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

Band: 7 (1964)

Artikel: HV-Verbindungen: Überlegungen, Beobachtungen, Versuche

Autor: Aurnhammer, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-7855

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: 09.08.2025

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

II b 7

HV-Verbindungen. Überlegungen, Beobachtungen, Versuche

High Strength Bolted Joints. Thoughts, Observations, Tests

Assemblages HR. Réflexions, observations, essais

G. AURNHAMMER
Dipl.-Ing., Abteilungspräsident beim Bundesbahn-Zentralamt München

1. Problemstellung

Die Theorie der Reibungsverbindungen mittels hochfester, vorgespannter Schrauben, abgekürzt HV-Verbindungen genannt, ist denkbar einfach: Durch Vorspannen hochfester Schrauben werden die Berührungsflächen der zu verbindenden Teile mit bekannter Kraft P_v aufeinandergepreßt. Bei bekanntem Reibbeiwert μ dieser Berührungsflächen ergibt sich die Kraft N, die bei einschnittiger Verbindung durch Reibung längs dieser Berührungsflächen von dem einen auf den anderen Teil übertragen werden kann, zu $N = \mu P_v$.

Die praktische Anwendung dieser Theorie stellt einige Probleme. Denn die beiden als bekannt in die Rechnung eingeführten Größen sind in der Praxis nur annähernd bekannt und mit baustellenüblichen Mitteln nicht genauer bestimmbar, können aber stark streuen.

Die Größe des Reibbeiwerts μ läßt sich nur durch Belastung von Versuchskörpern bis zum Eintritt des Gleitens ermitteln. Dabei bleibt unsicher, wieweit die Werte μ im Versuchskörper und im Bauteil gleich groß sind. Rauhigkeitsmessungen mit einem einfachen, über die zur Berührung bestimmten Flächen gezogenen Gerät, oder Messungen des Winkels der schiefen Ebene, bei dem die aufeinander gelegten Teile zu gleiten beginnen, *können* nicht zum Erfolg führen; denn in Wirklichkeit handelt es sich bei HV-Verbindungen weniger um einen Reibungswiderstand, als um die Scherfestigkeit der ineinander verzahnten Oberflächenrauhigkeiten. Das ergibt sich einmal daraus, daß bei gleicher Aufrauhung Stähle höherer Festigkeit einen höheren μ-Wert aufweisen als Stähle geringerer Festigkeit. Es ergibt sich aber auch aus einer physikalischen Betrachtung: Der Eintritt des Gleitens nach Überwindung der ruhenden Reibung setzt voraus, daß sich die Teile voneinander abheben können, so daß die zunächst in Mulden des einen Teils hineinragenden Vorsprünge des anderen Teils über die nächste Kuppe hinweggehoben werden können. Bei HV-Verbindungen ist aber dieses Abheben nicht möglich.

Die zweite als bekannt in die Rechnung eingeführte Größe, die Anpreßkraft, ist in ihrer tatsächlichen Höhe noch schwerer zu bestimmen. Sie wird in der Praxis durch Ablesung oder Einstellung des Drehmoments an Drehmomenten-

schlüsseln oder durch Kraftanzeige an Schlagschraubern festgestellt. Dabei streut bereits die Anzeige der Anziehgeräte teilweise in weiteren Grenzen als die Richtlinien es fordern. Auch das gleiche Drehmoment erzeugt — je nach Reibwiderstand in den Gewinden und zwischen Mutter und Unterlagscheibe — eine oft in weiten Grenzen streuende Vorspannkraft in den Schrauben. Die Vorspannkraft in den Schrauben ist schließlich nicht gleich der Pressungskraft in den Berührungsflächen. Der Schluß von der Anzeige des Anziehgeräts auf die erzeugte, der Reibung dienende Pressungskraft ist also mit verschiedenartigen Unsicherheiten behaftet.

Solange man die in einer Verbindung mögliche größte Summe gleichgerichteter Ungenauigkeiten, also ungünstigenfalls Fehlbeträge, nicht sicher kennt, muß man einen verhältnismäßig hohen Sicherheitsbeiwert wählen, der alle Unsicherheiten überdeckt. Das heute herrschende Streben nach hoher Materialausnützung macht es daher nötig, sich über die Größe der praktisch auftretenden Ungenauigkeiten und über die Möglichkeiten zu ihrer Einschränkung möglichst weitgehend Klarheit zu verschaffen. Einen Beitrag zu diesem Ziel sollten die Untersuchungen liefern, über die im folgenden berichtet wird.

2. Der Einfluß der Oberflächenbehandlung auf die Größe des Reibbeiwerts

2.1 Flammstrahlen

Eigene Beobachtungen und gelegentliche Mitteilungen aus der Praxis boten Anhaltspunkte für die Befürchtung, daß die in der 1. Ausgabe der deutschen Richtlinien für HV-Verbindungen gleichwertig mit dem Sandstrahlen genannte Behandlung der Berührungsflächen durch Flammstrahlen nicht mit Sicherheit den in der Berechnung vorausgesetzten Reibbeiwert erreicht. Das Bundesbahnzentralamt München ließ daher in eigener Brückenwerkstätte einfache Prüfstücke aus St 37 aus gestoßenen, symmetrisch verlaschten Flachstäben ähnlich den in Bild 1 gezeigten Formen herstellen. Die Berührungsflächen wurden von zuverlässigen Brückenschlossern unter Aufsicht nach Vorschrift geflammstrahlt (Sauerstoffüberschuß 30%, Vorschub 1 m/min) und anschließend mit weicher Stahlbürste von losem Zunder und Rost befreit. Die insgesamt 20 Prüfkörper ergaben — ohne erkennbaren Unterschied zwischen den Probenformen — einen mittleren Reibbeiwert von $\mu = 0{,}38$ (statt $\mu \geqq 0{,}45$) bei einer Streuung von etwa $\pm 10\%$.

Die Versuche bestätigen also, daß beim Flammstrahlen das Erreichen des vorausgesetzten Reibbeiwerts nicht gewährleistet ist.

Noch schwerer wiegt — was bei den weitgespannten Hauptträgern der Bahnsteighalle München-Hbf. eindrucksvoll beobachtet werden konnte —, daß der glatte Spiegel gesunder Walzhaut durch Flammstrahlen nicht entfernt wird, so daß in diesem Falle eine nennenswerte Aufrauhung überhaupt

nicht eintritt. An St 37 wurden dabei durch Rauhigkeitsmessung Reibbeiwerte um 0,3 festgestellt, während die μ-Werte der sandgestrahlten Flächen über 0,45 lagen.

2.2 Strahlen mit Strahlmitteln

Ein zuverlässiges Aufrauhen zur Erzielung des nötigen Reibbeiwerts konnte nur vom Strahlen mit Strahlmitteln (Sand, Stahlkies, Korund) erwartet werden. Mit diesem Verfahren wurden daher umfangreichere Versuche angestellt, deren Durchführung größtenteils dem Otto-Graf-Institut der Technischen Hochschule Stuttgart übertragen wurde.

2.2.1. Belastung mit und ohne Querschwingungen, schwellende Belastung, Einfluß der Form der Verbindung. Nach einigen Vorversuchen wurden je 22 Prüfstäbe der in Fig. 1 dargestellten Formen geprüft.

