

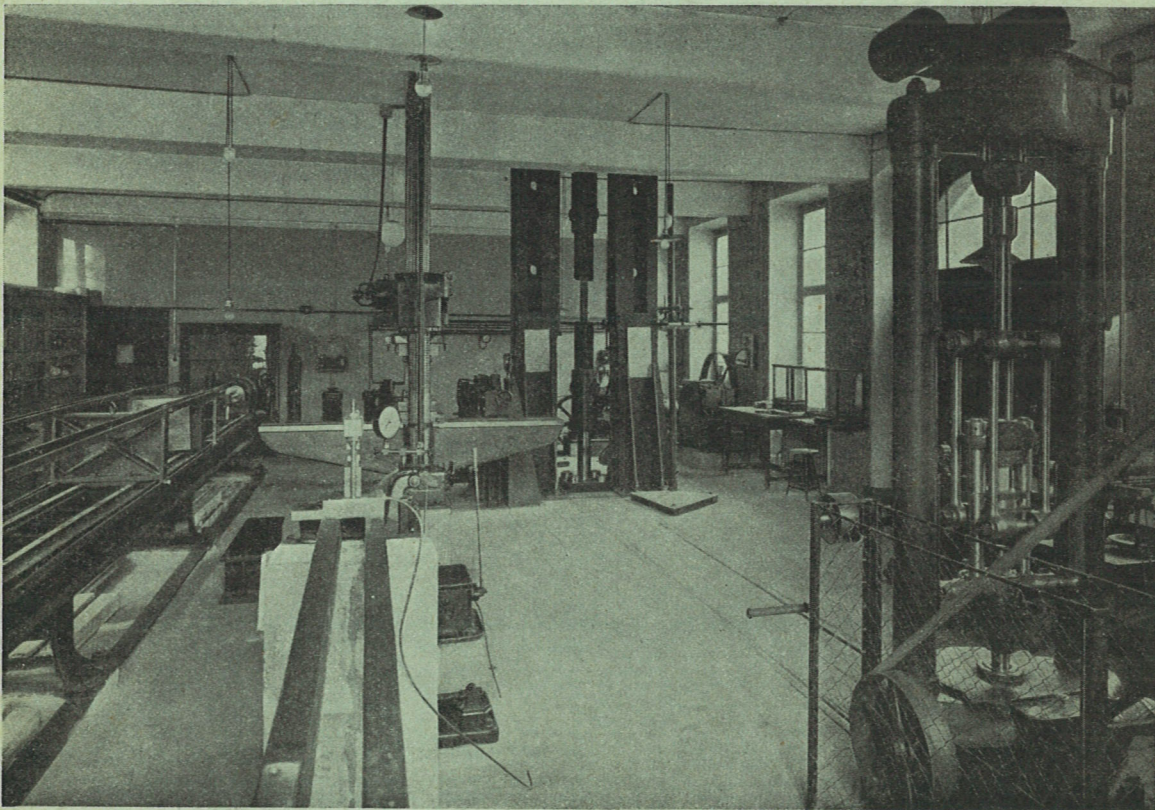
VERSUCHSANSTALT FÜR HOLZ, STEIN UND EISEN
PRÜFRAUM GABER • TECHNISCHE HOCHSCHULE KARLSRUHE

HEFT 4

GLEIT- UND FLIESSGRENZE VON NIET-VERBINDUNGEN

VON

Dr.-Ing. HERMANN HOFFGEN
KARLSRUHE



Innenansicht des Prüfraums Gaber. Hinten rechts die 300-t. Zerreißmaschine für dynamische Beanspruchung.

Karlsruhe 1935

Inhalts-Verzeichnis

	Seite
Vorwort	3
I. Hauptteil, Gleitgrenze, Gleitweg und Verschiebungen einer Nietverbindung	5
Versuche über Gleitgrenze und Gleitweg	8
Einfluß von	
a) Nietungsverfahren	9
b) Niettemperatur, Nietungsdauer- u. -druck	13
c) Nietschaftlänge	14
d) Nietstahlsorte	15
e) Abschrecken	17
f) Blechoberflächen	18
g) Zahl und Anordnung der Niete	19
h) Wiederholte Belastung	22
Zusammenfassung und Folgerungen für den I. Hauptteil	23
II. Hauptteil, Verhalten der Nietverbindung bis zum Bruch	26
1. Einzeluntersuchungen	27
a) Scherbeanspruchung des Niets	27
b) Lochwanddruck u. seine Auswirkungen	28
2. Versuche an Verbindungen	31
a) Niet- und Bolzenverbindungen aus verschiedenen Baustählen	31
b) Wiederholte Belastung	33
c) Reibung bei höheren Lasten	34
III. Schluß und Folgerungen aus den Versuchen	36
Literatur-Verzeichnis	39

Vorwort.

Nietung und Schweißung stehen im Stahlbau heute in scharfem Wettbewerb. Die Schwierigkeiten einer einwandfreien Schweißung sind aber heute noch so groß, daß man in den meisten Fällen auf der Baustelle z. B. die Baustöße von geschweißten Konstruktionen lieber vernietet. Für die meisten geschweißten Konstruktionen sind die heutigen Walzprofile wenig geeignet. Es wird noch lange dauern, bis die richtigen Konstruktionsformen für geschweißte Tragwerke sich entwickelt haben und ausgereift sind. Unter diesen Umständen ist die Nietung praktisch und wirtschaftlich durchaus nicht in Hintergrund getreten. Der größte Teil der Stahlbauten wird heute und für lange Zeit noch genietet werden. Es war daher nicht unzeitgemäß, wenn wir uns in der Versuchsanstalt laufend auch mit der Nietung beschäftigt haben und unter Fortsetzung einer Tradition Engessers das Verhalten von Nietverbindungen, vor allem bei wiederholter Belastung, studierten.

Es zeigte sich bald, daß aus den bei der ersten Belastung einer Nietverbindung gewonnenen Feststellungen durchaus nicht auf ihr Verhalten nach wiederholter Last geschlossen werden kann. Am augenfälligsten ist diese Erscheinung bei der ähnlich gearteten Verbindung im Holzbau, bei der Nagelung.¹⁾ Hier ist es augenfällig, daß die Vielzahl von Nägeln erst nach längerem Einspielen, also erst nach wiederholter Belastung richtig und gleichmäßig zum Tragen kommt; es ist notwendig, jede genagelte oder genietete Konstruktion mindestens zwölfmal vorzubelasten, ehe sich ein richtiges Bild über ihr dauerndes Verhalten ergibt. Schon frühzeitig haben wir daher bei unsern Arbeiten dieser Tatsache Rechnung getragen und auch die normalen statischen Versuche erst nach zwölfmaliger Vorbelastung in der jeweils zulässigen Höhe durchgeführt. Der Konstrukteur will nicht wissen, wie seine Konstruktion sich das erstemal bei der Ingebrauchnahme verhält, sondern welche Eigenschaften sie im Laufe der Dauerbenützung aufweist.

In letzter Zeit ist man in Deutschland von den statischen zu den dynamischen Belastungen übergegangen, hat sich dabei aber meistens auf Verbindungen mit 1 oder 2 Nieten beschränkt. Es ist jedoch gewagt, aus diesen Erkenntnissen allgemein gültige Schlüsse auch für Verbindungen mit so zahlreichen Nieten zu ziehen, wie sie eben in der Normalkonstruktion vorkommen.

Aus dieser Erkenntnis heraus, auf der übrigens die ganze Einrichtung unserer Ver-

suchsanstalt aufgebaut wurde, haben wir schon frühzeitig Maschinen entwickelt, welche die Prüfung von wirklichkeitsnahen Konstruktionen gestatten:

Eine stehende 300-t-Zerreißmaschine mit einer größten Versuchslänge von 7,50 m.²⁾

und eine 500 t-Druck- und Biegemaschine mit einer größten Länge des Versuchskörpers von 2,00 und 6,00 m.

Beide Maschinen eignen sich für statische und dynamische Versuche. Durch Kupplung mit einer hydraulischen Hochleistungspumpe und Einbau eines selbstentwickelten Steuer- und Schaltorgans kann in jeder der Maschinen eine Schwelllast in beliebigen Grenzen, beim Zug zwischen 0 und 200 t, beim Druck zwischen 0 und 300 t erzeugt werden. Der dabei auftretende Rhythmus kommt wiederum der Wirklichkeit nahe, weist also nicht so viele Lastwechsel auf wie bei den üblichen Dauerfestigkeitsmaschinen des Motorenbaues usw., sondern eine solche Lastwechselzahl, wie sie bei unsern Brücken und andern Tragwerken tatsächlich vorkommt, nämlich 20 bis 30 Lastwechsel/min je nach Belastungshöhe.

Dr.-Ing. Hoeffgen ist eine lange Reihe von Jahren als Betriebsleiter in meiner Versuchsanstalt tätig gewesen und hat in dieser Zeit lebhaft bei der Durchführung und Auswertung all dieser Versuche mitgewirkt. Die Versuche erstreckten sich zunächst auf den Leibungsdruck der Nietung, gefördert durch Herrn Dr.-Ing. Dörnen und die Reichsbahnhauptverwaltung. Wir gewannen dabei die Überzeugung, daß durch einen hohen zulässigen Leibungsdruck nicht, wie befürchtet, die Tragkraft einer Konstruktion leidet, sondern daß nur die Sicherheit gegen große Formänderung etwas beeinträchtigt wird. Der Leibungsdruck ist niemals die unmittelbare Ursache einer Zerstörung, wenn der Randabstand der Niete genügend groß gewählt wird.

Hieran reihten sich umfangreiche Arbeiten über die Güte der Nietarbeit anlässlich des Baues der Köln-Mülheimer Hängebrücke. Ein Vergleich zwischen der Arbeit der Kniehebelpresse in der Werkstatt und dem Preßlufthandhammer bei dicken und langen Nieten fiel zur Überraschung aller Beteiligten zu ungunsten der Kniehebelpresse aus.

¹⁾ Heft 3 der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen 1935.

²⁾ Zeitschrift des Vereins d. Ing. 1935, Heft 17.

Angeregt durch diese aufschlußreichen Versuche entwickelten wir dann als Erste das bekannte Edelnietverfahren, um weitgehend, auch bei großen Klemmlängen, konische Bolzen durch die üblichen Niete zu ersetzen, in dem der Arbeitsgang der Nietung in zwei Abschnitte zerlegt wurde:

1. Stauchung des Nietschaftes auf seine ganze Länge unter vollkommener Umschließung des überstehenden Nietschaftes während der Arbeit der Kniehebelpresse oder der leichten und zahlreichen Preßlufthammerschläge,
2. Formung des Schließkopfes wieder durch die Kniehebelpresse oder den Döpper mit wenigen, aber kräftigen Preßlufthammerschlägen.

Das Verfahren wurde auch von anderen aufgegriffen und wird angewendet.

Zwischenhindurch schenken wir unsere Aufmerksamkeit der Schweißung und fanden dabei wohl zum erstenmal das Gesetz für die ungleichmäßige Verteilung der Schubspannungen über die Nahtlänge.

Schon früher hatten wir versucht, durch Einführen von Hohnieten und Beobachtung der Flüssigkeitssäulen an jedem dieser Hohniete das Gesetz für die Verteilung einer

Stabkraft auf eine größere Nietverbindung zu finden und anschaulich zu machen.

Anschließend an diese Versuche wurde auch in Fortführung der Untersuchungen anderer Forscher das Verhalten von Nietkonstruktionen untersucht, welche nachträglich durch Schweißen verstärkt wurden.³⁾ Es zeigte sich dabei die eigentlich selbstverständliche Tatsache, daß bei einer genieteten Konstruktion, welche im spannungslosen Zustande durch Schweißnähte verstärkt wird, praktisch die ganze Belastung von den Schweißnähten getragen wird. Ein gleichzeitiges Wirken beider Verbindungsmittel ist nur dann zu erreichen, wenn man die genietete Konstruktion während der Schweißarbeit ganz erheblich belastet.⁴⁾

Über diese Versuche, welche meist aus praktischen Anlässen oder zu Lehrzwecken durchgeführt wurden, haben wir bisher wenig veröffentlicht. Es ist daher zu begrüßen, daß mein langjähriger Mitarbeiter auf meinen Wunsch es unternommen hat, unser Material zu sichten und teilweise auszuwerten. Es war selbstverständlich, daß dabei Anschluß an die zahlreichen und wertvollen Versuchsarbeiten anderer Forscher gesucht wurde, um schließlich zu einem abgerundeten Urteil wenigstens über einen Teilausschnitt dieses interessanten Gebietes des Verhaltens von Nietverbindungen zu gelangen.

Karlsruhe, im Dezember 1935.

E. Gaber.

³⁾ Bauingenieur 1932, Heft 21/22.

⁴⁾ Internationale Vereinigung für Brückenbau, 2. Band 1934, S. 13.

I. Hauptteil.

Gleitgrenze, Gleitweg und Verschiebungen einer Nietverbindung.

Es werde als Beispiel angenommen, daß eine Verbindung nach Abb. 3 und 4 vorliegt. Ein Flachstab ist stumpf gestoßen und beiderseits gelascht. In jeder Stoßhälfte ist also ein einziger zweisehnittiger Niet vorhanden.

Diese Verbindung macht, während sie erstmalig steigend belastet wird, eine Reihe verschiedener Zustände durch, wie in Abb. 6 dargestellt.

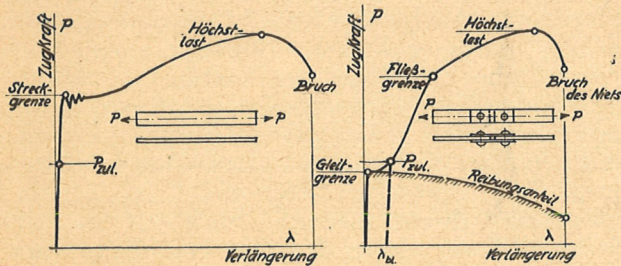


Abb. 1: Kraft-Verlängerungs-Linie eines Stahlstabes.

Abb. 2: Kraft-Verlängerungs-Linie einer Nietverbindung mit einem Niet.

Beim unbelasteten Versuchsstab sitzen die Niete stets mit Spielraum in den Bohrungen, schon weil sie sich unmittelbar nach dem Einziehen beim Erkalten radial zusammenziehen. Um die rotwarmen Niete bequem in die vorgebohrten Löcher einführen zu können, muß der Roh Niet kleiner sein als der Lochdurchmesser. Der z. Zt. übliche Unterschied beträgt etwa 1 mm, um dieses Maß muß der Niet durch Verstauchung verdickt werden. Die üblichen werkstatmäßigen Nietverfahren erreichen das nur unvollkommen. Dazu kommt, daß infolge unvermeidlicher Ungenauigkeiten beim Anreißen und Bohren die Löcher der zu vernietenden Bleche oft gegeneinander versetzt sind.

Auch die Zunderschicht, welche sich beim Erwärmen des Nies bildet, verhindert ein gutes Anliegen. Wir haben beim Herausdrücken von Nieten Zunderplättchen bis zu 0,5 mm Stärke und mehr gemessen. Dieser Zunder ist sehr spröde und wenig fest und wird daher bei Bewegungen des Nietanschlusses leicht zu feinem Staub zerrieben.

Unmittelbar nach seiner Herstellung hat der Niet durch seine Abkühlung aber auch in seiner Längsrichtung eine Schrumpfung erlitten. Er wird also mit einer gewissen Kraft die beiden Außenbleche gegen das Mittelblech pressen und Reibung zwischen den Blechen erzeugen.

Bei allmählicher erstmaliger Belastung der Verbindung wirken zunächst nur diese Reibungskräfte, so daß eine Verschiebung der verbundenen Teile zunächst nicht eintritt. Der Niet nimmt in diesem Falle keine neue

Spannung auf, auch keine Scherspannung, ebenso kann kein Lochleibungsdruck wirken, da er ja nicht an der Leibung anliegt. Der Niet übernimmt also zunächst nicht die Kräfte so, wie er berechnet ist, sondern er trägt lediglich durch Klemmwirkung infolge der in ihm vorhandenen Zugspannung.

Daß der Niet in diesem Zustand in der Tat keine Scherkräfte oder Lochleibungsdrücke aufnimmt, zeigt folgender in der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen an der Technischen Hochschule Karlsruhe durchgeführter Versuch. Ein Niet mit 23 mm \varnothing in einem Versuchsstab etwa nach Abb. 3 wurde mit 5 mm \varnothing durchbohrt und die eine Seite verschlossen, während die andere Seite mit einer Kapillare und Maßstab versehen wurde. Bei einer Belastung des Nies mußte sich jede Formänderung des Nieschaftes durch eine Änderung der Steighöhe der gefärbten Flüssigkeit bemerkbar machen. Um den störenden Einfluß der Temperatur auf die Messung ausschalten zu können, war eine zweite Nietverbindung vorhanden, deren Niet in gleicher Weise auch mit einer Kapillare versehen war, welche aber nicht belastet wurde.

Der Versuchsstab wurde nun in eine Zerreißmaschine eingespannt und die Steighöhe der 20 cm hohen Kapillare unter Last beobachtet. Es ergab sich:

1. Versuch			
Belastung in t	Belastung auf 1 cm ² Niescherfl. kg/cm ²	Steighöhe der Kapillare cm	Vergleichs- kapillare cm
0	0	0	0
7,0	840	0	0
9,6	1150	0	0
12,0	1440	0	0
15,0	1800	0	0
17,4	2090	0	0
17,5	2100	über 20	0
0	0	„ 20	0
2. Versuch			
unmittelbar anschließend an den 1. Versuch			
Kapillarflüssigkeit erneut auf Null eingestellt			
0	0	0	0
7,0	840	0,7	0,1
9,6	1150	1,1	— 0,1
0	1440	1,3	— 0,3
1,20	0	— 0,3	— 0,3

Bei der erstmaligen Belastung erlitt in der Tat der Niet keine Formänderung, nahm also keine Scherkraft auf bis 17,4 t. Dann trat bei

der geringen Kraftzunahme von 0,1 t durch Überwindung der Reibung das Gleiten und die Belastung des Niets so heftig ein, daß die

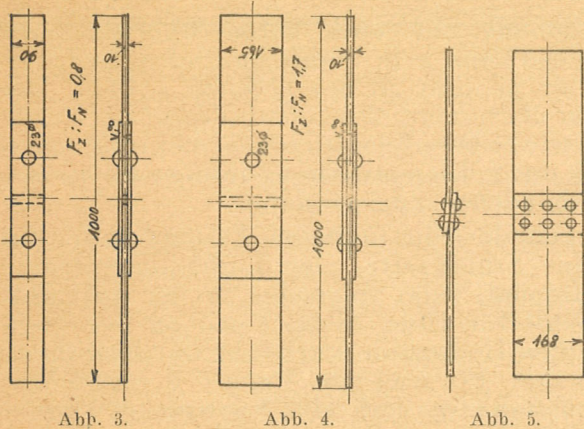


Abb. 3: Genieteteter Versuchsstab, so bemessen, daß er bei Zugbeanspruchung im gelochten Querschnitt reißt.

Abb. 4: Genieteteter Versuchsstab, so bemessen, daß er bei Zugbeanspruchung durch Abscheren des Niets reißt.

Abb. 5: Mit Überlappung genieteteter Versuchsstab (nach Bach).

Flüssigkeit in der Kapillare über 20 cm stieg. Nach dem Entlasten blieb dieser Gleitweg im wesentlichen bestehen, der Niet lag endgültig an der Leibung an. Die Kapillarflüssigkeit ging nicht auf Null zurück, der Niet erhielt also auch nach dem völligen Entlasten der Verbindung bleibende Formänderungen.

Bei der zweiten Belastung war der Niet aber von vornherein auf Scheren und Lochleibungsdruck etwa proportional der Kraft beansprucht, wie das ziemlich gleichmäßige Steigen der Flüssigkeit beweist. Er wirkte jetzt rein elastisch, da die Flüssigkeit auf den Stand der Vergleichskapillare zurückging.

Es ist daher nicht möglich, die Verteilung einer Gesamtkraft auf die einzelnen Niets einer Reihe — natürlich einschließlich der Klemmkraft — etwa mit Hilfe der Formänderung der Niets zu finden. Wohl aber ist das bei Bolzen möglich.

Hierher gehörige Versuche sind von Hertwig und Petermann (29) beschrieben. Es wurde die gegenseitige Verdrehung von Nietköpfen unter Last gemessen. Es ergab sich eine Abhängigkeit der Verdrehungen von der Gesamtkraft nach Abb. 7. Sie zeigt, daß bei einer Last von 3,0 t ($\tau = 480 \text{ kg/cm}^2$)¹⁾ die Verdrehung noch gleich Null war und hier die regelmäßigen Verdrehungen erst begannen. (Die positiven und negativen geringen Verdrehungen zwischen 0 und 3 t dürften auf unvermeidlichen Meßfehlern beruhen.) Hier erst hatte sich der Niet also an die Wandung angelegt. Die Versuche wurden mit eingepaßten Bolzen weitergeführt, welche keine Klemmkraft ausüben können. Es zeigte sich dann eine fast gradlinige Abhängigkeit.

¹⁾ Dies ist die Last, bezogen auf 1 cm² Scherfläche. In Wirklichkeit traten Scherkräfte aber hier noch nicht auf.

In jenem Augenblick also, wo die anwachsende äußere Kraft die ruhende Reibung überwindet, tritt ein Gleiten der verbundenen Teile aufeinander ein, es wird der „Gleitwiderstand“ überwunden. Dieser Gleitwiderstand, bezogen auf 1 cm² Nietscherquerschnitt, werde „Gleitgrenze“ genannt.

Die Überwindung des Gleitwiderstandes wird beim Versuch mit einem Niet meist durch knackende Geräusche angezeigt. Außerdem macht sich oft ein plötzliches Abfallen der Stablast bemerkbar, da die Reibung der Bewegung kleiner ist als die der Ruhe. Es tritt eine ähnliche äußere Kennzeichnung der Gleitgrenze ein, wie bei der Streckgrenze beim einfachen Zugversuch. Das Gleiten dauert ohne wesentliche Zunahme der Stablast so lange an, bis der Niet an der Leibung anliegt, dann erst steigt die Belastung weiter. Äußerlich ähnlich, aber durch andere Ursachen bedingt, steigt beim einfachen Zugversuch mit einem ungestoßen durchlaufenden Stab mit überall gleichem Querschnitt die Last erst dann wie-

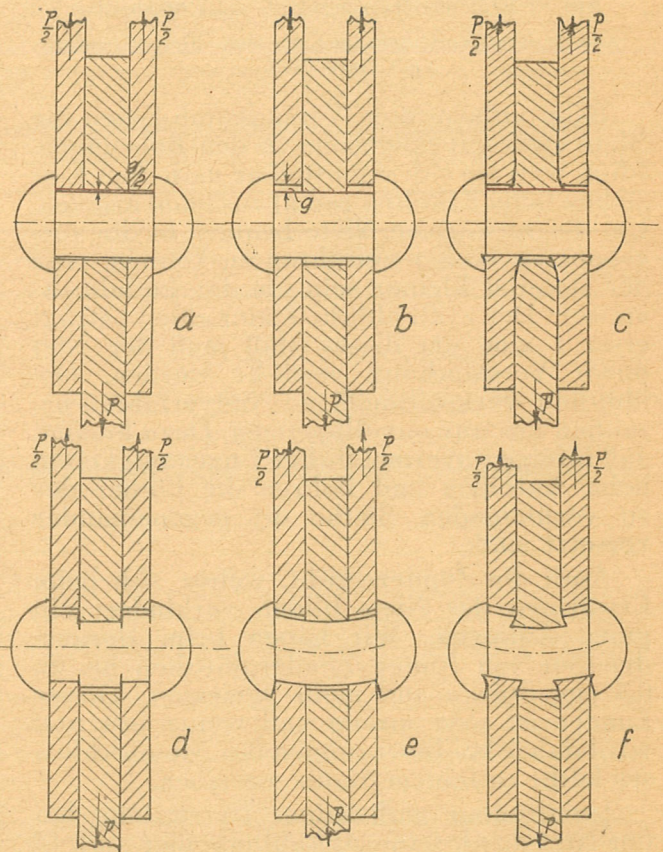


Abb. 6: Zustände in einer Nietverbindung nach Abb. 3.

Nach der Herstellung und unbelastet

a) Der Niet sitzt mit Spielraum in der Bohrung.

Nach Belastung mit Überwindung des Gleitwegs

b) Die Leibungsflächen kommen zum Anliegen.

Nach stärkerem Belasten

c) Die Lochränder weichen plastisch aus.

d) Der Niet wird geschnitten.

e) Der Niet wird verbogen.

f) Die Zustände c) d) e) wirken gleichzeitig und überlagern sich.

der an, wenn das Strecken über die ganze Länge des Stabes erfolgt ist. So haben die Last/Dehnungslinien eines Stabes nach Abb. 4, welcher so dimensioniert ist, daß der Niet bricht, bevor der Stab die Streckgrenze erreicht und die eines einfachen Flachstabes, eine gewisse Ähnlichkeit (Abb. 1 und 2).

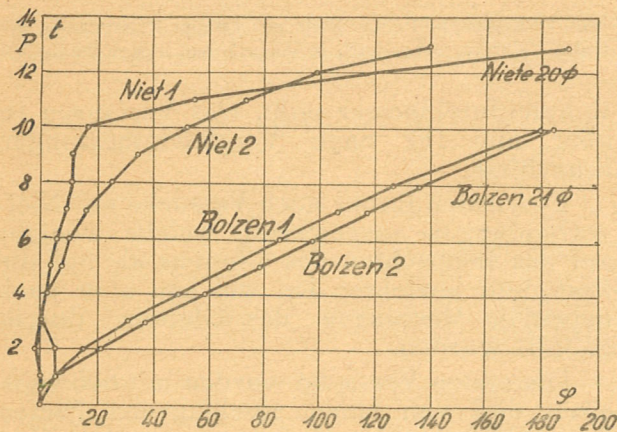


Abb. 7: Verdrechung von Nietköpfen und Bolzenendflächen unter Last (nach Hertwig und Petermann).

Bei der Nietverbindung muß also zuerst ein „Gleitweg“ zurückgelegt worden sein, bis die Scherfestigkeit des Niets in Anspruch genommen wird. Setzt man vereinfachend voraus, daß der Spielraum zwischen Niet und Lochwandung überall gleich ist, so wird nach Abb. 6 der Gleitweg gleich dem doppelten Spielraum, oder gleich dem Unterschied der Durchmesser von Bohrung und Niet.

