Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 6 (1960)

Artikel: Hochfeste vorgespannte Schrauben (HV-Schrauben) als neuartige Verbindungsmittel des Stahlbaus

Autor: Steinhardt, O.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-6968

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

IIb3

Hochfeste vorgespannte Schrauben (HV-Schrauben) als neuartige Verbindungsmittel des Stahlbaus

High-Tensile Prestressed Bolts as a New Type of Structural Connection in Steel Construction

L'emploi de boulons à haute résistance (boulons HR) en tant que nouveau moyen d'assemblage de la construction métallique

O. STEINHARDT
Prof. Dr. Ing., Karlsruhe

Einführung

Über die Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln, wurden bisher 4 grundlegende Schriften, nämlich die beiden «Berichte» Nr. 18 (1954) und Nr. 22 (1959), die «Veröffentlichung Nr. 22» (1958) und die «Richtlinien» (1956) der Fachwelt zur Verfügung gestellt. Sie enthalten zwar u. a. auch Hinweise auf die Entwicklungsarbeiten im Ausland, legen jedoch hauptsächlich die Ergebnisse der *deutschen* Forschungstätigkeit seit dem Jahre 1953 vor. Sie ermöglichen deren Nutzbarmachung durch die «Vorläufigen Richtlinien für Berechnung, Ausführung und bauliche Durchbildung von gleitfesten Schraubenverbindungen (HV-Verbindungen)» und behandeln auch die industrielle Praxis der Schraubenherstellung sowie die stahlbautechnische Handhabung der neuen Verbindungsweise. — Nach Beauftragung durch den Deutschen Ausschuß für Stahlbau wurden bis zum Herbst des Jahres 1958 in der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine an der Technischen Hochschule Karlsruhe zwei Teilprogramme vollständig abgeschlossen; ein *drittes* Teilprogramm läuft zur Zeit, wobei sich ein reger Gedankenaustausch mit den Fachkollegen fast aller europäischer Nationen entwickelt.

1. Systematik des deutschen Forschungsbeitrages

Es wurde bisher gemäß folgender *Systematik* geforscht:

Beanspruchung und Festigkeit der HV-Schrauben,
Gleitwiderstand von HV-Verbindungen (Tragmechanismus),

Verhalten von HV-Verbindungen unter statischer Belastung,
Verhalten von HV-Verbindungen unter schwingender Belastung,
Verformungen von HV-Verbindungen mit steigender Belastung,
Die Schraubenvorspannung unter Dauerbetrieb,
Konstruktionsformen mit HV-Verschraubung,
Die Praxis der neuartigen Verbindungstechnik.

Sehr bald erwies es sich, daß der «gesamte Gleitwiderstand» einer HV-Verbindung nicht allein vom aufzubringenden Anziehmoment, sondern vor allem auch vom jeweils erzeugten *Reibbeiwert* μ der aufeinandergepreßten Kontakt- und Reibflächen abhängig ist. Es wurde daher der Oberflächenbehandlung der Reibflächen große Aufmerksamkeit gewidmet, weil hierdurch die «maßgebende Tragfähigkeit» einer HV-Verbindung bis zur Gleitgrenze leicht um 50% bis 100% gesteigert zu werden vermag, was außer bei einer vorwiegend *ruhenden* Belastung vor allem auch bei *schwingender* Belastung sowie für *kombinierte* Verbindungen (z. B. Nieten + HV-Verschraubung oder Schweißung + HV-Verschraubung) von großer Bedeutung ist.

2. Beanspruchung und Festigkeit der HV-Schrauben

Für die Abmessungen der HV-Schrauben war zunächst die deutsche DIN 931 maßgebend, späterhin wurden für die Anwendung im Stahlbau — der hauptsächlich die Durchmesser M 18 bis M 24 benötigt — einige *Formkorrekturen* vorgenommen. Weil nämlich gemäß DIN 931 der Übergangsradius zwischen Schraubenschaft und Kopf für M 12 bis M 22 nur 1,0 mm beträgt und der gleichzeitigen Torsions- und Zugbeanspruchung an dieser Stelle nicht immer befriedigend gewachsen war, so wurde für HV-Schrauben dieser Radius für M 12 bis M 20 auf $R = 1{,}5$ mm erhöht, ab M 22 aufwärts sogar auf $R = 2{,}0$ mm. Ferner wurden neben Vollschaftschrauben auch Dünnschaftschrauben mit aufgewalztem bzw. aufgerolltem Gewinde erpropt, bei denen die Gewindeaußendurchmesser jeweils gleich groß waren. Zuletzt wurden die ursprünglich 8 mm dicken Unterlegscheiben gemäß DIN 1050, Bl. 2, die sich als sehr aufwendig erwiesen hatten, ohne feststellbaren Nachteil auf die neue Form abgeändert; sie entsprechen nunmehr mit Ausnahme der Dicke der Vorschrift DIN 125; ihre Dicke ist für Durchmesser von 14 bis 24 mm mindestens 4 mm, darüber hinaus 5 mm. Die einseitigen außenliegenden Abfasungen von 45° passen sich dem Ausrundungsradius des Schraubenkopfes an, außerdem dienen sie zur Kontrolle des technisch einwandfreien Einbaus. Diese U-Scheiben der neuen Form sind auch nicht mehr spanabhebend bearbeitet, sondern aus Blechen entsprechender Dicke gestanzt und anschließend vergütet.

Die untersuchten Materialgüten der HV-Schrauben waren 8 G und 10 K sowie 12 K im Sinne der DIN 267. Die zur Zeit zweckmäßigste Schraubenqualität 10 K ergab die Festigkeitswerte gemäß Tabelle 1, wobei die Bruch-

Tabelle 1. Festigkeitswerte der untersuchten Schrauben, Materialgüte 10 K

Versuch Nr.	Nenn-durch-messer	Stabform	Streckgrenze $\sigma_{0.2}$ kg/mm²	Zerreißfestig-keit σ_B kg/mm²	Bruchdehnung δ_5 %
1	M 16	glatt	104,2	109,8	14,0
2	M 16	glatt	96,5	102,3	13,1
3	M 16	glatt	102,2	107,3	13,1
Mittel			101,0	106,5	13,4
4	M 16	Gewinde	101,4	114,9	—
5	M 16	Gewinde	100,7	114,1	—
6	M 16	Gewinde	102,1	114,9	—
Mittel			101,4	114,6	
1	M 22	glatt	100,0	107,0	14,4
2	M 22	glatt	103,2	111,2	12,9
3	M 22	glatt	102,8	110,7	12,7
Mittel			102,0	107,6	13,4
4	M 22	Gewinde	117,8	127,8	—
5	M 22	Gewinde	122,0	127,4	—
6	M 22	Gewinde	120,0	126,0	—
Mittel			120,0	127,1	

Tabelle 2. Ergebnisse der Abwürgversuche mit Voll- und Dünnschaftschrauben

Gewinde-⌀	Schrau-benform	Hersteller und Materialgüte		Anziehmomente in kgm		M_B/M_a
		Schraube	Mutter	M_a	M_B	
M 12	D	I 10 K	I 6 S	9,3	16	1,72
M 16	V	I 10 K	I 8 G	23,9	38 bis 45	1,59 bis 1,88
M 16	D	I 10 K	I 8 G	23,9		
M 16	D	I 10 K	I 6 S	23,9	38 bis 39	1,59 bis 1,63
M 16	D	I 10 K	I 6 S	23,9	40 bis 41	1,67 bis 1,72
M 16	V	II 10 K	II 8 G	23,9	45 bis 47	1,88 bis 1,97
M 16	V	II 10 K	I 8 G	23,9	46 bis 70	1,93 bis 2,93
M 16	D	III 10 K	III 10 K	23,9	45 bis 55	1,88 bis 2,30
M 16·1,5*	D	III 10 K	III 10 K	23,9	50 bis 60	2,09 bis 2,51
M 20	V	I 10 K	I 6 S	46,3	88 bis 93	1,90 bis 2,00
M 22	V	I 8 G	I 6 S	44,7	72 bis 76	1,61 bis 1,70
M 22	D	I 10 K	I 6 S	63,9	87 u. 89	1,63 u. 1,39
M 22	V	I 10 K	I 6 S	63,9	92	1,44
M 24	V	I 12 K	I 8 G	96,0	126, 126, 130	1,31 bis 1,35
M 24	V	I 12 K	I 10 K	96,0	182, 182	1,90
M 24	V	I 12 K	I 10 K	96,0	(175, 175)	(1,82)

* Feingewinde-Schrauben mit doppelter Normhöhe der Muttern.

dehnung δ_5 am glatten Schaft ermittelt und die 0,2-Dehngrenze sowie die Bruchgrenze jeweils auf den Gewindekerndurchmesser bezogen sind. — Abwürgversuche mit Schrauben *und* Muttern verschiedener Form und Herkunft zeigt Tabelle 2; hier sind die bis zum Bruch ertragenen Drehmomente M_B mit den nach den «Vorläufigen Richtlinien» festgelegten Werten M_a verglichen. Das in der letzten Spalte angegebene Verhältnis M_B/M_a ergibt die beim Anziehen vorhandene Bruchsicherheit der HV-Schraube. — In den letzten beiden Zeilen erkennt man das für die zukünftige Entwicklung interessante Verhalten von Schraubenbolzen der Güte 12K mit Muttern der Güte 10K; derartige HV-Schrauben zeigen in der Anwendung eine um ca. 20% gesteigerte Tragfähigkeit.

