

Günther Valtinat

Technische Universität Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Stahlbau und Holzbau

## **LOW-CYCLE-FATIGUE-VERHALTEN UND SCHWINGFESTIGKEITSUNTERSUCHUNGEN AN SCHRAUBENVERBINDUNGEN MIT FEUERVER- ZINKTEN BAUTEILEN UND GESTANZTEN LÖCHERN**

Bericht Nr. 135

des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V.

Forschungsvorhaben GAV-Nr. FD 21

---

Die Untersuchungen wurden vom Bundesminister für Wirtschaft / von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF) gefördert, AiF-Forschungsvorhaben Nr. 9864

---

Hamburg 1996

## 1. Einleitung

Beim Bau von Masten, Funkmasten, abgespannten Masten, Hochspannungsmasten und Türmen in Gitterbauweise werden schlanke, feuerverzinkte Bauteile als Eckstiele, als Diagonalen und als Horizontalen verwendet. Die Herstellung und die Fertigung der einzelnen Bauteile mit gestanzten Löchern sind preisgünstig. Die Feuerverzinkung solcher Bauteile erfolgt nach der Bearbeitung und nach dem Stanzen, damit alle Schnittkanten und Lochwangen korrosionsgeschützt sind. Zusammenbau und Montage durch Schweißung sind nicht üblich, weil der Korrosionsschutz Feuerverzinkung dabei Einbußen erleidet und durch nachträglich durchgeführte Ausbesserungs-Maßnahmen nicht wieder auf ein gleichwertiges Niveau wie die Feuerverzinkung angehoben werden kann. Daher sind Schraubenverbindungen üblich. Bei Schraubenverbindungen gibt es drei Möglichkeiten:

1. SL-Verbindungen mit Schrauben niedriger Festigkeit einzusetzen ohne Vorspannung.
2. SL-Verbindungen mit Schrauben hoher Festigkeit jedoch ohne planmäßige Vorspannung und ohne spezielle Reibflächenbehandlung. Die Kraftübertragung erfolgt rechnerisch durch Scherwirkungen und durch Lochleibungswirkungen.
3. GV-Verbindungen mit hochfesten vorgespannten Schrauben und mit einer Reibflächenbehandlung der Feuerverzinkungsschicht z.B. durch Aufbringen einer Alkali-Silikat-Zinkstaubbeschichtung.

Reibbeiwerte für die letztgenannte Beschichtung sind in den Normen nicht angegeben, gleichwohl sind zahlreiche Untersuchungsergebnisse verfügbar, um dennoch auch bei feuerverzinkten Bauteilen eine Verbindung herzustellen, bei welcher die Kräfte planmäßig und rechnerisch durch Reibung und Vorspannung übertragen werden.

Diese Veröffentlichung beschäftigt sich mit den beiden erstgenannten Verbindungen, bei welchen Kräfte rechnerisch auf Abscheren und Lochleibung übertragen werden und die Schrauben keine planmäßige Vorspannung haben. Diese SL-Verbindungen sind hinsichtlich des Nettoquerschnitts mit gestanzten Löchern am ungünstigsten beansprucht.

Die obengenannten Mastkonstruktionen sind nach den Vorschriften als „vorwiegend ruhend belastete“ Konstruktionen eingestuft, eine Betriebsfestigkeitsberechnung entfällt deshalb. Ein wesentlicher Lastfall wird durch die Windlasten gebildet. Da der Wind aus wechselnden Richtungen auftritt, ist klar, daß sowohl die einzelnen Stäbe als auch die Verbindungen

durch sich ändernde Lasten beansprucht werden; es handelt sich dabei nicht um schwingende Belastungen, sondern um solche im low-cycle-fatigue-Bereich, die Beanspruchungen können im gleichen Vorzeichenbereich bleiben, sie können aber auch ihr Vorzeichen wechseln.

Der Komplex der statisch beanspruchten Stahlbauverbindungen mit feuerverzinkten Bauteilen und gestanzten Löchern ist in der Literatur [1] bis [7] abgehandelt.

In den neuen Bemessungsvorschriften des Stahlbaus kann die Grenzlast der Verbindung, reduziert um den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  für den Widerstand, ausgenutzt werden, daraus können bei Lastschwankungen mit Lastumkehr wiederholte Plastizierungen auftreten.

Werden die Schraubenlöcher aus wirtschaftlichen Gründen durch Stanzen erzeugt, dann wird der Werkstoff um das Schraubenloch herum stark kalt verformt und verfestigt [5], wodurch die Duktilität abnimmt; zudem wird ein Eigenspannungszustand eingepreßt. Diese Einflüsse können die Reißgefahr erhöhen und die Festigkeit der Verbindung beeinträchtigen. Durch das Erwärmen beim Feuerverzinken können einerseits die Eigenspannungsspitzen am kaltverfestigten Lochrand abgebaut werden, andererseits kann es zur Alterung und/oder Reißinitiation kommen. Unter statischer Beanspruchung sind die Auswirkungen gering.

Das im Gebrauchslastniveau auftretende Plastizieren am Lochrand, das heißt hier in Zonen reduzierter Duktilität, kann somit bereits im low-cycle-Bereich zu Anrissen führen, die sich infolge sich ändernder Beanspruchungen schnell zum Bruch der gesamten Verbindung entwickeln können. Im Nutzlastbereich wird dabei an Lastwechselzahlen von 10 000 bis 100 000 gedacht. Diese niedrigen Lastwechselzahlen werden noch nicht dem Bereich der eigentlichen Betriebsfestigkeit bzw. Dauerfestigkeit zugerechnet.

Schwinganrisse einer SL-Verbindung im Nettoquerschnitt im Bereich stanzbeeinflusster, plastizierter Zonen um das Schraubenloch herum können meines Erachtens durch volles Vorspannen der HV-Schrauben abgefangen bzw. zumindestens gemildert werden. Welchen Einfluß eine solche Vorspannung auf das low-cycle-fatigue-Verhalten und die Betriebsfestigkeit der Verbindung hat, wurde in ersten Versuchen angegangen.