Die aus TU-St-37-Grobblechen gefertigten Stäbe waren mit Quarzsand der Körnung 2—3 mm unter 4—5 atü bei 45 cm Düsenabstand im Freistrahlverfahren gestrahlt worden. Die Versuche sollten den Einfluß der Schraubenanordnung (in Kraftrichtung und quer dazu), außerdem einen etwaigen Einfluß von Querschwingungen in der belasteten HV-Verbindung und von wiederholter Belastung ermitteln. Die Ergebnisse sind in der Tafel 1 zusammengefaßt. Die erzielten Reibbeiwerte liegen durchwegs über dem in den deutschen

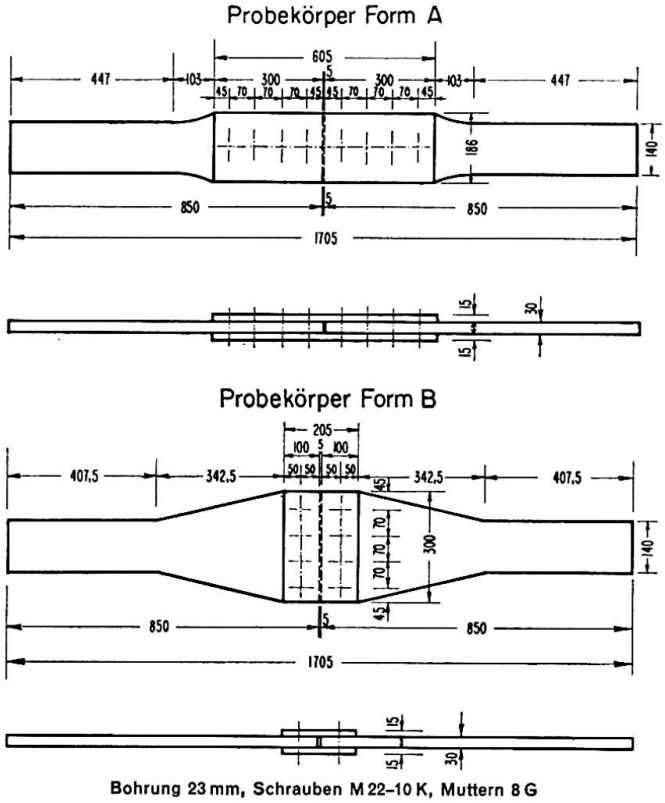

Fig. 1.

Richtlinien angegebenen Wert. Sie sind, wie auch bei allen anderen beschriebenen Versuchen, aus der gemessenen Gleitlast und aus der durch Dehnungsmessung und Eichung der Schrauben genau ermittelten Summe der in den Schrauben wirkenden Zugkräfte errechnet.

Zwischen den bei Längszug ohne Querschwingungen und mit Querschwingungen erzielten Reibbeiwerten besteht kein bemerkenswerter Unterschied, abgesehen von dem Versuch mit einem einzigen Prüfstab der Form A, der mehreren Millionen Querschwingungen bei gleichbleibendem Längszug unterworfen und dessen Belastung dann bis zum Eintritt des Gleitens gesteigert wurde. Dieses eine Ergebnis berechtigt jedoch noch nicht zu Folgerungen. Auch das wiederholte Aufbringen einer etwas unter der Gleitlast bleibenden Vorbelastung zeigte keinen erkennbaren Einfluß.

Klar erkennbar ist dagegen ein Unterschied der übertragbaren Reibungskraft bei den Probekörpern der beiden Formen A und B. In Tafel 1 ist dieser Unterschied in Reibbeiwerte μ umgerechnet. Tatsächlich kann es sich natürlich nicht um verschiedene Höhen der Reibbeiwerte handeln. Die mutmaßliche Ursache der Unterschiede zwischen den beiden Prüfkörperformen wird unter Abschnitt 4 besprochen.

Tafel 1

Belastungsart	Probekörper		Errechnete Reibbeiwerte *)		
	Form	Anzahl	min μ	max μ	Mittelwert
Längszug ohne Querschwingungen	A B	8 8	0,507 0,458	0,709 0,608	0,630 0,527
Längszug mit gleichzeitig wirkenden Querschwingungen	A B	7 7	0,617 0,508	0,696 0,644	0,664 0,581
Längszug *ohne* Querschwingungen nach 50 Längszugbelastungen nahe der Gleitlast	A B	3 2	0,649 0,539	0,680 0,604	0,661 0,571
Längszug nach 50 Längszugbelastungen wie vorstehend, jedoch *mit* gleichzeitig wirkenden Querschwingungen	A B	2 3	0,658 0,611	0,664 0,635	0,661 0,624
Längszug mit mehreren Millionen Querschwingungen	A B	1 1	0,458 0,503		

*) Aus Vorspannkraft und Gleitlast. Vorspannkraft im Schraubenschaft durch Dehnungsmessung und Eichung genau ermittelt.

2.2.2. Einfluß mehrmaligen Sandstrahlens. Die Reibbeiwerte wurden auch im Zusammenhang mit dem unter Abschnitt 4 behandelten Versuch an Stäben aus St 52 ermittelt. Der dort genannte Knotenpunkt mußte wegen Nacharbeiten nochmals sandgestrahlt werden. Das gleiche mußte daher mit den Prüfstäben geschehen, die zur Feststellung des zu erwartenden Reibbeiwerts dienen sollten. Das erste Strahlen war mit Quarzsand der Körnung 0,7—1,2 mm im Freistrahlverfahren geschehen. Zum Nachstrahlen mit einem Vacublastgerät wurde Stahlkies der Körnung 24 (0,75 mm) verwendet. Während bei dem ersten Strahlen der für St 52 geforderte Reibbeiwert von 0,60 gerade erreicht worden war, sank er beim zweiten Strahlen auf im Mittel 0,405 ab, bei Streuung von 0,382 bis 0,449. Die Versuche zeigten, daß auch bei der Oberflächenbehandlung durch Strahlen mit Strahlmitteln gewisse Voraussetzungen erfüllt sein müssen, um die vorgeschriebenen μ-Werte zu erreichen. Wiederholtes Strahlen kann leicht die erzielte Aufrauhung wieder zum Teil beseitigen. Auch die Korngröße und Art des Strahlguts ist zweifellos von Einfluß.

2.2.3. Einfluß der Korngröße des Strahlguts auf den Reibbeiwert. Die eben beschriebenen Ergebnisse führten zu Versuchen zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Korngrößen beim Strahlen mit Quarzsand. Diese Versuche können erst ein Anfang in der Klärung aller der Einflüsse sein, die bei der Aufrauhung der Oberfläche verschiedener Stahlsorten eine Rolle spielen können. Die Vermutung liegt nahe, daß bei härteren Stählen anderes Strahlgut und vielleicht auch andere Korngrößen verwendet werden müssen als bei weicheren Stahlsorten, um den größtmöglichen μ-Wert zu erzielen. Für die Versuchsreihe zur Klärung des Einflusses verschiedener Korngrößen bei Quarzsand wurde St 37 verwendet. Es standen 50 Probestäbe zur Verfügung.