Von Bedeutung für die Berechnung der Tragfähigkeit einer HV-Verbindung ist zunächst die Abhängigkeit der *Vorspannkraft* P_v vom Anziehdrehmoment M_a. Bei einem Steigungswinkel γ des Schraubengewindes und den Reibbeiwerten μ_1 bzw. μ_2 in der Gewindefläche bzw. an der Mutterauflage setzen sich dem Anziehmoment (näherungsweise) folgende Widerstände entgegen (r_F = Flankenradius, r_M = mittlerer Radius von Kopf und Mutterauflage):

$$M_a \approx P_v \operatorname{tg}\gamma\, r_F + P_v \mu_1 r_F + P_v \mu_2 r_M .$$

Drückt man r_F und r_M durch den Nenndurchmesser D der Schraube aus, so erhält man — über $r_F = \alpha \frac{D}{2}$ und $r_M = \beta \frac{D}{2}$ — zuletzt

$$M_a = P_v D \frac{(\operatorname{tg}\gamma + \mu_1)\alpha + \mu_2 \beta}{2} = P_v D k ,$$

bzw.

$$P_v = \frac{M_a}{D k} .$$

Versuchstechnisch wurden für M 16- bzw. M 22-Schrauben k-Werte von 0,163 bzw. 0,167 ermittelt, wobei leichtgefettete 8 G-Schrauben verwendet wurden. Vergleichsversuche an nichtgefetteten, phosphatierten 10 K-Schrauben zeigten keine nennenswerten Abweichungen.

Weiterhin wurden die Verdrehwinkel ϑ einer M 16-Schraube bei Verwendung unterschiedlicher Muttern und Unterlegscheiben (unter Annahme einer vollständigen Krafteinleitung nach dem zweiten Gewindegang) in Abhängigkeit vom Verdrehmoment M_T untersucht:

$$M_T = G\vartheta \Big/ \left(\frac{l_s}{J_{D_s}} + \frac{l_k}{J_{D_k}} \right),$$

l_s = Länge des glatten Schaftes, l_k = Länge des Gewindeteils,
J_D = polares Trägheitsmoment für Schaft (s) bzw. Kern (k).

Die Messungsergebnisse erwiesen, daß *nach* Beendigung des Anziehens eine gewisse Verringerung des Winkels ϑ eintrat, was auf eine Rückfederung infolge «umgelagerter» Kräftewirkung auf die Mutter zurückzuführen ist. Bei einem Anzugsmoment M_a von 20 kg/m erhielt man z. B. $M_{T\,max} = 11{,}8$ kgm $= 0{,}59\, M_a$ und ein Restmoment $M_{T\,Rest} = 8{,}4$ kgm $= 0{,}42\, M_a$.

Zulässig sind *solche* Anziehdrehmomente, die eine schädigende Anstrengung im Kernquerschnitt vermeiden. Die entsprechende Vergleichsspannung σ_V ergibt sich zu:

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{M_a}{k\,D\,F_k}\right)^2 + 3\left(\frac{0{,}59\,M_a}{W_k}\right)^2}.$$

Für die Schraube M 16 ist z. B.: $D = 16$ mm, $F_k = 1{,}41$ cm², $W_k = \frac{\pi D_k^3}{16} = 0{,}471$ cm³; man erhält dann

$$\sigma_V = 1{,}28\,\sigma_Z.$$

Auch für die Schraube M 22 zeigt sich, daß die Größtspannung σ_V durch den Einfluß der Verdrehung um 28% über der reinen Zugbeanspruchung liegt. Um eine Überbeanspruchung im Gewindequerschnitt zu vermeiden, könnte man für die Anwendung eine 1,25-fache Sicherheit gegen Erreichung der Streckgrenze als ausreichend ansehen, woraus sich die folgenden zulässigen Anziehdrehmomente bei den Güten 8 G bzw. 10 K ergäben:

$$M_{a\,zul} \begin{cases} \text{für M 16: } 14{,}7 \text{ kg/m bzw. } 20{,}7 \text{ kg/m} \\ \text{für M 22: } 40{,}7 \text{ kg/m bzw. } 57{,}0 \text{ kg/m;} \end{cases}$$

diese Werte wurden späterhin für die «Vorläufigen Richtlinien» jedoch wieder um 10% erhöht, und zwar einerseits mit Rücksicht auf die Einstellgenauigkeit der Anziehgeräte, andererseits im Hinblick darauf, daß der «Spannungsquerschnitt» im Gewindegrund ca. 5% bis 8% größer als der Kernquerschnitt angesehen werden darf.

3. Der Gleitwiderstand von HV-Verbindungen (Tragmechanismus)

Ein für den Stahlbau geeignetes Verbindungsmittel soll hauptsächlich drei technische *Eigenschaften* möglichst vollkommen aufweisen: *Erstens* eine pro *Einheit* möglichst große Tragfähigkeit bis zu einer quantitativ sicher festlegbaren Grenze; dieses führt nämlich zu kleinen Stoß- bzw. Anschlußbildern. Es ist dabei *zusätzlich* sehr wünschenswert, daß die jeweilige Belastung pro Einheit, d. h. hier pro HV-Schraube (analog wie pro Niet oder pro cm² Schweißnaht) dem Mittelwert aus der Gesamtbelastung praktisch gleichgesetzt werden darf. — *Zweitens* soll oberhalb der für die zulässige Nutzbeanspruchung maßgebende Belastungsgrenze eine erfaßbare Tragreserve — unter Umständen bei Inkaufnahme gewisser Verformungen der Verbindung — vorhanden sein; dies ist insbesondere bei den vorwiegend ruhend belasteten Tragwerken des Industrie- und Hochbaus von Wert. — *Drittens* soll die Spannungsverteilung im kritischen Stab- oder Trägerquerschnitt am Anfang des Stoßes oder Anschlusses eine möglichst ausgeglichene sein; dies ist insbesondere bei den «dauerbeanspruchten» Konstruktionen des Brückenbaus und des Kranbaus von Bedeutung.

Bei den HV-Verbindungen werden hochfeste Schrauben, die mit einem gewissen Spiel in gebohrten (oder unter Umständen in gestanzten) Löchern sitzen, durch Anziehen der Mutter so weit vorgespannt, daß bedeutende Scherkräfte bis zu einer charakteristischen *Gleitgrenze* P_g allein durch Reibung zwischen den zu verbindenden Stab-, Träger-, Platten- bzw. Schalenteilen übertragen werden können. In der Formel für diese Gleitlast

$$P_g = \mu\, m\, n\, P_v$$

bedeuten m die *Schnittigkeit* der Einzelschrauben, n die gesamte *Anzahl* der Schrauben und P_v die axiale *Vorspannkraft* je Schraube.