Die Höhe der Gleitgrenze ist sehr wichtig für die Güte und Zuverlässigkeit der Verbindung, denn sie bestimmt die Grenze des elastischen Verhaltens. Weiter ist zu beachten, daß der Gleitwiderstand beim Überschreiten der Gleitgrenze wohl noch weiter wirkt, aber kleiner wird. Es liegt also die Gefahr nahe, daß die verbundenen Teile, besonders solche, die abwechselnd Zug und Druck zu übertragen haben, nach der einmaligen Überschreitung der Gleitgrenze ständig aufeinander gleiten; hierdurch werden die Reibungsflächen immer mehr geglättet, der Gleitwiderstand wird im Laufe der Zeit mehr und mehr herabgesetzt und die Nieten lockern sich.

Schon aus diesem Grunde wird man zur Erzielung einer guten Nietverbindung Sorge tragen müssen, daß die Nieten so gut wie möglich ihr Loch ausfüllen, damit der Gleitweg, falls die Gleitgrenze überschritten wird, so klein wie möglich ausfällt und damit die Längenänderungen der verbundenen Teile gleichmäßig und nicht sprunghaft verlaufen.

Sobald der Gleitweg bis zum Anliegen des Niets an die Wandungen der Bohrung zurückgelegt ist, erhält der Niet bei anwachsender Belastung der Verbindung allmählich Scherkräfte, welche das Abscheren des Niets

nach Abb. 6d bewirken. Durch den die Fließspannung überschreitenden Lochleibungsdruck werden die Lochränder um Stab und Laschen verdickt und suchen plastisch auszuquellen (Abb. 6c). Hierdurch wird erneut Zugspannung im Niet hervorgerufen, welche durch die Seilwirkung nach Abb. 6e verstärkt wird. Schließlich erhält der Niet noch Biegespannungen, welche ebenfalls die Fließgrenze des Materials vermutlich erreichen. Alle diese Spannungen wirken gleichzeitig zusammen und erzeugen bleibende Verschiebungen der verbundenen Teile, welche vermöge der Zähigkeit des Niet- und Stabmaterials große Werte bis zum Bruch der Verbindung annehmen können.

Die Ähnlichkeit der Kraft-Verschiebungslinie des Nietanschlusses mit der Kraft-Verlängerungslinie des ungestoßenen Zugstabes führt u. a. zu der Frage, ob die Nutzlasten, nach der „Fließgrenze“ oder nach der „Bruchgrenze“ zu bemessen seien, wobei der natürlichen Fließgrenze des Zugstabes die Gleitgrenze des Nietanschlusses und der Tragkraft aus der Zugfestigkeit des Zugstabes die Tragkraft aus der Scherfestigkeit der Nieten entspricht.

Bei der Bemessung der Nietverbindungen stehen sich immer noch die beiden verschiedenen Anschauungen gegenüber: die eine, welche die vom Niet erzeugte Reibung als das Maßgebende für die Verbindung ansieht und die übliche Berechnung auf Lochleibungsdruck und Abscheren nur als notwendiges Hilfsmittel ansieht, da die Reibungskräfte nicht genügend sicher bekannt und nicht mit Zuverlässigkeit herzustellen sind; die andere, welche das Abscheren als das Maßgebende ansieht, weil es den Bruch verursacht und rechnerisch besser erfaßt werden kann.

Ganz neue Erkenntnisse bringen Versuche an Nietverbindungen mit oftmals wiederholter Belastung (28). Hier macht sich der Einfluß des Gleitwiderstandes infolge der Klammerwirkung des Nietes besonders günstig bemerkbar, indem unter Umständen der Dauerbruch aus dem Bereich des durch den Niet geschwächten Querschnitts heraus in den vollen Stabquerschnitt verlegt werden kann.

Solche Versuche sind z. Zt. noch nicht genügend zahlreich, um Gesetzmäßigkeiten in bezug auf die Reibungs- und Gleitverhältnisse zu überblicken. Die hier beschriebenen Untersuchungen gründen sich daher ausschließlich auf gewöhnliche Versuche mit einfachem Lastanstieg oder wenigen Lastwiederholungen.

In den nächsten Abchnitten wird zunächst erörtert werden, wie weit der Reibungsschluß zuverlässig hergestellt werden kann, wobei auch die Größe des Gleitweges mitbehandelt werden wird.

Versuche über Gleitgrenze und Gleitweg.

Eine Verbesserung der Nietverbindung in dem besprochenen Sinne kann erreicht werden durch Erhöhung der Gleitgrenze oder durch Verkleinerung des Gleitweges.

Das vorliegende Problem ist einer theoretischen Behandlung nicht zugänglich. Seit rd. 80 Jahren hat man daher Versuche unternommen zur Klärung der Fragen: Wie hoch ist der Gleitwiderstand überhaupt, und ist er ausreichend, um die Kräfte durch Reibung zu übertragen? Welche Umstände beeinflussen die Gleitgrenze günstig oder ungünstig? Wie erreicht man eine gute Stauchung der Niete?

Bei den meisten hierhergehörigen Versuchen wurde entweder unmittelbar die Gleitgrenze festgestellt, indem zu wachsenden Kräften die Verschiebungen in einer genieteten Verbindung gemessen wurden, oder es wurde die Längszugkraft der fertig geschlagenen Niete bestimmt. Diese Längszugkraft ist wiederum abhängig von der Federung der verbundenen Bleche und von der Verkürzung des Niets. Wärmeausdehnungsbeiwert und Dehnungszahl der Stahlsorten für Niete unterscheiden sich kaum, dagegen hat sich die verschiedene Längenausdehnung bei der thermischen Umwandlung des Stahls als wesentlich für die „Klammerwirkung“ der Niete herausgestellt. Auch werden die verschiedenartigen Oberflächen der aufeinandergepreßten Bleche Einfluß nehmen. Häufiger untersucht sind die Wärmebehandlung der Niete sowie der Einfluß der Herstellungsart.

Versuche über die Größe der Gleitstrecke sind nur in geringer Zahl durchgeführt worden. Die Bestimmung der P/δ -Linie führt hier nicht einwandfrei zum Ziel, weil nach dem Zurücklegen der Gleitstrecke der Niet nicht plötzlich die Scherkraft aufnimmt, sondern erst allmählich mit wachsender Größe der Berührungsflächen; das Ende der Gleitstrecke wird in den P/δ -Linien also nicht scharf angezeigt.

Es ist daher hierzu besser, die fertigen Niete aus ihren Verbindungen herauszuschlagen und ihre Durchmesser gegenüber den Durchmessern der Bohrungen auszumessen, um so auf den Gleitweg zu schließen. Das Ergebnis gibt zwar nicht den genauen Gleitweg, denn die Unebenheiten und der Zustand der Lochwandung, ferner die Lage der Niete im Loch, welche selten zentrisch ist, spielen eine unbekannte Rolle; wohl aber ist das Verfahren gut zur vergleichweisen Beurteilung der Einflüsse (Nietungsart, Nietstahlart usw.) auf das Stauchmaß und somit indirekt auch auf den Gleitweg.

Noch einfacher ist es freilich, wenn man auf die Bestimmung des Gleitweges verzichtet und an Stelle der Lochausfüllung nur die Verdickung der Niete gegenüber dem

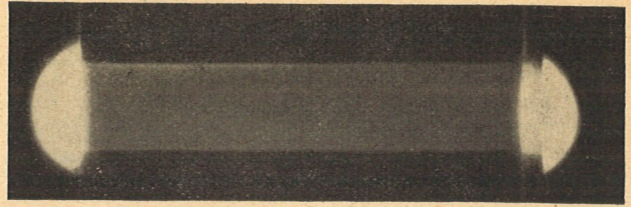


Abb. 8: Röntgenbild eines Niets mit 120 mm Klemmlänge, mit Kniehebelpresse hergestellt, in einem 50 mm dicken Stahlstück.

Rohnietdurchmesser mißt. Das Verfahren ist aber nur für enge Vergleichsmessungen brauchbar.

Es wurden ferner noch Versuche mit Nietverbindungen ausgewertet, welche weniger auf das Beobachten des Gleitens als auf die Festigkeit abzielten, bei welchen aber auch nebenher Messungen des Gleitens durchgeführt wurden.

Die ersten Versuche wurden mit Schweißeisen und von Hand geschlagenen Nieten durchgeführt. Sie stammen von Lavalley (1857), Read (1869), Fairbank & Clark (1874) (19), Wildisch (1883—1884), Considère (1888) (13) und Dupuy (1895) (17) u. a.¹⁾, wobei meist Gleitgrenzen von 1400—2000 kg/cm² festgestellt wurden. Wir werden noch feststellen, daß so hohe Werte später nur noch selten erreicht wurden.

Auch Engesser (1889) hat sich (18) mit dem Reibungswiderstand der Nietverbindungen befaßt, welcher beim Bruch der Verbindung auftritt.

Die klassischen Versuche zur Ermittlung der Größe des Gleitwiderstandes stammen von C. v. Bach (1892, 1894, 1895) (1, 2, 3). Bach findet aus seinen Versuchen seine Ansicht bestätigt, wonach der Widerstand gegen das Gleiten die eigentliche Lebensbedingung einer Nietverbindung ist. Aus der üblichen Berechnungsweise auf Scherfestigkeit der Niete folge eine Gleichgültigkeit der Ingenieure gegenüber der Größe des Gleitwiderstandes. Die Ermittlung der Bruchlast von Nietverbindungen komme erst in zweiter Linie.

Bach hat rd. 350 Verbindungen untersucht, welche von 5 verschiedenen Brückenbauanstalten und Kesselschmieden hergestellt wurden.

Es waren überlappte und gelaschte Verbindungen vorhanden, die Niete saßen ein- oder mehrreihig, die Zahl der Niete betrug 3, 4, 6 oder 8; die Blechstärke schwankte zwischen 7 und 18,5 mm, der Nieldurchmesser zwischen 16 und 28 mm. Die Niete waren teils von Hand, teils hydraulisch geschlossen und zum Teil verstemmt. Abb. 5 zeigt eine zweireihige überlappte Verbindung mit 6 Nieten, wie sie Bach untersuchte, als Beispiel.

¹⁾ Eine Übersicht über ältere Versuche findet man bei Schächterle (42).

Die Verbindungen wurden in eine Zerreißmaschine eingespannt und stufenweise von 1000 zu 1000 kg belastet, bei jeder Laststufe wurde an den beiden Schmalseiten der Verbindungen beobachtet, ob Gleiten eingetreten war oder nicht. Dabei trat das Gleiten auf den beiden Seiten meist nicht gleichzeitig ein, sondern nacheinander.

Weitere bemerkenswerte Versuche wurden durch den Deutschen Eisenbau-Verband durchgeführt. Gleitungen wurden gemessen bei Versuchen über den Wert des sogenannten kleinen Versenks und bei Versuchen über die Anschlüsse steifer Stäbe (8).

Eine neuere Arbeit ist von Wellinger (48), die sich allerdings weniger mit dem Nietanschluß als mit dem Niet selbst befaßt.

Versuche mit Nickelstahlnieten unternahmen Talbot und Moore sowie Preuß (1909) (36). Anschlüsse mit steifen Stäben wurden durch Rudeloff (8) und Dörnen (15) behandelt.

Über Versuche über die Stauchwirkung bei Nieten aus gewöhnlichem und hochwertigem Baustahl berichtet Gaber (24), welcher auch in den Jahren 1923, 1926, 1927 für die deutsche Reichsbahn parallel zu gleichen, in Dresden und München geprüften Versuchskörpern Versuche über den Lochleibungsdruck ausführte, bei welchen ebenfalls Gleitungsmessungen durchgeführt wurden. Über diese Versuche hat Weidmann (46) zusammenfassend berichtet, ferner Finden (21) über die Dresdener Versuche.

Im folgenden sind außer durch Veröffentlichung bekannt gewordenen Versuchen noch die Ergebnisse von bisher nicht veröffentlichten Versuchen der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen an der Technischen Hochschule Karlsruhe verwendet worden.

Die Umstände, welche die Größe des Gleitwiderstandes und des Gleitweges beeinflussen, sind

- das Nietverfahren (Handhammer, Preßlufthammer, Kniehebelpresse, hydraulische Presse),
- Dauer des Nietungsvorganges, Nietungsdruck, Niettemperatur,
- Nietschaftlänge,
- Stahlsorte für Niete und Bleche,
- Abschrecken und ungleichmäßige Erwärmung,
- Oberflächenbehandlung der verbundenen Teile und sonstige Einflüsse,
- Zahl der Niete. Anordnung des Nietbildes,
- Wiederholte Belastung.

Das Verhalten einer Nietung ist also von einer großen Reihe von Umständen abhängig. Es ist natürlich versuchstechnisch schwierig, alle Einflüsse bis auf den einen, den man untersuchen will, auszuschalten. Daher ist bei den Versuchsergebnissen dieser Art eine

größere Streuung als sonst zu erwarten. Es ist gerade bei diesen Versuchen vielfach der Erfahrung, Übung und Geschicklichkeit des Beobachters überlassen, die Versuchsergebnisse richtig zu deuten.

a. Einfluß des Nietungsverfahrens.

Gleitgrenze.

Die grundlegenden Versuche hierzu stammen von C. v. Bach. Seine Ergebnisse sind in der Liste 1 Seite 10 zusammengestellt.

Bach (1) untersuchte 1892 außer den handgeschlagenen Nieten auch einige hydraulisch geschlossene. Vergleicht man die Ergebnisse der Reihen 1, 2, 3, 8 mit der Reihe 20, welche mit nahezu gleichgestalteten Versuchskörpern durchgeführt waren, so kommt man zunächst zu dem Schluß, daß die hydraulische Maschinennietung nur etwa die Hälfte des Gleitwiderstandes ergab wie die Handnietung. Die weiteren Versuche haben das aber nicht bestätigt (s. Liste 2), indem die Gleitgrenze

Liste 2

Versuche von Bach

Reihe	Nietung	Gleitgrenze kg/cm ²	Zahl der Nieten	Anschluß
1	Hand	1200	2	überlappt
2		1120		
3		1020		
8		1185		
20	Maschine	560	2	verlascht
16	Hand	905		
21	Maschine	1150		
22		1130		
9	Hand	550	3	überlappt
23	Maschine	690		
12	Hand	1065	3	überlappt
24	Maschine	495		

bei der Maschinennietung z. T. höher, z. T. niedriger ausfiel. Weitere Versuche im Jahre 1894 (2) ergaben zunächst überraschend niedrige Gleitgrenzen von 125—570 kg/cm² bei der Maschinennietung (s. Reihen 40—45, Liste 1). Erst nachdem nochmalige Versuchskörper hergestellt wurden in einer Werkstätte, in welcher Bach beobachtete, daß hier der Nietdruck länger (15 s), wie sonst üblich, gehalten wurde, ergaben sich die Werte 1210 bis 1410 kg/cm² (Reihe 46 und 47), welche die der Handnietung (entsprechende Reihen 1, 2, 3, 8 mit i. M. 1130 kg/cm²) sogar noch übertrafen. Um mit einem guten Gleitwiderstand rechnen zu können, muß man also den Stauchstempel lange genug auf dem Niet belassen. Man erhält dann mit Maschine einen größeren Reibungswiderstand als mit Hand.

Liste 1

Versuche von Bach über den Gleitwiderstand in den Jahren 1892—1895.

Versuchsreihe Nr.	Hersteller der Nieten	Nietdurchm. cm	Nietzahl	Art des Stoßes (einschnittig überlappt oder zweischnittig verlascht)	Nietungsart H: von Hand M: mit Maschine (hydr.)	Bemerkungen		Gleitwiderstand kg/cm ²	
1	A	1,9	3	überlappt	H	kirschrot . . .	bis zum Schwarzwerden geschlagen	1200	
2	A	1,9	3	"		lichtrot, wie üblich	Kopf bei Beendigung des Schlagens in der Mitte noch rot	1125	
3	A	1,9	3	"		nicht überwacht .	nicht überwacht	1020	
4	B	2,0	3	"		" "	" "	860	
5	A	1,9	3	"		kirschrot . . .	wie bei Reihe 1	aber mit Zwischenlag., so daß Klemmlänge 5,2 cm	1310
6	A	1,9	3	"		lichtrot, wie üblich	wie bei Reihe 2		1770
7	A	1,6	3	"		lichtrot, wie üblich	wie bei Reihe 2		850
8	A	1,9	3	"		"	"	"	1185
9	A	2,5	3	"		"	"	"	550
10	A	1,6	3	"		"	"	"	1110
11	A	1,9	3	"		"	"	"	1440
12	A	2,5	3	"		"	"	" m. Beil.	1065
13	A	1,9	5	"		"	"	"	570
14	A	1,9	6	"		"	"	"	620
15	A	1,9	4	"		"	"	"	765
16	A	1,9	2	verlascht		"	"	"	905/910
17	A	1,9	3	"		"	"	"	805/840
18	A	1,9	4	"		"	"	"	710/710
19	A	1,9	4	"		"	"	"	820/770
20	C	2,0	3	überlappt	M	Herst. freigegeben wie üblich, nicht überw.		560	
21	C	2,0	2	verlascht		"	"	"	1150
22	C	2,0	2	"		"	"	"	1130
23	D	2,5	3	überlappt		"	"	"	690
24	D	2,8	3	"		m. Beil.	"	"	495
Bei den folgenden Versuchsreihen 25—39 wurden in die Versuchskörper aus den Reihen 1—24, welche bereits beansprucht waren, z. T. gleiche, z. T. stärkere Niete eingezogen, was bei der Beurteilung der Ergebnisse zu beachten ist.									
25	A	1,6	3	überlappt	H			845	
26	A	2,5	3	"				550	
27	A	1,6	3	"				1030	
28	A	2,5	3	"		Löcher gebohrt,	mit Beilagen	1010	
29	A	1,9	3	"		Temperatur d. Niete:		740	
30	A	2,2	3	"		lichtrot, wie üblich.		1060	
31	A	1,9	3	"		Köpfe wurden so	mit Beilagen	710	
32	A	2,2	3	"		lange geschlagen, bis	mit Beilagen	1475	
33	A	2,2	5	"		d. Schließkopf in der		660	
34	A	2,2	6	"		Mitte noch dunkelrot		840	
35	A	2,2	4	"		erschien.		910	
36	A	2,2	2	verlascht				1040	
37	A	2,2	3	"				1030	
38	A	2,2	4	"				1335	
39	A	2,2	4	"				800	
Bach bestellte weitere hydraulisch genietete Versuchskörper, um nachzuprüfen, ob Maschinennieten tatsächlich kleinere Gleitwiderstände haben als Handnieten.									
40	D	1,9	3	überlappt	M	unbeaufsichtigt.	1=2 δ	315	
41	D	1,9	3	"		sichtigt.	1=2 δ	490	
42	D	1,9	3	"		wahr- mit Beilage	1=72 mm	570	
43	D	1,9	3	"		scheinlich mit Beilage	1=72 mm	410	
44	D	1,6	3	"		kurze	1=2 δ	250	
45	D	2,5	3	"		Nietdauer	1=2 δ	125	
Diese Werte sind nun ganz besonders und auffallend niedrig ausgefallen. Den Grund suchte Bach darin, daß der Schließdruck den Nietkopf zu früh, d. h. zu warm verläßt. Er bestellte neue Verbindungen in einer Kesselschmiede, in welcher er beobachtet hatte, daß man den Preßstempel länger als sonst, nämlich 15 s auf dem Nietkopf beließ.									
46	E	2,0	3	überlappt	M	wie üblich Nieten verputzt . . .		1410	
47	E	2,55	3	"		" " " " "		1210	
46 a	E	2,0	3	"		Nieten verstemmt, nur 1 Versuch .		1860	
47 b	E	2,55	3	"		" " " " "		1270	
Einfluß des Verstemmens.									
48	B	1,95	3	überlappt	H	Herstellung wie üblich, nicht überw.		881	
49	B	1,95	3	"		Bleche und Nietköpfe unverstemmt		1238	
50	B	1,95	3	"		Bleche beiders.verst., Niete unverst.		1327	
51	B	1,95	3	"		Bleche u. Nietköpfe einerseits verst.		1572	
52	B	1,95	3	"		Bleche beiders., Niete einers. verst. Bleche u. Nietköpfe beiderseits verst.		1617	

Bemerkungen auf nebenstehender Seite

Weitere Versuche wurden durch den Verein deutscher Brücken- und Eisenbaufabriken (7) durchgeführt. Die Versuche, die vor allem über den Wert des sog. „kleinen Versenks“, das bei Nieten früher vorgeschrieben war, Auskunft geben sollten, wurden mit Handnietung, mit Preßlufthammernietung und mit Preßluftkniehebelsnietung parallel durchgeführt. Die Niete wurden sämtlich hellrotglühend eingezogen und mit dem Hammer so lange bearbeitet, bis im Schatten nur noch eine schwache Rötung zu erkennen war. Bei der Kniehebelsnietung blieb der Stempel noch weitere 5 s auf dem fertigen Niet.

Im Mittel über alles ergaben sich folgende Gleitgrenzen:

bei Handnietung	685 kg/cm ² ,
bei Lufthammernietung	695 „
bei Kniehebelsnietung	980 „

Somit ergab die Kniehebelsnietung einen um rd. 40 % höheren Gleitwiderstand gegenüber den beiden anderen Verfahren, die unter sich gleichwertig sind.

H. Rudeloff (39) hat die Schrumpfspannungen verschieden hergestellter 20 mm starker Niete gemessen, indem er nach fertiggestellter Nietung die zusammengeschlossenen Bleche entfernte und dazu die Verkürzung zwischen den Nietköpfen maß. Die Nietspannung wurde daraus unter Berücksichtigung des Einflusses der Köpfe mit dem Elastizitäts-

modul 21 250 kg/mm² errechnet. Es ergaben sich Längsspannungen der Niete, gemittelt über 30, 60 und 120 mm Nietlänge:

bei Handhammer	22,5 kg/cm ² ,
bei Lufthammer	20,7 „
bei Kniehebelpresse	27,8 „

Auch hier ergab die Presse die Voraussetzungen für den besten Gleitwiderstand. Bemerkenswert ist, daß die Kniehebelpresse Nietspannungen erzeugt hatte, welche etwa der Streckgrenze des Stahls gleichkamen! (s. Abb. 11.)

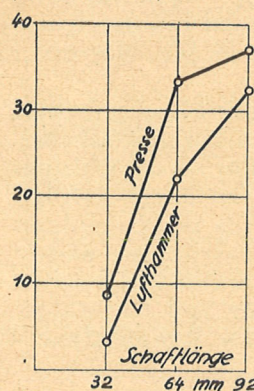


Abb. 11

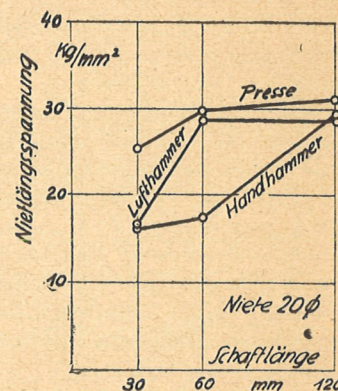


Abb. 12

Abb. 11: Einfluß der Nietenlänge auf die Längsspannung im Niet (nach Rudeloff).

Abb. 12: Einfluß der Nietenlänge auf die Längsspannung im Niet (nach Wellinger).

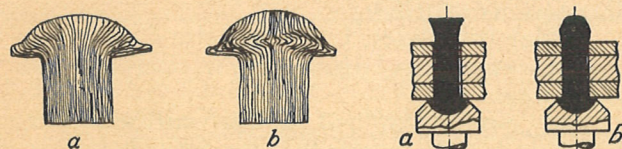


Abb. 9

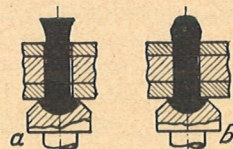


Abb. 10

Abb. 9: Geätzte Nietenlängsschnitte (nach Frémont gezeichnet)
a) mit Handhammer hergestellt,
b) mit Presse hergestellt.

Abb. 10: Schematische Darstellung des Verformungsvorgangs
a) beim Schlagen (Handhammer),
b) beim Stauchen (Presse).

Bemerkungen zu Liste 1 (Seite 10)

Spalte 1: Jede Versuchsreihe stellt das Mittel aus gewöhnlich 5 Parallelversuchen dar.

Spalte 2: A u. B waren Brückenbauanstalten, C, D und E Kesselschmieden.

Spalte 8: Das Gleiten trat auf beiden Seiten meist nacheinander ein. Die angegebenen Gleitwiderstände sind die errechneten Mittelwerte aus den beiden Laststufen, bei welchen das Gleiten noch nicht eingetreten war und bei welchen es bemerkt wurde, und zwar wurden hier die Ergebnisse jener Seite genommen, bei welcher das Gleiten zuerst eingetreten war. Nach Bach's Vorbild ZVDI 1894 Anm. S. 1232. Die Werte sind nur da auf 1 kg/cm² genau angegeben, wo Bach sie selbst so angab, sonst wurden sie aus Bachs Angaben errechnet und gerundet. Im übrigen stimmen die bei den (meist 5) einzelnen Versuchen ermittelten Gleitwiderstände bemerkenswert gut überein.

Ähnliche Versuche unternahm Wellinger (48). Er fand ebenfalls die Schrumpfspannung bei den mit Presse eingezogenen Nieten durchweg größer als bei denen mit Lufthammer. (Abb. 12.)

Weitere Versuche wurden in der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen an der Techn. Hochschule Karlsruhe mit symmetrischen Laschenverbindungen und mit einem einzigen oder mit zwei Nieten durchgeführt. Die Versuchsstäbe etwa nach Abb. 3 waren doppelt vorhanden, die Niete mit 23 mm \varnothing bestanden aus St 34 und waren hälftig mit Preßlufthammer, hälftig mit Kniehebelpresse hergestellt, die Stäbe bestanden aus St 37. Es finden sich folgende Gleitwiderstände und Gleitwege.

Es ergaben sich folgende Werte:

Zahl der Nieten	Nietverfahren	Gleitwiderstand in kg/cm ²	Gleitweg zu $\tau = 1120$ kg/cm ² in mm
1	Hammer	180	0,202
1	Presse	750	0,072
2	Hammer	570	0,132
2	Presse	1120	0,006

Auch hier zeigt sich eine sehr deutliche Überlegenheit der Pressennietung.

Gleitweg.

Weniger zahlreich sind Versuche, die sich mit dem Einfluß der Nietungsart auf das Stauchen der Niete befassen.