## 2. Ziel der Untersuchungen

Das Untersuchungsziel war die Überprüfung des low-cycle-fatigue-Verhaltens von SL-Verbindungen feuerverzinkter Stahlbauteile in St 37 und St 52 mit gestanzten Löchern im Nutzlastbereich. Von besonderem Interesse war dabei der Nettoquerschnitt der Bauteile, und zwar sowohl in einer Verbindung, d.h. mit Übertragung von Lasten im Lochbereich durch Verbindungsmittel, als auch beim einfachen Lochstab. Zu klären ist die Frage, ob solche Verbindungen, die aus der Nutzlast auf sie entfallenden Lasten zwischen 10.000 bis 100.000 mal ertragen können bzw. welche Lastwechselzahlen sich bis zum Versagen ergeben. Als Vergleich hierzu wurde das low-cycle-fatigue-Verhalten baugleicher Verbindungen feuerverzinkter Bauteile mit gebohrten Löchern unter Nutzlast ermittelt.

## 3. Experimentelle Untersuchungen

Es wurden Verbindungen (V) und Lochstäbe (L) aus RSt37-2 sowohl in grundierter nicht feuerverzinkter (nf) als auch in feuerverzinkter (f) Ausfertigung mit gestanzten (s) und gebohrten (b) Löchern untersucht (Bild 1). Das Stanzen erfolgte vor dem Feuerverzinken. Der Lochdurchmesser verringerte sich durch den Zinkauftrag an der Lochwandung um bis zu 0,5 mm. Die Löcher d1 und d2 in dem Mittelstab waren gestanzt, das Loch d3 war nach dem Verzinken gebohrt. Es wurden die Bauteildicke und -breite variiert, was zu Änderungen der Lochleibungsbeanspruchung führte. Versuchskörper mit den Löchern d4 bis d12 wurden entsprechend den Bezeichnungen (s = gestanzt, b = gebohrt) hergestellt.

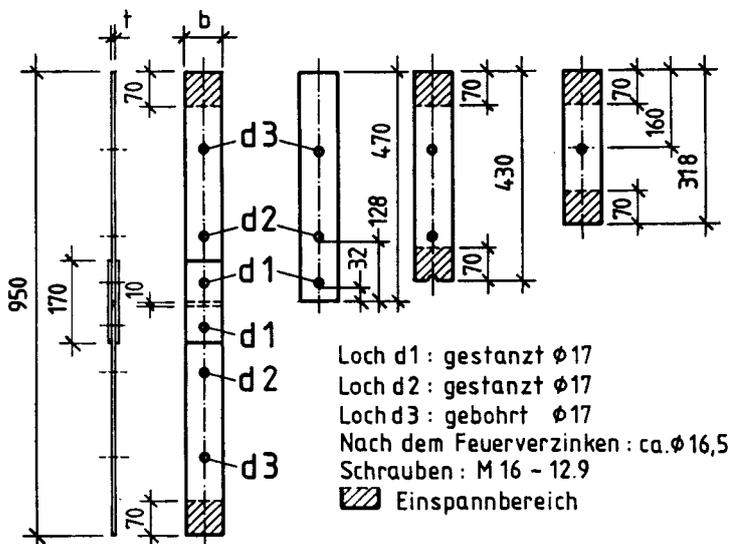


Bild 1: Typische zweischnittige SL-Verbindung und Lochstäbe für die Versuchsdurchführung

## 4. Durchführung der Versuche

Bei der Durchführung der Versuche waren folgende Gesichtspunkte von Wichtigkeit:

1. Sofern möglich, sollten sowohl die „Verbindungen“ als auch die „Lochstäbe“ in der jeweiligen entsprechenden Ausführung des Loches und der Oberfläche mit gleichen Ober- und Unterlasten gefahren werden. Der Vergleich sollte dann anhand der erreichten Lastwechselzahlen durchgeführt werden.
2. Bei allen Versuchen betrug die Oberspannung  $\sigma_o = 159 \text{ N/mm}^2$  und mehr. Die Unterspannung betrug in allen Fällen jeweils 10 % der Oberspannung, das heißt  $R = + 0,1$ . Die Schwingfrequenz betrug 10 Hz.
3. Es wurde versucht, in einen Mittelstab mit einer zu prüfenden „Verbindung“ auch schon die zugeordneten Löcher für die später anzuschließenden Versuche „gestanzter Lochstab“ und „gebohrter Lochstab“ einzubringen, damit der Lochstab schon die Lastwechselzahl der entsprechenden Verbindung als Vorbeanspruchung erhält. In Fällen, wo die Beibehaltung der Ober- und Unterlast für den Lochstab nicht zum Schwingversagen geführt hat (Durchläufer), wurden die Oberspannungen und entsprechend die Unterspannungen erhöht.

## 5. Versuchsergebnisse

Es wurden insgesamt 117 Versuchskörpertypen geprüft, einige davon nach Abbruch wegen Nichtversagens mit erhöhten Belastungen. Im folgenden sollen nicht die Einzelergebnisse dargestellt werden, sondern es sollen 7 Diagramme zur vergleichenden Betrachtung der Ergebnisse dienen. Darüber hinaus faßt die Tabelle 1 die Einzelergebnisse zusammen. Die jeweilige Kurzbezeichnung informiert über Detailangaben zu den Versuchskörpern.

Verbindung und Lochstab mit gestanzten Löchern lagen nicht zu weit in ihren Lastwechselzahlen auseinander; der Lochstab mit gebohrten Löchern jedoch erbrachte bei gleichem Lastniveau eine erhebliche Vergrößerung der Lastwechselzahlen bis weit über 2 Mio.; es hätte zahlreiche Durchläufer gegeben, daher wurden bei diesen Stäben Ober- und Unterspannungen erhöht. Über Einzelergebnisse gibt [8] Auskunft.