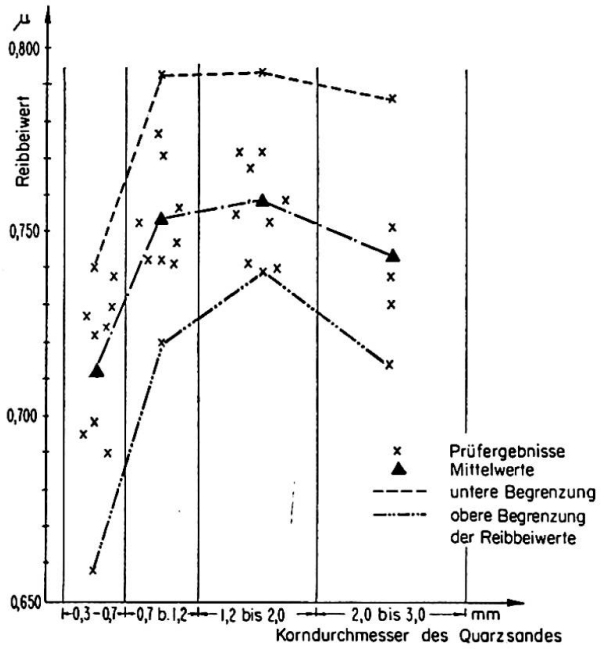

Fig. 2.

Durch Vorversuche wurde der günstigste Abstand der Strahldüse von der aufzurauhenden Oberfläche zu 25—30 cm ermittelt. Dann wurden mit viererlei Korngrößen je 3×10 und 1×5 Probestäbe metallisch blank gestrahlt. Die ermittelten μ-Werte sind in Fig. 2 zusammengestellt. Trotz der verhältnismäßig großen Streuungen zeigt sich unverkennbar, daß die Korngrößen über 0,7 mm feinerem Korn überlegen sind und daß bei Korndurchmessern 1,2 bis 2,0 mm optimale μ-Werte erreicht werden.

Es ist zweifellos notwendig, solche Versuche bei St 37 auch mit anderem Strahlgut und bei St 52 von Grund auf zu wiederholen.

2.3. Einfluß von Korrosionsschutzmaßnahmen auf den Reibbeiwert

Alle schon früher angewendeten Maßnahmen zum vorübergehenden Korrosionsschutz der aufgerauhten Flächen, wie das Aufkleben und Wiederabziehen von Klebefolien oder das Aufspritzen von Abziehlacken, bergen die Gefahr in sich, daß feinste Rückstände auf den Oberflächen bleiben und den Reibbeiwert herabsetzen.

Nach Beobachtungen, die in Abschnitt 7 beschrieben werden, trat der Wunsch auf, die Berührungsflächen durch bleibenden Korrosionsschutz vor Veränderungen zu schützen. Es wurden daher Versuche mit 4 spritzverzinkten, HV-verschraubten Prüfstäben aus St 37, bei einer Dicke der Zinkschicht von 0,020 bis 0,035 mm angestellt. Da vermutet wurde, daß im Gegensatz zu den Feststellungen an unbehandelten HV-verschraubten Verbindungen sich häufig wiederholende schwellende oder wechselnde Beanspruchung bei der Zinkzwischenschicht sich ungünstig auswirken würde, wurden die Prüfstäbe erst nach vorausgehender Wechselbeanspruchung durch eine Last, die sich als 40% der Gleitlast erwies, geprüft. Vorbelastet wurde 10^5mal bei einer Frequenz von 25 Lastspielen/min. Der bei der anschließenden Prüfung erzielte Reibbeiwert errechnet sich zu im Mittel 0,40. Er bleibt damit zweifellos erheblich unter dem ohne Spritzverzinkung zu erwartenden Wert.

2.4. Reibbeiwert bei bestehenden Nietverbindungen

In der Brückenunterhaltung spielt der Ersatz für gelockerte Niete eine Rolle. Wenn der Ersatz durch HV-Schrauben möglich wäre, würde das Vorteile bringen. Zur Klärung dieser Frage wurden einige Versuche zur Bestimmung des Reibbeiwerts mit Zwischenanstrich versehener Proben durchgeführt, von denen vorher

a) 7 Probestäbe handentrostet,
b) 6 Probestäbe flammentrostet und
c) 6 Probestäbe sandgestrahlt

waren. Vor dem Zusammenbau war der einmalige Zwischenanstrich (75% Eisenoxyd + 25% Zinkoxyd) gut durchgetrocknet.

Die aus der Gleitlast und den mittels Dehnungsmessung festgestellten Schraubenvorspannungen errechneten mittleren Reibbeiwerte ergaben sich

bei a) zu $\mu_m = 0{,}18$ bei $\min \mu = 0{,}165$ und $\max \mu = 0{,}206$,
bei b) zu $\mu_m = 0{,}24$ bei $\min \mu = 0{,}214$ und $\max \mu = 0{,}257$,
und
bei c) zu $\mu_m = 0{,}20$ bei $\min \mu = 0{,}187$ und $\max \mu = 0{,}226$.

3. Streuung der in den Schraubenbolzen tatsächlich erzielten Vorspannung

3.1. Bestimmung der Vorspannkraft aus der Längung der Schrauben

Um bei den verschiedenen erwähnten Versuchen die Vorspannkraft verlässig zu erfassen, wurden zahlreiche Schrauben in einer Zerreißmaschine mit genauer Kraftanzeige bei gleichzeitiger Messung der Längung der Schraube geeicht. Dabei zeigte sich, daß die Dehnungsmessung die in die Schraube eingebrachte Vorspannkraft meist mit $\pm 3\%$ Genauigkeit anzeigt. Vereinzelt kamen aber auch Streuungen bis $\pm 10\%$ und sogar etwas mehr vor. Wenn es auf Genauigkeit ankommt, muß also neben der Dehnung auch der genaue Schraubenquerschnitt gemessen werden.

3.2. Ablesegenauigkeit der Anziehgeräte

Die Genauigkeit der Momenten- bzw. Kraftanzeige der Anziehgeräte wurde meistens nicht isoliert festgestellt. Der Vergleich zwischen dieser Anzeige und der tatsächlich erzielten Vorspannkraft enthält auch die in den Abschnitten 3.3 und 3.4 besprochenen Einflüsse. Immerhin zeigen Vergleiche, die bei den verschiedenen Versuchen angestellt wurden, die Notwendigkeit, sich mit der Anzeigegenauigkeit der Anziehgeräte zu beschäftigen.

Ein Vergleich zweier Schlagschraubertypen hatte zum Beispiel ergeben, daß bei dem einen Typ die erzielte Vorspannkraft bei wiederholtem Ansetzen des Geräts gesteigert wurde, auch wenn die eingestellte Kraft schon erreicht oder überschritten war. Der Vergleich hat die Hersteller zu Verbesserungen angeregt.

Bei einem Versuch waren 40 Schrauben stufenweise vorgespannt worden, derart, daß jede Schraube zuerst mit einem Drehmomentschlüssel und weiter mit einem Schlagschrauber angezogen wurde. Während beim Anziehen mit dem Drehmomentschlüssel durchwegs Vorspannkräfte erreicht wurden, die weit über den aus dem eingestellten Anziehmoment errechneten lagen (bei Einstellung auf 25% der vollen Sollvorspannung im Mittel um 45% höher, bei Steigerung der Vorspannkraft abnehmend), wurden mit dem Schlagschrauber erheblich kleinere Vorspannkräfte erzielt als die am Gerät einge-

stellten (bei Einstellung auf 80% der vollen Sollvorspannung 34% zu wenig, bei Einstellung auf volle Sollvorspannung 18% zu wenig). Solche Unterschiede lassen sich ohne Streuung der Anzeige der Geräte kaum erklären.