Es sollen hier die Versuche von Gaber (24) kurz beschrieben werden. Die Niete bestanden teils aus Siliziumbaustahl (etwa gleich dem heutigen St 52), teils aus gewöhnlichem Nietstahl (dem heutigen St 34) und hatten Klemmlängen von 105 bis 160 mm. Die Niete waren hälftig mit dem Preßlufthammer, hälftig mit der Kniehebelpresse geschlossen worden. Beim Lufthammer benötigte die Schließung eines Niets 20 bis 25 s, während bei der Kniehebelpresse ein Druck von 45 bis 50 t etwa 2 bis 3 s lang wirkte.

Die Setzköpfe der Niete wurden abgeholt und die Niete aus den Löchern herausgedrückt, und zwar entgegengesetzt der Bohrrichtung, so daß ein Festklemmen der Niete infolge etwaiger Konizität der Löcher nicht erfolgen konnte. Während des Herausdrückens wurde die Kraft zu den Ausdrückwegen aufgezeichnet und dann wurden Löcher und Niete ausgemessen, nachdem vorher der Rohnietdurchmesser ermittelt war.

Das Ergebnis aus den Kraftweglinien wird durch die Messungen der Durchmesser vollauf bestätigt: Die Durchmesser vergrößerung über alle Meßstrecken und Nietlängen gemittelt, war bei St-Si-Nieten mit Handhammernietung 1,5mal so groß wie mit Pressennietung.

Die Versuche erbrachten übereinstimmend das zunächst überraschende Ergebnis, daß die Stauchung durch die Kniehebelpresse ganz erheblich schlechter war als durch den Lufthammer.

Verdickung der Nietdurchmesser von 26 mm über verschiedene Schaftlängen gemittelt in mm.

Klemmlänge l		105	115	130	140	160
Verhältnis l : d		4,0	4,4	5,0	5,4	6,2
St Si	Lufthammer	1,45	1,43	1,51	1,40	1,45
	Presse	1,06	1,25	0,90	0,81	0,90
St 34	Lufthammer	1,21	1,26	1,17	1,14	1,10
	Presse	1,17	1,26	1,17	1,13	0,84

Es ergab sich ferner, daß bei Lufthammernietung die Stauchung (Durchmesser vergrößerung) in $\frac{1}{2}$ der Schaftlänge noch fast so groß ist wie beim Schließkopf, während das Stauchmaß bei der Pressennietung unmittelbar hinter dem Schließkopf sofort stark nachläßt. Der Unterschied war besonders sinnfällig dadurch, daß man die Pressen-Niete mit Leichtigkeit in die Löcher zurückstecken konnte, ja sie fielen von selbst hinein, was bei den Hammernieten nicht der Fall war.

Auch Wellinger (48) fand bei seinen Versuchen mit dem Lufthammer i. A. eine bes-

sere Lochauffüllung als mit der Presse. Er stellte ebenfalls Nietverbindungen verschiedener Klemmlänge mit Nieten von 20 mm Fertigdurchmesser her. Im groben Durchschnitt und über 3 Nietstahlarten, welche hier keine Unterschiede in bestimmter Richtung zeigten, ergaben sich etwa folgende Schaftdurchmesser in Klemmlängenmitte, nach dem Herausnehmen der fertig geschlagenen Niete gemessen:

Klemmlänge		32	64	96 mm
Durchmesser der geschlagenen Niete	mit Lufthammer	19,95	20,1	19,8 mm
	mit Presse	19,95	19,8	19,5 mm

Es wurden also auch hier — abgesehen von den ganz kurzen Nieten — mit dem Lufthammer bessere Werte erzielt als mit der Presse.

Die Unterlegenheit der Pressennietung wurde nochmals bestätigt durch eine kurze, eigene Versuchsreihe, welche auch die Röntgendurchleuchtung zu Hilfe nahm. Es war hier mit Erfolg versucht worden, die die Gleitwege verursachenden Spielräume durch Röntgenaufnahmen zu erkennen und ihre gegenseitige Größe abzuschätzen. In 50 mm breite Pakete aus St 37 wurden Niete mit 23 mm Durchmesser aus St 34 auf verschiedene Arten eingeschlagen, mit Röntgenstrahlen durchleuchtet, dann die Setzköpfe entfernt, die Niete herausgedrückt, ausgemessen und das Ergebnis der Messungen mit der Röntgendiagnose verglichen.

In der folgenden Liste sind die Ergebnisse der Messungen als Mittelwerte wiedergegeben, und zwar

das „Stauchmaß“, d. h. die mittlere Verdickung des Niets infolge des Stauchens,

das „Maß des Durchstauchens“, d. h. das Verhältnis des Stauchmaßes an der Setzkopfhälfte zu dem Stauchmaß an der Schließkopfhälfte.

Nietungsart	Stauchmaß in mm	Maß des Durchstauchens (Verhältnis)
Kniehebel	0,618	0,45
Handhammer	0,925	0,65
Preßlufthammer	0,960	0,56
Preßlufthammer, aber von Hand vorgestaucht . .	1,026	0,49

Die Kniehebelpresse hat also auch hier eine geringere Stauchung und eine schlechtere Auffüllung der Bohrung erzielt und zudem am wenigsten gut über die Länge durchgestaucht. Über einen Unterschied zwischen den beiden Hammernietungen (Hand oder Preßluft) läßt sich der Streuungen wegen nichts aussagen. Die Hammernietung hatte eine Vergrößerung des Durchmessers um fast 1 mm bewirkt. Trotzdem waren die Boh-

rungen, welche allerdings (um rd. $\frac{1}{2}$ mm) größer als 23 mm ausgefallen waren, bei weitem nicht ausgefüllt, der Spielraum zwischen Schaft und Lochwandung betrug immerhin 0,17 bis 0,46 mm.

Die Röntgenbilder zeigten gute Übereinstimmung mit den Messungsergebnissen. In Abb. 8 ist eine Röntgenaufnahme als Beispiel dargestellt. Man erkennt nicht nur, daß zwischen Niet und Bohrung Spielräume sind, sondern auch, daß diese Spielräume ungleichmäßig sind; der Niet hat sich beim Schlagen verkrümmt und stellenweise an die Wänden angelehnt.

Im Röntgenbild zeigen ferner fast alle Niete, daß unmittelbar hinter dem Schließkopf der Nietschaftdurchmesser gleich dem Lochdurchmesser war. Dies rührt nicht nur von der dort größeren Stauchung her, sondern auch von einer Verengung des Nietloches durch den Schließdruck.

Die Begründung für die schlechte Stauchwirkung der Pressennietung (insbesondere bei langen Nieten) folgt aus der eigentümlichen Wirkungsweise der Nietverfahren. Hierüber hat Frémont (22) sehr schöne Versuche mit Anätzungen der längs durchschnittenen Niete in verschiedenen Stadien der Kopfbildung, bei Handnietung und Pressennietung durchgeführt. Sie zeigen (s. Abb. 9), daß bei Handnietung zunächst nur die Fasern umgeschlagen werden, bei Maschinen-nietung aber der Schaft am Kopfende aus-

gebaucht wird, ähnlich, wie ein von Schlägen getroffener Zylinder an der geschlagenen Endfläche, der gleiche, langsam gedrückte Zylinder aber wegen der Reibung an der Endfläche weiter der Mitte zu die größte Formänderung erfährt. Ein Niet wird also bald nach Beginn des Schließvorganges den in Abb. 10 schematisch und stark übertrieben dargestellten Zustand annehmen. Die anfängliche Formänderung hindert bei Hammer-nietung die Stauchung und Verdickung des Nietschaftes weniger als bei Pressennietung.

Zusammenfassung.

Alle Versuche lassen eindeutig und übereinstimmend erkennen, daß die mit einem einmalig und statisch lange genug wirkenden Arbeitsdruck (Kniehebel oder hydraulische Presse) hergestellten Niete zwar größere Klemmkräfte, also größeren Gleitwiderstand ergeben als die mit einer größeren Zahl kleinerer Schläge (Handhammer, Lufthammer) hergestellten, daß sie aber im Durchschnitt eine geringere Stauchwirkung, d. h. eine schlechtere Lochausfüllung zeigen.

Die Gleitwiderstände fand Bach im großen und ganzen bei Verbindungen mit wenigen Nieten zu 800 bis 1200 kg und mehr auf 1 cm² Nietscherquerschnitt. Andere Versuche zeigen aber, daß diese Werte durchaus nicht immer erreicht worden sind. Die Höhe der Gleitgrenze ist offenbar sehr stark von der Güte der Arbeit abhängig.

b) Einfluß von Niettemperatur, Nietungsdauer, Nietungsdruck.

Nietungsdauer und Temperatur der Niete beim Schlagen hängen eng zusammen, da die Dauer des Nietdruckes bei gleichen Abkühlungsverhältnissen bis zum Schwarzwerden des Niets von der Anfangstemperatur abhängt. Die Abkühlungsverhältnisse sind beeinflusst durch die Massen der zu vernietenden Teile und durch die Schließwerkzeuge, mehr aber noch durch den Nietdurchmesser. Dünne Niete kühlen so schnell ab, daß man ihnen eine etwas höhere Anfangstemperatur geben muß als dicken Nieten.

Schon Frémont (23) zeigt durch seine Versuche den Einfluß der Nietdauer. Er fand mit der Presse bei 60 s Schließdruck gegen 3 s eine Zunahme des Gleitwiderstandes von 10%, bei legierten Stählen sogar von 60 bis 100%.

Den Einfluß der Temperatur zeigen Versuche von Considère (13) und Wilson (49). Demnach ist es nicht günstig, die Niete weißglühend einzuziehen, eine kirschrote Farbe genügt zur Erzeugung des besten Reibungswiderstandes und ergibt ein Optimum an Schließkraft.

Auch bei Bach (1) ergab zuerst eine niedrige Stauchtemperatur (kirschrot) einen etwas

größeren Gleitwiderstand als die höhere (lichtrot), nämlich bei überlappten Verbindungen mit 3 Nieten mit 19 mm \varnothing und 26 mm Klemmlänge. Bei 52 mm Klemmlänge aber zeigte sich bei der wärmeren Nietung (lichtrot) 1770 kg/cm² gegen 1310 kg/cm² Gleitwiderstand bei der weniger warmen (kirschrot). Es schienen also andere Einflüsse die der Stauchtemperatur zu überwiegen.

Hierüber gab eine besondere Versuchsreihe Auskunft (2). Zunächst ergaben überlappte Nietungen (3 Niete nebeneinander), mit Nieten von 19 bis 25 mm \varnothing und mit hydraulischer Presse hergestellt, Gleitgrenzen von nur 125 bis 567 kg/cm², also außerordentlich niedrige Werte (s. Liste 1, Versuchsreihe Nr. 40–45). Zwei weitere daraufhin durchgeführte Versuchsreihen unter sonst ähnlichen Umständen, aber mit einer Dauer des Nietdrucks von 15 s ergaben dagegen die mehrfach höheren Werte von 1210 bis 1410 kg/cm². Bach schloß aus den Versuchen, daß bei der Pressennietung die Dauer des Schließdrucks maßgebend ist für den erzeugten Gleitwiderstand, namentlich ist es die Temperatur des Nietes beim Aufhören des Schließdruckes. Wesentlich ist, daß der Pressendruck solange wirkt, bis der Niet ausreichend abgekühlt ist.

Bach-Baumann (5) fanden bei ihren Versuchen mit Pressen an ebenen und leicht gewölbten Blechen, daß besonders bei den gewölbten Blechen ein Einfluß der Nietzeit auf die spannungserzeugende Wirkung des Schrumpfens vorhanden war, indem nach kurzer Nietzeit, wenn die Niete noch nicht genügend kalt sind, die Bleche durch Federwirkung einen Teil der Schrumpfwirkung aufnehmen, welcher dann zur Erzeugung der Reibung verloren geht. Bei ebenen Blechen wurde der Einfluß der Nietzeit nicht bedeutend gefunden.

Ein ähnliches Ergebnis fanden H. Rudeloff (39) für eine Nietzeit über 3 Sekunden und Wellinger (48) für Nietzeiten von 5 bis 30 Sekunden ebenfalls mit Pressen. Die Rudeloff'schen Ergebnisse stellen fest, daß nach einer Schließzeit von 3 s eine Höchstlängszugspannung im Niet vorhanden ist, welche durch längeres Nieten nicht mehr erhöht werden kann, zumal sie nahe an die Streckgrenze des Materials herankommt.

Auch mit Lufthammer geschlagene Niete lassen einen Einfluß der Nietzeit nicht erkennen, wie Versuche von Wilson und Wellinger (48) zeigen.

Der Einfluß der Größe des Nietungsdruckes bei der Pressennietung ist weniger untersucht worden, zumal die Größe des Nietdruckes weniger von dem Wunsch, möglichst hohe Schrumpfspannungen zu erzeugen, bestimmt wird, als von der einfachen Forderung, daß der Druck groß genug sein muß, um den Kopf einwandfrei zu schließen und den Schaft zu stauchen, aber nicht größer, um Beschädigungen der Bleche zu vermeiden.

Versuche von Bach zeigen folgendes:

Kraft der Nietmaschine bei Bildung des Nietkopfes	—	15	45	75	140	t
Spannung im Nieten	(3452) ¹⁾	2554	2427	2164	2200	kg/cm ²

¹⁾ Rotwarm eingezogene Schraube.

c) Einfluß der Nietenlänge.

Die ältesten Versuche von Fairbairn u. Clark, Dupuy u. a. (17) zeigen schon, daß die Klemmkraft der Niete mit deren Schaftlänge zunimmt und zwar sowohl bei der Presse, wie auch bei dem Lufthammer.

Die Zunahme der Reibungswiderstände wird durch alle Versuche übereinstimmend bestätigt.

Bach (1) fand bei Überlappungsnietungen mit 3 Nieten 19 \varnothing und mit Handhammernietung:

Bach folgert hieraus, daß die Kraft, mit der die eingezogenen Niete die Bleche zusammendrücken, von der beim Nieten verwendeten Kraft unabhängig ist.

Wellinger (48) fand mit Stahlnieten von 20 mm \varnothing , daß in den Nieten eine Zugspannung von rd. 2500 kg/cm² sowohl bei 30 t wie auch bei 42 t Druck erreicht wurde, nur streuen die Spannungen bei kleineren Nietungsdrücken mehr nach unten.

In Bezug auf die Stauchung ist anzunehmen, daß höhere Niettemperatur, höherer Nietungsdruck und längere Nietungszeit für die Stauchung günstig sein werden. Brauchbare Versuche hierüber sind nicht bekannt geworden.

Zusammenfassung.

Wesentlich zur Erreichung einer guten Schrumpfwirkung der Niete ist weder die Temperatur der Niete, sofern diese nur rotglühend sind, noch die Größe der Schließkräfte, sofern diese nur zur einwandfreien Bildung des Schließkopfes ausreichen, sondern nur die Ausdehnung der Nietungszeit bis zum Erkalten des Niets.

Das kann im wesentlichen erklärt werden dadurch, daß bei der Abkühlung des Niets die Streckgrenze des Nietstahls steigt, daß der Niet mit dem Kälterwerden der Rückfederung der verbundenen Teile also größere Spannungen entgegensetzen in der Lage ist (Bach).

daß der mit der thermischen Gefügeumwandlung bei rd. 600° C verbundenen Verlängerung des Nietenchaftes die bei dieser Temperatur noch wirksamen Schließkräfte entgegen wirken können.

Für den Gleitwiderstand ist eine niedrige Endtemperatur, für die Stauchung eine hohe Anfangstemperatur am günstigsten.

Niettemperatur	Schaftlänge in mm	Gleitwiderstand in kg/cm ²
lichtrot (üblich)	26	1115
	52	1770
kirschrot	26	1200
	52	1310

Rudeloff (39) stellte die Zugspannungen in den fertigen Nieten mit 20 \varnothing fest nach Abb. 12, sie wuchs also um etwa 40% an, während die Klemmlänge der Niete vom 1,5fachen auf den 5fachen Nietdurchmesser stieg.

Wellinger (48) fand dies bestätigt (Abb. 11). Die Nietlängsspannungen, ermittelt aus den Verkürzungen der Niete nach Entfernung der Bleche, nahmen mit der Klemmlänge zu, obwohl sämtliche Versuchskörper aus 16 mm starken Blechen bestanden, deren ungünstige Federwirkung wohl bei den längeren, mehr einzelne Bleche umschließenden Nieten größer, also ungünstiger sein müßten als bei kurzen und weniger Bleche schließenden Nieten.

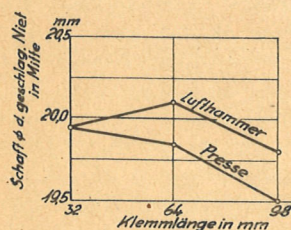


Abb. 13

Abb. 13: Einfluß der Klemmlänge auf die Verdickung des Nietenchaftes (nach Wellinger).

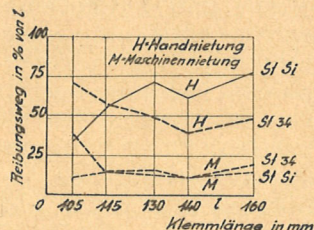


Abb. 14

Abb. 14: Einfluß der Klemmlänge auf den Reibungsweg beim Herausdrücken von Nieten (nach Gaber).

Der Einfluß der Nietlänge auf die Stauchung ist anscheinend erst in der letzten Zeit systematisch untersucht worden, man begnügte sich früher offenbar mit der Ansicht, daß der Gleitwiderstand wichtiger sei als das Stauchmaß, obwohl die Erfahrung lehrte, daß Niete mit größeren Klemmlängen als dem 4- bis 5fachen Nietdurchmesser nicht mehr gut durchzustauen sind.

So fand Wellinger (48) die in Abb. 13 angegebenen Werte. Danach fiel bei Klemmlängen von 1,6 bis 4,8 d mit Pressennietung die Stauchwirkung deutlich mit der Schaftlänge ab; das Gleiche ist im großen und ganzen auch bei der Nietung mit Lufthammer der Fall.

Die in Karlsruhe 1930 von Gaber (24) durchgeführten Versuche entstanden aus dem Bestreben, den Einfluß der Klemmlänge auf die Stauchbarkeit zu ermitteln, zumal bei dem s. Zt. neu eingeführten Siliziumbaustahl eine geringere Stauchbarkeit befürchtet wurde als bei dem sonst üblichen weichen Nietstahl

St 34. Die Versuche wurden daher mit großen Klemmlängen gleich dem 4–6fachen Durchmesser durchgeführt. Der Einfluß der Klemmlänge auf die Reibungswege beim Herausdrücken der Niete ist aus Abb. 14 zu entnehmen. Der Reibungsweg selbst steigt natürlich mit der Länge der Niete.

Zuverlässiger ist die Beurteilung aus den Dickenmessungen an den Nieten. Abb. 15 zeigt die Durchmesserverdickungen, abhängig von der Klemmlänge der Niete aufgetragen. Es zeigt sich, daß mit dem Lufthammer die Stauchungen bei den verschiedenen Schaftlängen nicht so unterschiedlich ausgefallen sind, daß eine wesentliche Verschlechterung der Stauchwirkung bei den Nieten mit $l = 6,2 d$ gegenüber den Nieten mit $l = 4 d$ festgestellt werden kann. Bei der Pressennietung läßt sich ein Nachlassen der Stauchung mit der wachsenden Klemmlänge leicht herauslesen. Leider wurden keine kürzeren Klemmlängen als 4 d in den Bereich der Untersuchungen einbezogen.

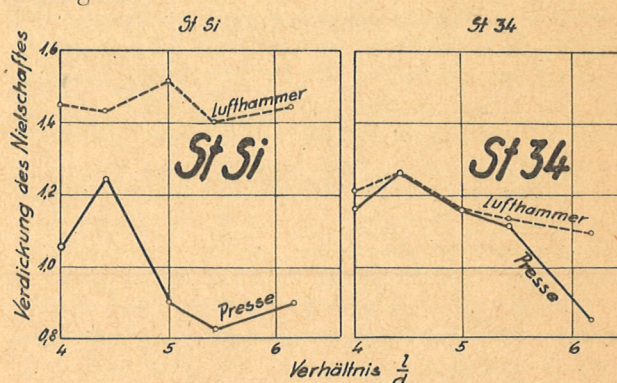


Abb. 15: Einfluß der Klemmlänge auf die Verdickung des Nietenchaftes beim Schlagen.

Zusammenfassung.

Die Versuche zeigen durchweg, daß der Gleitwiderstand mit wachsender Klemmlänge ansteigt. Gleichzeitig nimmt aber bei der Nietung mit der Presse die Stauchwirkung ab; bei der Nietung mit dem Lufthammer scheint dies weniger der Fall zu sein. Lange Niete bringen also im großen und ganzen hohe Gleitgrenzen, aber weniger gute Stauchung.

d) Einfluß der Stahlsorte.

Gleitgrenze.

Frémont (23) stellte den Gleitwiderstand für Nietmaterial verschiedener Zugfestigkeit fest und fand bei den gewöhnlichen Kohlenstoffstählen eine Erhöhung der Gleitgrenze mit der Zugfestigkeit des geschlagenen Nieten von rd. 40–60 kg/mm², bei legiertem Stahl von 80 kg/mm² fand er aber auffälligerweise nur schwach die Hälfte dieser Werte, bei solchen mit rd. 95 kg/mm² Festigkeit sogar fast gar keinen Reibungsschluß.

Zur Erklärung dieser auffälligen Ergebnisse dienen sehr schön die Versuche von

Wellinger (48) mit ausführlichen Untersuchungen des thermischen Verhaltens verschiedener Nietstähle. Es wird dadurch besonders der auffallende Unterschied zwischen den Kohlenstoffstählen und den legierten Stählen erklärt, indem er nachweist, daß der Einfluß der beim Abkühlen eintretenden Vergrößerung im Umwandlungsbereich groß ist.

Wellinger bestimmte die Zusammenziehung von geschlagenen Nieten nach Entfernung der durch die Niete zusammengeschlossenen Bleche und errechnete hieraus die Spannung. Er untersuchte 3 Stähle mit folgenden Beimengungen und Eigenschaften:

Bezeichnung	Beimengungen in %					Streckgrenze kg/mm ²	Zugfestigkeit kg/mm ²
	C	Si	Mn	Cu	Cr		
St 37	0,08 ²	0,01	0,50	0,06	—	31,8	46,9
St M 1	0,29	0,31	0,71	0,23	—	34,8	61,6
St M 2	0,16	0,24	0,80	0,80	0,39	36,4	55,9

Bei den mit Lufthammer, Presse und mit verschiedenen Klemmlängen durchgeführten Versuchen ergab der St 37 gegenüber dem St M 2 durchweg eine größere Schrumpfspannung; nur der St M 1 übertraf bei größerer Schaftlänge den St 37. Dazu bemerkt W. besonders, daß zur Erreichung der bestmöglichen Spannung beim St 37 und St M 1 nicht die Sorgfalt aufgewendet werden mußte, die beim St M 2 notwendig war.

Zur Klärung der Ursache für das wenig günstige Verhalten des St M 2, das sich besonders bei der Lufthammernietung zeigte, wurde von W. das thermische Verhalten der Stähle untersucht. Er findet zunächst, daß die Verlängerung bei der Umwandlung während der Abkühlung bei den legierten, kohlenstoffreicheren Stählen St M 1 und St M 2 doppelt so groß ist als bei St 37, in Übereinstimmung mit der Erscheinung, daß bis etwa 0,35% C — Gehalt des Stahls die Verlängerung im Umwandlungsgebiet stark ansteigt.

Weiterhin stellte Wellinger fest, daß die Umwandlungstemperatur mit wachsender Abkühlungsgeschwindigkeit abfiel; besonders stark war dies bei dem St M 2 der Fall.

Findet die Umwandlung und die damit verbundene Verlängerung noch während des Schließvorganges statt, so ist das weniger schädlich, da es noch durch den Nietdruck ausgeglichen werden kann. Ist der Vorgang des Nietens aber schon beendet, so kann ein erheblicher Teil der Nietspannung verloren gehen. Man muß also bei solchen legierten Stählen den Nietdruck u. U. besonders lange halten.

Preuß (36) untersuchte eingehend die Festigkeit und die Verschiebungsbilder von Nietten aus Nickelstahl, welche zur Verbindung von Flußeisenblechen dienten. Um einen Anschluß an die Bach'schen Versuche zu erhalten, wurden möglichst ähnliche Versuchskörper benutzt.

Preuß fand durchweg keine scharf ausgeprägte Gleitgrenze (Abb. 16). Mit elektrisch-hydraulischer Nietung vor allem er-

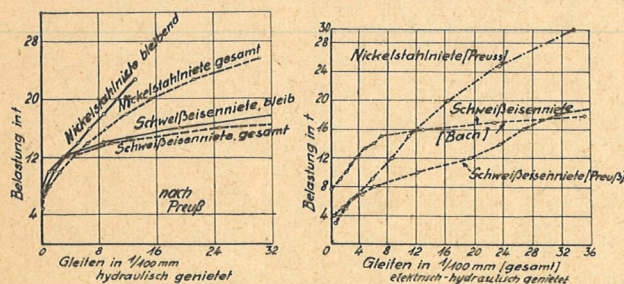


Abb. 16: Gleitung von Verbindungen mit Nietten aus Schweiß-eisen oder aus Nickelstahl (nach Preuß und Bach).

gaben sich erheblich niedrigere Gleitgrenzen, als Bach unter gleichen Bedingungen fand.

Die Gleitungen selbst wachen bei Schweiß-eisennieten viel rascher als bei Nickelstahlnieten; über die vergleichsweise Höhe der Gleitgrenze, erzeugt von Schweiß-eisen- oder Nickelstahlnieten, ist den Versuchen von Preuß Bestimmtes nicht zu entnehmen (linke Abb. 16).

Auch Dörnen (15) hat das Gleiten an Stahl- und Flußeisennieten¹⁾ untersucht. Es waren einfache verlaschte Stäbe mit Stahlnieten. D. sagt: „Dabei ergab diese Reihe mit einem Stahlniet bedeutend kleinere Gesamtverschiebungen des Mittelstückes gegen die Laschen. Diese betragen weniger als die Hälfte der entsprechenden Verschiebungen der Ausführung mit zwei Flußeisennieten. Das bedeutet, daß bei Verbindungen mit Stahlnieten länger der beste Zustand bestehen bleibt, daß ohne wesentliche Gleitungen der Reibungswiderstand der verbundenen Eisenlagen voll zur Kraftübertragung ausgenutzt wird, was besonders bei wechselnder Kraftrichtung wichtig ist“. D. hat hiernach das Gleiten zu gleichen Lasten verglichen, nicht aber die Höhe der Gleitgrenze selbst festgestellt.