**Tabelle 1:** Zusammenstellung der Versuche (Versuchskörpertyp, Abmessungen, Versuchsausführung, Lochidentifikation, Anzahl Schwinglasten und -spannungen) sowie Zusammenfassung der Ergebnisse (Lastwechselzahlen, Bruch oder Durchläufer, dargestellt in Bild)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Versuchskörpertyp Nr.	Stab b·t mm	Ausführung f = feuerverzinkt nf = nicht feuerverzinkt s = gestanzt b = gebohrt V = Verbindung L = Lochstab	geprüfte Loch-Nr.	Anzahl der Versuche	Oberlast P <sub>o</sub> kN	Unterlast P <sub>u</sub> kN	Oberspannung $\sigma_{No}$ N/mm <sup>2</sup>	Unterspannung $\sigma_{Nu}$ N/mm <sup>2</sup>	Gemittelte Lastwechselzahl N	Bruch in geprüfter Loch-Nr.	Diagramm im Bild Nr.
1	80·8	f, s, V	d1	12	80,0	8,0	159	15,9	51.367	ja	2, 3, 4
2	80·8	f, s, L	d2	12	80,0	8,0	159	15,9	657.991	ja	2, 4, 5, 6
3	80·8	f,b,L	d3	12	80,0	8,0	159	15,9	>11.614.191	nein	5
				5	110,9	11,1	220	22,0	268.722	ja	
				3	121,0	12,1	240	24,0	156.297	ja	
4	80·8	f,s,L	d4	6	80,0	8,0	159	15,9	647.999	ja	2, 4, 6
5	80·10	f,s,V	d5	11	94,5	9,45	150	15,0	80.156	ja	3
6	80·8	f,b,V	d6	6	80,0	8,0	159	15,9	40.980	ja	3
7	49·8	f,s,V	d7	6	46,4	4,64	180	18,0	173.032	ja	3, 7
				2	51,5	5,15	200	20,0	131.292	ja	
8	49·8	f,s,L	d8	4	61,8	6,18	240	24,0	70.606	ja	3, 7
				6	46,4	4,64	180	18,0	518.064	ja	
				2	51,5	5,15	200	20,0	325.190	ja	
9	49·8	f,b,V	d9	4	61,8	6,18	240	24,0	164.699	ja	3, 7
				6	46,4	4,64	180	18,0	407.179	ja	
				2	51,5	5,15	200	20,0	191.904	ja	
10	49·8	f,b,L	d10	4	61,8	6,18	240	24,0	70.056	ja	7
				1	80,0	8,0	159	15,9	6.924.287	nein	
				2	69,1	6,91	270	27,0	407.229	ja	
				4	51,5	5,15	200	20,0	1.563.693	ja	
11	80·8	nf,s,V	d11	6	61,8	6,18	240	24,0	405.617	ja	4, 8
				10	80,0	8,0	159	15,9	75.196	ja	
				1	80,0	8,0	159	15,9	>2.089.136	nein	
12	80·8	nf,s,L	d12	1	80,0	8,0	159	15,9	>6.847.273	nein	4, 8
				1	80,0	8,0	159	15,9	>6.847.273	nein	
				5	111,0	11,1	220	22,0	460.023	ja	
				3	121,0	12,1	240	24,0	263.860	ja	

## 5.2 Vergleich der Lastwechselzahlen der verschiedenen Versuchskörpertypen im low-cycle-fatigue-Bereich

### 5.2.1 Übersicht

Im folgenden werden die Versuchsergebnisse unter dem Blickwinkel vergleichender Ergebnisdiskussion betrachtet. Hierzu werden in den Bildern 2 bis 8 die Betriebsfestigkeitsergebnisse nach verschiedenen Gesichtspunkten zum Vergleich aufgetragen.

### 5.2.2 Vergleich: Verbindungen - Lochstäbe, feuerverzinkt, Löcher gestanzt

Im Bild 2 sind die Versuchsergebnisse für die Verbindungen und für die Lochstäbe feuerverzinkter Bauteile mit gestanzten Löchern dargestellt. Es handelt sich hierbei um die Versuchskörpertypen Nr. 1, 2 und 4. Der Vergleich zeigt, daß die Lastwechselzahlen der Lochstäbe (Versuchskörpertypen Nr. 2 und Nr. 4) hinsichtlich der erreichten Lastwechselzahlen über 10 mal so hoch wie die der Verbindungsstäbe liegen. Dieser Abstand ist höchst ungewöhnlich, wenn man ihn mit Betriebsfestigkeitstabellen zuständiger Berechnungsvorschriften für die Kerbfälle „Lochstab“ und „Verbindung“ vergleicht. Die Ursache für die niedrigen Lastwechselzahlen der Verbindung ist höchst wahrscheinlich die außerordentlich hohe Lochleibungsbeanspruchung zwischen Schraube und Lochwand im Mittelteil, die offensichtlich die Spannungsverteilung im Nettoquerschnitt erheblich negativ beeinflusst. Inwieweit auch die Stanzung und die anschließende Feuerverzinkung Einflüsse auf den Nettoquerschnitt haben, wird in den Abschnitten 5.2.3 und 5.2.7 erörtert. Eine genauere Untersuchung der Spannungsspitze am Lochrand und der Spannungsverteilung im Nettoquerschnitt ist nach meiner Auffassung dringend geboten.

### 5.2.3 Vergleich: Verbindungen, feuerverzinkt, Löcher gestanzt - gebohrt

Im Bild 3 sind die Ergebnisse für sämtliche Verbindungen mit feuerverzinkten Bauteilen und gestanzten bzw. gebohrten Löchern aufgetragen. Es handelt sich dabei um Mittelstäbe mit den Abmessungen  $b \cdot t = 80 \cdot 8$ ,  $80 \cdot 10$  und  $49 \cdot 8$ . Die Variation der Dicke und der Breite wurde angestellt, um die Lochleibungsbeanspruchungen bei der Verbindung zwischen Schraube und Lochwand herabzudrücken, denn diese ist von erheblichem Einfluß auf die erreichbare Lastwechselzahl. Man erkennt zunächst bei den feuerverzinkten Bauteilen mit gestanzten Löchern, aber verschiedenen Stabrei-

ten, daß sich die erreichbaren Lastwechselzahlen und low-cycle-fatigue-Festigkeiten mit abnehmender Lochleibungsbeanspruchung zwischen Schraube und Lochwand deutlich erhöhen ( $d1$ ,  $d5$ ,  $d7$ ). Die Lastwechselzahlen bei gebohrten Löchern liegen für den Fall der sehr hohen Lochleibungsbeanspruchung ( $d6$ ) nicht höher als die entsprechenden bei gestanzten Löchern, eher etwas niedriger. Bei den Prüfkörpern mit kleinerer Lochleibungsbeanspruchung ( $d9$ ) allerdings ergeben sich gegenüber gestanzten Löchern erheblich höhere Lastwechselzahlen. Welchen Einfluß die Feuerverzinkung nach dem Stanzen hatte, konnte im Rahmen dieses Diagramms nicht herausgearbeitet werden.

