

Günther Valtinat und Peter Dangelmaier

Schraubenverbindungen mit gestanzten Löchern in zugbeanspruchten, feuerverzinkten Bauteilen

Bericht Nr. 119
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.
Forschungsvorhaben GAV-Nr. FD 18

Aus Festschrift Udo Vogel
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. K. Schweizerhof
Dr.-Ing. W. Heil
Institut für Baustatik
Universität Karlsruhe

zugfe
die Schra
mit gest
Bericht
Einschrän
Feuerverzi

length
; not
eport
abers
eed for

(Nov. 90)
; an die
1, wenn
teile
sem
ie

Günther Valtinat und Peter Dangelmaier

Schraubenverbindungen mit gestanzten Löchern in zugbeanspruchten, feuerverzinkten Bauteilen

Bericht Nr. 119
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.
Forschungsvorhaben GAV-Nr. FD 18

Aus Festschrift Udo Vogel
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. K. Schweizerhof
Dr.-Ing. W. Heil
Institut für Baustatik
Universität Karlsruhe

Summary

In bolted shear connections according to DIN 18 800 part 1 (Nov. 90) it is allowed to make use of the ultimate strength in the net section if the holes are drilled, this is not allowed in the case of punched holes. In this paper we report about tests on connections with hot dip galvanized members with punched holes. The results show that there is no need for these restrictions.

Zusammenfassung

In Schraubenverbindungen darf nach DIN 18 800 Teil 1 (Nov. 90) die Tragfähigkeit im Nettoquerschnitt in Anlehnung an die Zugfestigkeit des Materials nur dann ausgenutzt werden, wenn die Schraubenlöcher gebohrt sind; dies gilt nicht für Bauteile mit gestanzten Löchern. Mit dem Versuchsprogramm, das diesem Bericht zugrunde liegt, konnte nachgewiesen werden, daß ohne Einschränkung eine Erweiterung auf gestanzte Schraubenlöcher in feuerverzinkten Bauteilen möglich ist.

1 Ausgangssituation und Ziel der Untersuchungen

Die neue Stahlbaunorm DIN 18 800 Teil 1 läßt im Element (742) und gemäß Gl. (28) die Ausnutzung des Nettoquerschnitts von Bauteilen mit gebohrten Löchern über die Streckgrenze hinaus nach Maßgabe der Zugfestigkeit zu. Ausgeschlossen von dieser erhöhten Ausnutzung sind damit Bauteile mit gestanzten Schraubenlöchern, weil die Aufhärtung und mögliche Anrisse am Lochrand durch den Stanzvorgang die Duktilität des Nettoquer-

schnitts und ebenfalls das Lochleibungstragverhalten negativ beeinflussen können. Da das Stanzen wirtschaftlicher ist als das Bohren, wird man es in der Praxis bei bestimmten Bauteilabmessungen weitestmöglich einsetzen wollen.

Im Rahmen von zwei durchgeführten Forschungsprojekten wurde der Einfluß des Stanzens bei unbehandelten und bei feuerverzinkten Stahlbauteilen untersucht. An den nichtverzinkten Bauteilen konnte gemeinsam mit dem Institut für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig ein Tragverhalten nachgewiesen werden /1,2/, das für Schraubenverbindungen mit gestanzten Schraubenlöchern unter vorwiegend ruhender Belastung keinerlei Einschränkungen hinsichtlich Tragkapazität und Duktilität erfordert. Über die Ergebnisse an feuerverzinkten Bauteilen soll hier berichtet werden /3/. Feuerverzinkte Bauteile mit gestanzten Löchern können sich wie folgt anders als nichtverzinkte verhalten:

- besser, weil infolge der Erwärmung beim Feuerverzinkungsvorgang ein Abbau von Spannungsspitzen am kaltverfestigten Lochrand möglich ist,
- schlechter, weil infolge der Erwärmung beim Feuerverzinken eine Alterung und/oder Ribbildung bzw. Aufweitung von Anrissen am Lochrand möglich erscheinen.

Zur Klärung dieser Fragen wurde ein Versuchsprogramm entworfen, das Aussagen über

- die Tragkapazität und
- die Duktilität

von Schraubenverbindungen mit feuerverzinkten Bauteilen und gestanzten Schraubenlöchern erlaubt.

Beide Ziele waren sowohl für Verbindungen mit

- Versagen im Nettoquerschnitt also auch mit
- Versagen durch Überschreitung der Lochleibungsfestigkeit zu erreichen. Damit waren Variationen der Randabstände e_2 (= Randabstand rechtwinklig zur Krafrichtung) und e_1 (= Randabstand in Krafrichtung) erforderlich.

2 Ausbildung der Versuchskörper

Alle experimentellen Untersuchungen wurden an zweischnittigen Einschraubenanschlüssen gemäß Bild 1 durchgeführt. Die geometrischen Einflußgrößen wurden entsprechend der folgenden Zusammenstellung variiert:

Blechdicke t : 12, 16, 20 mm
Schrauben- \emptyset d : t , $t+4$ mm
Loch- \emptyset d_L : $d+2$ mm
Endabst. e_1/d_L : 1,2 1,5 2,0 2,5
 mit $e_2/d_L = 1,5$
Randabst. e_2/d_L : 1,2 1,5 2,0 2,5
 mit $e_1/d_L = 2,0$

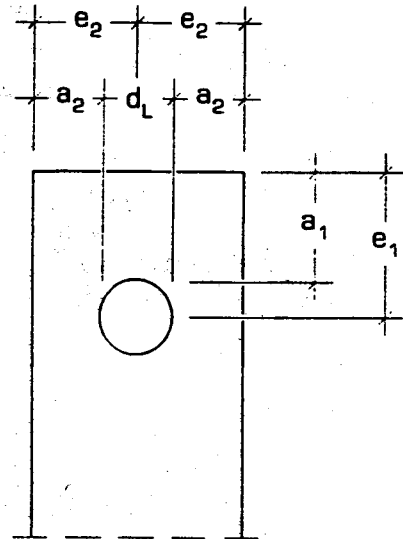


Bild 1 Abmessungen der Versuchskörper

Auf der Werkstoffseite wurden die beiden Stahlgüten St 37 und St 52 mit einbezogen.

Insgesamt wurden Kombinationen für 63 Versuchskörperausführungen mit jeweils maximal bis zu 3 Versuchskörpern ausgewählt.

Wesentliche Meßwerte für die nachfolgenden Auswertungen sind neben der Belastung die Verschiebungen der Verbindung. In dem Bild 2 sind die Versuchseinrichtung (schraffierter Teil), ein Probekörper und die Verschiebungsmeßeinrichtung dargestellt. Die beiden Wegaufnehmer W1 und W2 messen über eine Zeigerkonstruktion die Verschiebungen in Höhe des Schraubenschwerpunktes, der Wegaufnehmer W3 erfaßt die Gesamtverformungen, d.h. die Anschlußverschiebungen und die Dehnungen von Stab und Laschen.