Auch eine Reihe von Versuchen der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen im Jahre 1923 mit Stahlnieten in Flußeisenblechen gab über die Gleitgrenze keine genaue Auskunft, da, ähnlich wie bei Preuß, die an den Schmalseiten der Stäbe gemessenen Gleitungen schon bei sehr geringen Lasten begannen und dann allmählich anwuchsen.

Schließlich sei noch auf die Untersuchungen der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen (Techn. Hochschule Karlsruhe) im Jahre 1927 eingegangen, welche durchweg an einfachen Laschenverbindungen etwa nach Abb. 3 und 4 mit einem (vermutlich mit Presse hergestellten) Niet 23 \varnothing ausgeführt wurden. Die Stäbe waren 70 oder 120 mm breit. Da die Versuche zur Ermittlung des zulässigen Lochleibungsdruckes bei verschiedenen Baustählen angelegt waren und nicht zur Ermittlung der Gleitgrenze, waren die Laststufen leider reichlich groß gewählt worden, nämlich von 0,5 zu 0,5 σ zul., sodaß die gefundenen Gleitgrenzen in ziemlich weiten Grenzen eingeschlossen sind.

Es folgen hier zunächst die Ergebnisse mit solchen Versuchsstäben, bei welchen Stäbe, Laschen und Niete aus dem gleichen Stahl bestanden:

Baustahl	St 37	Gleitgrenze	820 kg/cm ²
..	St 37	..	935 ..
..	St 48	..	450 ..
..	St Si	..	400 ..
..	St Si	..	300 ..
..	St Si	..	500 ..
..	St Si	..	300 ..

¹⁾ Es ist anzunehmen, daß das „Flußeisen“ etwa unserem heutigen St 34, der „Stahl“ etwa unserem heutigen St 52 entspricht.

Die „hochwertigen“ Verbindungen hatten also bedeutend kleinere Gleitgrenzen!

Das Ergebnis weiterer Versuche ist der folgenden Liste zu entnehmen:

Niet	Stab und Laschen	Gleitgrenze		knarrendes Geräusch bei kg/cm ² Nietquerschnitt
		$\beta = \frac{\tau}{\sigma \text{ zul.}}$	kg/cm ²	
St 37	St 37	0,59	820	820
	St 37	0,67	935	1120
	St Si	0,34	470	540
	St Si	0,34	470	—
St 48	St 48	0,27–0,55	450	600
	St 48	0,21	(2300) ¹⁾	—
	St Si	0,27–0,55	450	?
	St Si	0,55	600	?
St Si	St Si	0,19	400	700
	St Si	0,14	300	720
	St Si	0,24	500	1000
	St Si	0,14	300	710

¹⁾ Das Verhalten dieser Verbindung fiel völlig aus dem Rahmen der andern.

Hiernach ergaben die St 37-Niete in St Si (St 52) — Baustahl erheblich kleinere Gleitgrenzen als in St 37.

Der Grund hierfür ist wahrscheinlich weniger bei den Nieten zu suchen, sondern mehr bei der Oberflächenbeschaffenheit der Bleche. Es wurde fast immer beobachtet, daß der St 48 und St Si eine wesentlich glattere und härtere Oberfläche haben als der weichere St 37. Besonders wenn die Stähle vor dem Vernieten gelagert haben, wird der St 37 den hochwertigen Stählen stets in Bezug auf die Reibung überlegen sein.

e) Einfluß des Abschreckens und ungleichmäßigen Erwärmsens der Niete.

Das Abschrecken des glühenden Nietschaftendes ist ein seit langem bekanntes und gebräuchliches Mittel, um zu erreichen, daß beim Schließen des Niertes der Schaft zunächst gut gestaucht wird, bevor das abgeschreckte Ende wieder warm wird und der Schließkopf sich bilden kann.

Die Versuche von Wellinger (48) ergeben keinen Einfluß des Abschreckens des Schließkopfes vor dem Stauchen auf die Längsspannung im fertigen Niet. Bei zu weit getriebenem Abschrecken fand er sogar eine leicht erklärliche Verringerung der Spannung.

Natürlich wird man ein Abschrecken nur bei besonders langen Nieten vorsehen. Ein teilweises Anwärmen, wie es bei sehr langen Nieten manchmal geschieht, um zu starke Spannungen, die ein Abspringen des Kopfes verursachen können, zu vermeiden, bringen

In allen Fällen wurde außer den Messungen auch beobachtet, wann erstmalig die knackenden oder knarrenden Geräusche, von der Überwindung der Reibung herrührend, auftraten. Wie obige Liste zeigt, tritt das Geräusch aber erst bei größeren Verschiebungen auf; es kann demnach als sicheres Zeichen dafür gelten, daß die Gleitgrenze schon überschritten ist, nicht aber für die Gleitgrenze selbst.

Stauchmaß.

Versuche zur Bestimmung des Gleitweges oder des Stauchmaßes bei verschiedenen Stahlarten sind wenig durchgeführt.

Die von Gaber (24) veröffentlichten Versuche über das Stauchmaß von Nieten aus gewöhnlichem Baustahl und aus Siliziumbaustahl wurden zu verschiedenen Zeiten durchgeführt, und wahrscheinlich unter verschiedenen Nietbedingungen. Maßgebende Schlußfolgerungen mögen daher nicht gezogen werden.

Zusammenfassung.

Die Kohlenstoffstähle mit höherer Streckgrenze können, da die Nietspannung bei guter, genügend lange ausgedehnter Nietung an die (Warm)-Streckgrenze heranreicht, größere Reibungskräfte erzeugen. Bei legierten Nietschäften kann aber trotz höherer Festigkeit eine ungünstigere Klemmwirkung stattfinden wegen der Ausdehnung des Stahls bei der Gefügeumwandlung. — Wesentlich für die Gleitgrenze ist die Oberflächenbeschaffenheit der zu verbindenden Teile. Der weniger korrosionsfeste St 37 scheint in den meisten Fällen eine rauhere Oberfläche zu besitzen als die hochwertigen Baustähle, welche infolge ihrer Glätte viel geringeren Reibungswiderstand erzeugen.

nach Bach-Baumann (5) die gleiche Spannung wie die auf der ganzen Länge angewärmten Niete.

Es genügt aber nach Versuchen von Müller (54) nicht, die Niete überhaupt nur auf einer Hälfte anzuwärmen, denn es ergaben sich dann kleinere Spannungen im Nietschaft bei den untersuchten kurzen Kesselnieten.

Ein Vorteil des Abschreckens in bezug auf den Gleitwiderstand ist also nicht festzustellen und war auch nicht zu erwarten, ebenso wenig aber ein Nachteil bei längeren Nieten.

Zur Erhöhung der Stauchwirkung aber ist das Abschrecken des Schaftendes bei langen Nieten durchaus brauchbar, wenn auch die erwartete Verbesserung nicht immer erreicht wurde.

Die Versuche von Gaber (24) sind in folgender Liste dargestellt.

Einfluß des Abschreckens auf die Stauchung.
(Mittlere Dicke in mm.)

Niet- stahl	Klemmlänge in mm		130	140	150
St Si	Lufthammer	abgeschreckt	1,54	1,45	1,56
		nicht abgeschreckt	1,51	1,40	1,45
		Verbesserung	+0,03	+0,05	+0,11
	Presse	abgeschreckt	1,17	1,11	0,92
		nicht abgeschreckt	0,90	0,81	0,90
		Verbesserung	+0,27	+0,30	+0,02
St 34	Lufthammer	abgeschreckt	1,28	1,13	1,08
		nicht abgeschreckt	1,17	1,14	1,10
		Verbesserung	+0,11	-0,01	-0,02
	Presse	abgeschreckt	1,11	1,09	0,98
		nicht abgeschreckt	1,17	1,13	0,84
		Verbesserung	-0,06	-0,04	+0,14

Man erkennt bei den Nietten aus St Si, welche wahrscheinlich mit großer Sorgfalt hergestellt wurden, daß das Abschrecken der mit Lufthammer geschlagenen Nieten wenig

genützt hat, jedenfalls so wenig Verbesserung brachte, daß sich die Mühe des Abschreckens nicht lohnt. Die gepreßten Nietten hingegen zeigen eine recht günstige Wirkung des Abschreckens, wodurch die Verdickung der Nieten verstärkt wurde, allerdings immer noch nicht auf das Maß, welches der Lufthammer ohne Abschrecken erreichte.

Die St 34-Nieten sind offenbar überhaupt mit weniger Sorgfalt hergestellt, wie sich an dem kleineren Durchmesser zeigt, hier hat auch das Abschrecken im großen und ganzen nichts genützt, da die abgeschreckten Nietten bald einen um ein geringes dünnere, bald einen wenig dickeren Schaft haben. Das Abschrecken kann demnach eine geringe Sorgfalt beim Nietten nicht im geringsten ausgleichen.

Zusammenfassung.

Das Abschrecken hat auf den Gleitwiderstand keinen Einfluß, auf die Nietverdickung auch nur dann, wenn sorgfältig gearbeitet wird. Unsere Versuche haben große Vorteile des Abschreckens in bezug auf das Durchstauchen bisher nicht gezeigt.

f) Einfluß der Oberflächenbehandlung der verbundenen Teile und sonstige Einflüsse.

Bei einer zweischnittigen Verbindung ist der Reibungswiderstand $R = 2 \cdot F_N \cdot \sigma \cdot \mu$. Hierin ist σ die Zugspannung in dem Niet, F_N der Nietquerschnitt und μ ein Erfahrungswert, in welchem die Reibungswirkung der verbundenen Oberflächen zum Ausdruck kommt. Es zeigt sich, daß hier, offenbar wegen der sehr großen Pressungen, der Wert μ nicht als gewöhnliche Reibungszahl angesehen werden darf. Vielmehr ergibt sich aus den Bachschen Versuchen bei guten Vernietungen $\mu = 0,45$, also als erheblich höherer Wert. Die Pressungen zwischen den Nietköpfen betragen immerhin bei einem Niet mit 20 mm ≈ 2410 kg/cm², wenn die Nietspannung 30 kg/mm² beträgt, also ein Flächendruck, welcher nahe an die Quetschgrenze heranreicht. Jedenfalls werden die Unebenheiten der Blechoberflächen sehr fest ineinandergepreßt und verzahnen sich. Da die hochwertigen Stähle korrosionsfester sind, haben sie i. A. auch eine härtere und glattere Oberfläche und erzeugen geringere Reibung, wie auch an eigenen Versuchen bereits gezeigt wurde. Die hochwertigen Baustähle müssen demnach — mit gleichen Nietten — kleineren Gleitwiderstand ergeben.

Künstliche Veränderung der Oberflächen durch Anstriche lassen einen Einfluß auf den Gleitwiderstand erwarten. Versuche des Vereins Deutscher Brücken- und Eisenbaufabriken (heute Stahlbauverband) ergaben keine Erniedrigung des Gleitwiderstandes durch Anstriche.

Wellinger (48) zeigt, daß durch den Schutzanstrich der Bleche in den mittelst

Presse eingezogenen Nietten die Spannung etwas vermindert wird und erklärt dies aus der größeren Nachgiebigkeit der zusammengeklebten Teile infolge des Anstrichs. Durch Anwendung höheren Nietungsdrucks ließ sich die Verminderung wieder beseitigen.

Ein englischer Bericht (37) beschäftigt sich mit Versuchen an verschraubten Laschen mit einer einzigen $\frac{3}{4}$ " Schraube bei 1,6 mm Spiel. Die Gleitlasten betrugen beim Anziehen der Schrauben von Hand 1,47 bis 2,82 t, i. M. 2,51 t, im Schraubstock 2,75 bis 4,45 t, i. M. 3,62 t.

Ein Versuch mit angestrichenen Proben gab nur 1,73 t Gleitlast. Der Anstrich scheint hiernach beträchtlichen Einfluß auf die Gleitlast zu besitzen, indem eben der Reibungskoeffizient zwischen den Laschen durch die Schmierwirkung des Anstrichmittels erheblich verringert wird.

Der Anstrich bewirkt also eine Verringerung der Gleitgrenze

1. infolge seiner Schmierwirkung, welche den Reibungswert herabsetzt,

2. infolge seiner Nachgiebigkeit bei Zusammendrückung, welche die Spannung in den Nietten und der Klemmkraft vermindert.

Einen erheblichen Einfluß auf die Gleitgrenze hat das Verstemmen der Nieten oder der Bleche oder der Nieten und der Bleche, wie Bach (3) (1895) festgestellt hat. Es geht dies aus seinen Versuchsreihen 48—52 sehr deutlich hervor, denn der Gleitwiderstand, welcher rd. 881 kg/cm² bei unverstemmter Ausführung betrug, stieg durch das Verstemmen erheblich und erreichte bei beiderseitiger

Verstimmung von Blechen und Nieten 1617 kg/cm².

Es ist auch der Einfluß des sog. kleinen Versenks auf den Gleitwiderstand untersucht worden. In einem Bericht Deutscher Brücken- und Eisenbaufabriken (7) werden auf Grund von Versuchen Schlüsse dahin ge-

zogen, daß das Anbringen der Gesenke den Gleitwiderstand nicht gesetzmäßig beeinflusst hat.

Zusammenfassung.

Der Einfluß von Anstrichen der reibenden Oberflächen auf die Höhe der Gleitgrenze ist noch nicht geklärt.

g) Einfluß von Zahl und Anordnung der Niete.

Bisher wurden Verbindungen betrachtet, welche im allgemeinen aus einem einzigen Niet oder einer einzigen Reihe nebeneinander angeordneter Niete bestanden. Es wird nun auf Verbindungen eingegangen, bei welchen mehrere Niete in der Kraftrichtung hintereinander sitzen. Wenn die Gesamtkraft auf die verschiedenen Niete einer solchen Verbindung gleichmäßig verteilt wäre, so würde das Gleiten bei allen Nieten etwa gleichzeitig eintreten, die Gleitgrenze eines Nietes würde keine Änderung erfahren, und der Gleitwiderstand der Verbindung würde gleich der Summe der Gleitwiderstände der Niete sein. In Wirklichkeit sind aber die Kräfte, die die verschiedenen Niete einer Verbindung aufzunehmen haben, recht verschieden.

Findeisen (20) untersuchte die Kraftverteilung auf 4 hintereinanderliegende Bolzen von 24 mm \varnothing . Er maß die Längsdehnungen auf den Laschen eines beidseitig gelaschten Stabes und schloß auf dem Umweg über die zugehörigen Spannungen auf die Beteiligung der Bolzen an der Gesamtkraft. Dabei trug, vom Stoß aus gerechnet,

Bei einem Bolzenabstand von	140 mm	90 mm
der erste Bolzen	29,2 %	29,8 %
der zweite Bolzen	11,6 %	13,7 %
der dritte Bolzen	17,2 %	26,1 %
der vierte Bolzen	42,0 %	30,4 %

Die Verteilung war also immer so, daß die äußeren Bolzen erheblich mehr Last übernahmen als die inneren, und zwar ist die Verteilung bei größerem Bolzenabstand ungünstiger gewesen als bei kleinerem. Die Verteilung hängt natürlich von den Dehnungen der verbundenen Teile ab, diese ihrerseits vom Verlauf der Spannungen. Andere Untersuchungen und Berechnungen ergaben stets grundsätzlich das gleiche Bild über die Verteilung. Eine ähnliche Spannungsverteilung findet sich übrigens bei Schweißnähten wieder (52).

Bei Nieten wird sich zunächst eine ähnliche, aber wegen der Klemmwirkung etwas andere Verteilung als bei Bolzen einstellen.

Der Gleitwiderstand wird zunächst bei einem der äußeren Niete überwunden werden, welcher den größten Kraftanteil hat. Es

wird hier aber nur ein kleines Stück des Gleitweges zurückgelegt, denn mit dem Gleiten wird sofort der Spannungsverlauf in den verbundenen Teilen so geändert, daß der Niet entlastet wird. Dadurch wird der hinter dem Niet liegende Teil des Stoßes stärker angespannt und somit der dahinter liegende Niet belastet u. s. f. Bei einer solchen Verbindung tritt also durch das Gleiten ein Ausgleich der vorher ungleichmäßig verteilten Kräfte ein. Das Gleiten wird sich — über die ganze Verbindung gemessen — nicht mehr als scharfer Knick in der Spannungsdehnungslinie bemerkbar machen, sondern als allmählich rascheres Wachsen der Dehnungen. Während sich also beim einzelnen Niet der Beginn des Gleitens gut verfolgen läßt, ist dies schwieriger, wenn man die Dehnung einer über die ganze Verbindung reichenden Meßstrecke verfolgt.

Schon bei einreihigen Verbindungen fanden verschiedene Forscher verschieden gute Ausprägung des Gleitbeginns. Bach (2) und Preuß (36) verwendeten genau gleiche Probestäbe; während Bach aber den Beginn des Gleitens mit einer unteren Lastgrenze, bei welcher Gleiten noch nicht eingetreten war, angeben konnte, fand Preuß schon bei ganz kleinen Lasten Gleitungen, obwohl die Meßstellen in beiden Fällen an den Schmalseiten der Verbindungen lagen. Es lag dies vielleicht daran, daß Bach in verhältnismäßig roher Messung das Gleiten mit dem Auge feststellte, während Preuß mit so feinen Instrumenten maß, daß die elastischen Formänderungen der Bleche mit angezeigt wurden.

Bei den Verbindungen mit mehreren Nieten hintereinander wird man nun entweder das „bleibende“ Gleiten der einzelnen Niete feststellen müssen oder man mißt die bleibenden Dehnungen einer über die ganze Verbindung reichenden Meßstrecke.

Daß das Gleiten hintereinandersitzender Niete nicht gleichzeitig stattfindet, hat schon Bach (4) festgestellt. Bei einer Überlappungsnietung mit 6 hintereinandersitzenden Nieten von je 19 mm \varnothing , mit 12 mm Blechdicke und 150 mm Blechbreite fand er, daß das Gleiten begann

bei Niet 1 und 6 bei 6000 kg Gesamtkraft

„ „ 2 „ 5 „ 8000 „ „
 „ „ 3 „ 4 „ 11000 „ „

Den Grund hierfür suchte schon Bach in einer entsprechenden ungleichmäßigen Kraftverteilung auf die Niete.

Den Einfluß der Anzahl der Niete auf das Gleiten untersuchte H. Rudeloff (8) mit einseitig an ein Blech angeschlossenen Winkeln. Der Anschluß erfolgte durch 3, 4 oder 5 hintereinander sitzende Nieten, deren Durchmesser so gewählt war, daß der Gesamtquer-

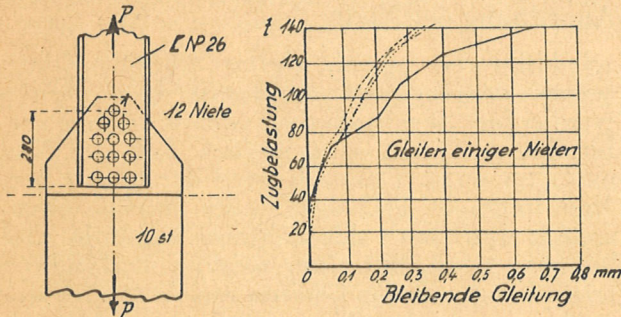


Abb. 17: Bleibende Gleitung eines mehrnietigen Anschlusses (nach Rudeloff).

schnitt stets annähernd gleich war. Ein Einfluß der Zahl hintereinandersitzender Niete war nicht zu erkennen; ein geringes Gleiten fand schon bei verhältnismäßig kleinen Lasten statt.

M. Rudeloff (40) dagegen stellte fest, daß bei sonst gleichartigen Verbindungen der Gleitwiderstand bei zwei Nieten größeren Durchmessers geringer war als bei drei Nieten von kleinerem Durchmesser. Der Unterschied trat bei Handnietung stärker hervor als bei Maschinennietung mit Kniehebel.

Rudeloff (8) berichtet weiter über Versuche mit einseitigen Anschlüssen von \angle -Eisen NP 26 an 10 mm starke Bleche mit 12 Nieten von 21 mm \varnothing ohne Beiwinkel. Das Gleiten, d. h. bleibende Verschiebungen von einigen tausendstel Millimetern, trat bei 20–30 t ein, d. h. bei 480–720 kg/cm² Nietquerschnitt, also bei verhältnismäßig kleinen Kräften. Wie Abb. 17 zeigt, tritt auch hier das Gleiten nicht plötzlich auf, sondern allmählich. Es sind hier nicht die gesamten, sondern nur die bleibenden Verschiebungen an 4 Stellen als Beispiel dargestellt.

Einen Einblick in die Gleitverhältnisse von Anschlüssen von Profilen geben weitere Versuche des Eisenbau-Verbandes, über welche Rudeloff (8) berichtet. Die Versuche bezweckten die Klarstellung des Verhaltens von verschiedenartig angeschlossenen Winkeln und \angle -Eisen. Außer der Messung der Durchbiegungen, Formänderungen, Bruchlasten usw. wurden auch die Gleitungen der Niete beobachtet, so daß sich für unsere Zwecke eine schöne Übersicht über die Gleitverhältnisse bei verschiedenen Arten des Anschlusses ergibt.

Die Versuche zerfallen in mehrere Versuchsgruppen, über welche kurz berichtet werden soll.

Zunächst wurden Winkleisen und \angle -Eisen an Blech auf verschiedene Weise, mit oder ohne Beiwinkel angeschlossen. Die „rechnerischen“ Scherspannungen der Niete, bei welchen sich das erste Gleiten zeigte, sind folgender Liste zu entnehmen.

Querschnitt	Bemerkungen	Niete im Anschlußbl.		Beginn des Gleitens bei kg/cm Scherspann.
		Zahl	\varnothing in mm	
	1 Winkel A 90×90×9 an Blech B	4	23	181
	2 Winkel A 90×90×11 Unmittelbar u. d. Winkel B mittelbar an Blech C	6	23	1090
	wie vor aber die Winkel über Kreuz	6	23	(1230)
	U-Eisen A unmittelbar u. durch 2 Beiwinkel B mittelbar an Blech C	12	23	950
	2 Stäbe wie vor vereinigt	12	23	1450

Hiernach waren die Gleitgrenzen der symmetrischen Anschlüsse immer höher als die der einseitigen Anschlüsse!

Es ist dies wohl dadurch zu erklären, daß der einseitige Anschluß Biegemomente in den angeschlossenen Stäben bedingt, welche in den Nieten Zugspannungen hervorrufen, die die Pressung der verbundenen Teile aufeinander und somit die Gleitgrenze ermäßigen. Der Gleitwiderstand des Stabes 1 ist allerdings ganz auffallend niedrig und m. E. einem Zufall beim Nieten zuzuschreiben, obwohl R. darauf aufmerksam macht, daß beide Stabenden die Gleitgrenze übereinstimmend niedrig zeigen.

Der Stab 3 (\angle -Eisen versetzt) zeigt höhere Gleitgrenze (1230 kg/cm²) als Stab 2 (1090 kg/cm²) (\angle -Eisen symmetrisch zum Blech). Bei einer weiteren, ähnlichen Versuchsreihe zeigte sich bei \angle -Anordnung, am Winkeln gemessen, erheblich kleinere Gleitgrenze wie bei \angle -Anordnung. Die Ergebnisse widersprechen sich; die Versuche sind

auch nur einmal durchgeführt worden, so daß ein brauchbares Ergebnis in bezug auf die Gleitgrenze sich nicht ergibt.

Bach (2) (1894) fand übrigens, daß einreihige Laschennietung (beiderseits Laschen) im Vergleich mit einreihiger Überlappungsverbindung einen geringeren Gleitwiderstand ergab. Hier war also die symmetrische Verbindung ausnahmsweise weniger fest. Bach sucht den Grund darin, daß bei der Überlappungsnietung durch die Abbiegung der Bleche ein auf Klemmung wirkendes Kräftepaar günstig wirkt, während bei der Laschennietung geringe Unterschiede in der Dicke der stumpf aneinanderstoßenden Stabenden ungünstige Wirkung hat.

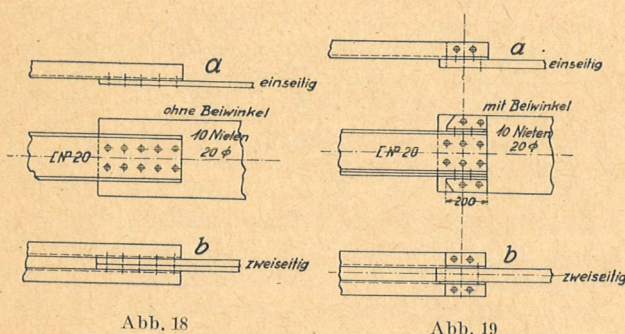


Abb. 18 und 19: Anschluß eines U-Eisens NP 20 an ein Blech ohne (Abb. 18) und mit (Abb. 19) Beiwinkel (nach Rudeloff):

Rudeloff (8) beschreibt weiter Versuche über die Anordnung eines Anschlusses von \square -Eisen an ein Knotenblech nach Abb. 18, 19. Ein oder zwei \square -Eisen NP 20 waren immer durch 10 Nieten mit 20 mm \varnothing , aber einmal ohne Beiwinkel (längerer Anschluß, Abb. 18) und einmal mit Beiwinkel (kürzerer Anschluß, Abb. 19), angeschlossen. Als Ergebnis stellt R. fest: „Der längere, unmittelbare Anschluß mit 10 Nieten ohne Beiwinkel hat sich dem kürzeren Anschluß unter Verwendung von Beiwinkeln hinsichtlich des Gleitens überlegen erwiesen.“ Ein „stärkeres Gleiten“ begann etwa bei folgenden Scherspannungen in der Niete:

Abb. Nr.	19a	19b	18a	18b
in kg/cm ²	480	540	650	640

Die Gleitgrenzen lagen also nicht besonders hoch, bei den unmittelbaren Anschlüssen aber höher als bei den durch Beiwinkel. Der symmetrische Stab 19b ergab gegen den unsymmetrischen Stab 19a höheren Wert. Die Gleitgrenze erscheint bei dem längeren, unmittelbaren Anschluß auch ausgeprägter als Knick in der P/ δ -Linie. Das kann erklärt werden durch die Formänderung der angeschlossenen Teile. Beim unmittelbaren Anschluß werden die Kräfte wegen der größeren Starrheit gleichmäßiger auf die 10 Nieten verteilt sein als bei dem breiteren Anschluß mit den Beiwinkeln, welche ja überdies nochmals gleitfähig an das \square -Eisen angeschlossen sind. Es wird infolgedessen der Reibungsschluß bei

dem durch Beiwinkel angeschlossenen \square -Eisen früher überwunden werden und es wird schon ein gewisser Gleitweg zwischen \square -Eisen und Blech und zwischen \square -Eisen und Beiwinkel eingetreten sein, bis auch die Beiwinkel auf dem Blech zu gleiten beginnen. Der Gleitweg zwischen \square -Eisen und Blech, auf welchen es bei unseren Betrachtungen allein ankommt, wird also größer als beim unmittelbaren Anschluß des \square -Eisens.