### 5.2.4 Vergleich: Verbindungen - Lochstäbe, Löcher gestanzt, nicht feuerverzinkt - feuerverzinkt

Im Bild 4 ist der Vergleich zwischen den Lastwechselzahlen von Versuchskörpern, die als Verbindungen bzw. als Lochstäbe mit gestanzten Löchern versehen waren, bezüglich der Oberfläche „nicht feuerverzinkt“ und „feuerverzinkt“ dargestellt. Sämtliche Prüfkörper hatten die Abmessungen  $b \cdot t = 80 \cdot 8$ . Bei den Verbindungen liegen, vermutlich infolge der hohen Lochleibungsbeanspruchungen zwischen Schraube und Lochwand, die Lastwechselzahlen nicht feuerverzinkter und feuerverzinkter Bauteile mit gestanzten Löchern im Mittel nur um 50 % auseinander ( $d1$  und  $d11$ ). Bei den Lochstäben ist dagegen der Einfluß der Feuerverzinkung auf low-cycle-fatigue-Festigkeit erheblich ( $d2$  und  $d4$  zu  $d12$ ).

### 5.2.5 Vergleich: Lochstäbe, feuerverzinkt, Löcher gestanzt - gebohrt

Das Bild 5 vergleicht die low-cycle-Betriebsfestigkeiten von feuerverzinkten Lochstäben einmal mit gestanzten ( $d2$ , Vierecksymbole), und mit gebohrten ( $d3$ , Dreiecksymbole) Löchern. Sämtliche im Diagramm auf  $\Delta\sigma = 143,1 \text{ N/mm}^2$  eingetragenen Dreiecke (= Versuchskörpertyp Nr. 3 mit gebohrten Löchern) sind auf diesem Spannungsniveau nicht zu Bruch gegangen, sondern die Versuche wurden abgebrochen, einer dieser Versuchskörper ertrug über 11 Mio. Lastwechsel ohne Versagen. Die Versuche wurden dann mit etwas höheren Lasten ( $\Delta\sigma = 198 \text{ N/mm}^2$ ,  $\Delta\sigma = 216 \text{ N/mm}^2$  und  $\Delta\sigma = 225 \text{ N/mm}^2$ ) wieder aufgenommen und bis zum Versagen schwingbeansprucht. Das Stanzen der Löcher hat hiernach erheblich nachteilige Einflüsse auf die low-cycle-fatigue-Festigkeit der Lochstäbe.

d1,d2,d4

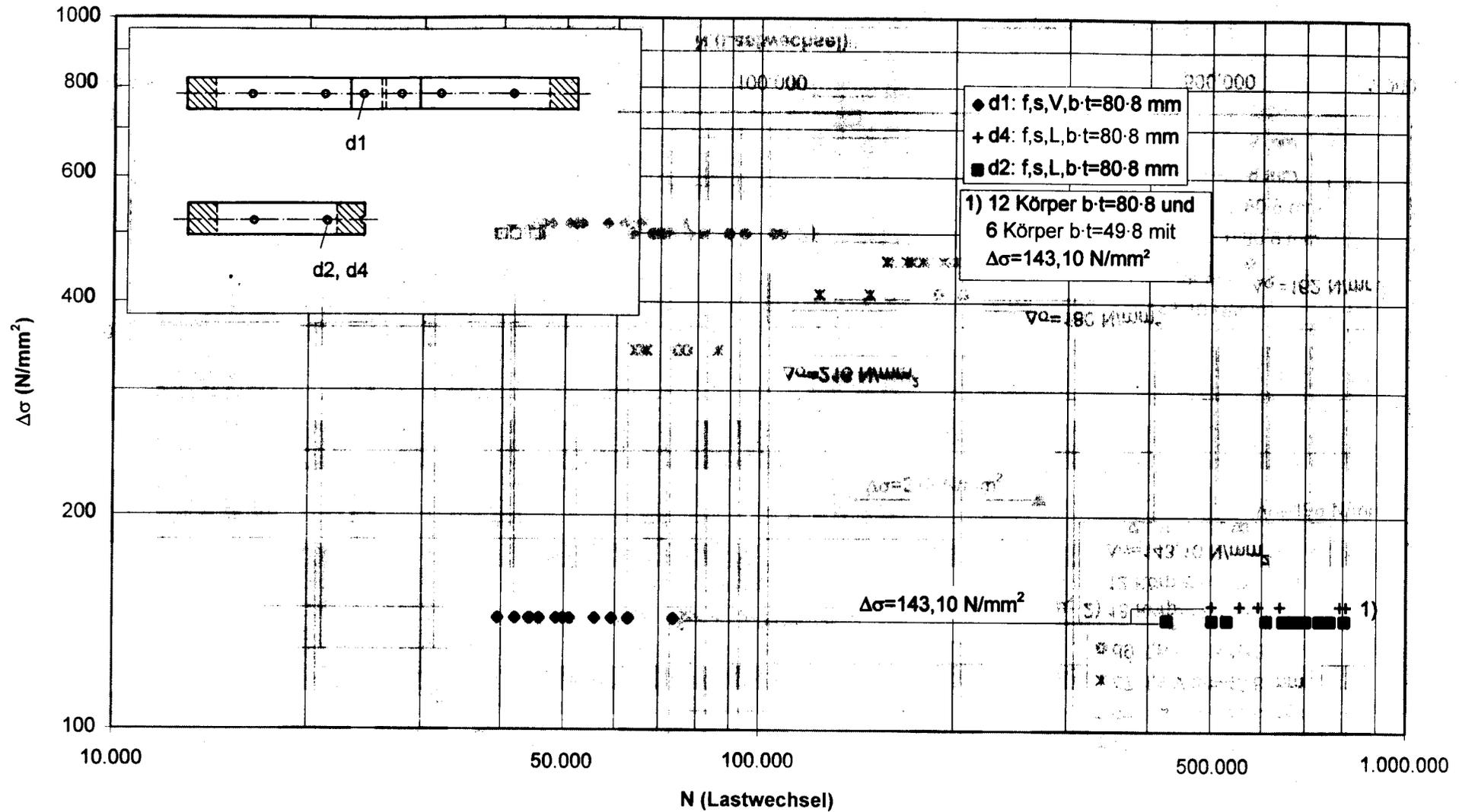


Bild 2: Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen und der low-cycle-fatigue-Festigkeiten der Versuchskörpertypen Nr. 1, 2 und 4; Verbindungen - Lochstäbe; feuerverzinkt; gestanztes Loch d1, d2 und d4; b · t = 80 · 8