An 2 Drehmomentschlüsseln, einem bei dem eingestellten Wert ausklinkenden und einem mit Ableseskala, wurde die Anzeigegenauigkeit durch einen besonderen Versuch isoliert festgestellt. Bei dem selbstausklinkenden Schlüssel für 120 mkp nahm die Anzeigegenauigkeit mit zunehmender Ausnützung seiner Leistungsfähigkeit zu. Bei Einstellungen auf 50 mkp und 60 mkp weichen die erreichten Drehmomente noch zwischen −17,6% und +13,2% von dem eingestellten Wert ab. Bei Einstellungen von 80 mkp bis 100 mkp wurden ± 6% Streuung nicht mehr überschritten. Auch der Schlüssel mit Ableseskala (für Anziehmomente bis 70 mkp) zeigte die größten Fehler bei geringer Ausnützung (bis zu 15% Fehler). Zwischen voller Ausnützung und $^1/_3$ der vollen Ausnützung zeigt sich kein bemerkenswerter Unterschied mehr. Das erzielte Drehmoment ist stets kleiner als das abgelesene, und zwar um ~ 5% bis 8%.

3.3. Zustand der Schrauben

Von Schraubenherstellern war schon auf den Einfluß hingewiesen worden, den unterschiedliche Scharfkantigkeit und unterschiedliches Spiel der Gewinde auf das benötigte Drehmoment ausüben. Auf Baustellen konnte darüber hinaus der bedeutende Einfluß des Oberflächenzustands (Sauberkeit, Anlieferungszustand, leicht geölt) der sich gegeneinander bewegenden Flächen beobachtet werden.

Bei den Versuchen am Otto-Graf-Institut wurden solche Einflüsse gemessen. Als Mittelwerte aus 360 Dehnungsmessungen ergaben sich folgende Werte für das benötigte Anziehmoment:

bei Schrauben im Anlieferungszustand	120% des Sollwertes,
nach leichtem Ölen der Gewinde	91% des Sollwertes.

Geölte Schrauben mit leichten Gewindeschäden, hervorgerufen durch das Einfügen in Bohrlöcher mit mangelhafter Passung, erforderten 125% bis 136% des Sollanziehmoments.

3.4. Einfluß der Anziehtechnik

Unterschiede in der erzielten Vorspannkraft können sich auch aus unterschiedlichem Vorgehen beim Anziehen ergeben. Insbesondere kann die Unterbrechung des Anziehens einer Schraube bei hoher, aber noch unter dem vollen Wert liegender Vorspannkraft dazu führen, daß bei nachfolgender Steigerung des Anziehmoments auf den vollen Sollwert keine Steigerung der Vorspannkraft mehr eintritt.

Besondere Versuchsreihen, die aussagen könnten, bis zu wieviel Prozent der vollen Vorspannkraft die Unterbrechung des Anziehens sicher unbedenklich bleibt, liegen nicht vor. Aus einem Versuch anderer Art, bei dem das Anziehen von 48 Schrauben je bei 60% ihrer Vorspannung unterbrochen wurde, ohne daß ein Einfluß dieses Vorgehens hätte beobachtet werden können, ist zu schließen, daß ein Unterbrechen bei dieser Grenze sicher ohne Nachteil ist.

4. Einfluß von Formungenauigkeiten auf die in den Reibflächen erzielte Pressung

Der unter 2.2.1 erwähnte Unterschied zwischen den Gleitlasten, die sich bei den Stabformen A und B ergaben, ist zweifellos nicht zufälliger Art und nicht durch unterschiedliche Reibbeiwerte bedingt. Bei der Form der Prüfstäbe B kann deren geringere Gleitlast auch nicht mit verringerter Mitwirkung der äußeren Schrauben erklärt werden. Dagegen müssen sich die praktisch immer vorhandenen Unterschiede in der Dicke und Ebenheit der gestoßenen Bleche in einem bei Stabform B größeren Verbrauch an Vorspannkraft für die Verformung der Laschen auswirken (siehe Fig. 3!).

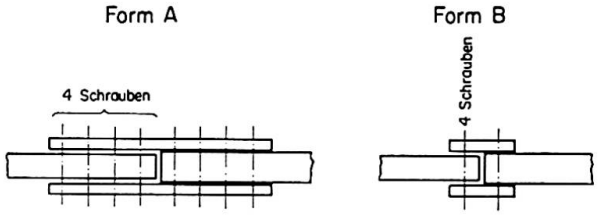

Fig. 3.

Bei den zu den Versuchsreihen verwendeten Probestäben wurden die Dickenunterschiede der gestoßenen Teile gemessen. Der Versuch, aus dem Dickenunterschied unmittelbar eine Beziehung zu der erzielten Gleitlast herzustellen, gelang nicht. Es zeigte sich vielmehr, daß Verkrümmungen der Bleche sich stärker bemerkbar machten als die Dickenunterschiede. Aber auch solche Unebenheiten haben zur Folge, daß die nicht genau anliegenden Laschen auf einer Seite des Stoßes erst herangezogen werden müssen, was bei Form B wegen des kurzen Hebelarms aller 4 Schrauben und des größeren Trägheitsmoments der Laschen einen größeren Spannkraftverlust bedeutet.

Bei praktischen Verbindungen von Stahlbauteilen ist stets mit nicht genauer Passung zu rechnen. Außer Walztoleranzen und Unebenheiten der Oberfläche spielen dabei besonders Schweißverformungen und andere Fertigungsungenauigkeiten, bei manchen Verbindungen auch für Montage benötigte Spielräume, eine Rolle.

Anläßlich des Baues einer HV-verschraubten Fachwerk-Eisenbahnbrücke wurden an 2 Knotenpunktmodellen in natürlicher Größe (Fig. 4) Messungen durchgeführt, um Aufschluß über Größe und Änderung der Zwischenräume