Wichtig erscheint noch die Feststellung, daß das Gleiten bei der zulässigen Nietscherspannung von 1120 kg/cm² in allen Fällen bereits eingetreten war. Ebenso wie die Formänderung der angeschlossenen Stäbe (z. B. Durchbiegungen bei exzentrischem Anschluß) Höhe der Gleitgrenze und Maß des Gleitwegs beeinflusst, wird auch der Gleitweg wieder andere Spannungsverteilung im Stab wachrufen. Das Gleiten beeinflusst somit nicht nur die Formänderungen der verbundenen Teile unmittelbar durch Größe und Richtung des Gleitens selbst, sondern auch mittelbar durch Änderungen in der Spannungsverteilung.

Dörnen (15) hat umfangreiche Versuche über genietete Anschlüsse eines Winkels \square 80/80/8 an ein Blech mit mehreren Nieten angestellt und dabei außer den Bruchlasten, Durchbiegungen und Verzerrungen auch in ausführlichen Messungen das Gleiten einzelner Nieten ermittelt. Es zeigt sich dabei u. a., daß bei jedem Niet das Gleiten — es waren immer mindestens 6 Nieten, davon 3 hintereinander, vorhanden — nicht plötzlich, sondern allmählich eintrat. Es läßt sich also auch hier eine ausgeprägte „Gleitgrenze“ nicht angeben.

Abb. 20 zeigt einen von Dörnen untersuchten Anschluß als Beispiel für die ermittelten Gleitungen. Die Schwerachse der \square -Eisen fiel hier mit der Kraftachse zusammen. Wir entnehmen der Abb. 20 besonders, daß das Gleiten nicht nur in der Richtung der Kraftachse, sondern auch senkrecht dazu gemessen wurde und daß solche Verschiebungen senkrecht zur

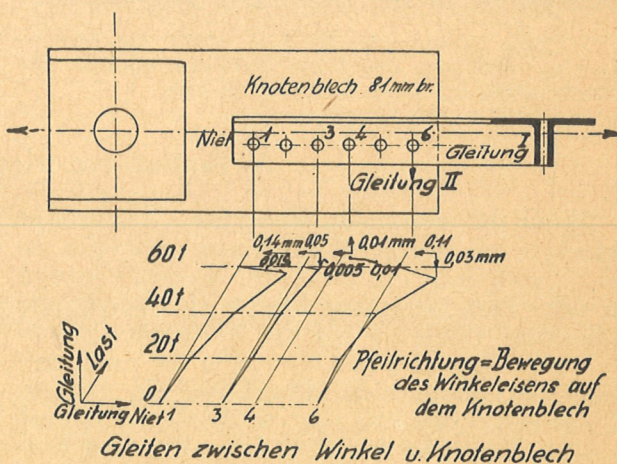


Abb. 20: Gleiten eines Winkelseisens an verschiedenen Nieten und nach verschiedenen Richtungen (nach Dörnen):

Kraftachse — im Verhältnis zu den Längerverschiebungen — in nicht unbeträchtlichem Maße aufgetreten sind. Diese rühren von einem Biegemoment her, das sich aus der Art des Anschlusses ergibt, obwohl die quer zur Stabkraft auftretenden Kräfte in den Nieten nur äußerst klein sein können gegenüber den Längskräften. Offenbar ist aber auch hier der Widerstand des Gleitens während der Bewegung geringer, so daß während des Längsgleitens auch Quergleiten in einer Größe auftreten kann, welches ohne das Längsgleiten nicht auftreten würde.

Dörnen hat geglaubt, aus den bei den einzelnen Nieten verschiedenen großen Gleitungen auf die Kraftverteilung unter den einzelnen Nieten schließen zu können, indem die „be-

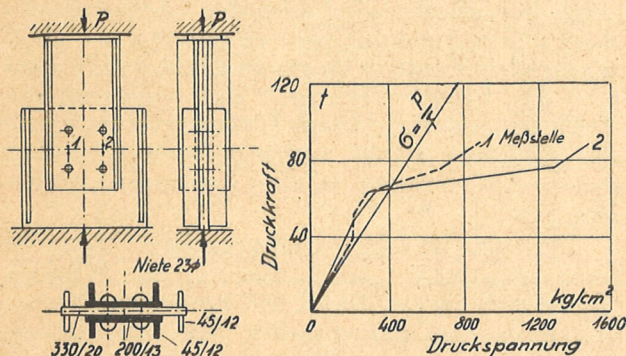


Abb. 21: Verlauf der Druckspannungen an den gezeichneten Meßstellen 1 und 2 abhängig von der Belastung des Versuchskörpers.

treffenden Niete von der Stabkraft einen Anteil etwa proportional ihrer Gleitstrecke¹⁾ übernehmen“, (S. 8/9 seines Berichts). Ein solcher Schluß wäre möglich, wenn die Gleitungen den Kräften annähernd proportional wären und ferner annähernd elastisch. Beides ist aber, wie andere Versuche gezeigt haben, bei weitem nicht der Fall.

Gute Reibung bewirkt auch gute und möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung in den Blechen. Wie sehr die Spannungsverteilung in einer genieteten Verbindung davon abhängig ist, ob der Niet durch Reibung oder

¹⁾ Unter Gleitstrecke ist hier nicht die Strecke bis zum Anliegen des Nieten gemeint, sondern die Verschiebung bei einer bestimmten Last.

durch Lochwanddruck und Scheren Kräfte überträgt, möge aus folgendem einfachen Versuch hervorgehen. 1 geschweißtes \perp -Profil war mit 2 geschweißten \perp -Profilen durch 4 Niete verbunden (Abb. 21). Es wurde diese Verbindung auf Druck belastet und dabei mit Hilfe von Dehnmessern auf 20 mm langen Meßstrecken an den 4 Stellen in der Kraft- richtung zwischen 2 Nieten die Spannung in den Blechen bestimmt. Der Spannungsverlauf ist in der gleichen Abb. 21 dargestellt und zeigt mit aller Deutlichkeit einen Knick. Es ist dies jene Stelle, wo die Reibung überwunden wurde und der Niet plötzlich das Blech anders beansprucht. Unter der Annahme, daß alle 4 Niete gleichviel übernehmen und die Spannung über den Querschnitt gleichmäßig verteilt ist, wirken in einem zwischen die Nieten gelegten Normalschnitt die in Abb. 21 dargestellten Spannungen. Man sieht, daß bei Reibungskraftübertragung die gemessenen Spannungen hiermit fast übereinstimmen: die Reibung hat die Kraftübertragung gleichmäßig vermittelt. Nach Überwindung der Reibung steigt die Spannung stark an, da nur die Lochwand gedrückt wird; sie beträgt an der gemessenen Stelle bei $P = 80 \text{ t}$ das 1,7fache der mittleren.

Zusammenfassung.

Da im Nietbild die Niete meist verschiedene Kraftanteile erhalten, werden bei den am stärksten belasteten die Gleitungen zuerst auftreten und zwar bei kleineren Kräften, als beim Versuch mit einem einzelnen Niet gefunden wird. Die „Gleitgrenze“ einer Verbindung aus vielen Nieten ist also niedriger, weniger ausgeprägt und mit geringeren Verschiebungen verbunden als bei einem einzigen Niet.

Die Anordnung der zu verbindenden Teile, die Lage der Schwerachse der Stäbe zur Kraftachse usw. haben ebenfalls bedeutenden Einfluß auf die Gleitgrenze. Alle Zusatzkräfte, welche bestrebt sind, Zugspannungen in den Nieten hervorzurufen oder welche Biegemomente und Gleitungen senkrecht zur Kraftachse bewirken, vermindern die Klemmkraft der Niete und setzen die Gleitgrenze herab.

h) Einfluß von wiederholter Belastung.

Wird die erstmalig über die Gleitgrenze belastete einnietige Verbindung entlastet, so bildet sich nur ein Teil der Formänderung zurück. Der Gleitweg bleibt als „bleibende Dehnung“ übrig. Wird die Verbindung weiterhin in den gleichen Grenzen be- und entlastet, so bildet sich allmählich ein Gleichgewichtszustand, ein rein elastischer Zustand, heraus. Versuche mit 25maliger Be- und Entlastung bei der zulässigen Nietenlast sind in der Versuchsanstalt für Holz,

Stein, Eisen im Rahmen der Versuche für die Reichsbahn 1927 — über die gestellte Aufgabe hinaus — durchgeführt worden. Es stellte sich nach den allerersten Lastwiederholungen bereits ein annähernder Gleitgewichtszustand ein. Da die Gleitgrenze für die Verbindung aber schon unterhalb der zulässigen Belastung, also schon bei der erstmaligen Belastung, überschritten wurde, ergeben sich daraus keine Folgerungen für das Verhalten des Gleitwiderstandes. Man sollte

Versuche anstellen mit Wiederholungen von Lasten, welche unterhalb der Gleitgrenze liegen, um zu sehen, ob die Gleitgrenze und die Reibung durch die Lastwechsel erniedrigt werden. Die Frequenz der Lastwechsel müßte dabei niedrig sein, damit den Gleitungen auch Zeit zur vollen Ausbildung gegeben wird.

Die neueren Dauerversuche sind meist auf die Feststellung der Bruchverhältnisse abgestellt. Allerdings berichtet Schächterle (44) auch über solche Versuche mit Messungen der Verlängerungen einer Meßstrecke, zumal die

Lasten oberhalb den zulässigen. Wichtig ist aber vor allem die Feststellung, ob überhaupt — und selbst unter den ausgezeichneten Nietungen, an welchen Bach die hohen Reibungswiderstände festgestellt hat — der Reibungsschluß bei den häufig wiederholt belasteten Verbindungen ebenso groß ist, wie er bei einmaliger Belastung gefunden wird. Ist das, wie vermutet wird, nicht der Fall, so ist dem Gleitweg und der Herstellung einer gut sitzenden lochfüllenden Nietung erst recht erhöhte Beachtung zu schenken.

Zusammenfassung und Folgerungen für den I. Hauptteil.

Die Höhe des Gleitwiderstandes betrug bei Bach (1892) etwa in der Hälfte der Fälle über und unter 1000 kg/cm^2 Nietquerschnitt bei einigermaßen normaler Nietung mit Hand. Bei allen anderen Versuchen wurden aber — gleich mit welcher Nietungsart — Gleitgrenzen von 1000 kg/cm^2 selten erreicht. Es mag das daran liegen, daß Bach verhältnismäßig breite und kurze Nietbilder mit enger Nietteilung bevorzugt hat (mehr vom Standpunkt des Kesselbauers ausgehend), während später mehr schmale Nietungen verwendet wurden, bei welchen die Verteilung der Anpressungsdrucke über die angeschlossene Fläche etwas ungünstiger war.

Die zulässigen Scherspannungen in den geschlagenen Nieten werden allgemein gleich dem 0,8fachen der zulässigen Stabzugspannung anzunehmen sein; sie betragen¹⁾

bei Schweißeisen	800 kg/cm^2 (Bach)	
„ St 37	$0,8 \cdot 1400 = 1120$	„ (Niete St 34)
„ St 48	$0,8 \cdot 1820 = 1460$	„
„ St 52	$0,8 \cdot 2100 = 1680$	„ (Niete St 44)

Ein Vergleich der heute zulässigen Nieterscherspannungen mit den versuchsmäßig gefundenen Gleitgrenzen zeigt sofort:

Der vollkommene Reibungsschluß ist bei der üblichen Berechnungsweise nur bei Konstruktionen aus St 37 mit St 34-Nieten und auch dann nur bei recht guter Nietung zu erreichen. Bei den hochwertigeren Stählen wird bestimmt unter Gebrauchslast die Gleitgrenze überschritten. Bei den „hochwertigen“ Verbindungen mit gleichmäßig beanspruchten Nieten wird dabei ein großer Gleitweg durch Verschieben der ganzen angeschlossenen Fläche zurückgelegt werden. Bei Verbindungen mit verschiedenen beanspruchten Nieten (ungleichmäßige Kraftverteilung) wird noch früher ein Gleiten bei den äußeren Nietten eintreten, der gesamte Gleitweg wird jedoch kleiner sein. Einen ungünstigen, ebenfalls versuchsmäßig noch nicht geklärten Einfluß hat noch eine wechselnde Belastung der angeschlossenen Teile, welche auch bei geringen Lastgrenzen schon geringe Gleitungen und

damit wahrscheinlich eine Herabsetzung der Gleitwiderstände der einzelnen Nietten bewirkt.

Auf Grund der Feststellung, daß die Herstellung völlig auf Reibung haltender Niete mit Sicherheit nicht möglich ist bei den heute zugelassenen hohen Nietscherspannungen und bei dem heutigen Stand der Nietungsverfahren, muß man die Ansicht, eine Nietverbindung sei nur bei völligem Reibungsschluß unbedingt brauchbar, fallen lassen. Dennoch bleibt nach wie vor der Reibungswiderstand eine wichtige Lebensbedingung der Nietverbindung, indem er auch nach seiner Überwindung die Niete wesentlich zu entlasten vermag. Damit er dies rasch und zuverlässig tun kann, ist aber ein kleiner Gleitweg, d. h. eine möglichst gute Stauchung der Niete erforderlich. Dies ist besonders wichtig, wenn man an die ungünstige Beanspruchung bei Wechselstäben im Fachwerk und ähnliche Fälle denkt.

Es war sicherlich nicht richtig, die zulässigen Scherspannungen der Niete immer weiter zu erhöhen, ohne die Verbesserung der Nietverfahren in bezug auf Gleitgrenze und Gleitweg entsprechend zu fördern. Man müßte zu erreichen suchen

1. eine Erhöhung der Gleitgrenze,
2. eine bessere Stauchung der Niete.

Bezüglich der Gleitgrenze gilt nach den vorliegenden Untersuchungen: Pressenietung mit genügend langer Druckdauer bis zum Schwarzwerden des Niets, wie es auch in den Vorschriften nach DIN 1000 niedergelegt ist, ist am besten. Lange Niete sind günstiger als kurze. Legierte Nietstähle sind zu vermeiden, solange hierüber keine genügenden Untersuchungen vorliegen. Durch Verstemmen kann der Gleitwiderstand erheblich erhöht werden.

Große Beachtung verdient m. E. der Einfluß, den der Konstrukteur auf die Güte seiner Anschlüsse nehmen kann, indem er auf zentrischen Kraftangriff und symmetrische Anschlüsse besonderen Wert legt und sich nicht nur Festigkeitsversuche, sondern auch die beschriebenen Versuche über den Gleitwiderstand mehr als bisher nutzbar macht.

¹⁾ Inzwischen ist lt. DIN 1050 die zulässige Nieterscherspannung auf σ_{zul} heraufgesetzt worden.

Als Bach die zulässige rechnerische Nieterscherspannung auf Grund seiner Gleitversuche auf 800 kg/cm^2 festsetzte, da war eine besondere Beobachtung der Lochausfüllung nicht nötig. Sie war bei Handnietung ohnehin besser, als sie mit den heutigen Schließwerkzeugen erzielt wird. Denn damals waren die Vorgänge des Stauchens und Schließens noch getrennt, indem die Nieten zuerst mit dem Handhammer gestaucht wurden, worauf erst mit dem Döpper und Vorschlaghammer der Kopf geformt wurde. Die modernen Nietverfahren ergeben wesentlich schlechtere Ausfüllung, zumal die Presse, welche in beobachteten Fällen sogar bei kurzen Nieten 1 mm Spielraum zurückläßt.

Wenn man wegen der Erzeugung höherer Klemmwirkung trotzdem an der Pressennietung festhalten will, muß man also ganz besonders auf die Verbesserung der Schaftverdickung bedacht sein.

Ein altes Mittel, das allerdings nur bei langen Nieten anwendbar ist, ist das Abschrecken des Schließkopfes vor dem Schließen des Kopfes. Wie einige Versuche zeigen, ist eine Verbesserung dadurch noch nicht verbürgt. Erwähnt sei hier ein Vorschlag von Dörnen (15), die Nieten nach dem Einziehen elektrisch mit der Lochwandung zu verschweißen. Diese Ausführungen würden aber auch das geringe Nachgeben eines überlasteten Nietes verhindern und damit die Ausgleichung der Nietkräfte und Nebenspannungen in einem Nietanschluß unmöglich machen. Erstrebenswert ist wohl eine satte Nietlochausfüllung, jedoch nicht so, daß auch das äußerst geringe Gleiten, das zum Ausgleich des Kräftespiels der Nieten unter sich erforderlich ist, verhindert wird.

Als weiteres Mittel zur Verringerung der Gleitwege empfahl Dörnen ein besonders sauberes Aufreiben der Bohrungen und Verwendung von genau zylindrischen Nieten mit eng tolerierten Durchmessern, um von vornherein weniger stauchen zu müssen.

Ein sehr beachtenswerter Vorschlag, der inzwischen auch Eingang in die Praxis gefunden hat, z. B. beim Bau der Westbrücke über den Mälarsee in Stockholm, stammt von Gaber (24). In der Erkenntnis, daß beim gleichzeitigen Stauchen des Schaftes und Schließens des Schließkopfes die Schaftstauchung dann aufhört, wenn die Kopfbildung einen gewissen Grad erreicht hat, sucht Gaber (24) die beiden Vorgänge von einander zu trennen und zeitlich nacheinander zu legen. Nach Abb. 22 wird zunächst beim Stauchen (Verdicken) des Schaftes eine Kopfbildung durch eine zylindrische Hülse verhindert. Erst wenn der Schaft genügend gestaucht ist, wird nach Abnehmen der Hülse der Kopf auf die übliche Weise hergestellt. Das Verfahren wurde versuchsmäßig ausgeführt und ergab

mit Pressennietung die erwartete Verbesserung der Nietverdickung. Bei Nieten mit langen Klemmlängen, wo sonst u. U. gedrehte Bolzen nötig würden, ist anzunehmen, daß ein solches Verfahren auch wirtschaftlich sein

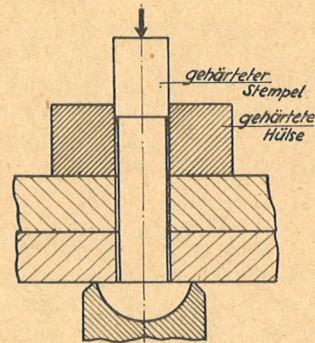


Abb. 22: Trennung der Vorgänge des Schaftstauchens und der Kopfbildung in zwei Arbeitsgänge (nach Gaber): Verhinderung der Kopfbildung durch zylindrische Hülse.

wird. Im Hinblick auf eine gute Klemmwirkung solcher „Edelnieten“ wird es nötig sein, Stauchzeiten und den Wechsel zwischen Stauchstempel und Formstempel so kurzzeitig wie möglich zu halten und so rasch wie möglich den Kopf zu formen, damit nicht ein großer Teil der Längszusammenziehung des Nietes verloren geht.

Schächterle (51) hat nach dem gleichen Prinzip einen Preßluft-Stauchhammer konstruiert, bei welchem die Hülse geteilt ist und durch Preßluft angelegt und entfernt wird. Das neue Nietverfahren ist bei einem größeren Brückenbau praktisch erprobt worden und hat sich gut bewährt in bezug auf Stauchwirkung und Wirtschaftlichkeit.

Es wäre aber falsch, anzunehmen, daß mangelnde Klemmkraft etwa durch satte Lochausfüllung des Nieten zu ersetzen wären. Der Verlauf des Kraftflusses ist bei Kraftübertragung durch Reibung der Bleche aneinander ganz anders und viel günstiger als bei Kraftübertragung durch Nieten und Lochwanddruck. Es ist dies deutlich zu sehen aus dem auf S. 22 beschriebenen Versuch (Abb. 21), wo gezeigt ist, daß bei Reibungsschluß in den Blechen die Spannungen über den Querschnitt recht gleichmäßig verteilt sind, im andern Falle aber, wie zu erwarten, sich bei den Nieten Spannungsschwellen einstellen, die naturgemäß die Dauerfestigkeit erheblich beeinträchtigen müssen [siehe Versuche von Graf (28)]. Insofern besteht auch ein grundsätzlicher Unterschied zwischen Verbindungen aus Nieten und eingepaßten Bolzen zugunsten des Nieten.

Mit Rücksicht auf die Dauerhaftigkeit der Nietverbindungen, insbesondere solchen aus hochwertigem Baustahl, erscheint es außerordentlich wichtig, der Fortbildung der Nietverfahren besondere Beachtung zu schenken

und den Fortschritt durch Versuche zu fördern. Man wird dabei außer gewöhnlichen Versuchen auch solche mit oftmals wiederholter und mit wechselnder Belastung durchführen, wobei zu beachten ist, daß zur Überwindung der Reibung Zeit benötigt wird.

Solche Versuche werden daher zweckmäßig mit niedriger Lastwechselfrequenz durchzuführen sein.

Zum Schlusse seien die Ergebnisse der beschriebenen Versuche in einer Liste kurz und übersichtlich zusammengestellt.

Zusammenstellung

Einfluß von	auf Reibungswiderstand	auf Nietschaftverdickung
Nietungsart	Presse ist besser als Handhammer und als Lufthammer	Hammernietung ist besser als Presse
Niettemperatur	Kirschrot eingezogene Niete sind am besten, doch sind Abkühlungsverhältnisse zu berücksichtigen. Maßgebend ist aber die Niettemperatur bei Aufhören der Nietung. Langdauernde Nietung ist am besten	Hohe Temperatur wahrscheinlich günstig. Versuche nicht bekannt
Nietungsdruck	Nicht wesentlich, soll nicht höher sein als erfahrungsgemäß nötig wegen Einfluß auf die Bleche	Versuche nicht bekannt
Nietungsdauer	Einfluß nicht bedeutend, sofern nur der Niet genügend kalt wurde	Versuche nicht bekannt, wahrscheinlich ohne Einfluß
Nietschaftlänge	Längere Niete sind günstiger	Längere Niete sind ungünstiger, anscheinend besonders bei Pressennietung
Nietstahlsorte	Einfluß nicht einwandfrei geklärt, Kohlenstoffstähle verhalten sich ganz anders als legierte Stähle, bei diesen kann die Klemmkraft gleich Null werden	Nicht geklärt
Blechstahlsorte	Hochwertige Stähle sind ungünstiger, weil glatter	—
Abschrecken des Schließkopfes bei langen Nieten	Einfluß nicht bekannt, wahrscheinlich verschwindend klein bei langen Nieten	Günstiger Einfluß bei sorgfältiger Arbeit, zahlenmäßig aber nicht genügend untersucht
Oberflächenbehandlung der verbundenen Teile durch Anstrich	Widersprechende Versuchsergebnisse, der Einfluß scheint bei hoher Pressung klein zu sein (bei St 37)	—
Verstemmen der Nietköpfe	Recht günstiger Einfluß	—
Zahl der Nieten	Kein Einfluß	—
Nietbildanordnung, Ausbildung des Anschlusses	Symmetrisch ausgebildete Anschlüsse geben stets größere Gleitwiderstände. Anordnung von Beiwinkeln ist ungünstig gegenüber unmittelbarem Anschluß mit gleicher Anschlußnietzahl	—
—	Günstig sind alle konstruktiven Maßnahmen, welche auf zentrischen Kraftangriff und gleichmäßige Kraftverteilung auf die Niete abzielen	—

II. Hauptteil.

Verhalten der Nietverbindung bis zum Bruch.

Versuche im plastischen Bereich.

Bei den bisherigen Betrachtungen traten Verschiebungen der verbundenen Teile bleibender und federnder Art auf, ohne daß Niet oder Blech beträchtliche Formänderungen erleiden mußten. Beim weiteren Ansteigen der Belastungen treten wir in den Bereich, in welchem der Niet auf Scheren und Biegen, das Blech auf Lochwanddruck beansprucht wird, und zwar, wie sich zeigt, unter vorwiegend bleibenden Verformungen.

Solange die Streckgrenze im Stab nicht überschritten wird, werden die Verschiebungen im wesentlichen durch Stabausquellung (Pressung) und Nietdeformation (Scheren und Biegen) bedingt. Ist die Fließgrenze des Stabes überschritten, so liefert der Stab einen wesentlichen Anteil an der Gesamtverlängerung.

Die Formänderungen kann man zerlegen in solche, welche durch das Scheren und Biegen und durch den Lochwanddruck und durch das Fließen des Stabes erzeugt werden.

Wir müssen weiterhin verschiedene Arten von „Fließgrenzen“ unterscheiden:

- a) Fließgrenze des Werkstoffs: jene Kraft, bei welcher der Werkstoff als Zug- oder Druckstab die ersten Fließerscheinungen zeigt (Streck- oder Quetschgrenze).
- β) Fließgrenze des Konstruktionselementes: jene Kraft, bei welcher das betrachtete Element (Lochwand — Bolzen — Stabquerschnitt mit Lochung) die erste Fließerscheinung zeigt.
- γ) Fließgrenze der Verbindung: jene Kraft, bei welcher die Verbindung über ihre ganze Länge gemessen, zu fließen beginnt.

Die Fließgrenze unter a) ist bei weichem Stahl gut kenntlich durch Lastabfall mit plötzlicher großer Verformungsgeschwindigkeit, da das Fließen über den ganzen Querschnitt gleichzeitig eintritt, sonst durch 0,2 % bleibender Dehnung festgelegt (0,2-Grenze).

Die Fließgrenze unter β) ist zwar durch die unter a) bedingt, aber nicht so sehr gekennzeichnet, da das Fließen nur örtlich auftritt.

Die Fließgrenze unter γ) ist durch die unter β) bedingt, jedoch aus einer Reihe solcher zusammengesetzt. Da das Fließen in den verschiedenen Elementen gewöhnlich nicht gleichzeitig eintritt, ist die γ-Fließgrenze noch weniger gut ausgeprägt und schwieriger festzustellen. Wir pflegen sie dort anzunehmen, wo die Längenzunahmen am raschesten Änderungen erfahren: im Kraft-Weg-Diagramm

ist dies der Ort der stärksten Krümmung (s. Abb. 2).