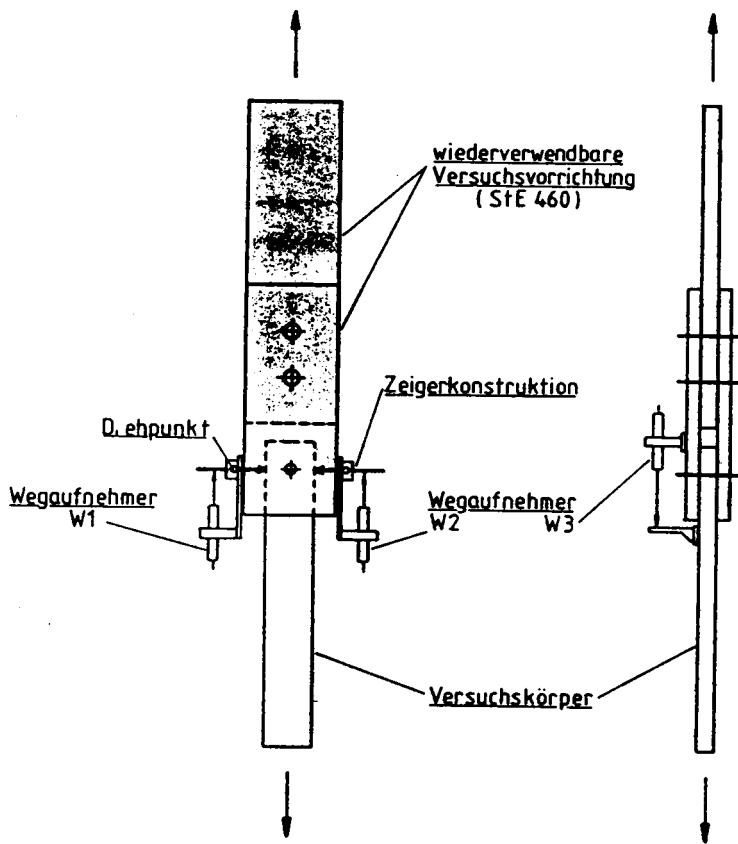


Bild 2 Versuchseinrichtung, Prüfkörper, Verschiebungsmeßeinrichtung

Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, daß zur exakten Auswertung die Probengeometrie genau ausgemessen und die Festigkeitskennwerte des Probenmaterials im Zugversuch ermittelt wurden. Die Durchführung der Versuche erfolgte mit einer konstanten Kolbengeschwindigkeit von 2 mm/min weggeregelt. Vor Erreichen der Traglast wurde bei den meisten Versuchen eine ca. 10-minütige Haltepause mit konstant gehaltenem Verschiebungsweg eingelegt, um den sich einstellenden Lastabfall zu bestimmen. Anschließend wurde der Versuch mit konstanter Verschiebungsgeschwindigkeit fortgesetzt, bis die Traglast eindeutig durch Abfall der Kolbenkraft erreicht war.

3 Ergebnisse

Die Traglast ist durch eine der 3 Versagensarten bestimmt

- Nettoquerschnittsversagen
- Versagen durch Überschreitung der Lochleibungsfestigkeit (Schubbruch oder Biegebruch)
- Abscheren der Schraube.

Welches Versagen eintritt, wird durch die Randabstände e_1 und e_2 und durch die Festigkeiten bestimmt. Die Abhängigkeit von den Randabständen ist im Bild 3 dargestellt, wobei bezogene Randabstände (Bezugswert ist der Lochdurchmesser d_L) verwendet werden. Es zeigt sich anhand der eingetragenen Symbole, daß das Nettoquerschnittsversagen unterhalb einer Blechbreite von

$$b = 2 \cdot e_2 \leq e_1 + d_L$$

maßgebend wird.

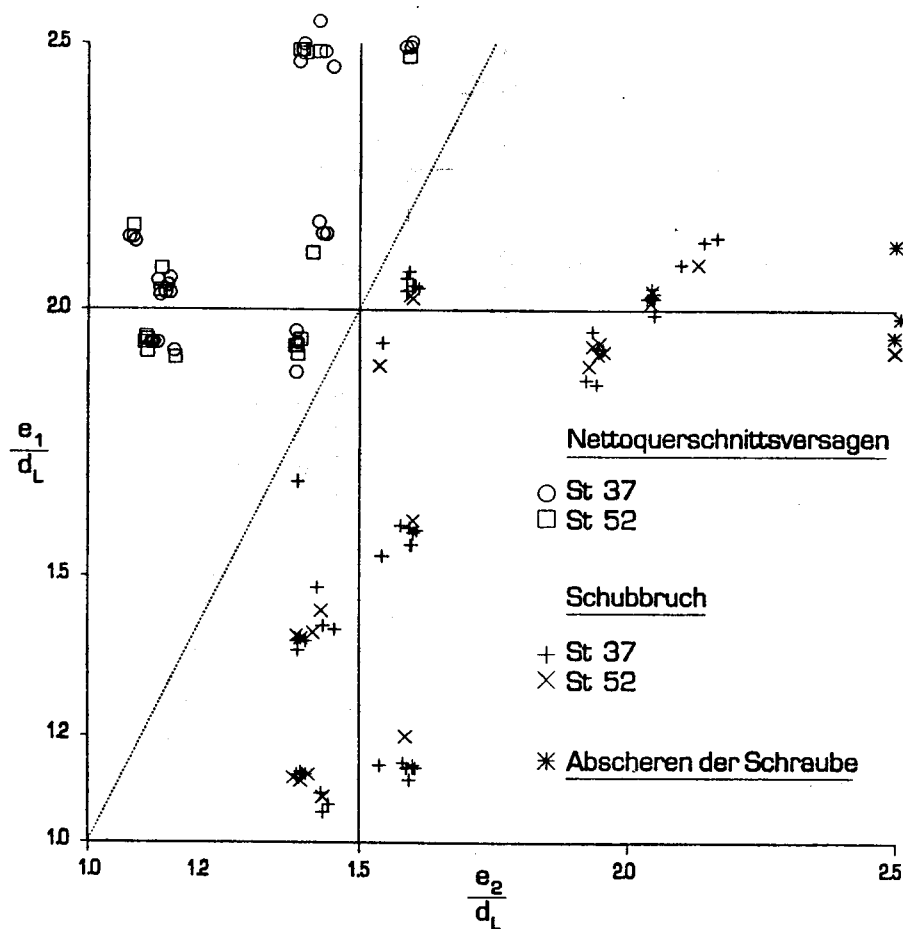


Bild 3 Versagensarten abhängig von den Randabständen

In den Tabellen 1-3, Anlagen 1-3 sind für alle Versuche die ausgemessenen Geometrien, die Festigkeitswerte aus Zugversuchen (obere Streckgrenze R_{eH} , Zugfestigkeit R_m), die Versagenslasten im Versuch P_{Vers} und die Versagensarten zusammengefaßt.

In den Bildern 4 a bis e werden stellvertretend für die anderen Ergebnisse die Last-Verschiebungs-Verläufe von 5 Versuchskörpern aus St 37 mit 20 mm Stabblechdicke, Schrauben HV M 20 und Lochdurchmesser $d_L = 22$ mm dargestellt, diese Auswahl soll Regel- und Extremausführungen der Randabstände gemäß folgender Tabelle 4 abdecken:

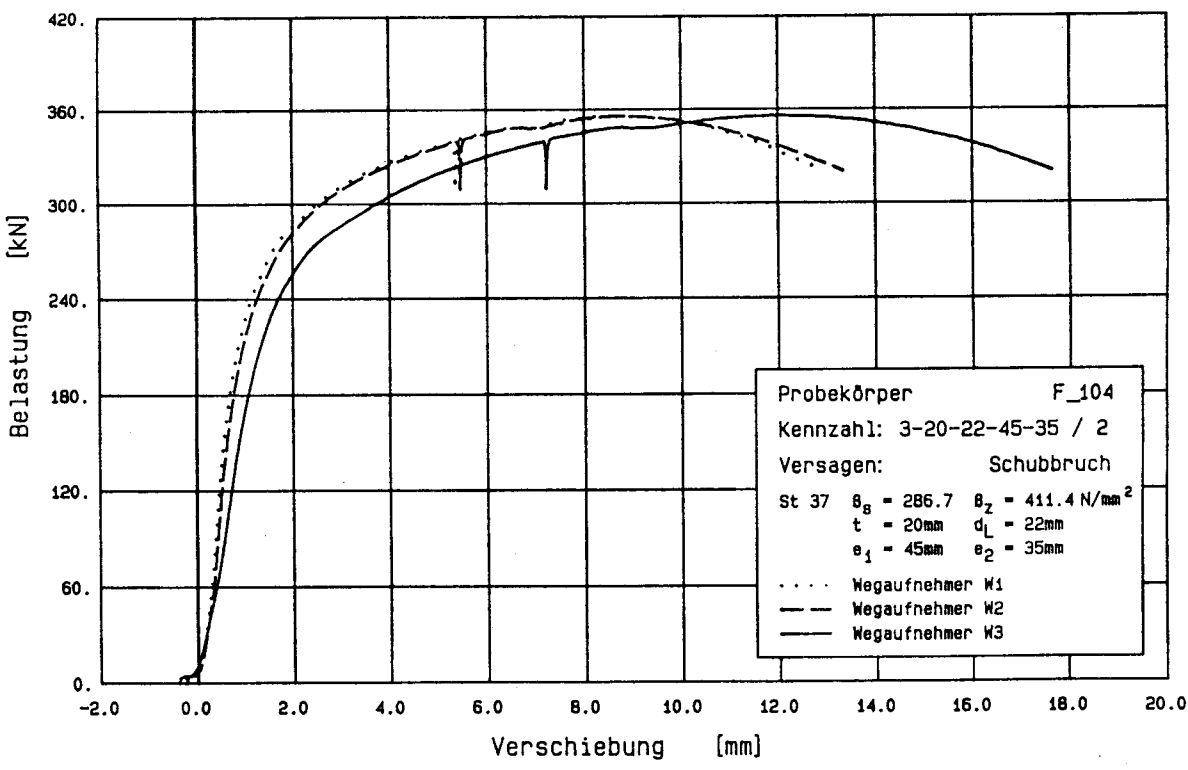


Bild 4a Last-Verschiebungs-Verläufe für den Versuchskörper mit $e_1 = 45$ mm (= Regel) und $e_2 = 35$ mm (= Regel)