Die *Reibbeiwerte* μ schwanken je nach Beschaffenheit oder Behandlungsweise der aufeinander gepreßten Oberflächen zwar in weiten Grenzen, können jedoch insbesondere bei Flammstrahlung oder Sandstrahlung für St 37 mit $\mu_1 \geqq 0{,}45$ und St 52 mit $\mu_2 \geqq 0{,}60$ i. d. R. mit ausreichender Sicherheit erreicht und in die Berechnung eingeführt werden. Dann werden weiterhin für den Stahlhochbau bzw. Stahlbrückenbau *Sicherheitsfaktoren* ν_H bzw. ν_B festgelegt. Man erhält zuletzt für die *zulässige Tragkraft* eines Anschlusses

$$N_{zul} = \frac{\mu}{\nu}\, m\, n\, P_v .$$

Bei HV-Verbindungen unterscheidet man drei Beanspruchungszustände, denen jeweils ein geänderter Tragmechanismus zugeordnet werden muß. Der *Zustand 1* entspricht in etwa den exakten Theorien von FILLUNGER[1]), FIND-

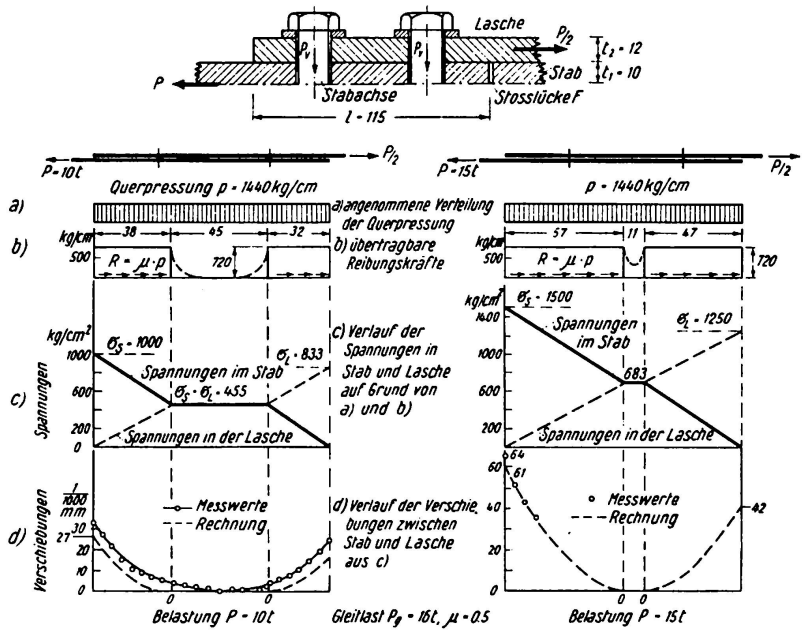

Fig. 1. Verschiebungen an einem HV-verschraubten Zugstoß nach Rechnung und Versuch.

---

[1]) FILLUNGER, P.: Über die Festigkeit von Löt-, Leim- und Nietverbindungen. O. W. Off. B. 1919.

EISEN [2]) u. a. m. Er gilt so lange, bis die an den Anschlußenden sitzenden Verbindungselemente ihre Gleitgrenze erreichen. — Der *Zustand 2* (teilweise geringes Gleiten oder «Setzen») wird durch vorstehende Fig. 1 charakterisiert. Hier zeigt sich, daß — bei Annahme einer gleichmäßig verteilten Fugenpressung p infolge der Schraubenspannkräfte P_v — die örtlichen Reibwerte (Scherkräfte) ihren Grenzwert $R = \mu p$ zwar *zuerst* an den Anschlußenden erreichen, daß aber dann weiterhin — nach Übergang des Zustandes 1 in den Zustand 2 — mit steigender Belastung der Verbindung (z. B. gemäß Versuch nach Fig. 2 von $P = 10$ t auf $P = 15$ t) die Bereiche *konstanten* Reibwiderstandes sich von den Anschlußenden zu deren Mitte hin ausbreiten. (An den Laschenenden wurden im vorliegenden Fall kleine Verschiebungen = «Setzungsrutschungen» bis zu 0,0064 mm gemessen, während der einfache Rechenansatz den entsprechenden Wert mit 0,006 mm ergab. Bei längeren Anschlüssen können derartige «Setzungsrutschungen» Werte von 0,02 bis 0,05 mm erreichen; auch ist i. a. die Umrechnung von P_v auf p nicht notwendig, da die Reibbeiwerte μ von der Größe p nahezu unabhängig sind.) Dieser Zustand 2 kann i. d. R. der Gleitgrenzenermittlung zugrunde gelegt werden; er besitzt große praktische Bedeutung. *Zustand* 3 (völliges Gleiten) wird erreicht, wenn über die gesamte Anschlußlänge die spezifische Gleitgrenze (d. h. also der Wert $\sum P_v \mu$) überschritten wird. Nunmehr bewegt sich die Verbindung (Stoß oder Anschluß) als Ganzes. Es werden dabei — entsprechend dem Lochspiel der HV-Schrauben — Wege von 0,5 bis 1,5 mm zurückgelegt, *ohne daß die Grenzlast* $\sum P_v \mu$ *zunächst merklich absinkt*; auch dieser Zustand ist praktisch wichtig, z. B. bei kombinierten Verbindungen.

Nach dem vollen Anliegen sämtlicher Schraubenschäfte kann man noch einen *Zustand 4* mit wiederum vollständig geändertem Mechanismus erkennen. Nun treten neben den Reibwiderständen bei den einzelnen Schrauben *gleichzeitig* noch Scher- und Leibungskräfte (ähnlich wie bei Nietverbindungen) auf, die je nach den Umständen eine weitere statisch-zügige Laststeigerung um 50% bis 100% ermöglichen. Die Verformungen sind *dabei* allerdings i. d. R. wesentlich größer als bei Nietverbindungen — wenn man nicht planmäßig ein Aufreiben der Bohrlöcher und ein entsprechend sehr kleines Lochspiel vorsieht (Paß-HV-Schrauben, die hier nicht weiter untersucht werden).

Diese summarische Beschreibung der wichtigsten Mechanismen einer HV-Verbindung berücksichtigt hauptsächlich den «Kraftfluß» (Spannungsführung) in *Längsrichtung* — sie soll anschließend in Einzelheiten erörtert werden. Späterhin wäre die Spannungsverteilung in *Querrichtung* des Stabes noch genauer zu beschreiben, da diese vor allem auch für die (schwingende) *Dauerbelastung* maßgebend wird.

---

[2]) FINDEISEN, C.: Versuche über die Beanspruchungen in den Laschen eines gestoßenen Flacheisens bei Verwendung zylindrischer Bolzen. Forsch.-Arb. VdI H. 229, Berlin 1920.

Der gesamte Gleitwiderstand P_g einer HV-Verbindung ist nach gegebener Vorspannkraft P_v, die gemäß $P_v = f(M_a)$ planmäßig mittels Drehmomentenschlüssel o. ä. eingebracht wird, nur noch abhängig von der jeweils vorliegenden Ausführungsform und vor allem vom Reibbeiwert, der seinerseits umgekehrt aus

$$\mu = \frac{P_g}{m\,n\,P_v}$$

experimentell bestimmt werden kann. Sehr zahlreiche Versuche brachten als Ergebnis die *Reibbeiwerte* μ gemäß Fig. 2. — Die große Bedeutung einer zweck-

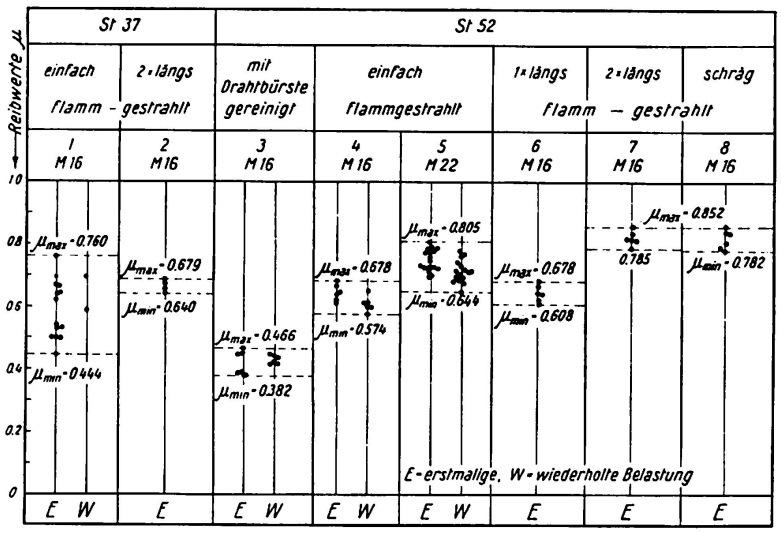

Fig. 2. Reibbeiwerte bei unterschiedlicher Oberflächenbehandlung (St 37 und St 52). Bemerkung: Bei unbehandelten Oberflächen ergaben sich (für Druck- und Zugkörper) μ-Werte zwischen 0,181 und 0,60 mit größter Häufigkeit bei $\mu = 0{,}30$.

mäßigen Oberflächenbehandlung der Kontaktflächen ist aus diesen Zusammenstellungen ersichtlich, wobei auch auf die Steigerungsfähigkeit der Reibung durch *doppeltes* bzw. *schräges* Flammstrahlen bei St 52 aufmerksam gemacht werden soll. Eine längere *Zwischenlagerung* ergab keinen Abfall der μ-Werte; eine Kombination der Behandlungsweisen Sandstrahlen/Flammstrahlen keine Steigerung oder Senkung; eine Kombination der Werkstoffe St 37 / St 52 brachte nur die geringeren Werte von St 37 ein. — Den «Vorläufigen Richtlinien» wurden für St 37 bzw. St 52 die bei sorgfältiger Ausführung leicht erzielbaren Reibbeiwerte $\mu = 0{,}45$ bzw. $\mu = 0{,}60$ zugrundegelegt, wobei für den *Hochbau* eine Sicherheitsspanne bis zur Gleitgrenze von 1,25 (H) und 1,10 (HZ), für den *Brückenbau* und *Kranbau* eine solche von 1,60 (H) und 1,40 (HZ) eingeführt wurde.