Bei einer größeren Reihe von Versuchen in der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen der Techn. Hochschule Karlsruhe wurden diese Formänderungen durch Messung der Verlängerung über die ganze Verbindung hinweg sowie durch Messung der Verschiebungen zwischen Laschen und Stab festgestellt. Da der Stab selbst infolge seiner Formänderung einen wesentlichen Anteil daran stellt, ist es nicht gleichgültig, an welcher Stelle diese Verschiebungen gemessen werden. Bei unseren Versuchen wurden sie an den Schmalseiten der Mittelstäbe gegen die Breitseiten der Laschen in Höhe der Nietachse gemessen. In Abb. 23 ist eine solche Meßeinrichtung dargestellt. Außer den Verschiebungen wurde noch die Verlängerung der verbundenen Stäbe über die ganze Verbindung hinweg mittelst Spiegelapparaten sowie die Auswölbung der Stirnflächen der Mittelstäbe durch die Nietkraft mittelst Meßtaster gemessen. In Sonder-

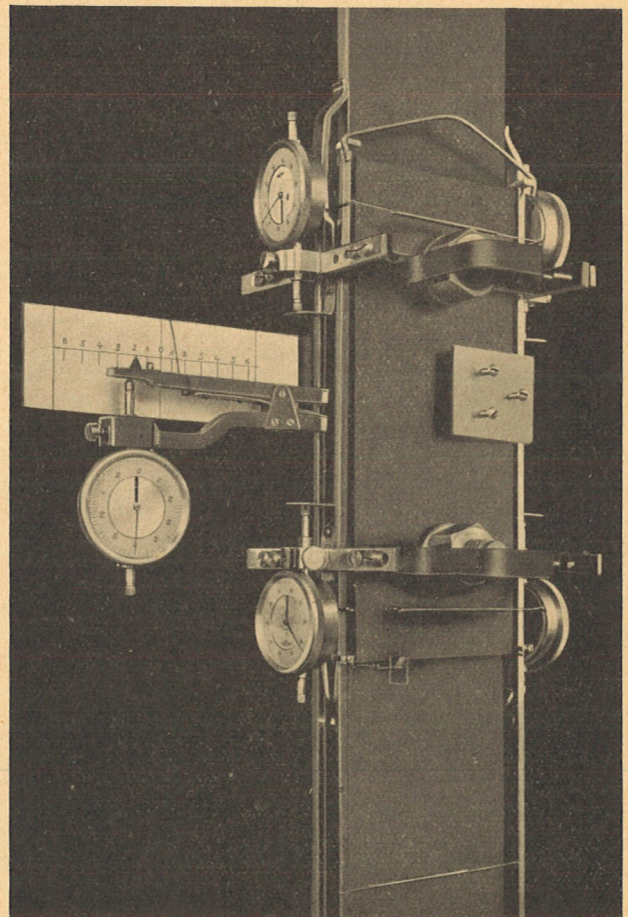


Abb. 23: Durch Bolzen-Laschenverbindung gestoßener Versuchsstab mit Einrichtung zur Ermittlung der Verschiebungen mittelst Meßuhr, der Dehnungen über den ganzen Stoß mittelst Spiegelapparaten, der Entfernung der Stirnflächen der Mittelstäbe mittelst Meßtaster.

untersuchungen wurden noch die Verformungen des Niets und der Lochwandung ermittelt. Bei dem überwiegenden Teil der Versuche kam es darauf an, festzustellen, ob und bei

welchen Spannungen eine ausgesprochene „Fließgrenze“ eintritt. Dabei wird häufig Gelegenheit sein, verschiedene Stahlsorten miteinander zu vergleichen.

I. Einzeluntersuchungen.

a) Scherbeanspruchung des Niets.

Die Beziehung zwischen der Scherkraft P eines Niets und den Verschiebungen Δ der Querschnitte zueinander wurden mit der üblichen Versuchsanordnung nach Abb. 24

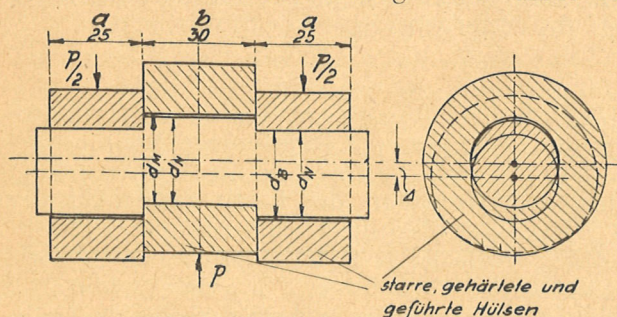


Abb. 24: Übliche Einrichtung für den Scherversuch an Rundstählen und Nieten.

bestimmt: Ein Rohnietschaft liegt mit geringem Spiel in gehärteten Stahlhülsen, die Verschiebung der Hülsen wird in der Richtung der Scherkraft mit Hilfe von Meßuhren gemessen.

Würde der Niet — etwa nach dem Dörnen-schen Vorschlage durch Schweißung — mit seiner Umgebung fest verbunden sein, so würde bei Belastung die Kraft mit sehr geringer Formänderung sehr rasch ansteigen und zunächst rein elastisch wirken. Der Niet hat aber einen kleineren Durchmesser als die Bohrung, und es werden sofort örtliche und plastische Verdrückungen am Niet erzeugt, welche größere Verschiebungen der starren Hülsen verursachen. Beim eingeschliffenen Bolzen ist dies nicht der Fall, er nimmt ohne wesentliche Verschiebung sofort größere Kräfte auf.

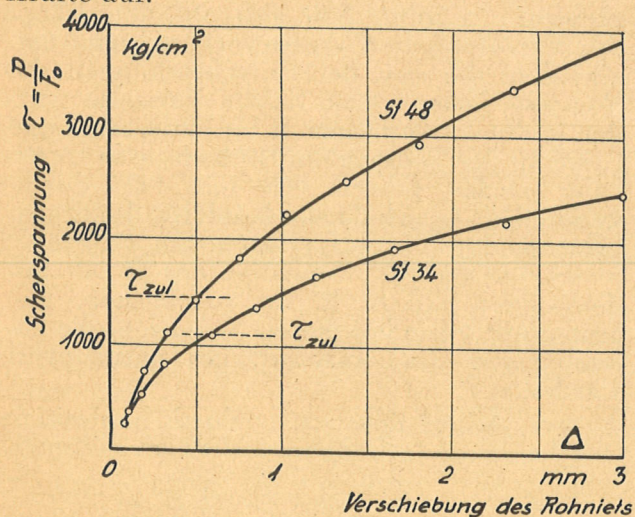


Abb. 25: Scherspannungs-Verschiebungs-Linien von Nieten aus 2 Stahlsorten.

Es ist wenig bekannt, wie sich die Scherverschiebungen der üblichen Stahlsorten verhalten. Abb. 26 zeigt die Verschiebungslinien von Rohnieten mit 21,3 mm \varnothing , in gehärteten Hülsen mit 22 mm \varnothing . Wie zu erwarten war, verhält sich der St 34 weicher als der St 48. Eine ausgesprochene Fließgrenze ist nicht vorhanden.

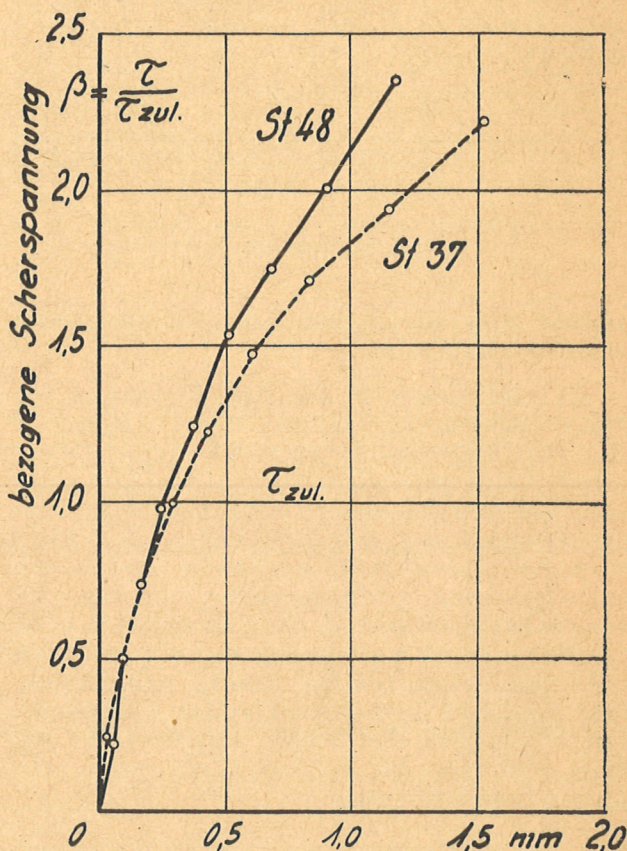


Abb. 26: Verschiebungen beim Scheren von Rundstählen, wobei die Spannungen auf die zulässigen bezogen sind.

Ein ähnliches Ergebnis zeigt Abb. 26. Um den Vergleich zu erleichtern, ist hier an Stelle von τ der Wert $\beta = \frac{\tau}{\tau_{zul}}$ angetragen. Die wahren Scherspannungen betragen also $\tau = \beta \cdot 1120 \text{ kg/cm}^2$ bei St 37 und $\beta \cdot 1460 \text{ kg/cm}^2$ bei St 48. Hier ist deutlich zu sehen, daß der St 37 nicht nur absolut, sondern auch im Verhältnis zu den zugelassenen Scherspannungen weicher ist als St 48. Unter den zulässigen Scherspannungen tritt aber in beiden Fällen etwa die gleiche Verschiebung ein, nämlich von rd. 0,3 mm, die Unterschiede kommen erst bei höheren Spannungen.

In Abb. 27 sind die Verschiebungslinien von je 2 Rohnieten aus St 37 und St 48 dargestellt, wie sie im Versuch mit Einrichtung

nach Abb. 24 aufgezeichnet wurden. Man sieht, daß der Niet bis zum Bruch eine erhebliche Verschiebung aushält, sie beträgt bei diesen Rohnieten von 21,7 mm \varnothing sowohl aus St 37 als aus St 48 etwa 14 mm, also etwa $\frac{2}{3}$ des Durchmessers. Der Niet in der Konstruktion hält diese großen Verschiebungen wegen der zusätzlichen Zugbeanspruchung aber nicht aus, zumal er durch die Verformung beim Ein-

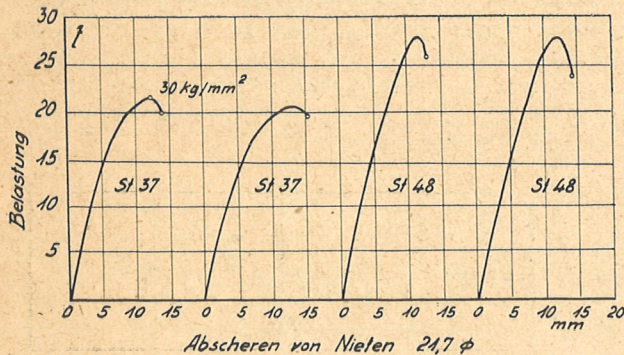


Abb. 27: Verschiebungslinien von Nieten bis zum Bruch, in einer Einrichtung nach Abb. 24 ermittelt.

ziehen und durch die Scherformänderung selbst spröder wird.

Es geht dies z. B. aus Abb. 28 hervor, wo diese Verformung bis zum Bruch nur rd. $\frac{1}{4}$ des Durchmessers beträgt. Der eine Querschnitt ist bereits abgescher, der andere steht kurz vor dem Abscheren. Die Abbildung und die Beobachtung zeigen deutlich, daß nicht etwa die ganzen Querschnitte sich aneinander vorbeischieben. Vielmehr findet zunächst eine plastische Verdrückung statt, an welcher nicht nur der eigentliche Scherquerschnitt, sondern auch die angrenzenden Fasern teilnehmen. Das geschieht so lange, bis das Formänderungsvermögen des Stahls aufgebraucht ist, dann erst tritt die Trennung ein durch Abschieben und Biegung.

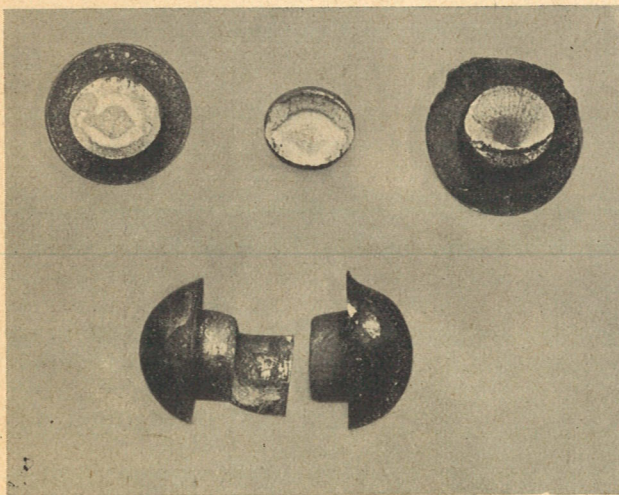


Abb. 28: Bis zum Bruch abgescherter Niete.

b) Der Lochwanddruck und seine Auswirkungen.

Nach Beendigung des Gleitweges liegt der Niet eben mit Linienberührung an der Lochwandung. Die (theoretisch unendlich große) Flächenpressung erzeugt sofort ein plastisches Ausbreiten der Lochwandung und des Niets, welche solange fortschreitet, bis ein Gleichgewichtszustand sich einstellt. In diesem Augenblick wird die Flächenpressung, die wir nunmehr als Lochleibungsdruck oder kürzer als „Lochwanddruck“ bezeichnen, wenig höher als die Quetschgrenze des Stahls sein.

Bei einem das Loch von vornherein vollständig und gleichmäßig ausfüllenden eingeschliffenen Bolzen stellt sich nach theoretischen Erwägungen eine solche Spannungsverteilung ein, daß der in die Krafrichtung fallende Größtwert des Lochwanddrucks das 1,27fache der über die Lochdurchmesser gleichmäßig verteilt gedachten mittleren Druckspannung ist (Gehler 27). Aber schon die gleichmäßig verteilt gedachte zulässige Lochleibungsspannung gleich der 2,5fachen zulässigen Zugbeanspruchung liegt weit (rd. 50%) über der Quetschgrenze σ_Q . Die Quetschgrenze des Materials wird also örtlich unvermeidlich überschritten, sobald einmal die Gleitgrenze überwunden ist. Mit steigender Belastung wird der Fließbereich immer größer, die Verbindung längt sich weiter bleibend. Das seitliche Abfließen der gequetschten Lochwand ruft im Niet zusätzliche Zugkräfte hervor, welche wiederum die Reibung zwischen den verbundenen Teilen vergrößert. Da gleichzeitig auch die Scherspannungen im Niet zunehmen, wird nach mäßiger Überschreitung der Gleitgrenze und nach verhältnismäßig kleiner Verlängerung wieder ein Gleichgewichtszustand hergestellt.

Die Frage, bei welchen mittleren rechnerischen Lochleibungsdrücken die ersten bleibenden Verdrückungen von Bedeutung auftreten, und wann das Fließen der Verbindungselemente beginnt, läßt sich auf dem Wege des Versuchs bei Bolzenverbindungen entscheiden, die sich bei Unterbrechungen des Versuchs lösen lassen. Solche Versuche wurden in der Versuchsanstalt für Holz, Stein und Eisen an der Technischen Hochschule in Karlsruhe in den Jahren 1926 und 1927 durchgeführt, als es sich darum handelte, die Eigenschaften der neu aufgekommenen Baustähle St 48 und St Si¹⁾ (Vorläufer des St 52) mit denjenigen des St 37 zu vergleichen. Insbesondere sollte bei diesen Versuchen die zulässige Höhe des Lochwanddrucks nachgeprüft werden.

Zwei Mittelstäbe waren durch beidseitige Überlaschung verbunden und durch zylindri-

¹⁾ Es waren zwei Sorten von St Si zur Prüfung vorgelegt, ein im Boßhardt-Ofen (Si Bo) und ein im Martin-Ofen (Si Ma) hergestellter.

sche Bolzen mit 100 mm Randabstand zusammengehalten. Die Bolzen hatten 23 mm Durchmesser, waren genau in die Bohrungen eingeschliffen und mit Handgriffen zum Herausziehen versehen. Die Mittelstäbe waren um das Loch herum hochgradig poliert, um das Auftreten von Fließfiguren beobachten zu können. Ferner war ein System von konzentrischen Kreisen und Radialstrahlen eingritz, an welchen durch Ausmessung die plastischen Verzerrungen der Oberfläche zu verfolgen waren. Die Versuche gingen so vor sich, daß die Stäbe in einer 50-t-Zerreißmaschine stufenweise be- und entlastet wurden. Nach jeder Entlastung wurden die Stäbe auseinandergenommen, und es wurde die Wirkung des Lochleibungsdruckes festgestellt, nämlich:

1. Form und Größe der bleibenden Lochausweitung in der Richtung der Strahlen und die bleibende Verzerrung der Oberfläche um das Loch herum, ersteres mit Hilfe eines eigens hierzu gebauten Meßuhren-Tasters mit $\frac{1}{1000}$ mm Ablesegenauigkeit, letzteres mit Hilfe einer Meßlupe mit $\frac{1}{100}$ mm Ablesegenauigkeit.

2. Die bleibende Verdickung des Mittelstabes um die Bohrung herum in den Schnittpunkten der Kreise und Strahlen mit einem Meßuhren-Dickentaster mit $\frac{1}{1000}$ mm Ablesegenauigkeit.

3. Das Auftreten von Fließfiguren.
4. Die Verdrückungen an den Bolzen.
5. Das Ausbiegen der Stab-Endflächen.

Um dabei das Verhalten der verschiedenen Baustähle, welche sich durch verschiedene Festigkeit und verschiedene Höhe der zulässigen Beanspruchung unterscheiden, bequem untereinander vergleichen zu können, wurden jene Formänderungen miteinander verglichen, welche zu gleichen Verhältnissen

$$\frac{\text{Lochleibungsdruck } \sigma_l}{\text{zulässige Zugspannung } \sigma_{zul}} = \alpha$$

gehören.

Die Ergebnisse dieser Karlsruher Versuche sind nachstehend kurz und im Auszug wiedergegeben.

1. Form und Größe der bleibenden Lochausweitung.

Da die Meßgenauigkeit nur rd. $\frac{2}{100}$ mm betrug wegen der unvermeidlichen Fehler beim Ansetzen der Instrumente, konnte die Lochausweitung erst von dem Augenblick an gemessen werden, wo die Elastizitätsgrenze deutlich überschritten war. Die Locherweiterung war natürlich in der Kraftrichtung am größten und das Bild der Verteilung der Eindrückungen über den Umfang war im wesentlichen das gleiche, das sich bei der Ver-

schiebung zweier gleicher Kreise (Bolzen und Bohrung) ergibt.

Der Verlauf der Kraft-Ausweitungslinie in der Kraftrichtung — als die größte — ist in Abb. 29 für die 4 untersuchten Stähle dargestellt, wobei Stab und Bolzen jeweils aus dem gleichen Material bestanden. Die Linien zeigen im allgemeinen ein stärkeres Anwachsen der bleibenden Locherweiterungen bei $\alpha = 2$, wobei die Art des Stahls gleichgültig zu sein scheint. Dagegen zeigen die festeren Stähle relativ kleinere Erweiterungen als die weicheren¹⁾. Abgesehen von St Si Ma, bei welchem erst zu $\alpha = 2$ die ersten bleibenden Erweiterungen gemessen wurden, treten schon früh bleibende Verformungen auf. Obwohl die Bolzen gut in die Bohrung eingepaßt waren, muß also die Quetschgrenze des Stahls bei $\alpha = 1$, d. h. bei der zulässigen Spannung schon örtlich überschritten worden sein. Von

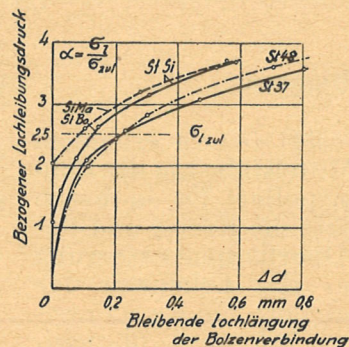


Abb. 29

Abb. 29: Bleibende Lochlänge bei Bolzenverbindungen (Stab und Bolzen aus gleichem Werkstoff).

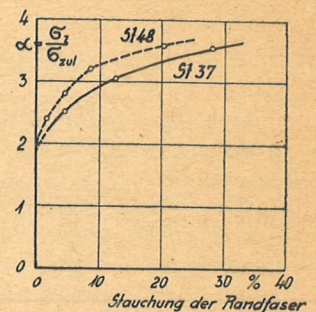


Abb. 30

Abb. 30: Stauchung der Lochrandfaser auf 0,5 mm Breite gemessen, in Richtung der Bolzenkraft.

$\alpha = 2$ ab aber muß sich das Fließen über den ganzen Lochumfang ausgebreitet haben, denn hier beginnen die Ausweitungen stark anzuwachsen: hier ist die eigentliche „Fließgrenze“ des Lochwanddrucks, nach welcher die zulässige Beanspruchung sonst bestimmt zu werden pflegt. In bezug auf die Ausweitung der Bohrungen könnten also z. B. die Vorschriften für St 37 auf die hochwertigen Baustähle übertragen werden, sofern die Sicherheit gegen Überschreitung dieser Fließgrenze bei diesen Stählen gleich sein soll.

2. Die Stabverdickung.

Das Ausquellen sollte festgestellt werden, um sich ein Bild darüber zu machen, wie weit sich die plastische Zone erstreckt. Nach früheren Vorversuchen war zu erwarten, daß sich ein festumrissenes Gebiet plastischer Ver-

¹⁾ Die Versuche nach Findeisen (21) stimmen sehr gut mit unseren Ergebnissen überein.

formung herausbilden werde. Tatsächlich entsteht eine solche Zone, in der Kraftrichtung etwa gleich dem Nietdurchmesser lang, schon bald nach dem Auftreten der ersten Fließerscheinungen, ohne daß sie sich bei weiterer Verformung wesentlich erweitert. Die gesamte Formänderung wird also fast ausschließlich zur Verdickung der Fließzone verbraucht und nicht zur Erweiterung in der Länge oder Breite: das Material weicht quer zur Kraft aus. Die Dickenzunahme, an der dicksten Stelle gemessen, betrug zu $\alpha = 3,5$ bei St 37 : 0,28 mm, bei St 48 : 0,27 mm, beide Stähle verhielten sich also gleich.

Aus Abb. 30 ist ersichtlich, wann die plastischen Formänderungen beginnen. Es ist hier die Stauchung einer 0,5 mm breiten Ringzone in der Kraftrichtung in % der ursprünglichen Breite dargestellt. Bei $\alpha = 2$ beginnt das Fließen; St 48 erscheint relativ etwas fester als St 37.

3. Fließfiguren.

Um die ersten Fließfiguren erkennen zu können, waren die Mittelstäbe um die Bohrungen herum hochglanzpoliert. Da an diesen Stellen jedoch gleichzeitig die Kreise und Radien zur Messung der Oberflächenverzerrung angerissen waren, war das Erkennen der ersten Fließfiguren erschwert. Sie waren erstmalig etwa bei $\alpha = 2$ zu erkennen, übereinstimmend mit der aus den Lochausweitungen und Lochwandstauchung erkenntlichen Fließgrenze. (Findeisen gibt an $\alpha = 1,62$ bei St 37 und $\alpha = 1,44$ bei St 48.)

4. Verdrückung der Bolzen.

Es konnte beobachtet werden, daß außer dem Abscheren der Kreisflächen auch bleibende Verdrückungen des Bolzens (Unrundwerden) eintreten, da der Bolzen an nachgie-

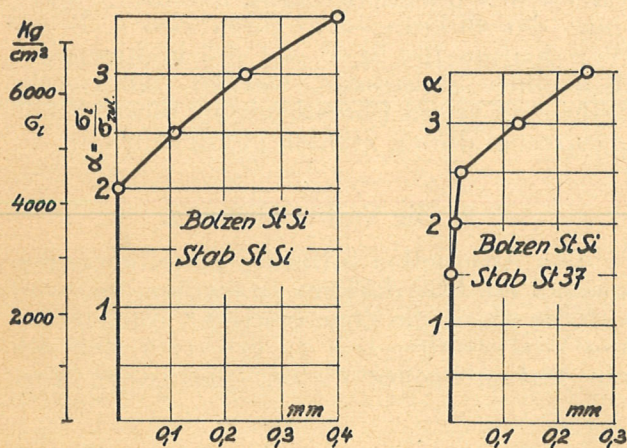


Abb. 31: Abnahme des Bolzendurchmessers in der Kraftrichtung.

biger, fließfähiger Lochwand anliegt. Die Dicke des zylindrischen Bolzens nahm in der Kraftrichtung ab, senkrecht dazu zu. Ein Teilergebnis unserer Messungen ist aus Abb. 31 ersichtlich. Das Fließen beginnt hier sehr deutlich bei rd. 4500 kg/cm^2 und ist natürlich wenig vom Material des Stabes abhängig.