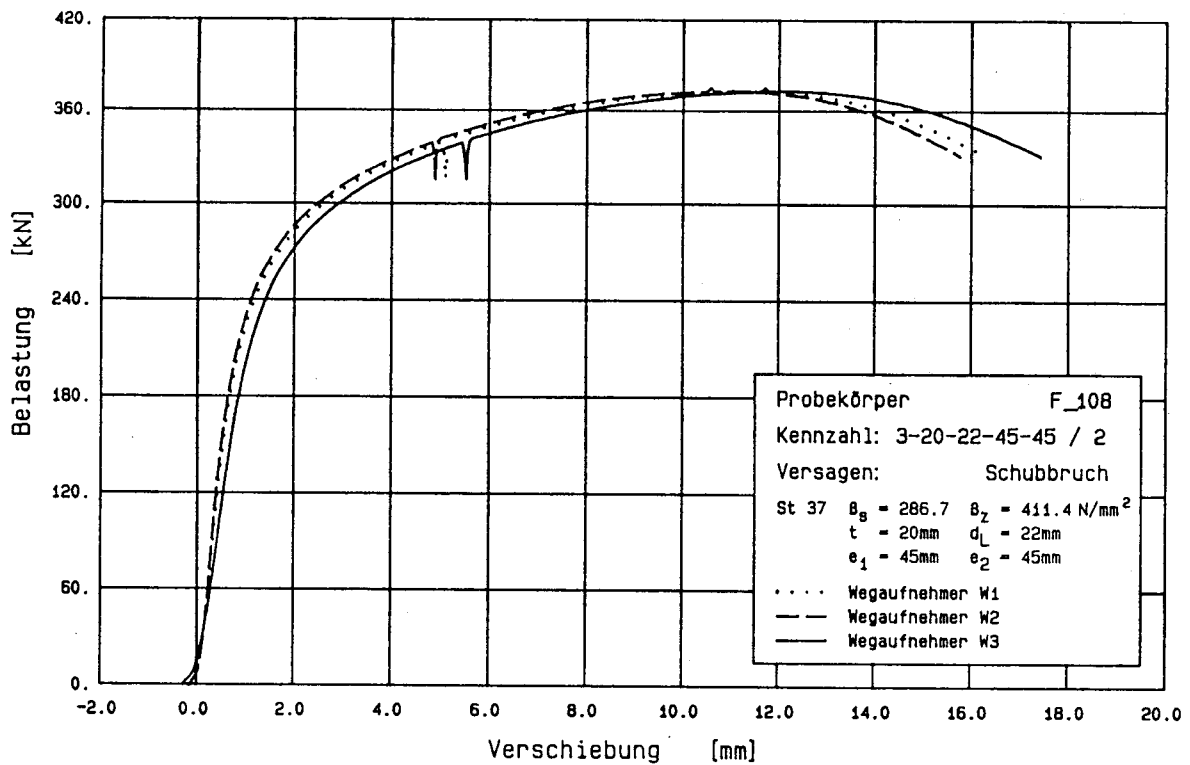


Bild 4b Last-Verschiebungs-Verläufe für den Versuchskörper mit $e_1 = 45 \text{ mm}$ (= Regel) und $e_2 = 45 \text{ mm}$ (> Regel)

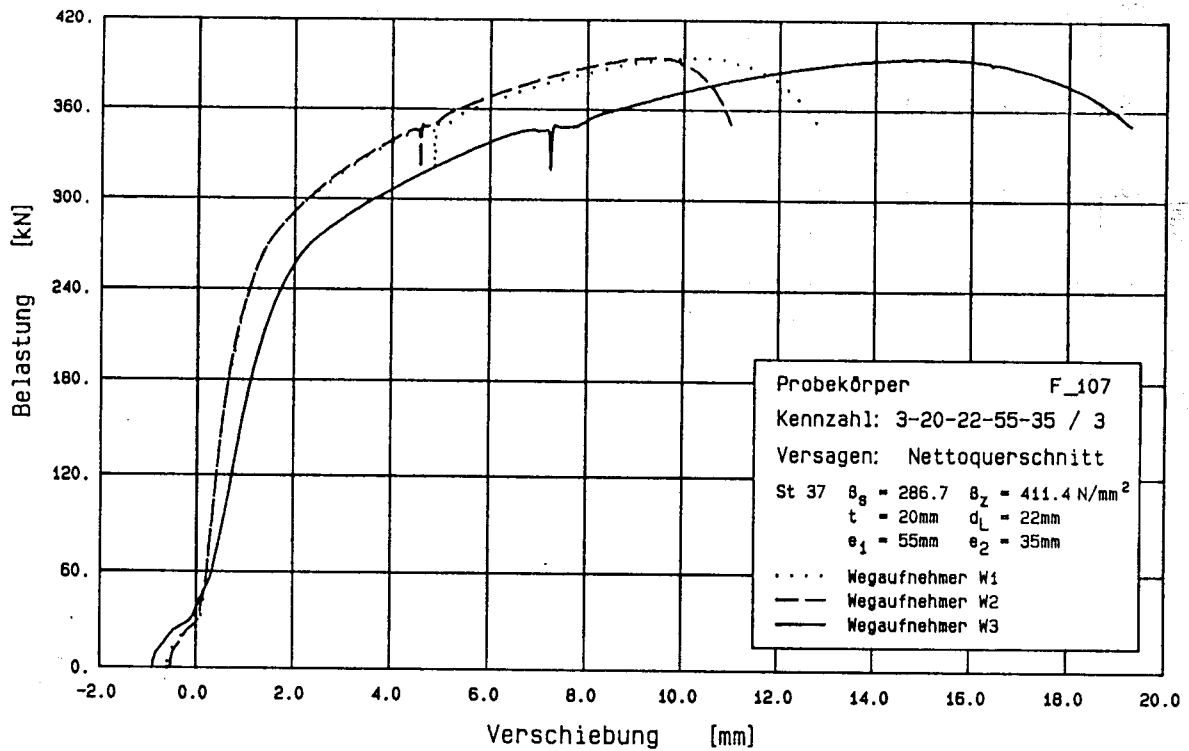


Bild 4c Last-Verschiebungs-Verläufe für den Versuchskörper mit $e_1 = 55 \text{ mm}$ (> Regel) und $e_2 = 35 \text{ mm}$ (= Regel)