d1,d5,d6,d7,d9

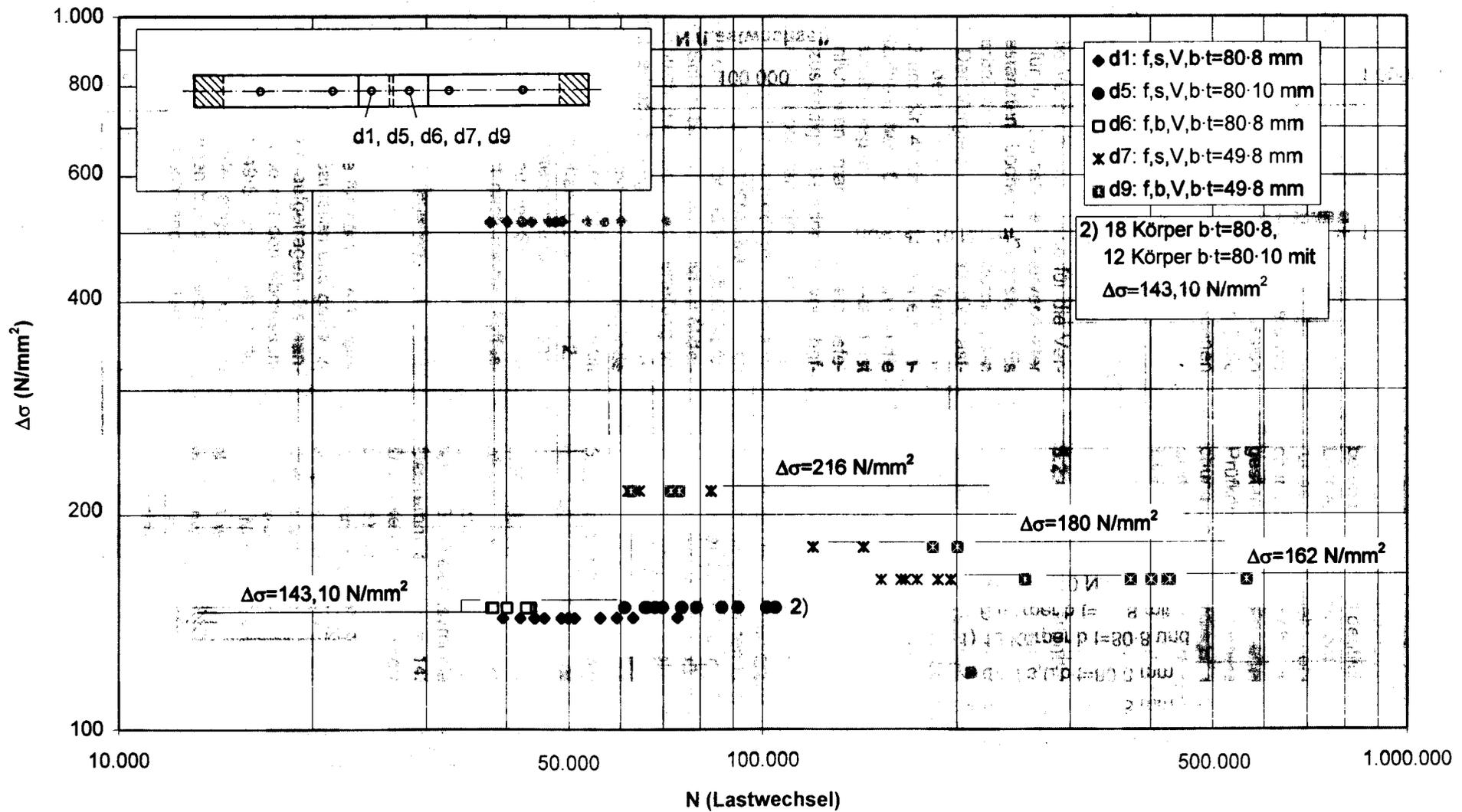
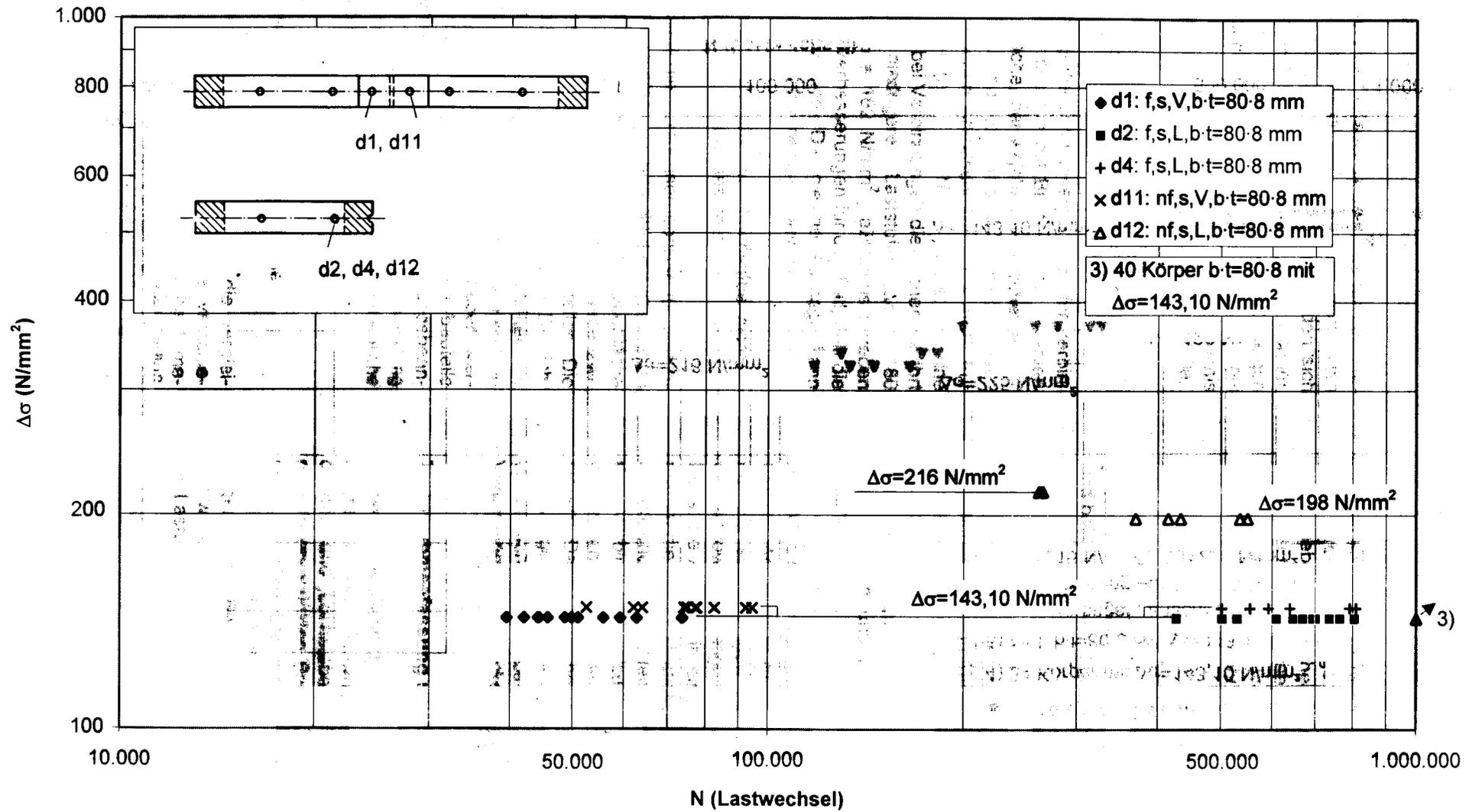