Der Einfluß der Größe der Berührungsflächen (Reibflächen) auf den Gleitwiderstand einer HV-Verbindung erwies sich im Pressungsbereich 1765 kg/cm² $< p_m <$ 4765 kg/cm² als vernachlässigbar gering. Ebenso zeigte es sich, daß HV-Schrauben-*Zahl* und -*Anordnung* für die *statische* Belastbarkeit einer Ver-

bindung keinen wesentlichen Einfluß auf die Höhe der Gleitlast besitzen. Es wurden noch einige Feststellungen über Reibbeiwerte μ bei *feuerverzinkten* Stahlflächen gemacht: Sowohl bei einschnittigen als auch bei zweischnittigen Verbindungen betrugen hier die μ-Werte nur $^1/_3$ bis $^1/_4$ derjenigen von flamm- oder sandgestrahlten Kontaktflächen.

4. Das Verhalten der HV-Verbindungen unter statischer Belastung

Die Ermittlung des spezifischen Gleitwiderstandes von HV-Schrauben war zunächst in über 300 Versuchen — vorwiegend an zweischnittigen Laschenkörpern aus Baustahl (St 37 bzw. St 52) mit 2×2 Schrauben — durchgeführt worden; ferner interessierte das Verhalten von HV-Verbindungen unter stati-

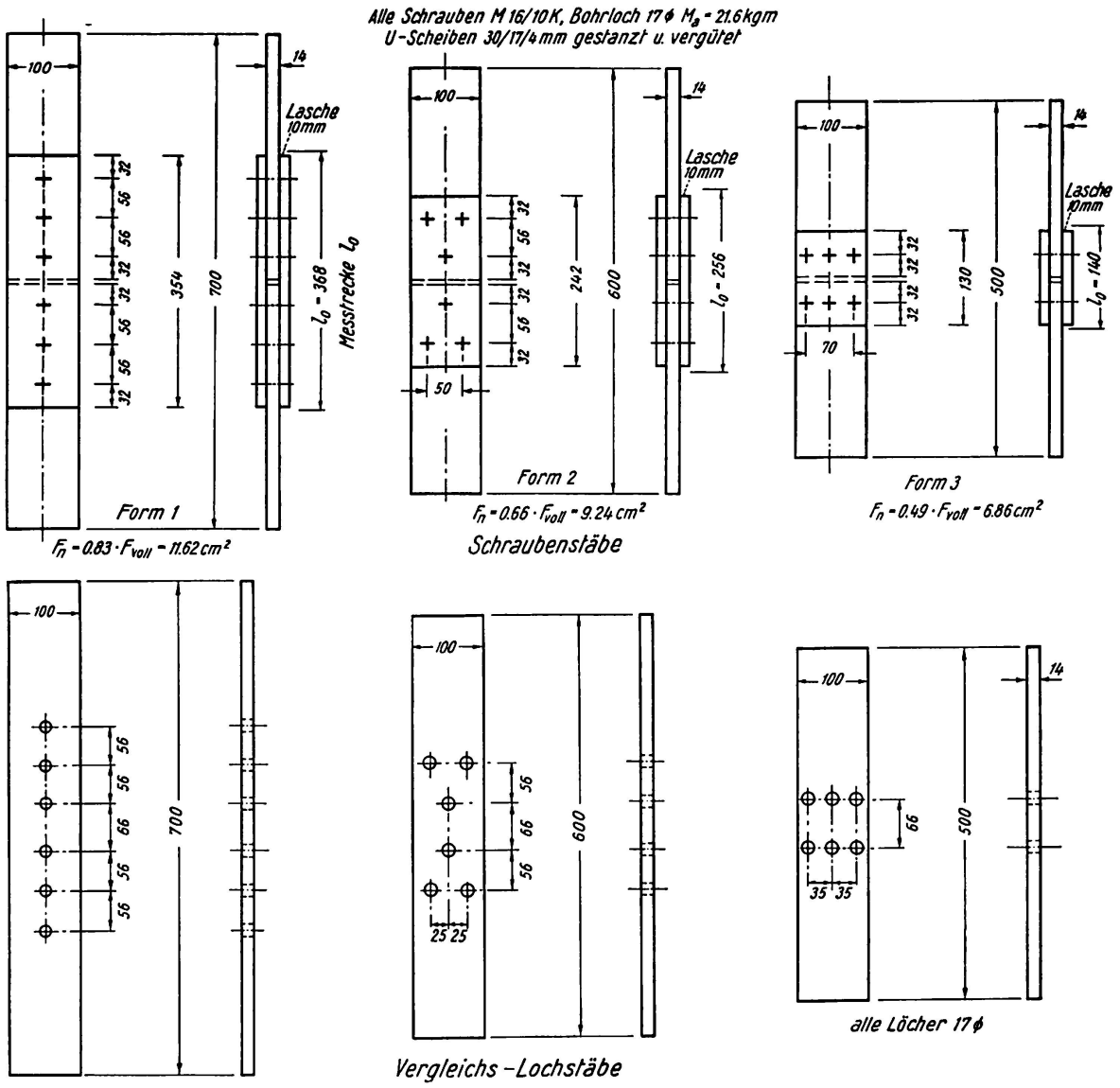

Fig. 3. Versuchskörper aus St 37 zur Ermittlung des Verhaltens bei statischer Belastung.

scher Zug- bzw. Druckbelastung bei unterschiedlicher Anzahl und Anordnung der Schrauben sowie bei unterschiedlicher «Lochschwächung» im kritischen Stabquerschnitt. — Es wurde daher eine *grundlegende Versuchsserie* an Stabformen gemäß Fig. 3 in Angriff genommen, bei welcher Lochstäbe, einfach verschraubte Stäbe und HV-Stäbe mit unterschiedlicher Lochschwächung von 17%, 34% und 51% in ihrem Dehn- und Tragverhalten unter zügiger Belastung miteinander verglichen werden konnten. Die HV-Schrauben M 16, Güte 10 K, saßen dabei in Bohrlöchern von 17 mm Durchmesser. Die Festigkeitswerte des Grundmaterials waren für Mittelstück bzw. Decklaschen folgende: Streckgrenze 2880 kg/cm² bzw. 3090 kg/cm², Zugfestigkeit 4200 kg/cm² bzw. 4050 kg/cm² und Bruchdehnung δ_{10} = 29,6% bzw. 25,2%. — Das Tragverhalten der Voll- bzw. Lochstäbe ist aus Fig. 4 erkennbar; dieses Bild zeigt dazu die

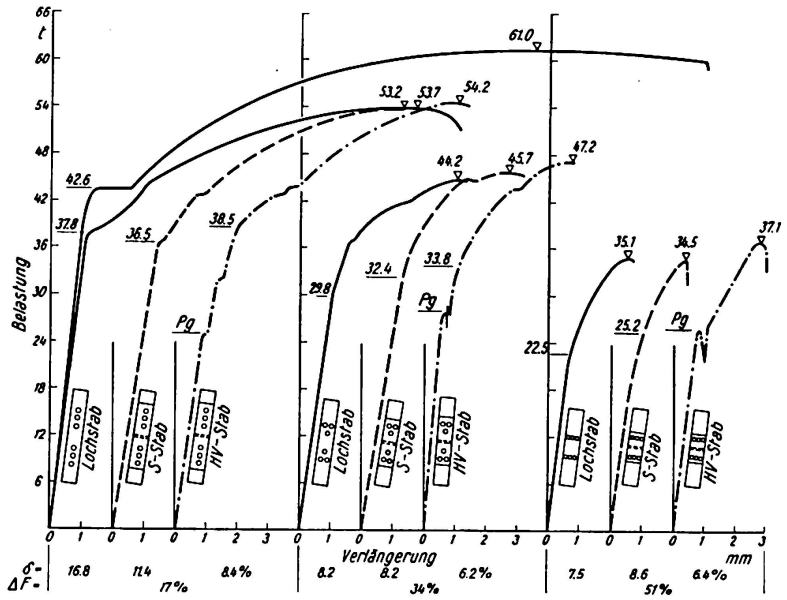

Fig. 4. Last-Verlängerungs-Linien für Loch-, Schrauben- und HV-Stäbe bei statischer Zugbelastung (Meßstrecken vgl. Fig. 3).