5. Ausbiegung der Stabendflächen.

Einen weiteren Grund für die Verschiebung der Laschen gegen die Mittelstäbe bildet die Ausbiegung der Endfläche nach Ab-

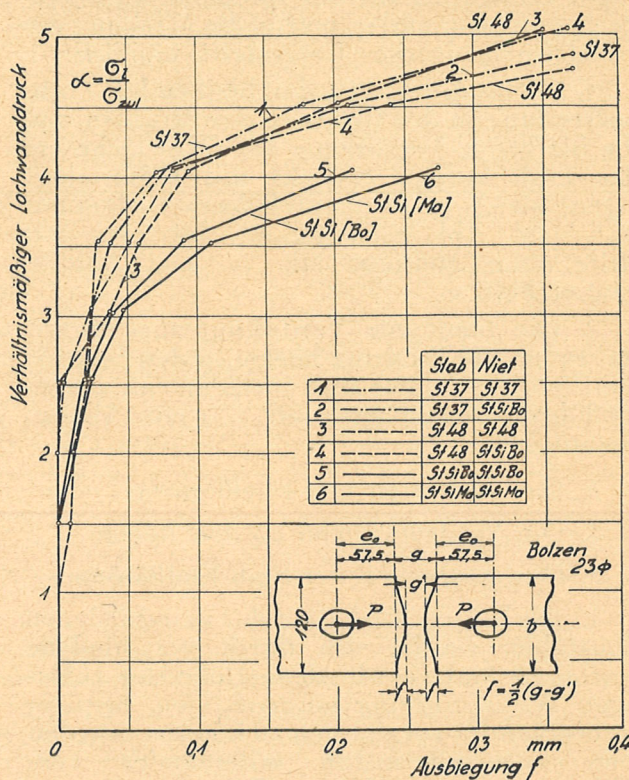


Abb. 32: Ausbiegung der Endflächen der Mittelstäbe infolge der Bolzenkraft.

bildung 32. Diese ist abhängig vom Lochwanddruck σ_1 , von der Breite b und von dem Randabstand e_0 . Sie wurde gemessen mit einem in Abb. 23 sichtbaren Taster mit Meßuhr, der zwischen die Endflächen der Mittelstäbe eingeschoben wurde. Abb. 32 zeigt ein Teilergebnis unserer Versuche mit Bolzenverbindungen, wobei wiederum verschiedene Stahlsorten verglichen sind. Während St 37 und St 48 sich kaum unterscheiden, erreicht St Si rascher das Gebiet des Fließens. Oberhalb $\alpha = 4,0$, bei St Si schon oberhalb $\alpha = 3,5$ beginnen die Ausbiegungen gefährlich rasch zu wachsen, sie betragen bei $\alpha = 2,5$ allerdings nur rd. 0,02 mm. Bei Nieten ergaben sich wegen der Mitwirkung der Reibung nur unwesentlich geringere Werte.

2. Die Verbindungen.

In der Bolzenverbindung werden sich die Formänderungen, welche vorhin getrennt untersucht wurden, ungehindert zusammensetzen. Die bleibende Verlängerung einer Meßstrecke, welche über die Verbindung hinweg reicht, wird gegenüber dem freien Stab vergrößert, um die bleibende Gesamtverschiebung, bestehend aus den bleibenden Einzelverschiebungen durch Scheren, Biegen und Verdrücken des Bolzens, durch Lochausweitung infolge Wanddruck und durch Stabausbiegung.

Dazu kommt bei normal bemessenen Stäben noch eine Verlängerung durch Überschreiten der Streckgrenze im gelochten Stabquerschnitt.

In der entsprechenden Nietverbindung sind die Verschiebungen kleiner wegen der Klemmung des Niets. Die Reibungskraft des Niets kann aber nicht einfach von der Gesamtzugkraft des Versuchsstabes abgezogen werden, um zu den gleichen Verschiebungen wie bei der entsprechenden Bolzenverbindung zu gelangen, denn der Unterschied der Kräfte zu gleichen Verschiebungen beruht nicht auf Reibung allein, sondern auch darauf, daß in der Nietverbindung das Ausquellen der Lochränder mehr behindert ist, die Lochlängen also kleiner sind als beim Bolzen, und daß die Verbiegung des Niets infolge der Einspannung durch das Anliegen der Köpfe verringert wird.

a) Versuche mit Niet- u. Bolzenverbindungen aus verschiedenen Baustählen.

Unsere Versuche bezweckten eine richtige Beurteilung der Sicherheit der Verbindungen aus den Baustoffen St 37, St 48, St Si Bo, St Si Ma (über die St Si-Sorten s. Anm. S. 28). Es waren Bedenken zu klären, welche dagegen laut geworden waren, daß bei den hochwertigen Stählen gleichgroße Lochleibungsspannungen, bezogen auf die zulässige Zuganstrengung, zugelassen waren.

Außer den bereits beschriebenen Versuchen an den Elementen Lochwand und Bolzen wur-

den genietete Versuchsstücke aus verschiedenen Baustählen geprüft mit einem Niet von 23 mm \varnothing und Stabbreiten von 70 oder 120 mm.

Abb. 33 zeigt rechts den Versuchsstab mit 70 mm Breite.

Bei diesen Stäben wurden die Verschiebungen der Laschen gegen die Schmalseiten der Mittelstäbe in den durch die ursprüngliche Lage der Niets gehenden Querschnitten gemessen.

In Abb. 33 sind die α/δ -Linien aus den 1927 durchgeführten Versuchen mit Nietverbindungen wiedergegeben. Sie zeigen die gesamten und federnden Verschiebungen getrennt bei der ersten Belastung. Man sieht deutlich die Gleitgrenze bei St 37 höher ($\alpha = 1,5$ bis 2,0) liegen als bei den übrigen Stählen ($\alpha = 0,5$). Die Linien der federnden Verschiebungen laufen etwas gekrümmt. Die federnden Verschiebungen sind kleiner als die bleibenden.

Eine „Fließgrenze der Verbindung“ war in einigen Fällen deutlich zu erkennen. Sie lag bei 120 mm Stabbreite (nicht gezeichnet) bei $\alpha \geq 4$ und war hier durch die Verbindung verursacht. Bei 70 mm Stabbreite lag sie schon bei $\alpha \geq 3,5$, war hier aber vorwiegend durch das Fließen des Stabes verursacht, da hier die Streckgrenze im gelochten Querschnitt überschritten wurde.

Die Verschiebungen bei $\alpha = 2,5$ ergeben sich wie folgt:

Verschiebungen in mm: bei $\sigma_1 = 2,5 \sigma_{zul}$

Baustoff		St 37	St 48	St 52 (Si Bo)	St 52 (Si Ma)
Stabbreite 120 mm	gesamt	0,09	0,13	0,33	0,33
	federnd	0,02	0,12	0,07	0,07
Stabbreite 70 mm	gesamt	0,18	0,40	0,35	0,28
	federnd	0,02	0,07	0,09	0,07

Diese Werte treten noch unterhalb der Stabfließgrenze auf und zeigen, daß die federnden Werte weitaus am kleinsten bei

Niet und Stab waren immer aus dem entsprechenden Baustoff

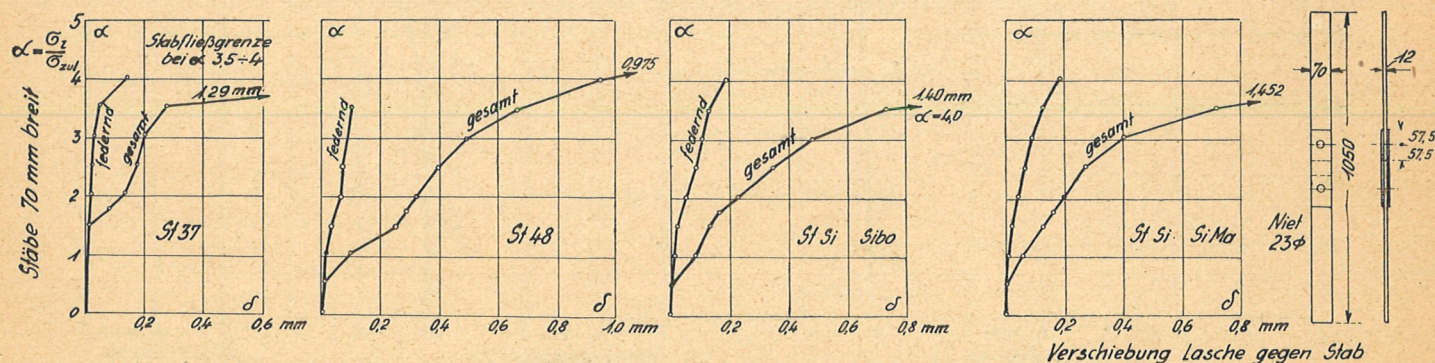


Abb. 33: Gesamte und federnde Spannungs-Verschiebungs-Linien für verschiedene Baustähle mit Niets aus entsprechenden Stählen.

St 37 sind, auch in bezug auf die Gesamtverschiebungen verhält sich St 37 weitaus am günstigsten; es schließt dies folgerichtig an die bereits beschriebenen Beobachtungen, die an der Lochformänderung und den Nietten gemacht wurden.

Das Verhalten von Verbindungen bei noch höheren Lasten läßt sich aus Abb. 34 ersehen. Es sind hier 120 mm breite Verbindungen, ähnlich wie vorhin, aber mit 23 mm starken konischen Bolzen (Randabstand 2,5 d, Anzug 1:100) beobachtet worden; die Verschiebungen gehen bis zu 5 mm. Die α -Werte sind hier im Maßstabe der Spannungen aufgetragen, d. h. gleichen Ordinaten entsprechen gleiche Lochleibungsdrücke. Eine Verschiebung von etwa 1 mm trat auf bei

Stabwerkstoff	α	σ_1 kg/cm ²	Vielfaches der Streckgrenze
St 37	4,0	5600	2,3
St 48	3,5	6400	1,9
St Si	3,0	6300	1,6

Man sieht: Je fester der Werkstoff (höhere Streckgrenze und Zugfestigkeit), um so weniger darf die Fließgrenze überschritten werden, wenn man beispielsweise 1 mm Verschiebung zulassen will.

Auffallend ist, daß es selbst für die großen Verschiebungen fast gleichgültig war, aus welchem Werkstoff der Bolzen bestand, ausschlaggebend war das Stabmaterial und nicht der Bolzen.

Nimmt man die „Fließgrenze der Bolzenverbindung“ dort an, wo die Linien ihr größte Krümmung zeigen, d. h. sich plötzlich rasch von der α -Achse fortbewegen, so liegt diese

bei St 37 etwa bei $\alpha = 3,5$

St 48 $\alpha = 3,0$

St Si $\alpha = 2,5$

Diese Grenze ist allerdings nicht deutlich ausgebildet. Es zeigt sich aber doch, daß bei gleichmäßiger Zulassung von $\alpha = 2,5$ für alle Baustähle eine Sicherheit der Bolzenverbindung gegen Überschreiten der Fließgrenze bei St Si nicht mehr vorhanden ist. Diese Feststellung ist sinngemäß auf die Nietverbindung zu übertragen, wobei für die hochwertigen Baustähle die bereits besprochene niedrige Gleitgrenze und der größere Gleitweg erschwerend ins Gewicht fällt. Sie ist auch durch den gleichartigen Ausfall der in München und Dresden (Findeisen 21) durchgeführten Parallelversuche genügend erhärtet.

Bei einem Teil der Versuche wurden die genieteten Stäbe auf Anregung von Professor Gaber ganz langsam zwölfmal bis zu $\sigma_1 = 2,5 \cdot \sigma_{zul}$ belastet. Schon nach wenigen Lastwiederholungen auf $\alpha = 2,5$ verhielt sich die erstmalig so weiche einfache Nietverbindung starr und vollkommen federnd.

Abb. 35 zeigt je ein typisches Beispiel für St 37 und St Si. Diesmal sind nicht Verschiebungen dargestellt, sondern Verlängerungen einer 335 mm langen über den Stoß reichenden Meßstrecke. Man sieht wieder sehr deutlich die Gleitgrenze zu $\alpha = 2,0$ bei St 37, aber zu $\alpha = 0,5$ bei St Si. Natürlich treten Stabdeh-

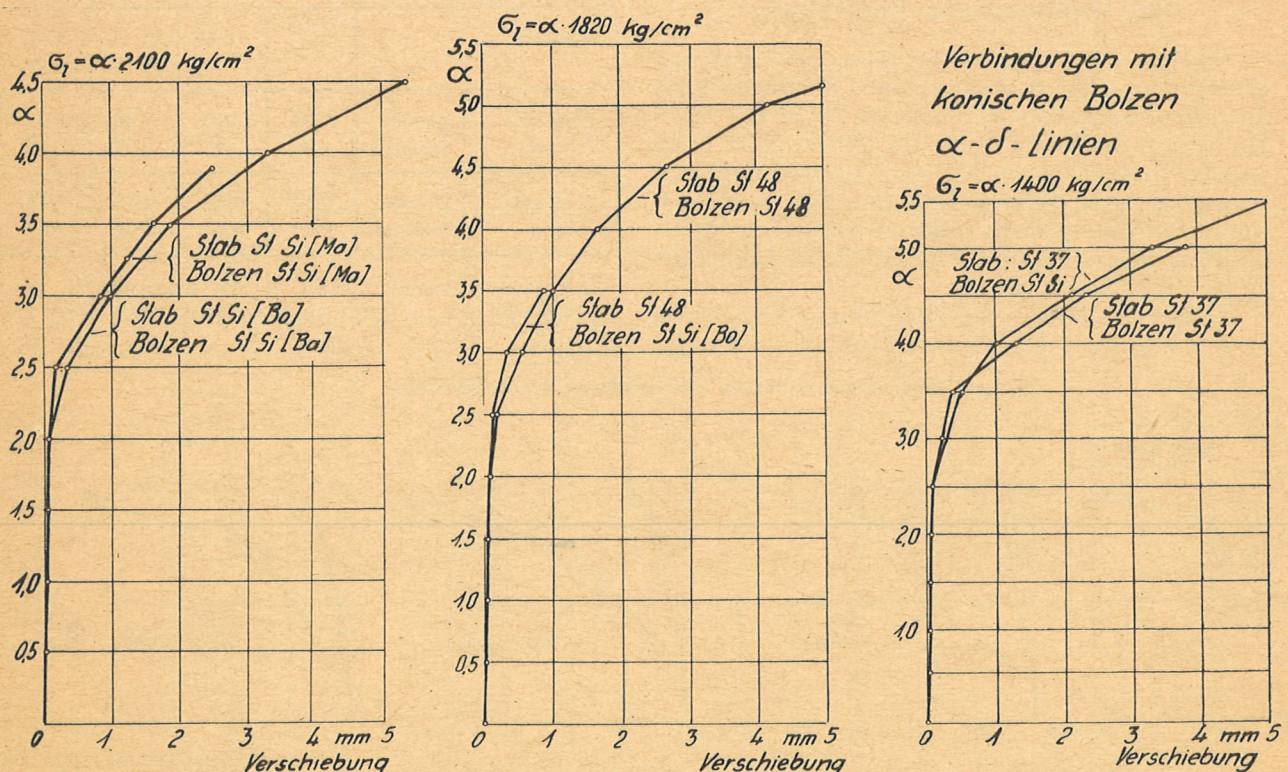
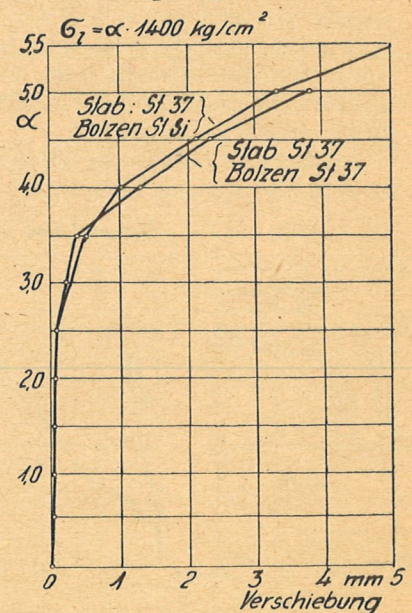


Abb. 34: Spannungs-Verschiebungs-Linien für Bolzenverbindungen bei erstmaliger Belastung.

Verbindungen mit
konischen Bolzen
 α - δ -Linien



nungen schon vorher ohne Zutun der „Verbindung“ auf. Die Federung entspricht anfänglich fast ganz genau dem mit $E = 2\,100\,000\text{ kg/cm}^2$ eingezeichneten Maße, d. h., die Einschaltung der Verbindung beeinflusst — so lange die Gleitgrenze nicht überschritten ist — nicht das elastische Verhalten des Stabes: es verhält sich nahezu so, als ob die Niete und Laschen nicht vorhanden wären.

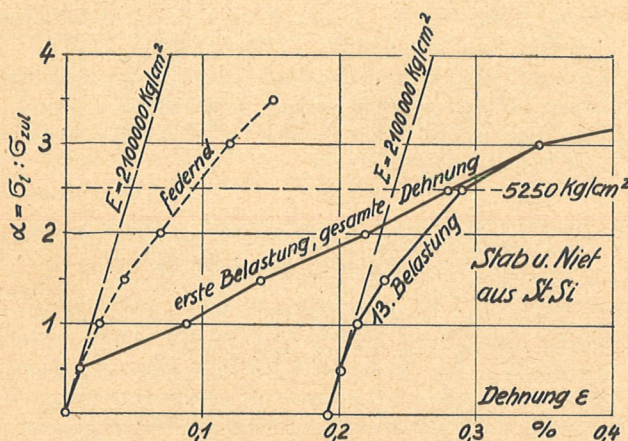
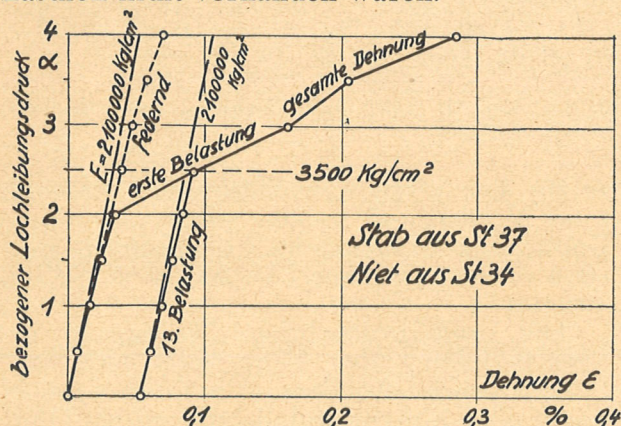


Abb. 35: Spannungs-Dehnungs-Linie eines genieteten Stabes bei der 1. und 13. Belastung auf $\sigma = 2,5 \sigma_{zul}$.

Deutlich machte sich beim Entlasten von $a = 2,5$ die bleibende Verschiebung als Dehnungsrest bemerkbar: 0,053% bei St 37, aber 1,93% bei St 52. Während zwölfmaliger Belastung nahm die Dehnung kaum weiter zu. Die a/ϵ -Linie für die 13. Belastung ist ebenfalls in Abb. 35 gezeichnet. Das elastische Verhalten der Verbindung aus St 37 (St 34-Niet) deckt sich nun fast genau mit dem des ungestoßenen Stabes, die Verbindung aus St Si aber ist — obwohl auch rein federnd — erheblich weicher und zeigt keine lineare Beziehung mehr zwischen Kraft und Verlängerung.

Abb. 36 zeigt nun wieder die Verschiebungslinien der gleichen Stäbe wie Abb. 33, jedoch nach zwölfmaliger Vorbelastung und in vergrößertem Maßstabe. Man erkennt, daß die Linien bei St 37 im großen und ganzen geradlinig verlaufen, bei hochwertigen Stählen aber gekrümmt, indem die Verschiebungen rascher wachsen als die Spannungen.

Bei $a = 2,5$ (zulässigem Lochleibungsdruck) betrug die Verschiebung nach wiederholter Belastung

	bei St 37	St 48	St Si (Bo)	St Si (Ma)
120 mm Stabbreite	0,026	0,12	0,096	0,083
70 mm Stabbreite	0,020	0,076	0,084	0,070
im Mittel bei St Si			0,083 mm	
bei St 37			0,023 mm	

Also bringt auch hier im federnden Bereich nach dem Einspielen der Verbindung der hochwertige Baustahl ganz erheblich größere Formänderungen, als den Spannungen rechnerisch entspricht.

Allerdings wird die durch die Verbindung geschaffene Abweichung von dem federnden Verhalten des freien Stabes um so kleiner, je größer die Maßstrecke ist. Ein 1 m langer Stab aus St 37, welcher mit 1000 kg/cm^2 angespannt ist, dehnt sich z. B. um 0,05 cm; hiergegen verschwindet der federnde Beitrag der St 34-Nietverbindung mit rd. 0,002 cm fast völlig, der bleibende Betrag von 0,01 cm bedeutet dagegen schon 20% der Gesamtdehnung. Bezüglich der Genauigkeit der Annahmen bei der Spannungsberechnung von statischen Systemen sind somit die durch die Nietverbindung bedingten bleibenden Dehnungen viel schädlicher als die federnden.

b) Wiederholte Belastung von Nietverbindungen.

Die ersten Versuche mit wiederholter Belastung an Nietverbindungen stammen von Preuß (36). Dieser hat unter seinen Versuchskörpern 2 Nietverbindungen wiederholt nacheinander mit einer bestimmten Höchstlast belastet und darnach wieder bis auf 1 t entlastet. Bei jeder Be- und Entlastung ergab sich schließlich ein federnder Gleitweg von rd. 0,01 mm. Der Verlauf dieses Weges, ob geradlinig oder gekrümmt, ist nicht festgestellt.

Als nächster hat wohl Gaber solche Versuche angestellt. Die Versuchsstücke wurden zwölfmal hintereinander auf $\sigma_{1\text{ zul}}$ belastet. Die Zahl der Lastwechsel ist also gering.

Die Versuche sind bereits früher mit Ergebnissen erwähnt. Sie sollten zeigen und haben gezeigt, in welcher Richtung die σ/δ -Linien eine Änderung erfahren und welchen Grenzwerten sie zustreben. Sie sollten ferner den grundlegenden Unterschied darlegen, welcher zwischen einer erstmalig und einer wiederholt belasteten Nietverbindung in bezug auf das Verhalten von Niet und Lochwand besteht. Eine größere Reihe von Dauerversuchen mit zahlreichen Nieten ist z. Zt. in Karlsruhe in Vorbereitung, um das Verhalten großer Nietgruppen zu studieren.

Eigentliche Dauerversuche, bei welchen auch die Verlängerung einer über den Stoß reichen-

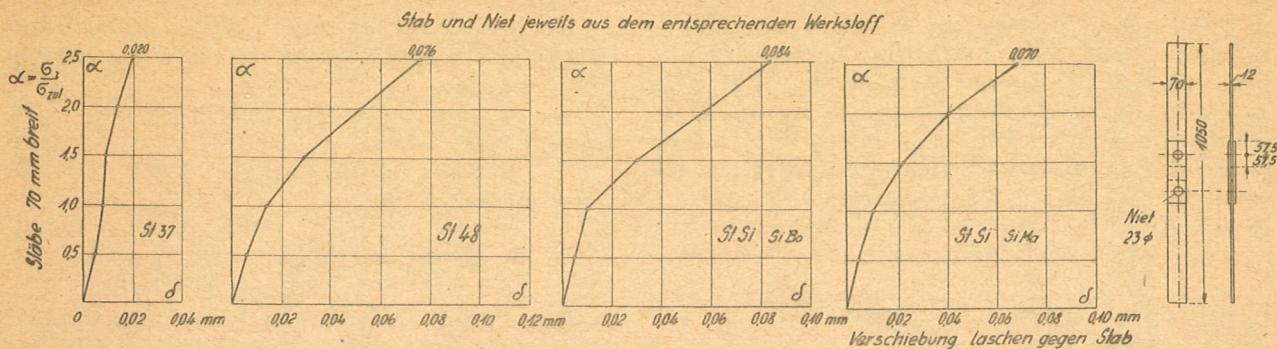


Abb. 36: Spannungs-Verschiebungs-Linien der gleichen Stäbe wie bei Abb. 33, jedoch nach vorausgegangener 12maliger Belastung und in größerem Maßstabe.

den Meßstrecke gemessen wurde, hat Schächterle (43, 44) beschrieben. Es wurden hier Stäbe aus St 37 mit Nieten aus St 34 geprüft. 16 Stäbe wurden dem gewöhnlichen Zugversuch ausgesetzt, 16 Stäbe aber einer pendelnden Belastung ausgesetzt. Die untere Lastgrenze war sehr gering, die obere wurde immer dann, wenn eine Zunahme der gesamten Verlängerungen über die Meßstrecke nicht mehr zu erkennen war, um eine bestimmte Stufe erhöht. Die P/λ -Linien beim Dauerversuch lagen stets unter denjenigen des gewöhnlichen Zugversuches, d. h. die pendelnde Belastung brachte stets größere Verlängerung der Meßstrecke. Weiter stellte sich die anfangs sehr steil aufgerichtete P/λ -Linie im Laufe der Versuche immer flacher. Die Verbindung wurde in der Federung weicher; dementsprechend nahmen auch die federnden Dehnungen rascher zu. Auch bei einigen anderen Versuchen ist dies deutlich zu erkennen, und zwar liegt der Knickpunkt beim Dauerversuch durchweg niedriger als beim gewöhnlichen Zerreißversuch. Die Versuche gewähren einen sehr guten Einblick in das Dehnungsverhalten der Nietverbindungen bei wiederholter Belastung.

Die bis zum Bruch aufgetretenen Dehnungen der Meßstrecke scheinen beim Dauerversuch erheblich kleiner zu sein als beim gewöhnlichen Zerreißversuch. Im Verein mit der geringeren Tragkraft würde dies eine starke Abminderung der Formänderungsfähigkeit oder des Arbeitsvermögens bedeuten. Deutlich ist dies auch aus den Brucherscheinungen ersichtlich (Stahlbau 1930, S. 291 und 293). Die dort sichtbare große Locherweiterung kurz vor dem Bruch ist weniger durch das Einfressen der Niete als durch das Fließen des Bleches zu erklären.

Weitere Versuche sind von Graf (28) beschrieben. Die Versuchsstücke waren zweireihig durch 6 Nieten $17 \varnothing$ auf jeder Stoßseite verbundene 190 mm breite Bleche. Auch hier finden sich die gesamten Verlängerungen einer über den ganzen Stoß reichenden Meßstrecke bei wiederholter Belastung größer als bei einfacher, und auch die federnden Werte sind etwas größer ausgefallen. Die σ/λ -Linie

zeigte bei oftmals wiederholter Belastung kurz oberhalb 23 kg/mm schon eine starke Umbiegung (dynamische Fließgrenze), während sie bei statischer Last weiter geradlinig ansteigt.

Die außerordentliche Bedeutung der Klemmwirkung der Niete zeigt sich beim Dauerversuch besonders schön. Nach Graf (28) ergab eine Nietverbindung mit gutem Gleitwiderstand einen Bruch im vollen Stab neben dem Niet trotz Nietlochverschwächung bei 786 400 Lastwechseln zwischen 0,5 und 22,7 kg/mm² Stabzugspannung. Interessant ist, daß beim Dauerversuch unter Umständen Dauerbiegungsbrüche im Nietschaft zwischen den Scherflächen auftreten.

c) Die Reibung in Nietverbindungen bei höheren Lasten bis zum Bruch.

Mit der Verschiebung der verbundenen Teile entstehen durch die Seilwirkung neue Zugkräfte im Niet, welche die Bleche erneut gegeneinander pressen und neue Reibung erzeugen. Dazu kommen weitere Klemmwirkungen durch das seitliche Ausweichen des Stabmaterials der Lochrandstauchung.