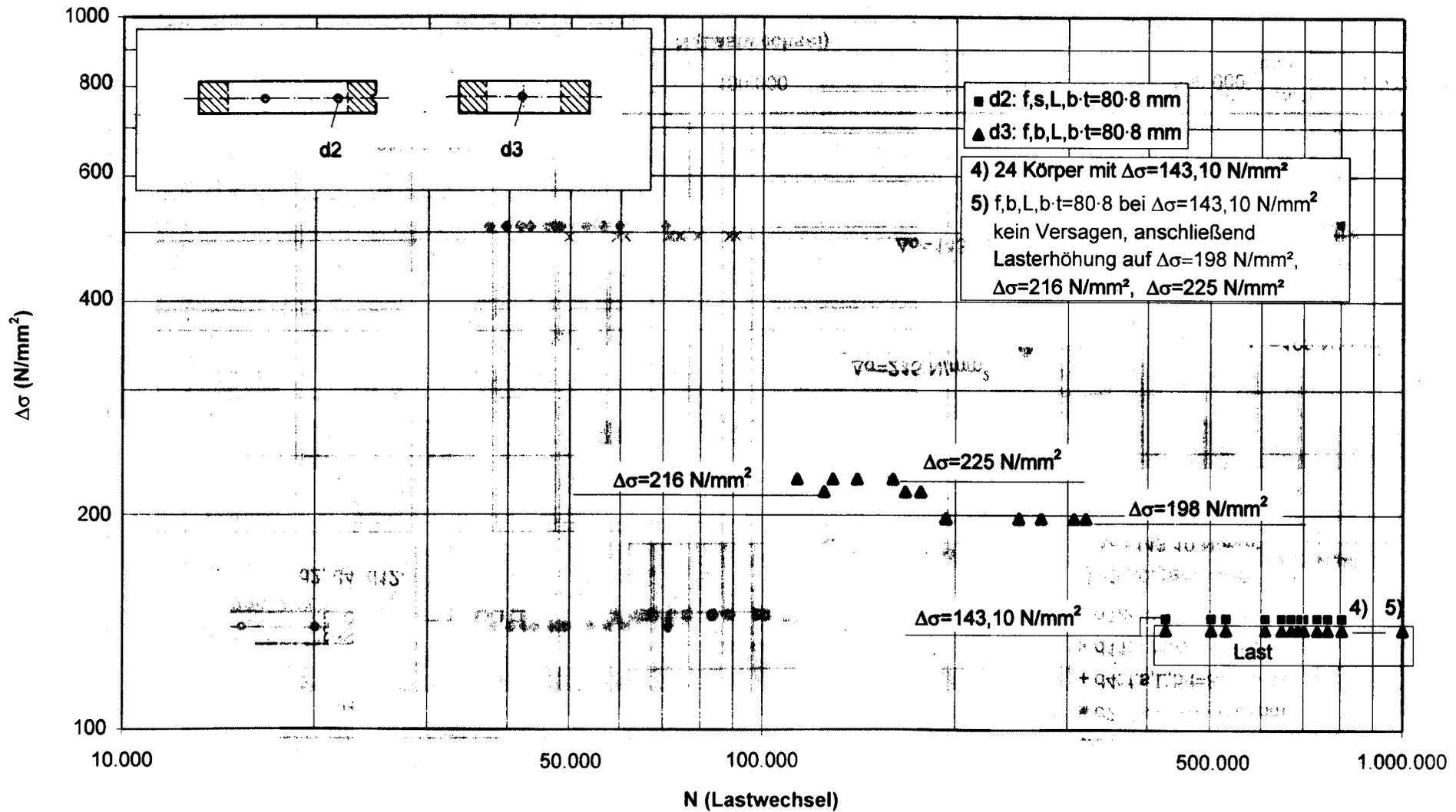
Bild 3: Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen und der low-cycle-fatigue-Festigkeiten der Versuchskörpertypen Nr. 1, 5, 6, 7 und 9; Verbindungen; feuerverzinkt; gestanztes und gebohrtes Loch d1, d5, d6, d7 und d9; bxt = 80 · 8 bzw. 80 · 10

d1,d2,d4,d11,d12



**Bild 4:** Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen und der low-cycle-fatigue-Festigkeiten der Versuchs körpertypen Nr. 1, 2, 4, 11 und 12; Verbindungen - Lochstäbe; feuerverzinkt und nicht feuerverzinkt; gestanztes Loch d1, d2, d4, d11 und d12;  $b \cdot t = 80 \cdot 8$

d2,d3



10

Bild 5: Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen und der low-cycle-fatigue-Festigkeiten der Versuchskörpertypen Nr. 2 und 3; Lochstäbe; feuerverzinkt; gestanztes und gebohrtes Loch d2 und d3;  $b \cdot t = 80 \cdot 8$

### 5.2.6 Vergleich: Lochstäbe, feuerverzinkt, Löcher gestanzt, Stab-Breiten 80 mm - 49 mm

Im Bild 6 sind die Versuchsergebnisse für Lochstäbe mit feuerverzinkten Bauteilen und gestanzten Löchern dargestellt. Die Stäbe unterscheiden sich durch verschiedene Breiten ( $d_2$  und  $d_4$  mit 80 mm,  $d_8$  mit 49 mm). Die Versuchsergebnisse zeigen keine Besonderheiten, offensichtlich spielen bei Lochstäben die Stabbreiten und das Verhältnis Nettoquerschnitt zum Bruttoquerschnitt keine Rolle.

