, HT-verzinkt + Molykote; φ - P_V -Diagramm, M_A - P_V -Diagramm. P_V -soll = 220 kN, M_A -soll = 800 Nm.

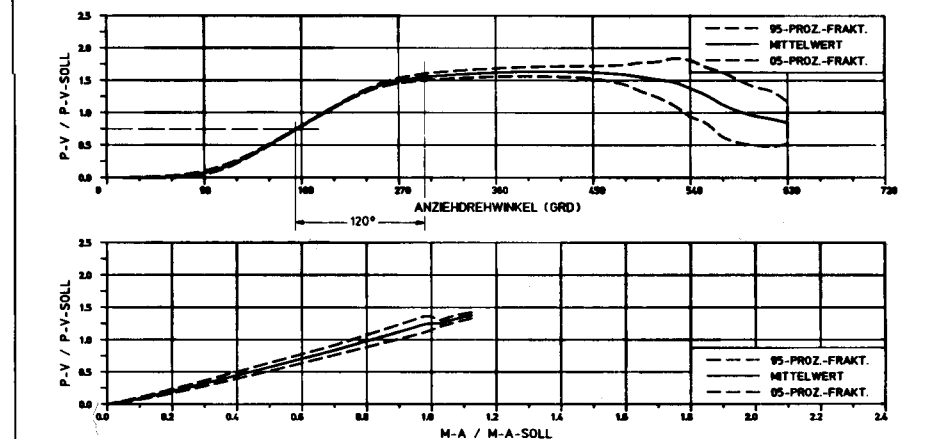


Bild 7. Statistische Auswertung der Untersuchungen an HV M24 = 200, HT-verzinkt + Molykote; φ - P_V -Diagramm, M_A - P_V -Diagramm. P_V -soll = 220 kN, M_A -soll = 800 Nm.

der Vorschrift DIN 18 800, (Teil 7) auch bei HT-verzinkten Schrauben mit MoS_2 im sicheren Bereich. Man kann sogar erwarten, daß man immer bis an den plastischen Bereich gelangt (vergleiche $\Delta \varphi_{06}$).

Holländische, EKS- und Eurocode-3-Vorschläge fordern ein Voranziehmoment, mit dem 75 % der Soll-Vorspannkraft erreicht werden; danach soll ein zusätzlicher Weiterzieh Winkel von $\Delta \varphi = 90^\circ$ bis 120° (t = Gesamtdicke der verbundenen Teile in mm, d = Schraubendurchmesser in mm) aufgebracht werden. Hieraus würden sich nach den Bildern 6 und 7 Vorspannkraften ergeben, die gerade am Beginn des plastischen Bereichs liegen und so eine optimale Ausnutzung bieten.

Der eingangs angeführte Punkt 7 kann nach diesen Ergebnissen so beantwortet werden, daß das Anziehverhalten von hochtemperaturverzinkten hochfesten Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 die Anwendung der bisherigen Berech-

nungs-, Konstruktions- und Montage-regeln für feuerverzinkte hochfeste Schrauben im Stahlbau gestattet. Um letzte Zweifel auszuschließen, laufen zurzeit ergänzende Untersuchungen mit anderen Fabriken und aus anderen Feuerverzinkereien. [7] [5] [10]

Literatur

- 1 Harper S., Brown R. S.: High Temperature Galvanizing of Silicon-killed Steel. Proceedings 12th International Galvanizing Conference. Paris 1979, London 1981.
- 2 Kloos K.-H., Schneider W.: Untersuchungen zur Anwendung feuerverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9. VDI-Z. 125 (1983), Nr. 19.
- 3 Kloos K.-H.: Hochtemperaturverzinkung von 12.9-Schrauben/Teil I: Mechanische Eigenschaften. Forschungsbericht über das AIF-Programm Nr. 5228/I.
- 4 Valtinat G., Frey P.: Abwürguntersuchungen an hochfesten Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 in feuerverzinkter und in schwarzer Ausführung. Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana (TH) Karlsruhe. 4. Folge-Heft 8, Karlsruhe 1983. (Bericht Nr. 89 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V., Düsseldorf).