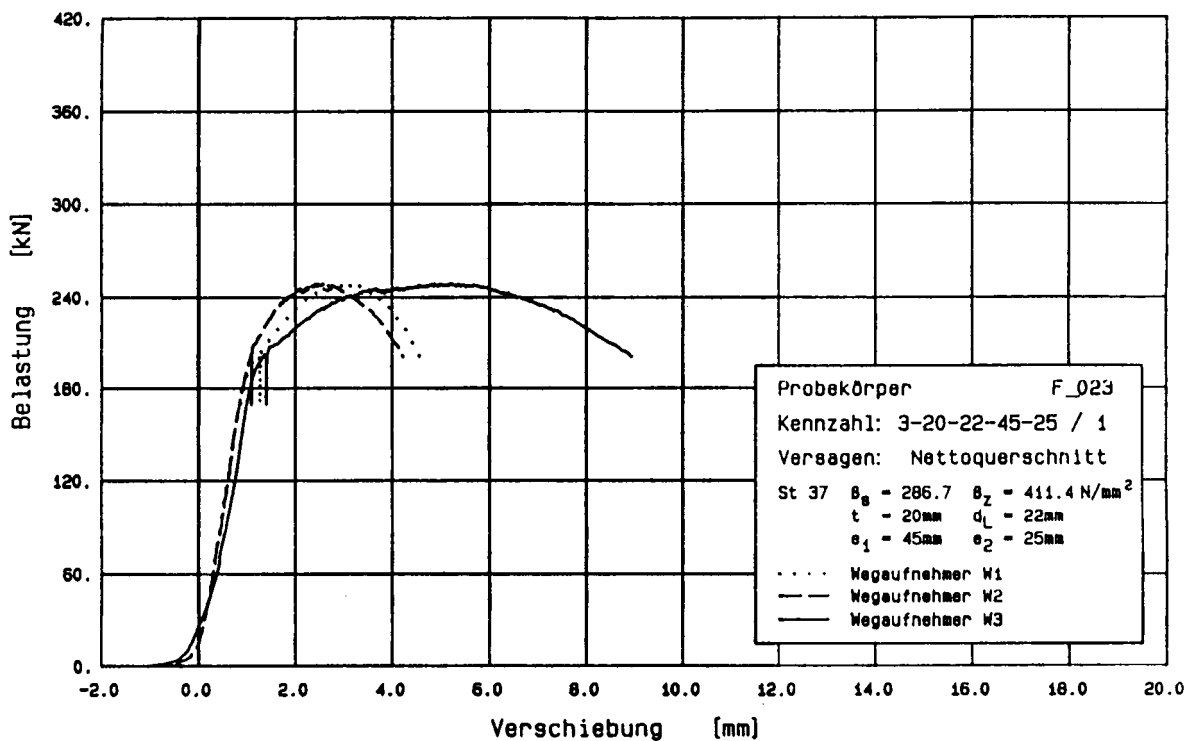


Bild 4d Last-Verschiebungs-Verläufe für den Versuchskörper mit $e_1 = 45 \text{ mm}$ (= Regel) und $e_2 = 25 \text{ mm}$ (< Regel)

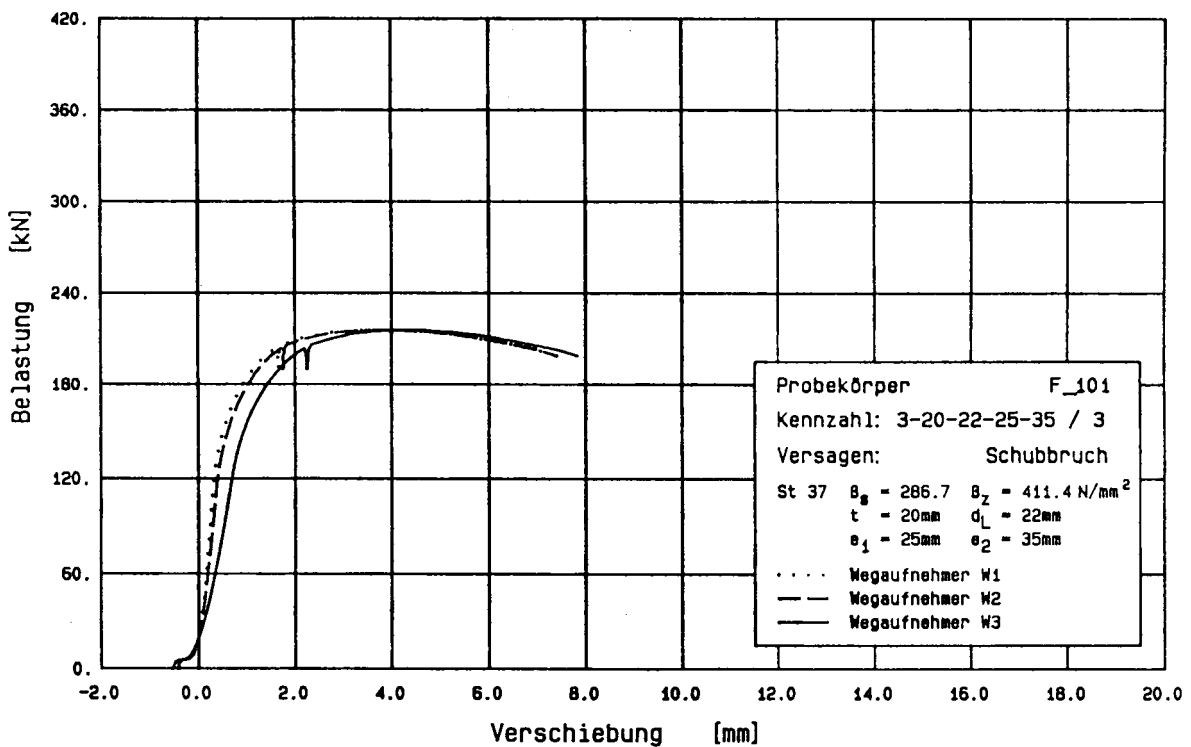


Bild 4e Last-Verschiebungs-Verläufe für den Versuchskörper mit $e_1 = 25 \text{ mm}$ (< Regel) und $e_2 = 35 \text{ mm}$ (= Regel)

Tabelle 4 Randabstände und Verschiebung bei Maximallast

Nr	Bild Nr	e_1 mm	Aus- füh- rung	e_2 mm	Aus- füh- rung	Verschiebg. W1, W2 bei Maximallast mm
1	4a	$45=2,0d_L$	=Regel	$35=1,6d_L$	=Regel	ca. 8
2	4b	$45=2,0d_L$	=Regel	$45=2,0d_L$	>Regel	ca. 10
3	4c	$55=2,5d_L$	>Regel	$35=1,6d_L$	=Regel	ca. 9
4	4d	$45=2,0d_L$	=Regel	$25=1,14d_L$	<Regel	ca. 2,5
5	4e	$25=1,14d_L$	<Regel	$35=1,6d_L$	=Regel	ca. 3

Es ist erkennbar, daß immer dann, wenn die Abstände e_1 und e_2 den Regelausführungen ($e_1 = 2,0 d_L$ und $e_2 = 1,5 d_L$) entsprechen oder größer sind, die zur Maximallast gehörenden Verschiebungswege W1, W2 relativ groß sind, daß dagegen jedoch bei kleineren Abständen als den Regelausführungen diese Verschiebungswege drastisch zurückgehen; Anhaltswerte sind in der obigen Zusammenstellung enthalten.

4 Rechenmodell

Für die Versagensformen Nettoquerschnittsversagen und Lochleibungsversagen (Schubbruch) können mit Hilfe einfacher Formeln die Traglasten der Versuche abgeschätzt werden

- Nettoquerschnittsversagen

$$P_{\text{Theor}} = A_{\text{Netto}} \cdot R_m \quad (1)$$

$$A_{\text{Netto}} = t \cdot \Sigma a_2 \quad \text{oder}$$

$$A_{\text{Netto}} = t \cdot 2 \cdot \min a_2$$

(Bei zentrischem Schraubenloch sind beide Formeln für A_{Netto} identisch, bei exzentrischem Schraubenloch liefert der zweitgenannte Nettoquerschnitt kleinere Traglasten)

- Lochleibungsversagen (Schubbruch)

$$P_{\text{Theo}} = t(a_1 + d/2)R_m \quad (2)$$

Das Versagen der Schrauben durch Abscheren (3 Versuche) wurde hier nicht weiter verfolgt.

Ein statistischer Vergleich, getrennt nach den zwei Versagensarten, ist in den Tabellen 5a und b zusammengestellt.