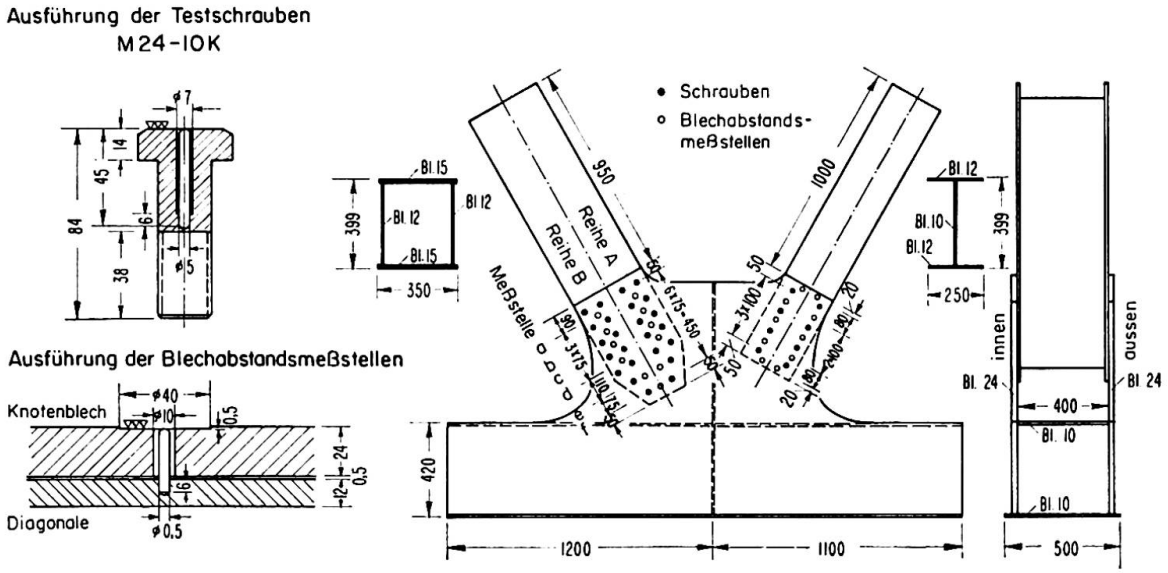

Fig. 4.

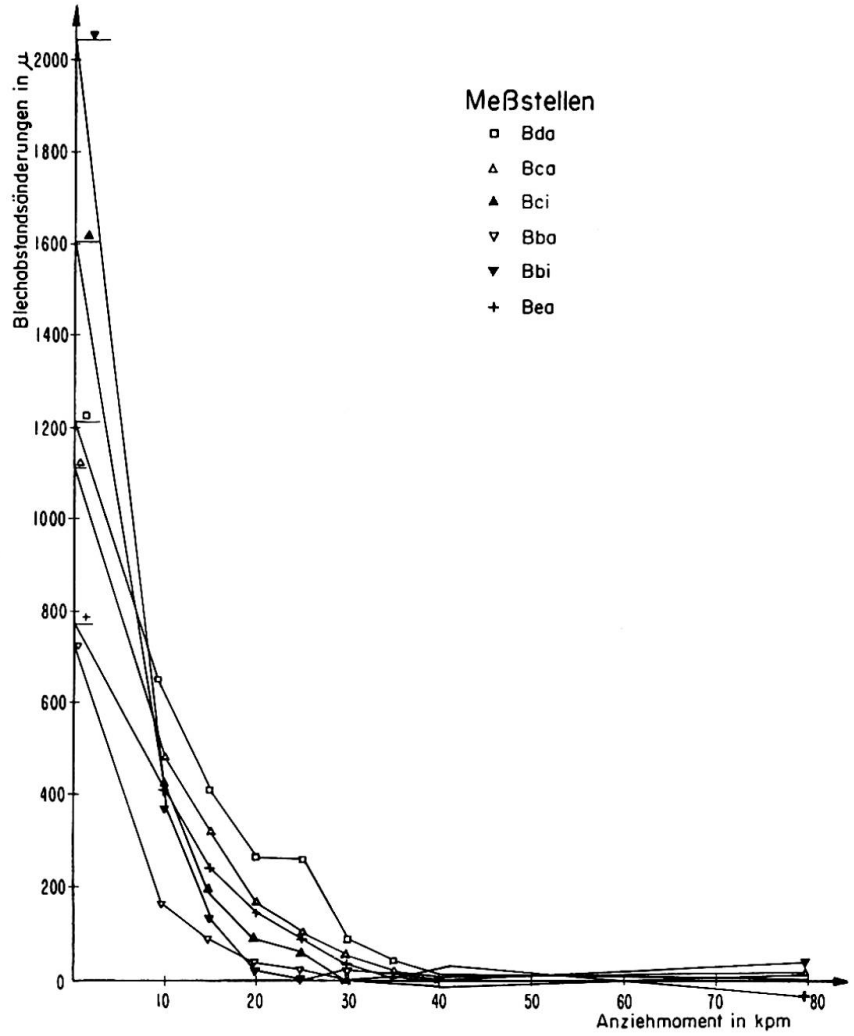

Fig. 5. Blechabstandsänderungen.

zwischen den Diagonalstäben und Knotenblechen im Verlauf des Anziehens der HV-Schrauben zu erhalten. Zur Abstandsmessung waren in den Knotenblechen seitlich der Schrauben feine Bohrungen angebracht. Die wesentlichen Ergebnisse der Abstandsmessungen an dem ersten Modell sind im vorstehenden Diagramm (Fig. 5) aufgezeichnet.

Der zunächst bei allen Blechabständen festzustellende geradlinige Steilabfall der Kurven zeigt den Bereich an, in dem Vorspannkraft verbraucht wurde, ohne daß eine Berührung der Berührflächen eintrat. Es handelt sich dabei um rund 12% der Sollvorspannkraft. Ein volles Anliegen an allen Stellen der Berührflächen wurde erst bei Vorspannkräften zwischen 30 und 50% der vollen Vorspannkraft erzielt. In diesem Bereich wird zweifellos schon Reibung erzeugt. Über deren Größe sagt die Messung nichts aus, so daß die Größe des Vorspannkraftverlustes aus diesen Abstandsmessungen nicht genau entnommen werden kann. Diesen Aufschluß sollten weitere Untersuchungen an einem gleichen zweiten Modell, die in Gemeinschaftsarbeit mit dem Otto-Graf-Institut vorgenommen wurden, liefern. Der Versuch, dieses Ziel durch gleiche Abstandsmessungen und durch Belastung des Knotens bis zum Eintritt des Gleitens sowie durch Vergleich mit gleichartig angefertigten Probestäben zu erreichen, gelang nicht, da sich bisher noch nicht aufgeklärte Nebeneinflüsse bemerkbar machten. Der Versuch lieferte aber eine Reihe wertvoller anderer Aufschlüsse.

In welchem Bereich die Reibflächen sich nach dem Aufbringen der vollen Vorspannung berührten, zeigen die nach Eintritt des Gleitens an Hand der

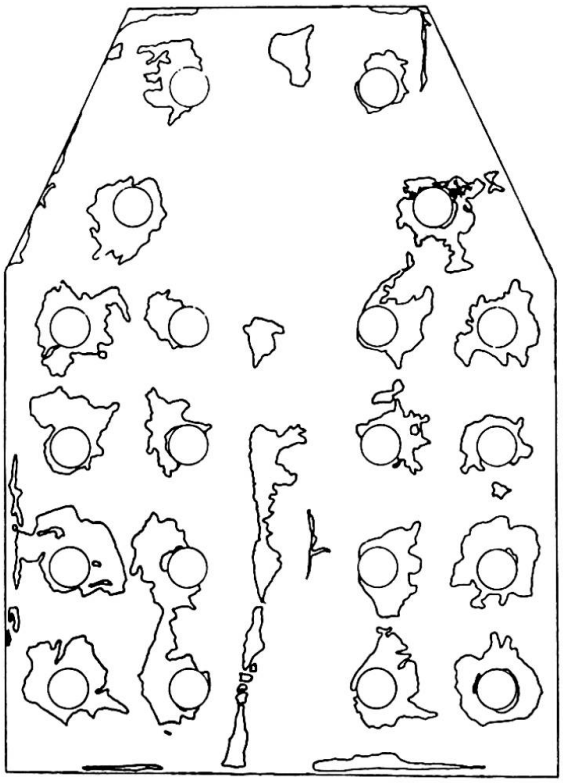

Fig. 6.