### 5.2.7 Vergleich: Verbindungen - Lochstäbe, feuerverzinkt, Löcher gestanzt - gebohrt

Das Bild 7 zeigt die Versuchsergebnisse für Verbindungen und Lochstäbe mit Bauteilen mit feuerverzinkter Oberfläche, bei welchen die Löcher einmal gestanzt und einmal gebohrt sind. Sämtliche Stäbe haben die gleichen Abmessungen  $b \cdot t = 49 \cdot 8$ . Für hohe Laststufen ( $\Delta\sigma = 216 \text{ N/mm}^2$ ) bietet es keine Vorteile, wenn bei Verbindungen die Löcher gebohrt sind, für die niedrigeren Laststufen ( $\Delta\sigma = 180 \text{ N/mm}^2$  und  $\Delta\sigma = 162 \text{ N/mm}^2$ ) allerdings ergeben sich deutliche Verbesserungen für den Fall, daß die Löcher gebohrt sind. Die gleiche Aussage kann auch für die Lochstäbe gemacht werden.

### 5.2.8 Vergleich: Verbindungen - Lochstäbe, nicht feuerverzinkt, Löcher gestanzt

Das Bild 8 stellt die Versuchsergebnisse für Verbindungen und Lochstäbe mit  $b \cdot t = 80 \cdot 8$  mit gestanzten Löchern, jedoch ohne feuerverzinkte Oberfläche dar. Auch hier sind erhebliche Unterschiede zwischen Verbindung und Lochstab festzustellen. Die Unterschiede liegen keineswegs in dem Bereich, wie sie bei den verschiedenen Vorschriften für Betriebsfestigkeitsuntersuchungen für die Kerbfälle „Lochstab“ und „Verbindung“ vorgeschrieben werden. Auch für die nicht feuerverzinkten Bauteile spielt offensichtlich die hohe Lochleibungsbeanspruchung zwischen Schraube und Lochwand für den Versuchskörpertyp Nr. 11 eine erhebliche Rolle für die niedrigen Werte.

## 6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Einzelergebnisse (siehe [8]) und die vergleichende Darstellung der Ergebnisse unter verschiedenen Gesichtspunkten in den Bildern 2 bis 8 machen deutlich, daß ein sehr entscheidender Einfluß auf die erreichbaren Lastwechselzahlen von Verbindungen von der Höhe der Lochleibungspressung zwischen Schraube und Lochwand ausgeübt wird.

Verbindungen mit gestanzten bzw. gebohrten Löchern haben im hohen Oberspannungsbereich, das heißt bei hohen Lochleibungsspannungen, kaum unterschiedliche Lastwechselzahlen erreicht. Im niedrigeren Spannungsniveau besitzen solche Stäbe mit gebohrten Löchern deutlich höhere Betriebsfestigkeiten als solche mit gestanzten Löchern. Diese Unterschiede werden sich vermutlich bei Verbindungen mit mehr Schrauben in einer Reihe auch deutlich zeigen.

Gegenüber der Feuerverzinkung liegt die low-cycle-fatigue-Festigkeit nicht feuerverzinkter Stäbe mit gestanzten Löchern bei Verbindungen 50 % höher und bei Lochstäben deutlich höher.

In den verschiedensten Vorschriften für die Ermittlung der Betriebsfestigkeit bei Neubauten und Altbauten wird hinsichtlich der zu verwendenden Spannungen kein großer Unterschied zwischen den Kerbfällen „Lochstab“ und „Verbindung“ gemacht. Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen kann ausgesagt werden, daß die Unterschiede jedoch erheblich sind und prinzipieller, weiterer Klärung bedürfen.

Aus den bisher mitgeteilten Ergebnissen ist es nicht möglich,  $\Delta\sigma$ -N-Linien zu ermitteln, weil die Versuche nur auf sehr wenigen Spannungshorizonten und dies im low-cycle-fatigue-Bereich gefahren wurden. Es ist die Absicht, in einem Anschlußversuchsprogramm die Betriebsfestigkeit in höheren Lastwechselbereichen zu ermitteln, um dann  $\Delta\sigma$ -N-Linien für die Verbindungen feuerverzinkter Bauteile mit gestanzten Löchern der Praxis zur Verfügung zu stellen. Das vorgesehene Anschlußprogramm ist eine dringend benötigte Ergänzung, um den gesamten Bereich der Betriebs- und Dauerfestigkeit dieser Verbindungen abzudecken.

## 7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

In dieser Veröffentlichung werden Ergebnisse aus insgesamt 117 Schwingversuchen an „Verbindungen“ und „Lochstäben“ mit feuerverzinkten und nicht feuerverzinkten Bauteilen und mit gestanzten und gebohrten Löchern vorgestellt. Ziel war die Ermittlung des low-cycle-fatigue-Verhaltens der vorgenannten Bauteile. Ziel der Untersuchungen war weiterhin, Vergleiche zwischen den erreichbaren Lastwechselzahlen

- von Verbindungen und Lochstäben in feuerverzinkter Ausführung mit gestanzten Löchern,