Tabelle 5a Nettoquerschnittsversagen

Oberfläche	Stahlgüte	Mittelwert	Standardabweichung
unbehandelt	St 37	1,005	0,030
	St 52	0,983	0,028
feuerverzinkt	St 37	1,025	0,050
	St 52	0,981	0,050

**Tabelle 5b Lochleibungsversagen
(Schubbruch)**

Oberfläche	Stahlgüte	Mittelwert	Standardabweichung
unbehandelt	St 37	1,020	0,032
	St 52	0,958	0,027
feuerverzinkt	St 37	1,042	0,042
	St 52	0,978	0,021

Das Verhältnis von experimenteller Traglast zu theoretischer Traglast $P_{\text{Vers}}/P_{\text{Theo}}$ zeigt unabhängig von der Versagensart, daß die Rechenmodelle die wahre Tragfähigkeit gut abschätzen, das heißt, das Verhältnis $R_{\text{Vers}}/R_{\text{Theo}}$ liegt nahe bei 1.0. Es ist zu verzeichnen, daß bei den Versuchen mit Stahl St 52 der Quotient $P_{\text{Vers}}/P_{\text{Theo}}$ durchweg niedriger liegt (ca. 4 bis 6 %) als bei Stahl St 37. Weiterhin enthalten diese Tabellen den Quotienten $P_{\text{Vers}}/P_{\text{Theo}}$ für nicht feuerverzinktes (unbehandeltes) Material. Hierbei ist dieselbe Tendenz zwischen St 52 und St 37 zu erkennen, und der Quotient selbst liegt in derselben Größenordnung wie für feuerverzinktes Material.

5 Vergleich mit Normen

Entsprechend DIN 18 800 Teil 1 Ausgabe Nov. 1990 wird das Nettoquerschnittsversagen durch folgende Formeln abgedeckt:

$$P_{DIN} = A_{Netto} \cdot f_{u,k} / (1,25 \cdot \gamma_M) \text{ für gebohrte Löcher} \quad (3)$$

$$P_{DIN} = A_{Netto} \cdot f_{y,k} / \gamma_M \quad \text{für gestanzte Löcher} \quad (4)$$

$f_{u,k}$ = charakteristischer Wert der Zugfestigkeit

$f_{y,k}$ = charakteristischer Wert der Streckgrenze

$$\gamma_M = 1,1.$$

Nach Auswertung des Quotienten P_{Vers}/P_{DIN} liegen die im Versuch erreichten Tragfähigkeiten um etwa 30 bis 40 % über der mit Gl. 3 und um etwa 40 bis 50 % über der mit Gl. 4 ermittelten Traglast.

Das Versagen des Bleches durch Überwinden der Lochleibungs-
festigkeit (Schubbruch) wird in der DIN 18 800 Teil 1 mit der
Lochleibungsformel abgedeckt:

$$P_{DIN} = \alpha_1 \cdot t \cdot d \cdot f_{y,k} / \gamma_M \quad (5)$$

α_1 = Formbeiwert, abhängig von e_1 und e_2

Bei dieser Versagensform wurden im Versuch bis zu doppelt so große Tragfähigkeiten erreicht, wie mit Gl. 5 berechnet. In dem Bild 5 sind die im Versuch erreichten Schubbruchlasten bezogen auf den Wert R_{eH} für die beiden Stahlsorten St 37 und St 52 mit unterschiedlichen Symbolen eingetragen. Deutlich liegen die Werte für St 52 tiefer als für St 37. Aus den Versuchswerten wurden für beide Stahlsorten getrennt Regressionsgeraden berechnet.

$$\text{St 37: } P/(t \cdot d \cdot R_{eH}) = 1.50 \, e_1/d_L + 0.196$$

$$\text{St 52: } P/(t \cdot d \cdot R_{eH}) = 1.44 \, e_1/d_L - 0.059$$

Zum Vergleich sind entsprechende Geraden nach mehreren Normen mit aufgenommen:

1. Alte DIN 18 800 März 1981

Diese Norm basiert noch auf dem $zul\sigma$ -Konzept, aber der Quotient $zul\sigma_1/zul\sigma$ liefert einen dem Traglastniveau adäquaten Vergleichswert.

2. Neue DIN 18 800 Teil 1 Nov. 1990

Die Tragfähigkeit wird nach Gl. 5 bestimmt. Wie die Versuchsergebnisse zeigen, hat der Randabstand e_2 keinen signifikanten Einfluß; Versuchskörper mit kleinem Randabstand $e_2 < 1,5 d_L$ versagten immer im Nettoquerschnitt, für $e_2 \geq 1,5 d_L$ ist nur der Randabstand e_1 zu berücksichtigen, hierfür gilt:

$$\alpha_1 = 1,1 \cdot e_1/d_L - 0,3$$

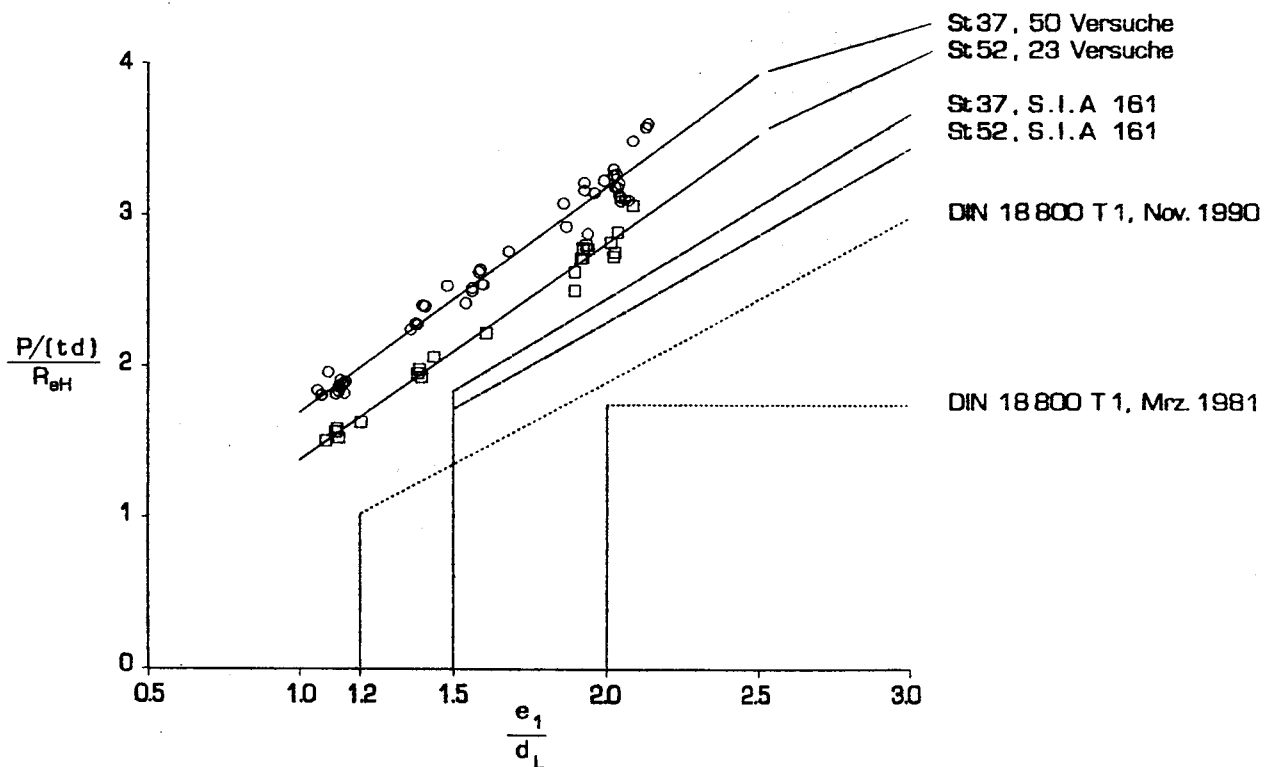


Bild 5 Lochleibungsversagen (Schubbruch) im Vergleich mit Normen

3. Schweizer Norm SIA 161

Abhängig von der Zugfestigkeit f_u des Blechmaterials bestimmt die Lochleibungs-Grenzspannung

$$\sigma_{l,u} = 0,8 (e_1/d) f_u \leq 2,4 \cdot f_u$$

die Tragfähigkeit. Um für den Vergleich mit den Versuchsergebnissen eine gut durchschaubare Darstellungsform zu erhalten, wurden mit der Vereinfachung $e_1/d \sim e_1/d_L$ sowie den Verhältniswerten

$$f_u/f_y = 1,53 \quad \text{für St 37}$$

$$f_u/f_y = 1,44 \quad \text{für St 52}$$

die beiden Geraden

$$\sigma_{l,u}/f_y = 1,23 \cdot e_1/d_L \quad \text{für St 37}$$

$$\sigma_{l,u}/f_y = 1,15 \cdot e_1/d_L \quad \text{für St 52}$$

in das Bild 5 mit aufgenommen.