Diagramme der Lochstabtypen im Vergleich zu den entsprechenden Diagrammen von Bolzen- bzw. HV-Stäben. Bemerkenswert ist bei den Versuchsergebnissen, daß innerhalb der Meßstrecke die mit steigender Last ermittelten Verlängerungen für die Stabformen 1 und 2 sogar hinter denjenigen des Vollstabes anfänglich zurückbleiben, trotzdem die örtlichen Lochschwächungen 17% bzw. 34% betragen; erst oberhalb von P_{zul} werden hier die rechnerischen Nennwerte der mittleren Dehnungen erreicht. Die Gleitlasten sind nahezu unabhängig von der Anordnung der HV-Schrauben bzw. von der Größe des Nettoquerschnittes. Ferner zeigt sich, daß bei Zugrundelegung der zulässigen Belastungen gemäß den jeweiligen *Stabquerschnitten* die Sicherheiten gegen Bruch mit zunehmender Lochschwächung ansteigen; bei Bezug auf den nach den «Vorläufigen Richtlinien» bemessenen HV-*Schraubenanschluß* ist die Sicherheit

gegen Gleiten bei allen 3 Stabformen in etwa gleich, während hier die Sicherheit gegen *Bruch* mit zunehmender Lochschwächung abnimmt.

Außer an besonderen Druckversuchskörpern wurde der Einfluß der Schraubenanordnung auf die Größe des mittleren Reibbeiwertes μ an zahlreichen Bauformen überprüft. Es zeigte sich durchweg, daß der Scherkraftausgleich auf den Mittelwert innerhalb eines HV-Schrauben-Anschlußbildes in sehr weiten Grenzen erfolgt, d. h. praktisch *immer* zulässig erscheint.

Bei statischer Beanspruchung einer HV-Verbindung stellt die rechnerisch erfaßbare Gleitgrenze P_g eine gute Bemessungsgrundlage dar, weil vor Erreichung der Fließgrenze des jeweils maßgebenden Querschnitts infolge der Querkontraktion über die Klemmlängen bei Zug- bzw. Druckstäben eine negative bzw. positive Veränderung der Schraubenvorspannkräfte um weniger als 10% erfolgt. — Oberhalb der Gleitgrenze der HV-Verbindung ist auch weiterhin mit Aufrechterhaltung der Klemmkräfte zu rechnen, wodurch (insbesondere bei kürzeren Anschlüssen) eine Verzögerung des Fließens im kritischen Lochquerschnitt bewirkt wird.

5. Verhalten der HV-Verbindungen unter schwingender Belastung

Für die Ermittlung der *Zugschwellfestigkeit* von HV-Verbindungen wurden die Versuchsstäbe zwar mit denjenigen der statischen Prüfungen vergleichbar, jedoch im Hinblick auf die jetzt andere Fragestellung mit verstärktem Schraubenanschluß ausgebildet. Es sollte geklärt werden, welche *Stabspannungen*, bezogen auf den Brutto- oder Nettoquerschnitt, für die Größe der erreichten Dauerfestigkeit maßgebend sind. Die Form der Versuchsstäbe wurde deshalb so gewählt, daß die jeweils erreichbare Gesamt-Gleitlast mit Sicherheit oberhalb der Dauerlast lag. Gleichzeitig wurden wiederum Dauerschwellversuche an entsprechenden Lochstäben vorgenommen, da bei Nietstäben (im Hinblick auf zu erwartende Streuungen infolge unterschiedlicher Klemmkräfte und Reibbeiwerte) keine so zuverlässigen Vergleichswerte zu erwarten waren.

Für die *statischen* Versuche war — für Belastungshöhen *unterhalb* der Gleitgrenze — die Spannungsverteilung über dem Stab-Anschlußquerschnitt ohne praktische Bedeutung; *oberhalb* genannter Grenze sind allerdings der stark abgeminderte Lochleibungsdruck und die sehr hohen Scherwiderstände der Schraubenkräfte bemerkenswert. — Für die *Dauerfestigkeit* nun ist die Spannungsverteilung im kritischen Anschlußquerschnitt ausschlaggebend; sie ist für HV-Verbindungen offenbar wesentlich günstiger als für Nietverbindungen. So ergeben sich zunächst für *spezielle* HV-Probestäbe aus St 37, die einen direkten Vergleich mit den deutschen «Gemeinschaftsversuchen 1936»[3]) zulassen, folgende Werte: *Ursprungsfestigkeit* (Nettoquerschnitt) 2500 kg/cm² (statt 2750 kg/cm² beim Vollstab, 2500 kg/cm² beim Lochstab und 1710 kg/cm²

[3]) Vgl. Zeitschrift «Der Stahlbau» (1936), Heft 13/14, S. 97ff.

beim Nietstab) sowie *Wechselfestigkeit* ± 1360 kg/cm² (statt ca. 1500 kg/cm² beim Vollstab, während beim Lochstab ca. 1150 kg/cm² und beim Nietstab ca. 1050 kg/cm² gesetzt werden können).

Die *weiteren* Versuchsergebnisse (Wöhlerlinien) für die Probestäbe gem. Fig. 3 mit variierter Lochschwächung enthält Fig. 5. Hiernach beträgt die —

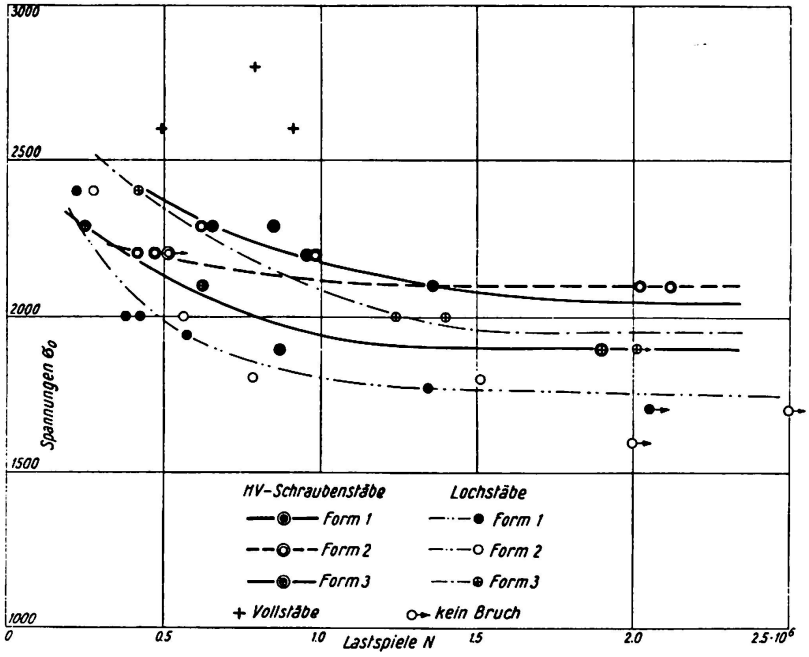

Fig. 5. Wöhlerlinien für die Dauerzugschwellversuche mit Voll-, Loch- und HV-Stäben aus Material St 37.

jetzt auf den *Bruttoquerschnitt* bezogene — Ursprungsfestigkeit ($\varkappa \approx +0{,}1$) von HV-*Stäben* der Formen 1, 2 und 3, d. h. bei «Lochschwächungen» von 17%, 34% und 51% zwischen 1900 kg/cm² und 2100 kg/cm². (Für Form 1 ergibt sich dabei eine Nettospannung von ca. 2570 kg/cm².) Die *Lochstäbe* der gleichen Versuchsserie besaßen Ursprungsfestigkeiten von $\sigma_{DN} = 1750$ kg/cm² bis 1950 kg/cm². Interessant sind die in Fig. 6 wiedergegebenen Fotos der gebrochenen HV-Stäbe: Mit abnehmender Maximalspannung der Wöhler-Reihe verlagert sich der Dauerbruch i. d. R. vom Lochrand weg in das Stabmaterial; diese Erscheinung wird nicht nur im Zugschwellbereich, sondern auch — wenn auch nicht so deutlich — im Wechselbereich festgestellt.

Die bisher beschriebenen Versuche mit Stäben aus St 37 wurden ergänzt durch solche aus St 52. Die Probekörperform sowie die erreichte Ursprungsfestigkeit ($\varkappa \approx +0{,}1$), bezogen auf den Brutto- bzw. Nettoquerschnitt, sind aus Fig. 7 ersichtlich; letztere erreichte ca. 2100 kg/cm² bzw. 3100 kg/cm². Demgegenüber betrüge die vergleichbare Zugschwellfestigkeit eines Nietstabes gleicher geometrischer Form etwa 1900 kg/cm², während der Vollstab etwa eine Dauerfestigkeit ($\varkappa \approx +0{,}1$) von 3150 kg/cm² besitzen dürfte.