Über die Wirkung dieser reibenden Kräfte hat — m. W. als einziger — Engesser (18) Versuche angestellt mit Stäben, welche im Niet und mit solchen, welche im Stab zu Bruch gingen.

Vergleichsversuche mit einnietigen ein- und zweischnittigen Verbindungen, welche warm oder kalt genietet waren, ergaben annähernd die gleiche Nietscherfestigkeit. Die anfänglich vorhandene Reibung infolge der Wärmespannungen im Niet beeinflussten also die Bruchlast nicht mehr; die später infolge Niet- und Lochverformung auftretenden Reibungskräfte aber sind in beiden Fällen gleich groß.

Versuche mit warm geschlagenen Verbindungen wurden auch mit aufgehobener Reibung durchgeführt. Es wurden beim Nieten mit dem Setzkopf rd. 3 mm starke, geteilte Blechstücke gelegt, die später durch so dünne ersetzt wurden, daß Pressung nicht vorhanden war. Sie zeigen zwar „etwas geringere

Werte; doch sind letztere insofern nicht völlig zutreffend, als infolge der Herstellungsweise der Probestücke die Nietköpfe z. T. nicht völlig anlagen, ein geringes Auseinanderklaffen der Stäbe beim Festigkeitsversuch eintrat und hierdurch eine zusätzliche Biegungsspannung der Nietbolzen verursacht wurde. — Hiernach findet ein nennenswerter Festigkeitsverlust eines sonst gut geschlagenen Nietes beim Losewerden nicht statt . . . Es ist aber auch wohl denkbar, daß tatsächlich das teilweise Fehlen der durch die ausquellenden Lochränder bedingten Reibung den Festigkeitsabfall verursacht hat, welcher allerdings hier nur $0,9 \text{ kg/mm}^2$ bei einschnittiger, $2,3 \text{ kg/mm}^2$ i. M. bei zweischnittiger Nietung beträgt. Gallik (25) setzt in Ausdeutung der Engesser'schen Versuche die Reibung im Augenblick des Reißens hiernach zu 200 kg/cm^2 ein.

Dagegen brachte die warme Nietung beträchtlich höhere Bruchlast, wenn der Stab so bemessen war, daß die Zugfestigkeit des Stabes überwunden wurde. Engesser erhielt einschnittig folgende Stabzugfestigkeiten:

	44,7
mit warmer Nietung	44,0 i. M. $44,2 \text{ kg/mm}^2$
	44,0

	35,3
mit kalter Nietung	36,5 i. M. $35,7 \text{ kg/mm}^2$
	35,3
	32,3
mit Verschraubung	33,0 i. M. $33,1 \text{ kg/mm}^2$
	34,1

Der Niet war hierbei mit warmer Nietung etwa zu 64%, mit kalter Nietung etwa zu 50% seiner Scherfestigkeit beansprucht. Die zugehörigen Verschiebungen waren nur gering. Unter solchen geringen Verschiebungen also wird die Festigkeit der Verbindung durch die Wirkung der Nietwärmespannung erhöht, es mußte also noch genügend Reibung vorhanden sein, um $44,2 - 35,7 = 8,5 \text{ kg/mm}^2$ Zugspannung aufnehmen zu können; es kommen dabei auf 1 mm^2 Nietquerschnitt 960 kg, ein Betrag, welcher etwa gleich ist dem zu Beginn der Gleitung vorhandenen Gleitwiderstand. Dieser bleibt also jedenfalls erhalten.

Schematisch dürfte die Abb. 2 für einen durch Abscheren des Nietes zu Bruch gehenden Stabes die Verteilung der Reibungs- und Scherkräfte auf den Gesamtwiderstand eines warm hergestellten Nietes wiedergeben. Die Reibung würde demnach im Verlauf des Gleitens wieder abnehmen. Erklärlich ist dies durch das Abnehmen der Blechdicken beim Strecken, besonders im Lochquerschnitt.

3. Kurze Zusammenfassung.

a) I. Hauptteil.

Es wurden eine größere Anzahl von fremden und Karlsruher Versuchen mit Nietverbindungen beschrieben und auf Grund von Messungen der Einfluß von Nietungsart, Stahlsorte, Nietlänge, Nietanordnung u. dgl. auf Gleitweg und Stauchung der Niete ermittelt und zusammengestellt. Dabei zeigte sich, daß der Reibungsschluß der verbundenen Teile bei der Höhe der z. Zt. zulässigen Nietspannungen häufig bei Verbindungen aus St 37, sicher aber bei solchen aus hochwertigem Baustahl schon unter Gebrauchslast überwunden wird. Zur Erzielung einer guten, dauerhaften und zuverlässigen Nietverbindung ist es nötig, die Nietverfahren zu verbessern, um gut füllende Niete mit ausreichenden Klemmkraften zu erhalten. Die Verbesserung der Stauchung der Niete, d. h. der Lochausfüllung, darf aber keineswegs auf Kosten der Reibung gehen, da diese erheblich zur Güte der Verbindung beiträgt.

b) II. Hauptteil.

Es wurde das Verhalten der Nietverbindung bis zum Bruch nach Überschreiten der Gleitgrenze gezeigt bei einmaliger und wiederholter Belastung.

Die Reibung durch Klemmen des Niets bleibt auch oberhalb der Gleitgrenze wirksam, nimmt aber bis zum Bruch des Niets auf etwa $\frac{1}{5}$ ab.

Die Ursachen der Verschiebungen — Niet- und Lochwandverformung — wurden an Bolzenverbindungen, welche sich nach Entlastung immer wieder auseinandernehmen lassen, einzeln betrachtet.

Das reine Scheren ist stets mit einem Verdrücken des Bolzens verbunden wegen der Unvollkommenheit der Anlageflächen und der plastischen Nachgiebigkeit der Lochwand. Diese Verdrückungen wachsen etwa ab 4500 kg/cm^2 mittlerer Pressung stark an. Die Bruchverschiebung eines St-34-Niets betrug beim Scherversuch etwa $\frac{2}{3}$, in der Nietverbindung etwa $\frac{1}{4}$ des Nietdurchmessers.

Die „Fließgrenze“ der Lochweite infolge Leibungsdruck der Bolzenverbindung liegt zwischen $\alpha = 2,0$ und $2,5$, von da ab wachsen die Lochlängungen stark an, da das Material seitlich abfließt. Die Stähle St 37, St 48 und St Si zeigen hier keine bedeutenden Unterschiede.

Die Stabverdickung infolge dieses seitlichen Abfließens zeigte sich stärker ebenfalls bei $\alpha = 2$.

Das Ausbiegen der Stabendflächen wächst bei Verbindungen aus St Si schon bei $\alpha = 3,5$, bei solchen aus den anderen Stählen erst bei $\alpha = 4,0$ stark an.

Die Längsverschiebungen von Nietverbindungen aus hochwertigem Stahl wachsen bereits bei kleineren α -Werten stärker an als bei Nieten aus gewöhnlichem Baustahl; gleichzeitig waren ihre Verschiebungen, bei gleichen α -Werten gemessen, erheblich größer.

Bei Verbindungen mit konischen Bolzen beginnen die großen Verschiebungen noch

früher (niedrigere „Fließgrenze“), auch waren die Unterschiede mit verschiedenen Stählen noch größer. Die „Fließgrenzen“ lagen bei Verbindungen aus

	St 37	St 48	St Si
etwa bei $\alpha =$	3,5	3,0	2,5.

Auch nach wiederholter Belastung verhält sich die Verbindung aus hochwertigem Stahl (Stab und Niet aus St Si) ungünstiger als die aus gewöhnlichem Baustahl, sie war weicher und zeigte keine Proportionalität zwischen Kraft und Verschiebung.

III. Schluß und Folgerungen aus den Versuchen.

Die Frage nach der Sicherheit der Nietverbindungen wurde beim Aufkommen der hochwertigen Baustähle neu gestellt. Es ist durch vorstehende Darlegungen aus statischen Versuchen erwiesen, daß Nietverbindungen aus hochwertigem Stahl St 52¹⁾, verglichen mit solchen aus gewöhnlichem Baustahl

1. eine erheblich kleinere Gleitgrenze besitzen,
2. i. A. wegen schlechterer Stauchung der Niete größere Gleitwege haben,
3. eine im Verhältnis zu den zugelassenen Spannungen kleinere Verbindungs-Fließgrenze haben,
4. unter Gebrauchslast über die durch die höher zugelassenen Spannungen bedingten hinaus noch weitere größere elastische Verschiebungen erleiden.

Höhere Gleitgrenze und kleinere Gleitwege sind praktisch genommen nur durch Verbesserung der Nietverfahren zu erreichen. Dörnen (15), Gaber (24) und Schächterle (51) haben hier neue Wege gezeigt. — Die anderen Nachteile der hochwertigen Stähle können nur durch Herabsetzung der zulässigen Spannungen (Scherspannung und besonders Lochwanddruck) verringert werden.

Der Lochwanddruck wurde ursprünglich nach Schwedler mit der zweifachen Zugspannung bemessen. Später ging man auf das 2,5-fache hinauf.

Engesser vertrat stets die Ansicht, daß man mit dem Lochleibungsdruck auf das 2,5-fache der zugelassenen Normalspannung gehen darf.

Dörnen (15) glaubt, daß man unbedenklich sogar die 3-fache Stabzugspannung als Lochleibungsdruck zulassen darf, da unter normalen Verhältnissen der angeschlossene

Stab stets durch Überschreiten der Zugfestigkeit zerstört wird. Bei solcher Ausnutzung der Lochleibungsfestigkeit wird allerdings meistens die Verwendung von Stahlnieten — als Stabmaterial ein Flußeisen, etwa dem heutigen St 37 entsprechend, vorausgesetzt — erforderlich und ein Randabstand von $3\frac{1}{4} d$.

Krohn (52) dagegen empfiehlt $\sigma_1 = 1,6$ bis $1,8 \sigma_{zul}$. Gerber ließ sogar für Gelenkbolzen $\sigma_1 = 2,5 \sigma_{zul}$ zu.

Nach Versuchen im Auftrage der Deutschen Reichsbahngesellschaft, von welchen ein Teil der in Karlsruhe durchgeführten oben beschrieben ist, folgert Weidmann (46, 47) eine Zulässigkeit von $\sigma_1 = 2,5 \sigma_{zul}$ auf Grund der ermittelten Fließgrenzen.

Die Höhe der zulässigen Spannung hängt auch davon ab, welche Sicherheit man bevorzugt:

1. Sicherheit gegen Überschreiten der Elastizitätsgrenze (E-Grenze),
2. Sicherheit gegen Überschreiten der Fließgrenze (F-Grenze),
3. Sicherheit gegen Bruch (B-Grenze).

Bei der Nietverbindung liegen F-Grenze und die der E-Grenze entsprechende G-(Gleit) Grenze weit voneinander. Es betragen (nach unseren Versuchen in ganz rohen Durchschnittswerten) bei gut ausgenutzten Spannungen ($\sigma:\tau:\sigma_1 = 1:0,8:2,5$) die Spannungen im nutzbaren Querschnitt des Zugstabes in kg/mm^2 :

	Nietverbindung ungest. Zugstab			
	St 37/34	St 52/52	St 37	St 52
Zulässige Spannung	14	21	14	21
E-Grenze (= G-Grenze)	10	5	18	27
F-Grenze	22	29	27	40
B-Grenze	40	58	40	58
Es betragen die Sicherheitsfaktoren gegen Überschreitung der E-Grenze (= G-Grenze)	0,71	0,24	1,29	1,29
der F-Grenze	1,57	1,38	1,93	1,90
der B-Grenze	2,86	2,76	2,86	2,76

¹⁾ Die Versuche wurden mit Stäben aus Siliziumbaustahl, der etwa dem heutigen St 52 entsprach, und mit Nieten aus Siliziumstahl durchgeführt. Es ist möglich, daß die heute zu St 52 im Stahlbau verwendeten Niete aus St 44 besser sind, insbesondere höhere Reibungskräfte erzeugen.

Die Sicherheit gegen Bruch ist im genieteten und im ungestoßenen Stabe gleichgesetzt. Die Sicherheiten gegen Überschreiten der E- und F-Grenze sind aber bei der Verbindung besonders bei St 52 erheblich kleiner als beim umgestoßenen Stab. Dazu wird vielfach gesagt, daß ja das Fließen in der Verbindung nicht, wie im freien Stab, sich über den ganzen Querschnitt ausbreitet; dies geschieht erst, wenn das gezogene Stabmaterial ins Fließen gerät. Vorher tritt das Fließen nur in der gequetschten Lochwandung ein, örtlich eng begrenzt; die Fließzone breitet sich nicht weiter aus; aus diesem Grunde sei das Fließen ungefährlicher (47).

Gegen diese Auffassung läßt sich geltend machen, daß auch im Falle der Biegung die Fließgrenze nur örtlich, nämlich in der Randfaser, überschritten wird, sich also nicht gleich über den ganzen Querschnitt ausbreitet, und daß trotzdem eine höhere Spannung nicht zugelassen werden kann.

M. E. ist es bei der Beurteilung des Fließens maßgebend, ob das Fließen zu unzulässigen Formänderungen des Tragwerkes oder zum Bruche führt. Das letztere tritt im Falle des Lochwanddruckes niemals ein, solange der Randabstand hinter dem Niet ausreichend ist. Es ist infolgedessen berechtigt, die Beurteilung des Lochwanddruckes nach Sicherheit gegen Fließen völlig fallen zu lassen, da selbst durch beliebig hohen Lochwanddruck bei ausreichendem Randabstand eine Zerstörung der Verbindung nicht verursacht wird. Dagegen treten große Verschiebungen auf, und an Stelle der Sicherheit gegen Überschreiten der Fließgrenze ist die Sicherheit gegen Überschreiten einer bestimmten Formänderungs-(Verschiebungs-)größe zu fordern.

Diese Forderung wird beim freien Stab in dem Verlangen, die Fließgrenze nicht zu überschreiten, schon erfüllt, weil unterhalb dieser die Formänderungen nur sehr klein sind. Die Nietverbindung ist aber dadurch gekennzeichnet, daß schon unterhalb der maßgebenden „Verbindungsfließgrenze“ erhebliche Verschiebungen durch Gleitung auftreten.

Die einfache Nietverbindung aus gewöhnlichem Baustahl weist einen Sicherheitsfaktor gegen Fließen von rd. 1,6 auf; er ist ausreichend, denn die Bemessungsregeln haben sich bei St 37 in jahrzehntelanger Erfahrung durchaus bewährt. Man könnte sagen, daß der bei Verbindungen aus hochwertigem Stählen bestehende Sicherheitsfaktor von 1,4 ebenfalls noch ausreichen würde, wenn die Formänderungen im gleichen Rahmen bleiben. Letzteres ist aber nicht der Fall. Die Verschiebungen an solchen Verbindungen aus hochwertigem Stahl haben sich als ein Vielfaches herausgestellt gegenüber solchen aus gewöhnlichem Baustahl, weil die Gleitwege

größer sind und weil der Spannungsunterschied vom Beginn des Fließens bis zum zulässigen Wert größer ist. Bei Bemessung der Verbindung nach Maßgabe der Größe der Verschiebung wird also nicht nur die Werkstofffestigkeit, sondern auch die Güte der Nietarbeit zum Ausdruck kommen.

Bei ausreichender Bruchsicherheit wird die Tragkraft der Verbindung auch bei Überbeanspruchung und Stößen erhalten. Nur durch Festlegung einer höchstzulässigen Verschiebung würde die Zuverlässigkeit und die Dauerhaftigkeit (dauerndes Festbleiben der Nietverbindung im Betrieb) gewährleistet, nicht aber durch Sicherheit gegen Überschreiten der „Verbindungsfließgrenze“, denn schon unterhalb dieser können beträchtliche Verschiebungen auftreten.

Bei der versuchsmäßigen Ermittlung dieser Verschiebung und bei der Festlegung ihrer Größe sollte man sich allerdings nicht mit der erst- und einmaligen Belastung begnügen, sondern die Verschiebungen nach mehrfach wiederholter Belastung als maßgebend ansehen (Gaber). Zahlreiche Niete spielen sich erfahrungsgemäß erst nach wiederholter Beanspruchung zu gleichmäßigem Tragen ein. Bei Niet- und Bolzenverbindungen genügen hierfür u. U. schon etwa 5 Lastwiederholungen, da dann schon ein annähernd gleichbleibender Zustand erreicht ist.

Das Problem ist hier ein ähnliches wie bei Holzverbindungen, bei welchen eine zuverlässige, der Wirklichkeit nahekommende einfache Berechnungsmethode oft nicht möglich ist und bei welchen man die zulässige Belastung einmal aus der notwendigen Sicherheit gegen Bruch und dann aus einem Höchstmaß an Verschiebung festsetzt.

Solange die Herstellung eines Niets von ausreichender Klemmkraft in hochwertigen Stählen nicht sichergestellt ist, und sofern man bei Nietverbindungen in hochwertigem Baustahl die gleiche Dauerhaftigkeit erhalten will wie in gewöhnlichem Baustahl, sollte man — im Gegensatz zu der Ansicht Weidmanns (47) — als Schlussfolgerung aus den Versuchen auf keinen Fall bei hochwertigen Stählen mehr als die zweifache Stabspannung als Lochwanddruck zulassen.¹⁾

An allen Stellen, wo die Kraftrichtung in Fachwerkstäben wechselt, werden durch das ständige Verschieben schon in gewöhnlichem Baustahl die Niete gern locker (bekannt von Windverbänden), für hochwertigen Baustahl wäre es angebracht, an solchen Stellen eine weitere Ermäßigung des Lochwanddruckes eintreten zu lassen.

Bei Nietverbindungen ist eine Sicherheit gegen Überschreiten der E-Grenze (Gleit-

¹⁾ Inzwischen ist lt. DIN 1050 der Lochwanddruck allgemein auf $2,0 \sigma_{zul}$ herabgesetzt worden.

grenze) meist nicht vorhanden. Immerhin sind praktisch in gewöhnlichem Baustahl Nietverbindungen möglich, die ganz auf Reibung halten, und die besser sind als Bolzenverbindungen aus dem gleichen Material. Bei Verbindungen aus hochwertigem Stahl ist aber der Unterschied zwischen Bolzen und Niet nur noch gering. Es ist hier u. U. nicht einmal nötig, bei der Berechnung einen Unterschied zu machen.

Man mag geteilter Meinung sein, ob Versuche an Anschlüssen mit einem einzigen Niet zu praktischen Schlußfolgerungen berechtigen. Versuche mit großen Nietgruppen werden demnächst auf einer großen, stehenden 300-t-Maschine für Schwellast im Prüfraum Gaber durchgeführt. Es liegen auch mit mehrnietigen

Verbindungen, mit Anschlüssen von U-Eisen u. dgl. einige wenn auch meist ältere Versuche mit St 37 vor. Versuche mit größeren Anschlüssen aus St 52 aber fehlen noch völlig, sie sind zur Kenntnis des Verhaltens solcher Verbindungen dringend erwünscht. — Aber auch bei gewöhnlichem Baustahl ist das Lochwanddruckproblem noch nicht völlig erforscht, z. B. fehlen noch Versuche darüber, wie sich die Verschiebungen im plastischen Bereich aus den einzelnen Formänderungen zusammensetzen.

Schließlich müssen Messungen an Bauwerken im Betrieb die Laboratoriumsversuche ergänzen, um deren Brauchbarkeit auch hier richtig einschätzen und ihre Ergebnisse einwandfrei deuten zu können.

Abgeschlossen 1933.

Dr.-Ing. H. Hoeffgen.

Literatur-Verzeichnis.

1. Bach, C., Versuche über den Widerstand von Nietverbindungen gegen Gleiten. ZVDI 1892, S. 1141.
2. Bach, C., Der Gleitungswiderstand bei Maschinen- und bei Handnietung. ZVDI 1894, S. 1231.
3. Bach, C., Versuche über den Einfluß des Verstemmens der Bleche und Nietköpfe auf die Größe des Gleitwiderstandes von Nietverbindungen. ZVDI 1895, S. 301.
4. Bach, C., Die Maschinenelemente, Verlag Koenner, Stuttgart, 1922, S. 189, 184.
5. Bach und Baumann. ZVDI 1912, S. 1893.
6. Baumann, Das Wesen der Nietverbindung. Bauing. 1925, S. 60.
7. Bericht (Zweiter) über Festigkeitsversuche mit Eisenkonstruktionen. ZVDI 1909, S. 1019.
8. Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau, Heft 3: Versuche mit Anschlüssen, Berichterstatter: Rudeloff.
9. Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau, Ausg. A, Heft 1, 1915, Der Einfluß der Nietlöcher auf die Längenänderungen in Zugstäben und die Spannungsverteilung in ihnen, Berichterstatter: Rudeloff.
10. Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau, H. 1, Ausg. B, Berlin 1915, Berichterstatter: Kögler.
11. Bradel, Nietverbindungen mit Zugbeanspruchung. Bauing. 1929, S. 473.
12. Cajar, Zugversuche mit Nietverbindungen. Bauing. 1928, S. 778.
13. Considère, Die Anwendung von Eisen und Stahl bei Konstruktionen, Wien 1888, S. 271.
14. David, Bericht über amerikanische Versuche (Eng. Rec. v. 24. 12. 25). Bauing. 1926, S. 257.
15. Dörnen, Die bisherigen Anschlüsse steifer Fachwerkstäbe und ihre Verbesserung, Berlin 1924, Ernst und Sohn.
16. Dörnen, Zuschrift in Bautechnik 1928, S. 393.
17. Dupuy, Mémoire sur la résistance des rivets. Annales des Ponts et Chaussées 1895 I.
18. Engesser, Versuche über die Festigkeit von Nietverbindungen. ZVDI 1889, S. 399.
19. Fairbairn und Clark, Useful Information for Engineers, London 1874.
20. Findeisen, Versuche über die Beanspruchungen in den Laschen eines gestoßenen Flacheisens bei Verwendung zylindrischer Bolzen. Forschungsarbeiten, H. 229, Berlin 1920.
21. Findeisen, Versuche über Lochleibungsdruck, 2. Intern. Tagung für Brücken und Hochbau in Wien, 1928.
22. Frémont, Ch., Etude expérimentale du rivetage. Mémoires publiés par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale. Paris 1906. Bericht hierüber von B. Baumann in ZVDI 1907, S. 1152.
23. Frémont, Bulletin de la Société d'Encouragement 1909, S. 65.
24. Gaber, E., Versuche an Nieten aus Siliziumbaustahl und gewöhnlichem Baustahl. Stahlbau 1930, Heft 12.
25. Gallik, Über die Scherfestigkeit und den Lochleibungsdruck von Nieten und Nietverbindungen. 2. Intern. Tagung für Brücken- und Hochbau in Wien, 1928.
26. Gehler, Bericht über die 2. Intern. Tagung für Brücken- und Hochbau in Wien, 1928. Bautechnik 1928, S. 747.
27. Gehler in Schaper, Grundlagen des Stahlbaus, 6. Aufl., Ernst und Sohn, Berlin.
28. Graf, Versuche mit Nietverbindungen bei oftmals wiederholter Belastung. ZVDI 1932, S. 438.
29. Hertwig und Petermann, Über die Verteilung einer Kraft auf die einzelnen Niete einer Nietreihe. Stahlbau 1929, S. 290.
30. Höhn, E., Nieten und Schweißen der Dampfkessel, Springer 1925.
31. Kayser, Untersuchungen über die Anfangsspannungen in Nieten und Schrauben. ZVDI 1914, S. 1402.
32. Kunze, Zuschrift in Bautechnik 1928, S. 92.
33. Lieck, Der elektrische Nieterrhitzer. Bauing. 1923, S. 115.
34. Müller, Die gebräuchlichsten Nietverfahren des Dampfkesselbaus. Diss. Dresden 1927.
35. Pleines, Nietverfahren im Metallflugzeugbau. Luftfahrtforschung 1930, Heft 1.
36. Preuß, Die Festigkeit von Nickelstahlnieten in Verbindung mit Flußeisenblechen unter besonderer Berücksichtigung des Gleitwiderstandes. Habilitationsschrift Darmstadt 1909.
37. Report (First) of the steel structures research committee London 1931. Auszugsweise berichtet in Bauingenieur 1932, S. 275, von Schleicher.
38. Rudeloff, H., Mitt. a. d. Materialprüfungsanstalt Berlin-Großlichterfelde-West, Bd. 33, 1915.
39. Rudeloff, H., Einfluß des Nietverfahrens auf Spannungen u. Materialeigenschaften des Niets. Mitt. a. d. Materialprüfungsanstalt 1915, S. 38.
40. Rudeloff, M., Versuche mit Nietverbindungen und Brückenteilen usw., Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes, 1911, Beiheft.
41. Schachenmeier, W., Die Zähigkeit der Flußeisensorten als Sicherheitsfaktor bei Eisenbauten. Bauing. 1922, S. 737.
42. Schächterle, Die Nietverbindungen bei Brücken aus hochwertigen Stählen. Bautechnik 1928, S. 83.
43. Schächterle, Dauerversuche mit Nietverbindungen, Stahlbau 1930, S. 277.
44. Schächterle, Dauerversuche mit Nietverbindungen. Stahlbau 1932, S. 65.
45. Schächterle, Die Nietverbindung. Bautechnik 1932, Heft 22.
46. Weidmann, Versuche über den zulässigen Lochleibungsdruck von Nietverbindungen. Bautechnik 1927, S. 668.
47. Weidmann, Zuschrift in Bautechnik 1928, S. 92.
48. Wellinger, K., Die bei der Herstellung von Nietverbindung in der Niete entstehenden Spannungen, Formänderungen, Gefügeänderungen u. Festigkeitseigenschaften. Diss. Stuttgart 1932.
49. Wilson, Engineering Experiment Station. University of Illinois, 1930, Bulletin 210.

Nachtrag.

50. Schultz-Buchholtz, Dauerfestigkeit von Verbindungen aus Baustahl St 52. Stahl und Eisen 1933, S. 545.
51. Schächterle, Der Stauchhammer, ein neues Gerät zum Vorstauchen der Niete. Stahlbau 1933, S. 117.
52. Gaber, E., Zusammenwirken von Nietung und Schweißung bei Zug und Druck. Bauingenieur 1932, Heft 21/22.

Druck :
Südwestdeutsche Druck- und Verlagsgesellschaft m. b. H.
Karlsruhe am Rhein