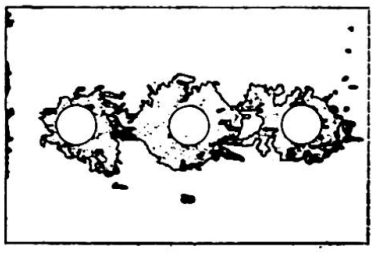

Fig. 7.

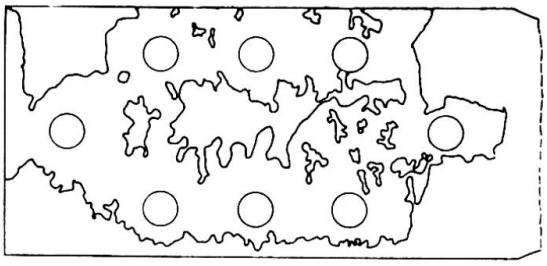

Fig. 8.

Gleitspuren gezeichneten Fig. 6 und 7. Tatsächlich waren die Ränder der sich berührenden Flächenabschnitte nicht so scharf abgegrenzt. Zum Vergleich zeigt Fig. 8 die gleiche Darstellung an einem der spritzverzinkten Versuchsstäbe.

5. Verlauf des Kraftübergangs in Stößen und Anschlüssen

Aus Gründen der Proportionalität von Spannungen und Dehnungen sind bei längeren Stößen und Anschlüssen kleine gegenseitige Verschiebungen der aneinandergepreßten Teile an den Enden der Kraftübergangsstrecke unvermeidlich.

Um über den Verlauf des Kraftübergangs und der Spannungsverteilung Aufschluß zu erhalten, wurden die Dehnungen zwischen den Schraubenquerreihen HV-verschraubter und belasteter Bauteile gemessen; die damit errechneten Spannungen ergeben ein klares Bild des Kraftübergangs. Für einen Knotenpunkt einer Fachwerkbrücke ist dies in den Fig. 9 und 10 dargestellt. Den Verlauf des Kraftüberganges an 2schnittigen Laschenverbindungen bei verschiedenen Laststufen läßt Fig. 11 aus den Verschiebungen erkennen.

Die gegenseitigen Verschiebungen von Laschen- und Stabquerschnitten sind Gesamtverschiebungen infolge reversibler, elastischer Dehnungen und

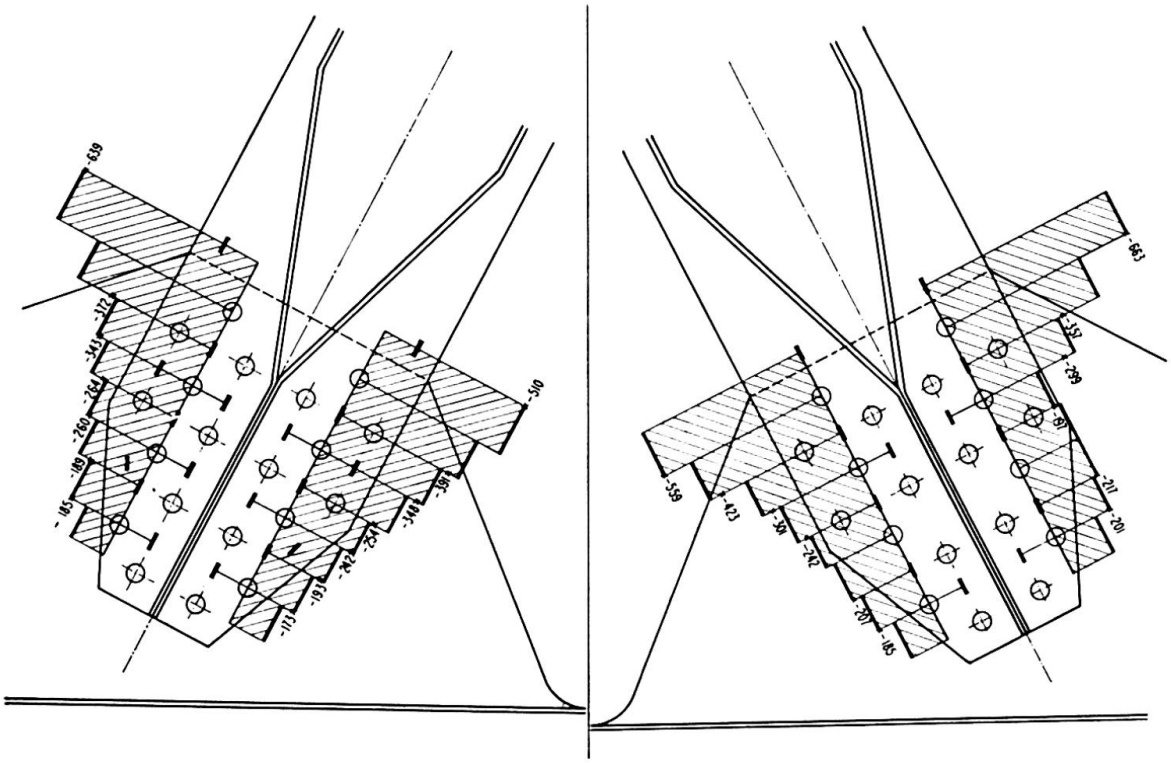

Fig. 9. Fig. 10.

× Mittelwerte aus 5 Belastungen (ohne 1. Belastung) aufgetragen von einer Nullinie aus.
— Dehnmeßstreifen.