In allen Fällen werden die Versuchsergebnisse durch die Normen sicher abgedeckt, am wirtschaftlichsten ist die Schweizerische Norm SIA 161.

6 Zusammenfassung

Die Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt über das Tragverhalten von feuerverzinkten Bauteilen mit gestanzten Löchern im Vergleich zu Schraubenverbindungen aus unverzinkten Bauteilen mit gestanzten bzw. mit gebohrten Löchern lassen folgende Aussagen zu:

- Die Traglasten von SL-Verbindungen mit feuerverzinkten Bauteilen und **gestanzten** Löchern lassen sich mit den gleichen Berechnungsformeln wie bei formgleichen Verbindungen aus unbehandelten Bauteilen mit gestanzten oder gebohrten Löchern ausreichend genau berechnen.

- Der Versagensmodus, als Nettoquerschnittsversagen oder Lochleibungsversagen (Schubbruch), bleibt erhalten, wenn auch im Bruchbild der gestanzten SL-Verbindung neben dem Hauptbruchriß zahlreiche zusätzliche Anrisse zu erkennen sind.
- Im Last-Verschiebungs-Verlauf haben Verbindungen aus feuerverzinkten Bauteilen mit **gestanzten** Löchern gegenüber Verbindungen aus schwarzen Bauteilen mit gestanzten Löchern keine Einbuße an Duktilität. Gegenüber Verbindungen mit **gebohrten** Löchern ist eine geringfügige Einbuße an Duktilität zu verzeichnen, das plastische Verformungsvermögen ist aber, abgesehen von Fällen mit extrem kleinen Randabständen, ausreichend.
- Mit der Regelung in der neuen Deutschen Stahlbaunorm DIN 18 800 Teil 1 Nov. 90, die in erster Linie für Verbindungen mit gebohrten Löchern entwickelt wurde, liegt man auch bei gestanzten Löchern mit den Grenzlasten für Nettoquerschnittsversagen und für Lochleibungsversagen gut auf der sicheren Seite und bezüglich des Verformungsverhaltens im duktilen Bereich, so daß unter vorwiegend ruhender Belastung die Anweisungen der Elemente (742) und (805) der DIN 18 800 Teil 1 Nov. 90 auch auf gestanzte feuerverzinkte Bauteile angewendet werden können.

Die Forschungsarbeiten wurden durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen, Köln, finanziell gefördert und durch den Gemeinschaftsausschuß Verzinken, Düsseldorf, fachlich begleitet. Die Stanzung und die Feuerverzinkung wurden durch die Firmen Rüterbau GmbH, Hannover-Langenhagen, und Arnold Georg AG, Neuwied am Rhein, kostenlos übernommen. Hierfür sagen wir unseren besten Dank.

Literatur

- /1/ Scheer, J., Maier, W. und Hofmeister, M.: Lochleibungsfestigkeit von geschraubten Verbindungen mit gestanzten Löchern unter vorwiegend ruhender Belastung. Bericht Nr. 6053 des Instituts für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig, Dezember 1989.
- /2/ Valtinat, G., Dangelmaier, P. und Wilhelm, M.: Schraubenverbindungen mit gestanzten Löchern in zugbeanspruchten, unbehandelten Bauteilen. Forschungsbericht des Arbeitsbereichs Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Hamburg 1993 (in Vorbereitung).
- /3/ Valtinat, G., Dangelmaier, P. und Wilhelm, M.: Schraubenverbindungen mit gestanzten Löchern in zugbeanspruchten, feuerverzinkten Bauteilen. Forschungsbericht des Arbeitsbereichs Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg. (AiF-Forschungs-Nr. 7448, GAV-Nr. FD18). Hamburg 1993.

Tabelle 1 Abmessungen und Tragfähigkeiten der Versuchskörper

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Versuch Nr.	Kennzahlen Stahl-Blech-Loch-e ₁ -e ₂	Schrauben Güte	t [mm]	b [mm]	d _L [mm]	a ₁ [mm]	a _{2,1} [mm]	a _{2,2} [mm]	R _{eff} [N/mm ²]	R _n [N/mm ²]	P _{Vers} [kN]
1	3 - 12 - 14 - 30 - 15	10.9	12.3	30.1	14.0	22.9	10.0	6.5	273.3	386.7	81.5 N
64	3 - 12 - 14 - 30 - 15	12.9	12.3	30.4	14.0	22.8	8.1	8.4	273.3	386.7	89.8 N
65	3 - 12 - 14 - 30 - 15	12.9	12.3	30.3	14.0	22.9	8.1	8.3	273.3	386.7	88.7 N
2	3 - 12 - 14 - 15 - 20	10.9	12.3	40.0	14.0	8.3	13.4	12.9	273.3	386.7	79.2 S
66	3 - 12 - 14 - 15 - 20	12.9	12.3	40.4	14.0	8.0	13.0	13.3	273.3	386.7	72.9 S
67	3 - 12 - 14 - 15 - 20	12.9	12.3	40.1	14.0	7.8	13.0	13.2	273.3	386.7	74.1 S
3	3 - 12 - 14 - 20 - 20	10.9	12.3	39.8	14.0	13.7	13.1	12.9	273.3	386.7	102.2 S
68	3 - 12 - 14 - 20 - 20	12.9	12.3	40.1	14.0	12.7	13.3	13.0	273.3	386.7	96.8 S
69	3 - 12 - 14 - 20 - 20	12.9	12.3	40.7	14.0	12.6	13.6	13.3	273.3	386.7	97.0 S
4	3 - 12 - 14 - 30 - 20	10.9	12.3	39.9	14.0	23.3	13.2	12.9	273.3	386.7	123.2 N+B
70	3 - 12 - 14 - 30 - 20	12.9	12.3	40.3	14.0	23.0	13.3	13.2	273.3	386.7	131.7 N+B
71	3 - 12 - 14 - 30 - 20	12.9	12.3	40.1	14.0	23.0	13.0	13.3	273.3	386.7	128.1 N+B
5	3 - 12 - 14 - 35 - 20	10.9	12.3	39.9	14.0	28.6	13.6	12.7	273.3	386.7	124.5 N+B
72	3 - 12 - 14 - 35 - 20	12.9	12.3	40.2	14.0	27.8	13.2	13.0	273.3	386.7	131.8 N+B
73	3 - 12 - 14 - 35 - 20	12.9	12.3	40.6	14.0	27.4	13.2	13.5	273.3	386.7	133.2 N+B
6	3 - 12 - 14 - 30 - 30	12.9	12.3	58.8	14.0	22.2	23.4	22.6	273.3	386.7	141.0 S
74	3 - 12 - 14 - 30 - 30	12.9	12.3	60.0	14.0	22.8	22.7	23.2	273.3	386.7	144.7 S
75	3 - 12 - 14 - 30 - 30	12.9	12.3	60.7	14.0	22.9	23.3	23.4	273.3	386.7	145.6 S
7	3 - 12 - 18 - 35 - 20	10.9	12.3	40.1	18.0	25.9	11.5	11.1	273.3	386.7	110.7 N
8	3 - 12 - 18 - 20 - 25	10.9	12.3	49.8	18.0	11.3	15.9	16.0	273.3	386.7	98.3 S
9	3 - 12 - 18 - 25 - 25	10.9	12.3	50.4	18.0	15.8	15.8	16.6	273.3	386.7	122.9 S
10	3 - 12 - 18 - 35 - 25	10.9	12.3	49.8	18.0	24.9	16.4	15.7	273.3	386.7	155.0 N
11	3 - 12 - 18 - 35 - 35	10.9	12.3	69.6	18.0	26.3	25.9	26.1	273.3	386.7	169.5 S
12	3 - 16 - 18 - 35 - 20	10.9	16.2	40.3	18.0	25.9	11.7	11.5	290.2	429.8	160.9 N
76	3 - 16 - 18 - 35 - 20	12.9	16.2	40.2	18.0	25.9	11.2	11.1	290.2	429.8	167.2 N
77	3 - 16 - 18 - 35 - 20	12.9	16.2	40.6	18.0	25.9	11.3	11.3	290.2	429.8	168.7 N
13	3 - 16 - 18 - 20 - 25	10.9	16.2	50.4	18.0	11.3	17.1	16.5	290.2	429.8	139.9 S
78	3 - 16 - 18 - 20 - 25	12.9	16.2	50.2	18.0	11.3	16.0	16.2	290.2	429.8	140.3 S
79	3 - 16 - 18 - 20 - 25	12.9	16.2	50.1	18.0	11.4	15.7	16.3	290.2	429.8	143.4 S
14	3 - 16 - 18 - 25 - 25	10.9	16.2	49.9	18.0	15.5	17.0	15.6	290.2	429.8	169.0 S
80	3 - 16 - 18 - 25 - 25	12.9	16.2	49.9	18.0	15.8	16.1	15.8	290.2	429.8	171.4 S
81	3 - 16 - 18 - 25 - 25	12.9	16.2	50.1	18.0	15.9	16.0	16.2	290.2	429.8	171.3 S
15	3 - 16 - 18 - 35 - 25	10.9	16.2	49.8	18.0	26.3	16.3	16.3	290.2	429.8	218.9 N+B
82	3 - 16 - 18 - 30 - 25	12.9	16.2	49.9	18.0	21.2	16.0	16.0	290.2	429.8	207.8 S a)
83	3 - 16 - 18 - 35 - 25	12.9	16.2	49.9	18.0	25.9	15.7	16.2	290.2	429.8	218.8 N+B
16	3 - 16 - 18 - 45 - 25	12.9	16.2	50.0	18.0	35.4	16.9	16.0	290.2	429.8	217.2 N
84	3 - 16 - 18 - 45 - 25	12.9	16.2	50.3	18.0	36.0	16.1	16.2	290.2	429.8	225.8 N+B
85	3 - 16 - 18 - 45 - 25	12.9	16.2	50.2	18.0	35.8	16.0	16.2	290.2	429.8	224.2 N+B
17	3 - 16 - 18 - 35 - 35	12.9	16.2	69.9	18.0	24.5	24.6	27.1	290.2	429.8	232.0 S
86	3 - 16 - 18 - 35 - 35	12.9	16.2	70.3	18.0	25.7	26.2	26.2	290.2	429.8	238.4 S
87	3 - 16 - 18 - 35 - 35	12.9	16.2	70.3	18.0	25.7	25.8	26.5	290.2	429.8	242.2 S