Zusammengefaßt kann festgestellt werden, daß bei den HV-Stäben die Dauerfestigkeit (bei Bezug der Nennspannung auf den *Nettoquerschnitt*) mit

zunehmender Lochschwächung stark ansteigt. Bei Bezug der Nennspannung auf den *Bruttoquerschnitt* dagegen erhält man i. d. R. nahezu gleich große Dauerfestigkeiten, die sich zudem in etwa mit den *Netto*-Spannungs-Werten von Nietverbindungen vergleichen lassen. Dieses Ergebnis findet in den «Vorläufigen Richtlinien» insofern seinen Niederschlag, als gemäß Abschnitt 4.2 der *Lochabzug* bei schwingend belasteten HV-Stäben unterbleiben kann; im übrigen gelten dann weiterhin z. B. die zul σ_D-Werte der BE, Übersicht 40.1 b, Sp. 3 u. 4.

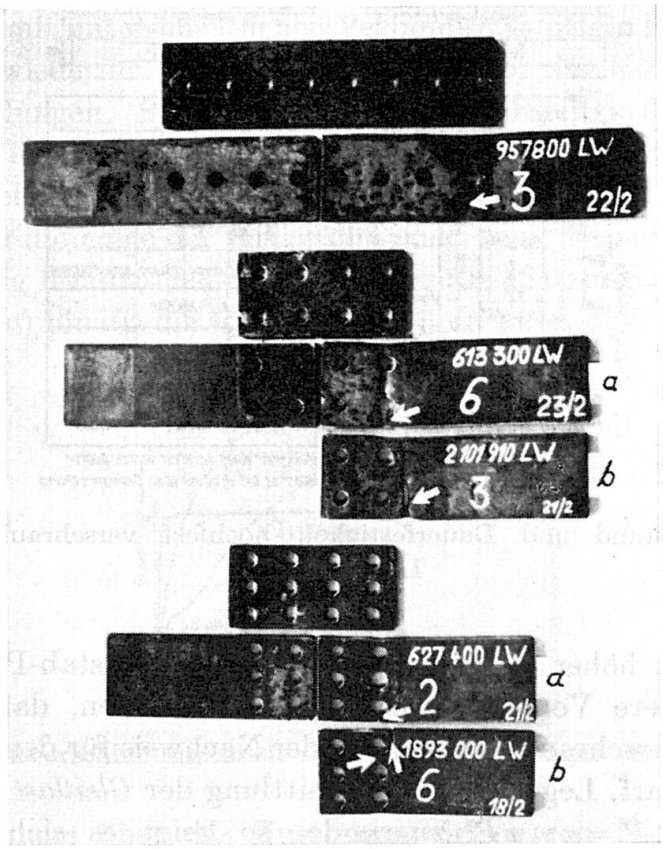

Fig. 6. HV-Stäbe (Material St 37) der Formen 1, 2 und 3 nach dem Dauerschwellversuch.

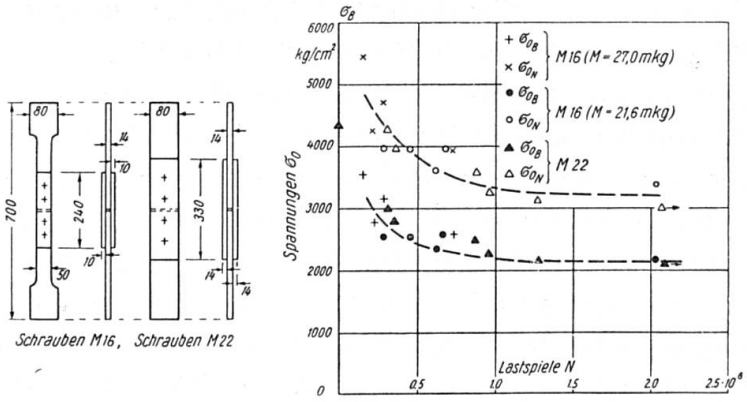

Fig. 7. Versuchskörper und Ergebnisse der Dauerzugschwellversuche mit HV-Stäben aus St 52.

Auch bei *Leichtmetall-Legierungen*, insbesondere der Zusammensetzung Al Zn Mg F 47 und Al Mg Si F 32, wurden HV-Verbindungen mit z.T. bemerkenswertem Erfolg erprobt. Die (statischen) Festigkeitswerte genannter Werkstoffe wurden mit $\sigma_B = 52$–56 kg/mm² und 31–33 kg/mm² und die entsprechenden Bruchdehnungen δ_5 zu etwa 10% bis 12% ermittelt. — Die *Zugschwellfestigkeiten* (Zeitfestigkeiten) einiger mittels HV-Schrauben hergestellter Verbindungen enthält Fig. 8; sie liegen — bezogen auf den Nettoquerschnitt —

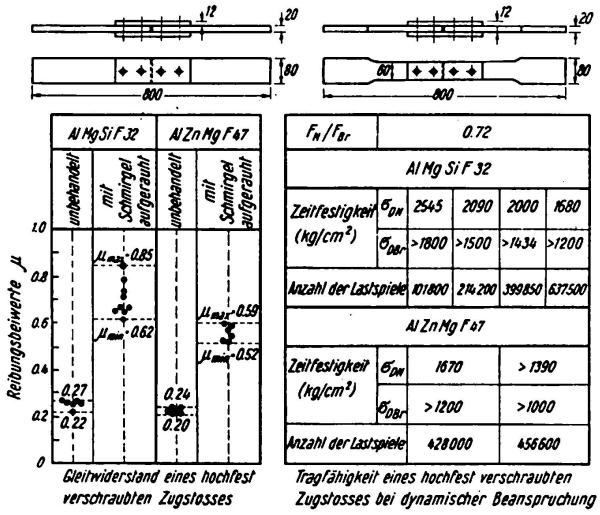

Fig. 8. Gleitwiderstand und Dauerfestigkeit hochfest verschraubter Zugstöße aus Leichtmetall.

jeweils wesentlich höher als bei entsprechenden Lochstab-Proben. Auch hier lassen u. U. weitere Versuche das Ergebnis erwarten, daß für Stöße und Anschlüsse HV-verschraubter Zugstäbe der Nachweis für den *Bruttoquerschnitt* geführt werden darf. Legt man zur Ermittlung der *Gleitlast* P_g wiederum den Rechenausdruck $P_g = \mu m n P_v$ zugrunde, so zeigt es sich, daß die *Reibbeiwerte* μ bei unbehandelten Oberflächen bei Al Zn Mg F 47 zwischen 0,20 und 0,24 schwanken, während sie nach Anrauhen mittels leichtem Schmirgeln auf $\mu = 0{,}52$ bis 0,59 ansteigen. Für Al Mg Si F 32 erfolgt die entsprechende Anhebung der μ-Werte von 0,22 bis 0,27 auf 0,61 bis 0,85.

Es ist wahrscheinlich, daß die *Höhe* der Gleitgrenze von schwingend belasteten HV-Verbindungen sowohl für Baustähle St 37, St 44 und St 52 als auch für Leichtmetalle von wesentlicher Bedeutung ist. Denn wenn auch im äußeren Lastwechselbereich ($-1 < \varkappa < -0{,}5$) infolge niedriger Beanspruchung des kritischen Querschnitts die unbehandelte Metalloberfläche (mit kleinen Reibbeiwerten) bei «querschnittsgerechtem» HV-Schrauben-Anschluß im Vergleich mit der behandelten Oberfläche oft ähnlich gute Festigkeitswerte ergibt, so kann dieses Ergebnis u. U. für den inneren Wechselbereich ($-0{,}5 < \varkappa < 0$) sowie für den Schwellbereich (z. B. für $\varkappa$ zwischen 0 und etwa $+0{,}5$) immer mehr zu Gunsten größerer μ-Werte verschoben werden. Erst bei einer oberen Bean-

spruchungsgrenze, welche die Fließgrenze des Werkstoffes wesentlich überschreitet, wird die Oberflächenbehandlung ohne entscheidende Bedeutung. (In Laborversuchen wirkt sich überdies oft eine Schwellbelastung, die im ersten Durchgang die Gleitgrenze überwindet, nicht so nachteilig aus wie im Bauwerk selbst.)

6. Verformungen von HV-Verbindungen mit steigender Belastung

Vergleicht man die *Lastverschiebungsdiagramme* (Fig. 9) von Stößen bzw. Anschlüssen, die mit unterschiedlichen Verbindungsmitteln hergestellt wurden, so erkennt man wiederum die besondere Bedeutung der Höhe der Gleitgrenze von HV-Verbindungen. Bei anfänglich großer «Steifigkeit», die im steilen Anstieg der HV-Kurve zum Ausdruck kommt, schneidet diese späterhin (bei Gleitwegen zwischen 0,5 und etwa 2,0 mm) alle anderen Lastverschiebungskurven, und zwar diejenige der *Schweißung* und auch diejenige der *Nietung*. — Es ist also wichtig festzustellen, wieweit über die «Setzungsrutschungen» (von maximal 0,05 mm) hinaus die Reibbeiwerte μ erhalten bleiben.