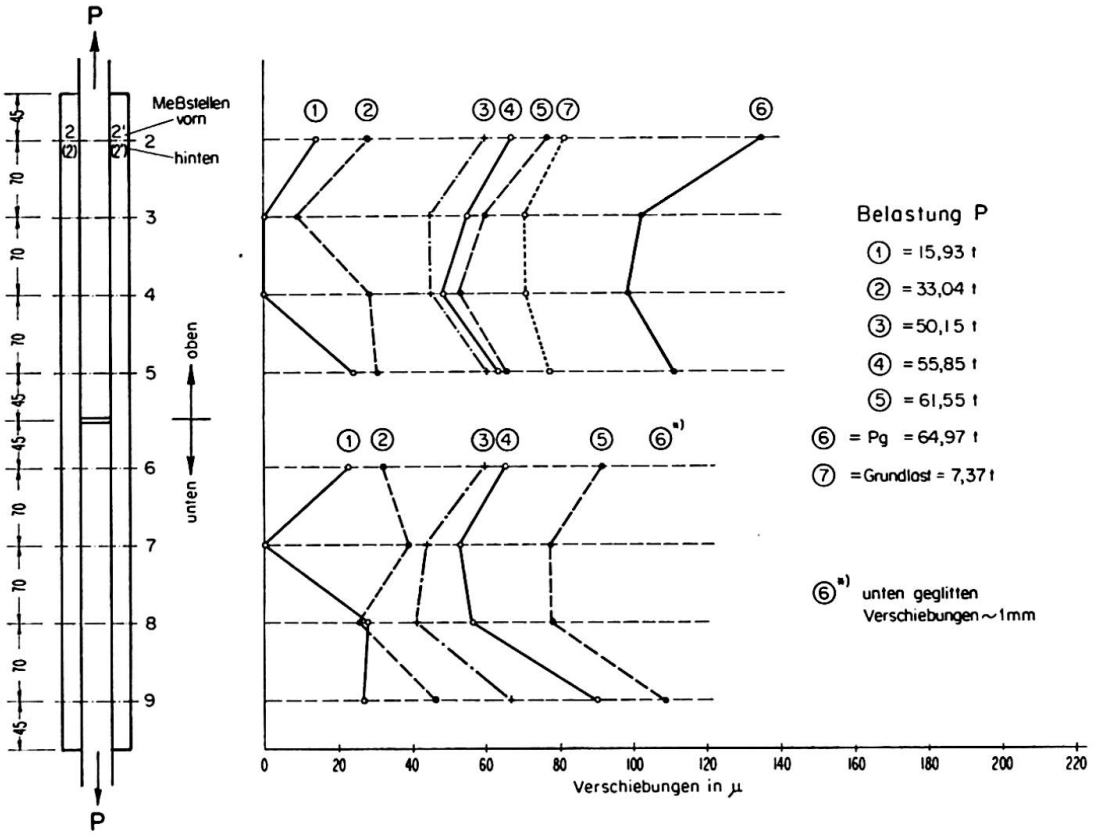
P
Meßstellen
vorn
hinten
oben
unten
Belastung P
① = 15,93 t
② = 33,04 t
③ = 50,15 t
④ = 55,85 t
⑤ = 61,55 t
⑥ = Pg = 64,97 t
⑦ = Grundlast = 7,37 t
⑥ a) unten geglitten
Verschiebungen ~ 1mm
Verschiebungen in μ

Fig. 11.

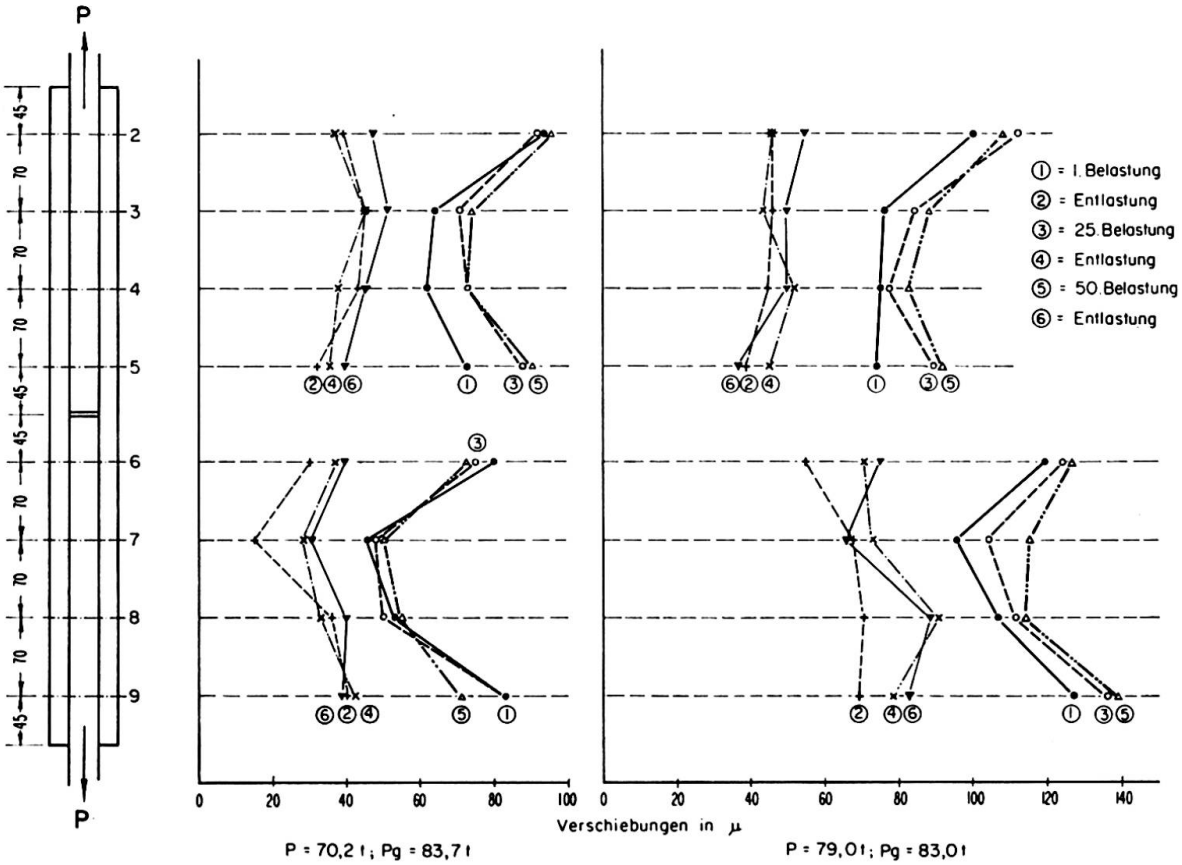
P
① = I. Belastung
② = Entlastung
③ = 25. Belastung
④ = Entlastung
⑤ = 50. Belastung
⑥ = Entlastung
Verschiebungen in μ
P = 70,2 t ; Pg = 83,7 t
P = 79,0 t ; Pg = 83,0 t

Fig. 12.

bleibender gegenseitiger Verschiebungen. Zum Nachweis der bleibenden Verschiebungen wurden an mehreren 2schnittigen Laschenverbindungen jeweils nach der 1., 25. und 50. Belastung die Gesamtverschiebungen unter der Last und nach jeweiliger Entlastung die bleibende Verschiebung gemessen. Fig. 12 zeigt die Verschiebungen der Zugstäbe gegenüber den Decklaschen in den Nettoquerschnitten von 2 Laschenverbindungen.

Auch an dem oben erwähnten Versuchsknotenpunkt wurden die gegenseitigen Verschiebungen zwischen Knotenblech und Diagonalstab gemessen. Sie sind in Fig. 13 dargestellt.

Das Bild läßt sogar die nach Entlastung gemessene Stauchung des Knotenblechs infolge bleibender Verschiebungen erkennen.

In Fig. 14 sind die Ergebnisse von Messungen bleibender und elastischer Verschiebungen an Diagonalen einer Talbrücke unter Verkehrslast dargestellt. Die Verschiebungen erfolgten unter Stabspannungen, die etwa einem Drittel der zulässigen Spannungen entsprechen.