a) Probe falsch gefertigt: e₁ = 30 mm statt 35 mm

N Nettoquerschnittsversagen

S Lochleibungsversagen (Schubbruch)

N+B Fließen im Netto- und im Bruttoquerschnitt

Tabelle 2 Abmessungen und Tragfähigkeiten (Fortsetzung)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Versuch Nr.	Kennzahlen Stahl-Blech-Loch-e ₁ -e ₂	Schrauben Güte	t [mm]	b [mm]	d _L [mm]	a ₁ [mm]	a _{2,1} [mm]	a _{2,2} [mm]	R _{eH} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	P _{Vers} [kN]
18	3 - 16 - 22 - 45 - 25	12.9	16.2	49.8	22.0	33.6	14.7	14.2	290.2	429.8	198.2 N
88	3 - 16 - 22 - 45 - 25	12.9	16.2	50.6	22.0	34.3	14.5	14.2	290.2	429.8	212.9 N
89	3 - 16 - 22 - 45 - 25	12.9	16.2	50.2	22.0	33.7	14.2	14.2	290.2	429.8	204.8 N
19	3 - 16 - 22 - 25 - 35	12.9	16.2	70.0	22.0	13.6	24.3	24.0	290.2	429.8	170.4 S
90	3 - 16 - 22 - 25 - 35	12.9	16.2	70.3	22.0	14.2	24.5	23.7	290.2	429.8	177.2 S
91	3 - 16 - 22 - 25 - 35	12.9	16.2	70.5	22.0	14.1	24.5	23.9	290.2	429.8	176.1 S
20	3 - 16 - 22 - 35 - 35	12.9	16.2	70.1	22.0	23.3	24.5	24.0	290.2	429.8	235.0 S
92	3 - 16 - 22 - 35 - 35	12.9	16.2	70.6	22.0	23.9	24.6	24.0	290.2	429.8	248.4 S
93	3 - 16 - 22 - 35 - 35	12.9	16.2	70.3	22.0	23.8	23.8	24.4	290.2	429.8	246.6 S
21	3 - 16 - 22 - 45 - 35	12.9	16.2	70.0	22.0	34.6	24.4	24.0	290.2	429.8	291.9 S
94	3 - 16 - 22 - 45 - 35	12.9	16.2	70.8	22.0	33.9	24.8	23.9	290.2	429.8	295.1 S
95	3 - 16 - 22 - 45 - 35	12.9	16.2	69.8	22.0	33.8	24.2	23.6	290.2	429.8	300.0 S
22	3 - 16 - 22 - 45 - 45	12.9	16.2	89.9	22.0	33.6	34.4	33.6	290.2	429.8	300.1 S
96	3 - 16 - 22 - 45 - 45	12.9	16.2	90.2	22.0	33.5	34.3	33.7	290.2	429.8	307.6 S
97	3 - 16 - 22 - 45 - 45	12.9	16.2	89.6	22.0	33.5	33.7	33.7	290.2	429.8	311.0 S
23	3 - 20 - 22 - 45 - 25	10.9	20.0	50.4	22.0	34.0	15.1	14.5	286.7	411.4	249.4 N+B
98	3 - 20 - 22 - 45 - 25	12.9	20.0	50.6	22.0	33.7	14.2	14.3	286.7	411.4	256.3 N+B
99	3 - 20 - 22 - 45 - 25	12.9	20.0	49.6	22.0	34.2	13.9	14.0	286.7	411.4	222.2 N b)
24	3 - 20 - 22 - 25 - 35	10.9	20.0	70.3	22.0	14.1	25.1	24.3	286.7	411.4	214.7 S
100	3 - 20 - 22 - 25 - 35	12.9	20.0	69.8	22.0	14.1	24.0	24.1	286.7	411.4	215.7 S
101	3 - 20 - 22 - 25 - 35	12.9	20.0	69.5	22.0	14.3	24.1	23.8	286.7	411.4	217.3 S
25	3 - 20 - 22 - 35 - 35	10.9	20.0	70.2	22.0	23.3	23.6	25.6	286.7	411.4	288.9 S
102	3 - 20 - 22 - 35 - 35	12.9	20.0	69.3	22.0	24.1	23.9	23.6	286.7	411.4	291.6 S
103	3 - 20 - 22 - 35 - 35	12.9	20.0	70.0	22.0	24.0	23.7	24.2	286.7	411.4	291.8 S
26	3 - 20 - 22 - 45 - 35	12.9	20.0	69.8	22.0	34.3	24.3	24.3	286.7	411.4	356.6 S
104	3 - 20 - 22 - 45 - 35	12.9	20.0	70.3	22.0	34.0	24.1	24.1	286.7	411.4	357.9 S
105	3 - 20 - 22 - 45 - 35	12.9	20.0	70.5	22.0	34.0	24.2	24.3	286.7	411.4	355.3 S
27	3 - 20 - 22 - 55 - 35	12.9	20.0	70.1	22.0	43.9	22.8	26.0	286.7	411.4	372.4 N+B
106	3 - 20 - 22 - 55 - 35	12.9	20.0	70.2	22.0	44.1	24.5	23.8	286.7	411.4	405.9 N+B
107	3 - 20 - 22 - 55 - 35	12.9	20.0	69.7	22.0	43.9	24.2	23.5	286.7	411.4	396.7 N+B
28	3 - 20 - 22 - 45 - 45	12.9	20.0	90.2	22.0	32.8	33.5	35.6	286.7	411.4	371.1 S
108	3 - 20 - 22 - 45 - 45	12.9	20.0	90.2	22.0	33.7	34.6	33.6	286.7	411.4	375.5 S
109	3 - 20 - 22 - 45 - 45	12.9	20.0	90.0	22.0	33.9	33.9	34.1	286.7	411.4	368.5 S
29	3 - 20 - 26 - 50 - 30	10.9	20.0	60.2	26.0	37.0	17.8	17.2	286.7	411.4	293.8 N
30	3 - 20 - 26 - 30 - 40	10.9	20.0	79.9	26.0	16.8	27.7	26.8	286.7	411.4	250.0 S
31	3 - 20 - 26 - 40 - 40	12.9	20.0	80.1	26.0	27.0	27.6	26.9	286.7	411.4	332.8 S
32	3 - 20 - 26 - 50 - 40	12.9	20.0	80.2	26.0	37.4	28.0	26.7	286.7	411.4	396.6 S
33	3 - 20 - 26 - 50 - 50	12.9	20.0	99.9	26.0	35.6	35.3	39.0	286.7	411.4	403.0 S

b) Vorzeitiges Versagen bei Weiterbelastung nach Haltepause
 N Nettoquerschnittsversagen
 S Lochleibungsversagen (Schubbruch)
 N+B Fließen im Netto- und im Bruttoquerschnitt