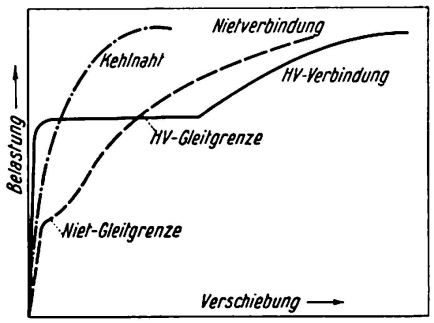

Fig. 9. Lastverschiebungslinien von Scherverbindungen (schematisch).

Frühere Versuche über das Zusammenwirken von Nietverbindung und Schweißung hatten bekanntlich ergeben, daß i. M. bei voller Ausnutzung eines Schweißanschlusses etwa gleichzeitig angeordnete Niete nur mit $^2/_3$ ihrer maximalen Tragkraft eingesetzt werden können. Entsprechende *neue* Versuche über das *Zusammenwirken* von HV-Verschraubung und Schweißnaht zeigten nunmehr, daß sowohl Stirnkehlnähte als auch Flankenkehlnähte mit einer HV-Verbindung als volltragend angesehen werden dürfen, solange man deren Gleitgrenze als maßgebend betrachtet.

Ein noch günstigeres Ergebnis ergab sich für das Zusammenwirken von Niet- und HV-Verbindung. Hier erwies eine Versuchsserie an drei großen Prüfkörpern (Fig. 10), daß in der kombinierten Verbindung (in welcher übrigens der Nietanschluß jeweils einen Zwischenanstrich besaß) im Nutzlastbereich sowohl einerseits die gesamte Tragfähigkeit erhöht als auch andererseits die Verschiebung deutlich herabgemindert wird. Ferner kam trotz großer Gleitwege zum Ausdruck, daß — bis zur Zerstörung des Nietanschlusses im

theoretisch gering beanspruchten Anschlußteil — die Reibbeiwerte der HV-Verbindung nur unwesentlich abgemindert sind.

Bei Verwendung der HV-Schrauben als *Paßschrauben* ändert sich das charakteristische Diagramm, je nachdem eine endgültige Zerstörung des Anschlusses auf *Lochleibung* oder auf *Abscheren* erfolgt. Jedenfalls hat eine spezielle Versuchsreihe gezeigt, daß bei guter Lochausfüllung die Gleitgrenze ohne wesentliche Verschiebungszunahme überschritten werden kann bis zur Loch-

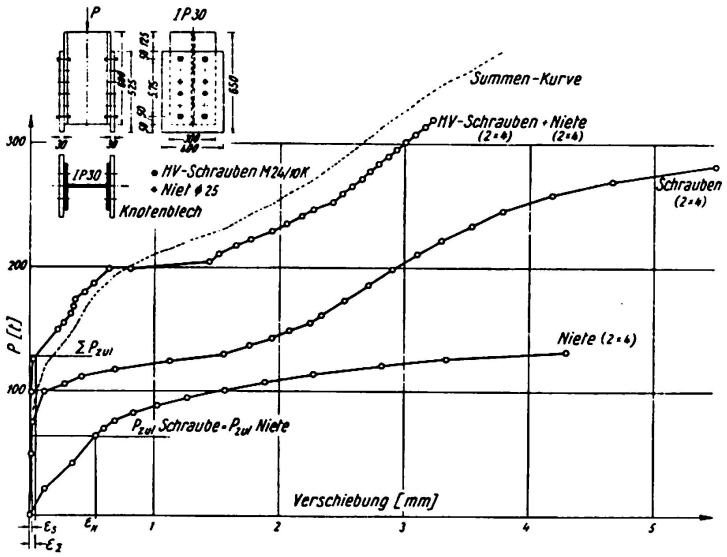

Fig. 10. Kombinierte Verbindung aus 2×4 HV-Schrauben M 24/10 K und 2×4 Nieten ⌀ 25 mm.

leibungs-Quetschgrenze, bei welcher merkliche Verschiebungen auftreten. Bei Abschluß eines Zugversuchs lag beispielsweise die mittlere Nettospannung bei maximal 2930 kg/cm²; vorher wurde die Quetschgrenze vor dem Schraubenschaft bei 7280 kg/cm² festgestellt, obwohl dann weiterhin der Lochleibungsdruck bis auf maximal 13500 kg/cm² gesteigert werden konnte. Bei diesem Versuch mit Baustahl St 37 und HV-Schrauben M 22 der Güte 10 K brachen letztere bei einer Scherbeanspruchung von $\tau_B = 8090$ kg/cm².

7. Die Schraubenvorspannung unter Dauerbetrieb

Es wurde die *dauernde* Aufrechterhaltung der Vorspannkräfte von HV-Schrauben mittels Meßhülsen bestätigt; hierbei waren die Anziehdrehmomente soweit gesteigert worden, daß die rechnerische Vergleichsspannung σ_V an kritischen Stellen die Fließgrenze des Schraubenwerkstoffes erreichte, während die reine Zugspannung allein ca. 81% der entsprechenden 0,2-Dehngrenze entsprach. Ein Nachgeben (Kriechen) der Schraubenstähle konnte bei wechselnden Temperaturen (zwischen −20° C und +80° C) nicht festgestellt werden, selbst nicht nach einer *weiteren* Steigerung der Vorspannungen um 13%.

— Diese mehrjährigen Versuche an Hülsenkörpern wurden ergänzt durch entsprechende an *Druckkörpern*. Dabei wurden (bei Klemmlängen von 44 mm) 6 bzw. 10 HV-Schrauben der Güte 10K bei erstmaliger Anspannung auf 1,25 zul M_a und bei verschiedenartiger Lagerung in Klimaräumen oder im Freien nach bestimmten Zeiträumen einzeln oder gruppenweise wieder gelöst. Das Öffnungsmoment, das theoretisch ca. 72% des Schließmomentes betragen müßte, wurde bei kurzfristiger Lagerung zu 80% gefunden; nach längerer Lagerung erhöhte sich dieser Wert sogar bis über 100% (Aufrauhung der Gewindeflächen), während Gleitversuche Reibbeiwerte μ zwischen 0,55 und 0,58 errechnen ließen, Werte also, die, wie nachfolgend ausgeführt werden soll, durchaus günstig beurteilt werden können. Erwähnt sei hier abschließend noch, daß die Größe der *Flächenpressung* zwischen Schraubenkopf und Unterlegscheibe bzw. zwischen Unterlegscheibe und Grundmaterial bei HV-Schrauben M 12 bis M 24 Werte von 53 kg/mm² bis 106 kg/mm² bzw. von 23 kg/mm² erreicht. Unter diesen Pressungen wurden örtliche Eindrückungen von 0,025 mm gemessen, die auch bei einer Vergrößerung der Unterlegscheiben nicht geringer waren; ein Fortlassen dieser Scheiben erscheint jedoch unzulässig.

Aus einem inoffiziellen Bericht der «Association of American Railroads» vom Frühjahr 1959 ist ersichtlich, daß die Verwendung von HV-Verbindungen im steten Anwachsen begriffen ist. Es ist dabei inzwischen «normale Praxis» geworden, die Kontaktflächen nicht mehr mit Farbanstrichen zu versehen, weil sonst oft im Nutzlastbereich Gleitungen eintreten können. Korrosionserscheinungen wurden an diesen Stellen auch nach längeren Betriebszeiten nicht festgestellt (das gleiche gilt übrigens auch für Nietverbindungen, bei denen man den «Zwischenanstrich» neuerdings oft fortläßt).

8. Konstruktionsformen mit HV-Verschraubung

Beim Entwurf und bei der konstruktiven Durchbildung eines stählernen Tragwerkes (oder eines solchen aus Leichtmetall) ist auf die charakteristischen Eigenschaften der HV-Verschraubung gebührend Rücksicht zu nehmen. Je nachdem, ob diese Verschraubung mit *Normalsitz* oder *Paßsitz* ausgeführt werden soll, ferner ob sie bei zug- und druckfesten *Stäben* oder bei *Biegeträgern* und bei *Flächentragwerken* als Verbindungsmittel zwischen tragenden Einzelteilen bzw. bei der Stoßausbildung eingesetzt wird, ergeben sich besondere Forderungen bezüglich Gleitwiderstand und zulässigem Gleitweg bei Überbeanspruchung gegenüber der Gebrauchslast. Zuletzt soll darauf hingewiesen werden, daß HV-Schrauben in vorteilhafter Weise auf «Kopfabreißen», d. h. in axialer Richtung beansprucht werden können, so daß neben *scherfesten* Verbindungen auch *axial-zugfeste* in Frage kommen. — Werden HV-Schrauben gleichzeitig auf Scheren *und* auf Zug beansprucht, so kann pro Schraube der spezielle Gleitwiderstand gemäß der Formel

$$N_G = \frac{\mu}{\nu}\left(P_v - \frac{Z}{n}\right)$$

berechnet werden, wobei Z die anteilige axiale Zugbelastung einer der Schrauben des Gesamtanschlusses bedeutet.