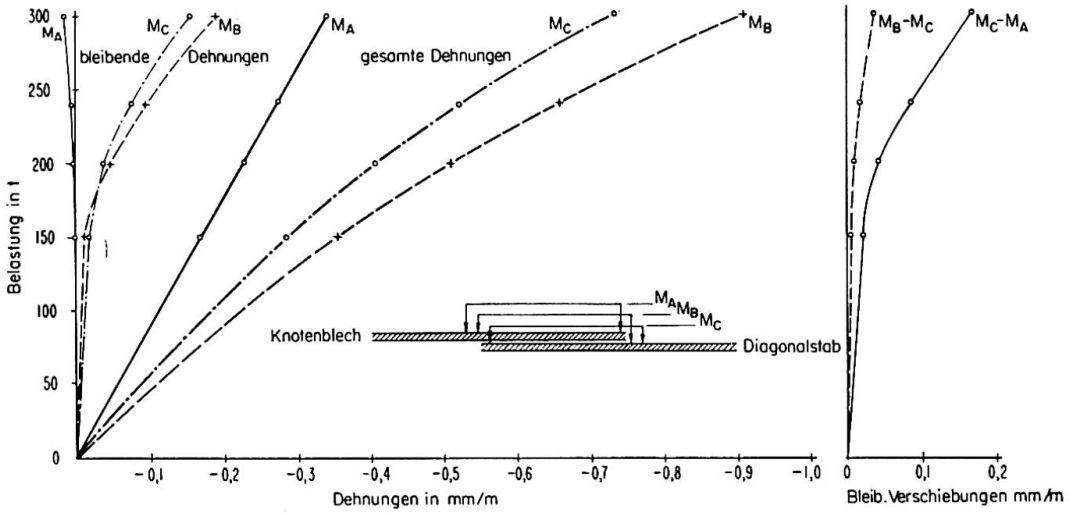

Fig. 13. Ergebnisse der Dehnungsmessungen mit einem 50-cm-Setzdehnungsmesser.

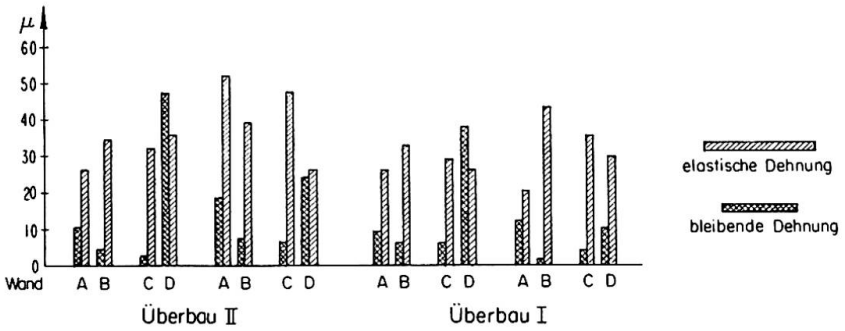

Fig. 14.

6. Kriechverhalten von HV-Verbindungen

In hochfesten Schraubenverbindungen zweier Fachwerk-Eisenbahnbrücken wurden über 2 Jahre hin seit ihrer Inbetriebnahme die Längenänderungen besonderer Meßschrauben (mit eingesetztem, spannungsfreiem Stift) beobachtet. Es konnte festgestellt werden, daß in 2 Jahren ein Längungsabfall von rund 10% eintrat, wovon im ersten Vierteljahr bereits 7% erreicht waren. Er scheint demnach zum Stillstand zu gelangen (Fig. 15 und 16).

Dieser Vorspannungsabfall kann durch Nachspannen großenteils beseitigt werden.

Der größte Teil des beobachteten Längungsabfalls dürfte auf plastische Verformung in den schmalen Berührungsflächen zwischen Unterlagsscheiben und Schraubenmuttern bzw. Schraubenkopf zurückzuführen sein, da es sich um HV-Schrauben aus der Produktion früherer Jahre handelt. Durch neuerdings hergestellte Schrauben verbesserter Form dürfte dieser Längungs- und Vorspannungsabfall verringert sein.

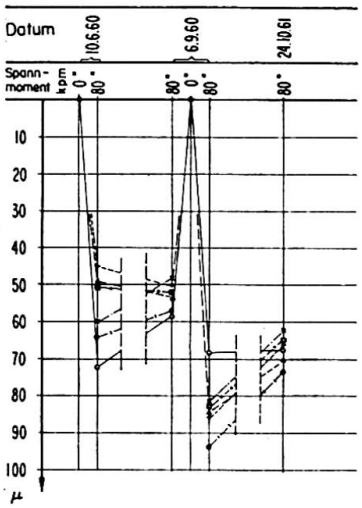

Fig. 15. Längenänderungen von 6 HV-Schrauben M 24—10 K eines Knotenpunktes der Kinzigbrücke.

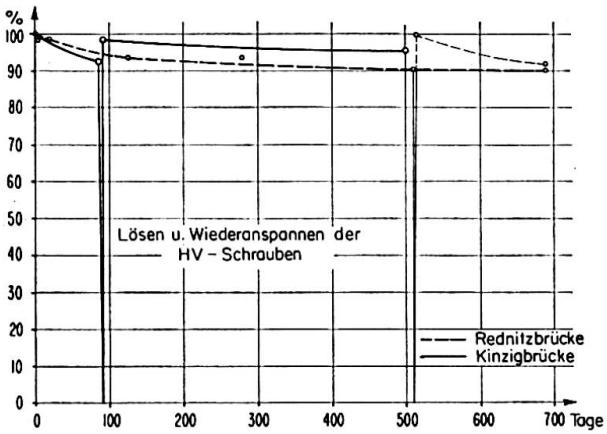

Fig. 16. Prozentualer Abfall der gemessenen Schraubenlängungen.

7. Korrosionsverhalten

Das Zusammenpressen der verbundenen Teile durch Schraubenvorspannung genügt nicht, um bei ungeschützten oder nicht genügend geschützten Berührungsflächen den Zutritt von Wasser oder gar feuchter Luft zu verhindern. Die Fig. 6 und 7 machen das besonders glaubwürdig.

An HV-verschraubten Eisenbahnbrücken wurde auch zum Teil Rostbildung in den Berührungsflächen und in den Schraubenlöchern festgestellt. In welchen Grenzen sich durch Korrosion der Reibbeiwert und damit die Gleitkraft der Verbindung ändern kann, ist noch nicht genügend untersucht. In einzelnen Fällen wurde ein Absinken des ursprünglichen Reibbeiwerts um etwa 15% festgestellt.

Einer besonders guten Abdichtung der Ränder der Berührungsflächen, die auch die oben beschriebenen geringen elastischen Verschiebungen mitmachen kann ohne zu reißen, kommt daher große Bedeutung zu.

Zusammenfassung

Es werden Auszüge aus den Ergebnissen umfangreicher Versuche, deren Programm sich aus Überlegungen und Beobachtungen über die Wirkungsweise von HV-Verbindungen ergab, mitgeteilt. Sie sollen einen Beitrag zur Beherrschung störender Einflüsse liefern.

Summary

The author presents results from an extensive test programme based upon considerations and observations on the mode of action of high strength bolted connections, as a means of control of unfavourable conditions. The subjects treated are: effect upon the friction coefficient of the means of surface preparation; divergent values of the induced bolt tension; the influence of form irregularities on the compression in contact surfaces; transfer of force in joints; effect of creep and corrosion.

Résumé

L'auteur présente quelques résultats d'un vaste programme d'essais, basé sur des réflexions et des observations relatives au mode d'action des assemblages HR. On saura ainsi mieux maîtriser certaines influences défavorables. Les sujets traités sont: influence du mode de préparation des surfaces sur la valeur du coefficient de friction; dispersion des valeurs effectives de la précontrainte dans les boulons; influence des irrégularités de forme sur le serrage des surfaces en contact; distribution des efforts dans les assemblages; comportement au fluage et à la corrosion des attaches HR.