Tabelle 3 Abmessungen und Tragfähigkeiten (Fortsetzung)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Versuch Nr.	Kennzahlen Stahl-Blech-Loch-e ₁ -e ₂	Schrauben Güte	t [mm]	b [mm]	d _L [mm]	a ₁ [mm]	a _{2,1} [mm]	a _{2,2} [mm]	R _{eff} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	P _{Vers} [kN]
34	5 - 12 - 14 - 30 - 15	10.9	12.1	30.3	14.0	23.2	11.2	5.6	422.6	555.9	92.4 N
35	5 - 12 - 14 - 15 - 20	10.9	12.1	40.1	14.0	8.2	13.4	13.7	422.6	555.9	92.2 S
36	5 - 12 - 14 - 20 - 20	10.9	12.1	40.0	14.0	13.1	13.4	12.6	422.6	555.9	126.6 S
37	5 - 12 - 14 - 30 - 20	12.9	12.1	39.6	14.0	22.5	13.1	12.4	422.6	555.9	170.5 N
38	5 - 12 - 14 - 35 - 20	12.9	12.1	39.9	14.0	27.8	13.3	12.6	422.6	555.9	170.4 N
39	5 - 12 - 14 - 30 - 30	12.9	12.1	59.7	14.0	22.2	23.2	22.5	422.6	555.9	188.4 S
40	5 - 12 - 14 - 30 - 35	12.9	12.1	70.0	14.0	22.7	28.4	27.7	422.6	555.9	186.6 A
41	5 - 12 - 18 - 35 - 20	10.9	12.1	39.9	18.0	25.6	11.6	10.9	422.6	555.9	147.7 N
42	5 - 12 - 18 - 35 - 25	10.9	12.1	50.1	18.0	26.0	16.1	15.5	422.6	555.9	210.9 N
43	5 - 12 - 18 - 35 - 35	10.9	12.1	70.1	18.0	25.9	26.5	25.4	422.6	555.9	227.4 S
44	5 - 16 - 18 - 35 - 20	12.9	16.4	39.7	18.0	25.9	11.1	10.9	412.9	546.6	205.2 N
110	5 - 16 - 18 - 35 - 20	12.9	16.4	39.9	18.0	26.0	11.1	11.2	412.9	546.6	207.3 N
111	5 - 16 - 18 - 35 - 20	12.9	16.4	39.8	18.0	26.1	11.3	10.9	412.9	546.6	208.2 N
45	5 - 16 - 18 - 20 - 25	10.9	16.5	50.6	18.0	11.3	16.8	16.1	414.5	549.3	166.6 S
112	5 - 16 - 18 - 20 - 25	12.9	16.4	50.1	18.0	11.1	16.0	16.4	412.9	546.6	169.4 S
113	5 - 16 - 18 - 20 - 25	12.9	16.4	49.6	18.0	11.2	15.9	16.1	412.9	546.6	171.5 S
46	5 - 16 - 18 - 25 - 25	10.9	16.5	50.9	18.0	16.1	17.1	16.2	414.5	549.3	211.0 S
114	5 - 16 - 18 - 25 - 25	12.9	16.4	49.8	18.0	16.0	16.0	16.0	412.9	546.6	214.7 S
115	5 - 16 - 18 - 25 - 25	12.9	16.4	50.1	18.0	15.9	16.0	16.2	412.9	546.6	212.0 S
47	5 - 16 - 18 - 35 - 25	12.9	16.5	49.9	18.0	25.5	16.1	15.8	414.5	549.3	282.1 N
116	5 - 16 - 18 - 35 - 25	12.9	16.4	49.8	18.0	25.8	15.8	16.1	412.9	546.6	282.3 N
117	5 - 16 - 18 - 35 - 25	12.9	16.4	49.7	18.0	25.8	15.7	15.9	412.9	546.6	284.3 N
48	5 - 16 - 18 - 45 - 25	12.9	16.5	50.2	18.0	35.8	16.2	15.7	414.5	549.3	272.9 N
118	5 - 16 - 18 - 45 - 25	12.9	16.4	50.0	18.0	35.8	15.8	16.3	412.9	546.6	287.2 N
119	5 - 16 - 18 - 45 - 25	12.9	16.4	50.4	18.0	35.7	16.2	16.3	412.9	546.6	288.2 N
49	5 - 16 - 18 - 35 - 35	12.9	16.5	69.6	18.0	25.8	26.0	25.6	414.5	549.3	307.0 S
120	5 - 16 - 18 - 35 - 35	12.9	16.4	70.0	18.0	25.5	26.1	26.0	412.9	546.6	294.3 S
121	5 - 16 - 18 - 35 - 35	12.9	16.4	70.4	18.0	25.6	26.1	26.4	412.9	546.6	294.5 S
50	5 - 16 - 18 - 35 - 45	12.9	16.5	89.9	18.0	26.1	36.4	35.7	414.5	549.3	302.8 A
122	5 - 16 - 18 - 35 - 45	12.9	16.4	90.0	18.0	25.6	36.2	36.0	412.9	546.6	300.7 S
123	5 - 16 - 18 - 35 - 45	12.9	16.4	89.9	18.0	25.6	36.0	36.2	412.9	546.6	302.2 S
51	5 - 16 - 22 - 45 - 25	12.9	16.5	49.8	22.0	33.8	15.0	13.8	414.5	549.3	254.0 N
52	5 - 16 - 22 - 45 - 35	12.9	16.5	70.1	22.0	33.6	24.3	24.2	414.5	549.3	377.4 S
53	5 - 16 - 22 - 45 - 45	12.9	16.5	90.0	22.0	33.8	34.6	34.2	414.5	549.3	395.3 S
54	5 - 20 - 22 - 45 - 25	12.9	20.4	49.9	22.0	34.7	13.0	14.8	423.9	566.8	317.0 N
55	5 - 20 - 22 - 25 - 35	12.9	20.4	69.7	22.0	15.4	22.5	25.7	423.9	566.8	281.2 S
56	5 - 20 - 22 - 35 - 35	12.9	20.4	70.3	22.0	24.3	24.6	24.0	423.9	566.8	384.4 S
57	5 - 20 - 22 - 45 - 35	12.9	20.4	70.3	22.0	33.5	22.3	26.3	423.9	566.8	472.3 S
58	5 - 20 - 22 - 55 - 35	12.9	20.4	70.0	22.0	43.5	24.0	24.3	423.9	566.8	524.4 N
59	5 - 20 - 22 - 45 - 45	12.9	20.4	89.9	22.0	33.3	34.3	33.8	423.9	566.8	488.2 S
60	5 - 20 - 22 - 45 - 55	12.9	20.4	110.4	22.0	32.7	44.6	43.9	423.9	566.8	496.0 A
61	5 - 20 - 26 - 50 - 30	12.9	20.4	60.3	26.0	36.7	17.2	17.4	423.9	566.8	390.2 N
62	5 - 20 - 26 - 50 - 40	12.9	20.4	79.9	26.0	36.3	27.5	26.7	423.9	566.8	519.9 S
63	5 - 20 - 26 - 50 - 50	12.9	20.4	100.2	26.0	36.3	37.8	36.7	423.9	566.8	545.3 S

N Nettoquerschnittsversagen
 S Lochleibungsversagen (Schubbruch)
 A Abscherversagen