9. Zur Praxis der neuartigen Verbindungstechnik

Außer in *Deutschland* und *Österreich* sind Ende 1958 auch in der *Schweiz* Brückentragwerke mittels HV-Verschraubung hergestellt worden; ferner wendet man in England, Frankreich, Italien, Belgien und Holland dieser neuen Verbindungstechnik wachsendes Interesse zu. In den deutschsprachigen Ländern werden im wesentlichen die «Vorläufigen Richtlinien» der Konstruktionsarbeit zugrunde gelegt. Allerdings werden genannte «Richtlinien» dabei oft in einzelnen Punkten abgeändert. So erhöhen z. B. die österreichischen Fachleute — unter weitgehenderer Ausnutzung der im Abschnitt 2 gemachten Ausführungen sowie unter Beachtung der Tatsache, daß die dem vorgeschriebenen Anziehmoment entsprechenden Anziehdreh*winkel* der Muttern von HV-Schrauben bis zum «Abwürgen» i. d. R. um das vierfache vergrößert werden können — die spezifischen zulässigen «Scherkräfte» N um etwa 15% bis 20%; einzelne Baubehörden der Bundesrepublik wünschen Abschwächungen des Teiles I. 3 der «Richtlinien» usw. — Zusammengefaßt läßt sich jedoch feststellen, daß genannte Anleitung für Berechnung, Ausführung und bauliche Durchbildung von HV-Verbindungen in etwa den derzeitigen Stand der Technik ausreichend genau wiederzugeben scheint, wenn auch — gerade bei immer wieder versuchten Vergleichen mit der Nietverbindung — mehr auf die in den einzelnen europäischen Ländern unterschiedliche Ausnutzung letztgenannter geachtet werden sollte.

Für die *Ausführung* von HV-Verbindungen erschienen zunächst die Beziehungen zwischen Anziehmoment, Vorspannkraft und Torsionsmoment für die Beanspruchung des Schraubenschaftes wichtig; späterhin galt auch der Kontrollmöglichkeit der Vorspannkraft besonderes Interesse. *Heute* widmet man in Deutschland zunächst der Reibbeiwert-Kontrolle große Aufmerksamkeit, da der Streubereich der μ-Werte als wesentlich angesehen wird. Einfache *Reibbeiwert-Prüfgeräte* sind hier inzwischen entwickelt worden. — Das *Anziehmoment* wird bei Anwendung von Handschlüsseln i. d. R. mit einer Toleranz von $\pm 10\%$ aufgebracht werden können. Bei Anwendung von maschinell betriebenen Anziehgeräten ist der Schwankungsbereich u. U. je nach Anwendungsfall unterschiedlich, so daß auch hier besondere Eich- und Überwachungsverfahren empfehlenswert sind. Die spätere *Kontrolle* der Schraubenvorspannkräfte bereitet noch gewisse Schwierigkeiten. Insbesondere bei größeren Konstruktionen empfiehlt sich eine Überprüfung im Umfange von 5% bis 10% aller eingebrachten HV-Schrauben. Bei Einstellung der Schlüssel auf $+10\%$

über dem Sollwert könnte der festgestellte Mutterdrehwinkel einen gewissen Maßstab für das «Fehlmoment» abgeben. (Für das vollständige Entspannen einer HV-Schraube dürfte i. a. ein Mutterdrehwinkel zwischen 45 Grad und 180 Grad erforderlich sein, wobei die größeren Winkel nur im Falle von nicht plan aufeinanderliegender Bleche vorkommen.)

Zusammenfassung

Verbindungen mittels hochfester vorgespannter Schrauben (HV-Schrauben) sind im Stahl- und Metallbau als fortschrittlich anzusehen. Auch im Stahl-Verbundbau liegt für HV-Schrauben ein zusätzliches Anwendungsfeld vor — wie dies anhand weiterer Versuche bestätigt werden soll.

Sowohl bei statischer als auch bei schwingender Belastung ergaben sich bei HV-Verbindungen hohe Festigkeitswerte für die Verbindungsmittel selbst und für den kritischen Stabquerschnitt; i. d. R. sind HV-Verbindungen dabei den Nietverbindungen technisch und wirtschaftlich überlegen.

Kombinierte Verbindungen: Nietung + HV-Verschraubung und Schweißung + HV-Verschraubung sind technisch einwandfrei möglich und oft zweckmäßig.

Bei der Herstellung von HV-Verbindungen muß sorgfältig auf das notwendige Anziehmoment M_a und auf die Vorbehandlung der Reibflächen (Reibbeiwert μ) geachtet werden; an unzugänglichen Stellen kann ein Teil des Anziehmomentes durch Vorwärmen der HV-Schrauben ersetzt werden.

Kontrollverfahren für HV-Verbindungen sind weiter zu entwickeln. Bezüglich der Erhaltung der Vorspannkräfte und der Reibbeiwerte bestehen — anhand der Ergebnisse jahrelanger Beobachtungen — keine Bedenken; insbesondere dann nicht, wenn Konservierungsmaßnahmen (Anstriche etc.) mit etwa der gleichen Sorgfalt wie bei Nietverbindungen vorgenommen werden. Für Sonderfälle (z. B. aggressiven Atmosphärilien oder im Seewasserbau) empfehlen sich oft Kunstharzanstriche bzw. Abdichtungen.

Summary

Structural connections formed by means of high-tensile prestressed bolts are to be regarded as constituting an advance in steel and metallic construction. Composite steel-and-concrete construction provides another field of application for high-tensile bolts, as will have to be confirmed by means of further tests.

Both for static and for vibrating loads high strength values were obtained with high-tensile bolted connections for the fastenings themselves and for the critical cross-section of the member; as a rule, connections of this kind are technically and economically superior to riveted connections.

Combined connections, viz., riveting in conjunction with high-tensile bolts and welding in conjunction with high-tensile bolts, are perfectly practicable from the technical point of view and are often expedient.

In forming structural connections with high-tensile prestressed bolts it is essential to ensure the correct tightening torque M_a and suitable preparation of the friction surfaces (coefficient of friction μ). In the case of bolts installed in inaccessible places it is possible to apply pre-heating of the bolts in lieu of part of the tightening torque.

Methods for checking high-tensile bolted connections will have to be further developed. Observations extending over a number of years have shown that there need be no misgivings as regards the permanence of the prestressing forces and the coefficients of friction, especially if protective treatments (painting, etc.) are applied with approximately the same degree of care as in the case of riveted connections. In special cases (e.g., in the presence of aggressive atmospheric influences or for marine structures) it is often advisable to use plastic coatings or sealings.

Résumé

Les assemblages au moyen de boulons à haute résistance (boulons HR) sont à considérer comme un progrès pour la construction métallique et en acier. Un champ d'application supplémentaire pour les boulons HR réside dans les constructions mixtes, ainsi que de nouvelles expériences doivent le confirmer.

Dans les assemblages avec boulons HR, on a obtenu des résistances élevées aussi bien pour des charges dynamiques que statiques, que ce soit pour les boulons eux-mêmes ou pour la section critique de la barre; en général, les assemblages avec boulons HR sont supérieurs à ceux avec rivets, tant au point de vue technique qu'économique.

Des assemblages combinés, tels que rivetage + boulons HR ou soudage + boulons HR sont techniquement absolument réalisables, voire souvent appropriés.

Lors de l'exécution d'assemblages avec des boulons HR, il faudra prêter une attention particulière au moment de serrage M_a nécessaire et au traitement préalable des surfaces de contact (coefficient de frottement μ); aux endroits difficilement accessibles, on pourra remplacer une partie du moment de serrage par l'échauffement préalable des boulons HR.

Les moyens de contrôle pour les assemblages avec des boulons HR sont encore à développer. Il n'y a aucun doute tant en ce qui concerne la conservation des forces de précontrainte que les coefficients de frottement ainsi que les résultats provenant d'expériences s'étendant sur des années l'ont démontré, ceci en particulier quand des précautions concernant la conservation (peinture etc.) sont prises avec le même soin que pour des assemblages rivés. Dans des cas spéciaux (par exemple dans les atmosphères agressives ou dans la construction dans l'eau de mer), il sera souvent recommandable d'utiliser des revêtements respectivement des isolations de résine synthétique.