d2,d4,d8

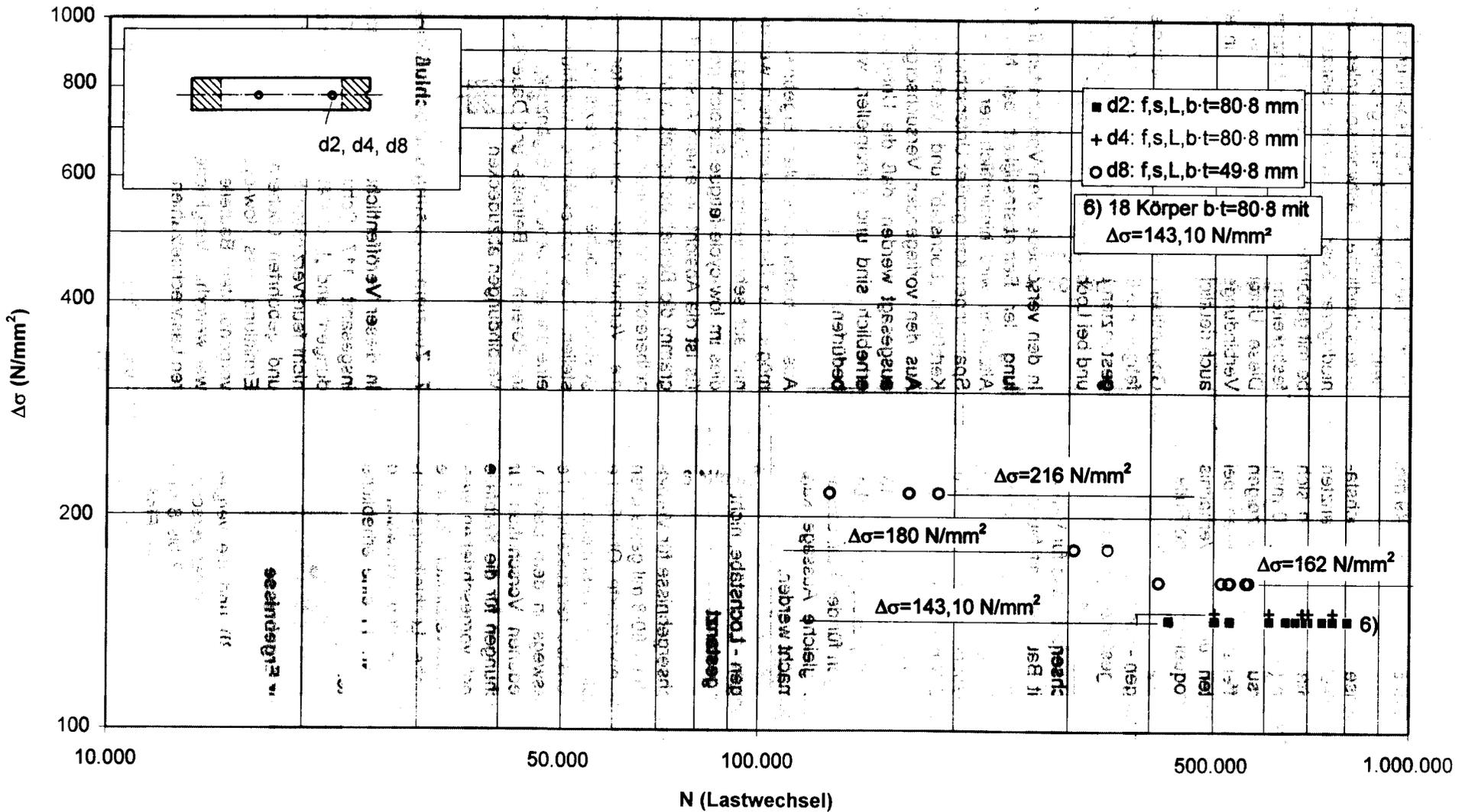
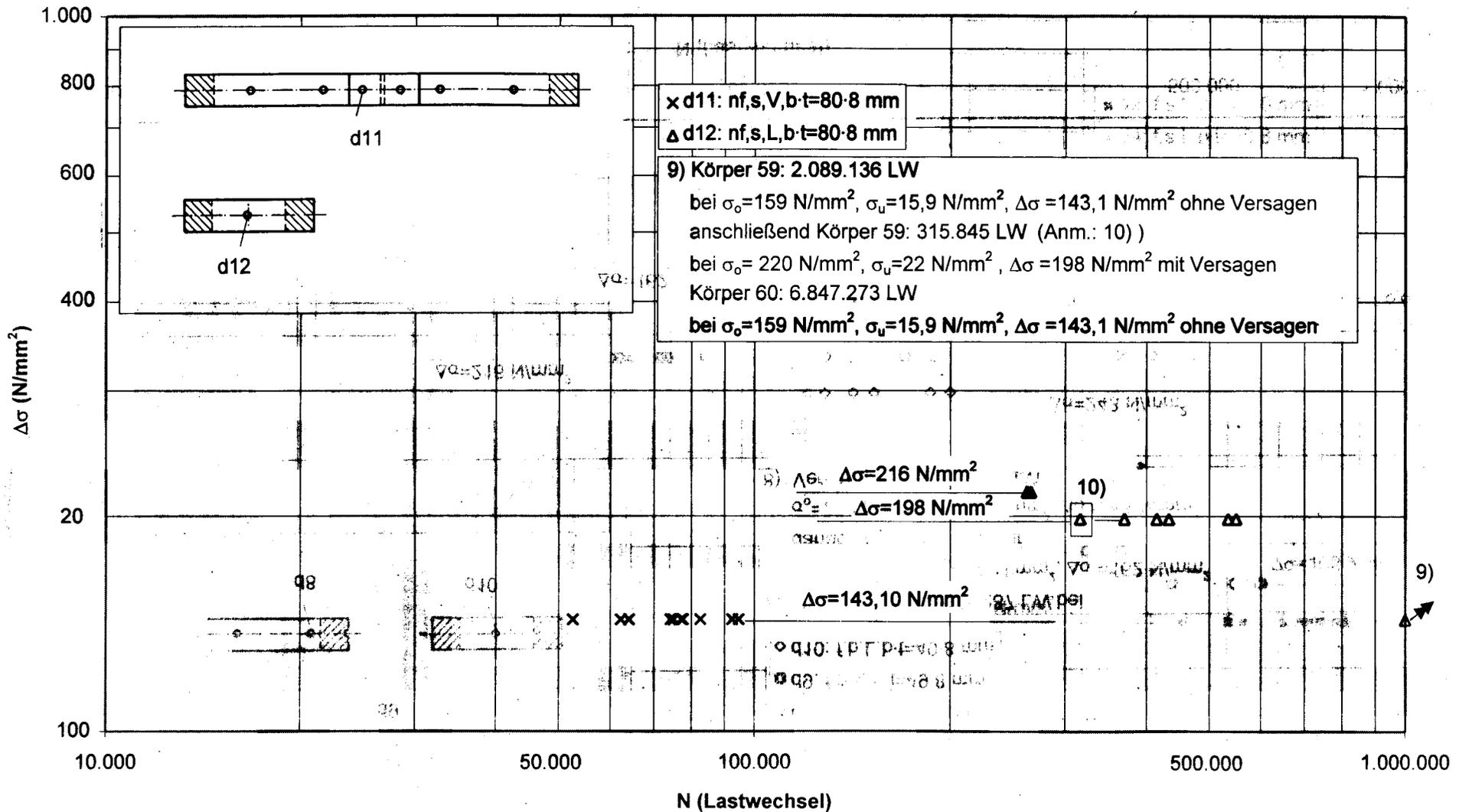


Bild 6: Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen und der low-cycle-fatigue-Festigkeiten der Versuchskörpertypen Nr. 2, 4 und 8; Lochstäbe; feuerverzinkt; gestanztes Loch d2, d4 und d8; bxt = 80 · 8 und 49 · 8



d11,d12



14

**Bild 8:** Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen und der low-cycle-fatigue-Festigkeiten der Versuchs körpertypen Nr. 11 und 12; Verbindungen - Lochstäbe; nicht feuerverzinkt; gestanztes Loch d11 und d12; b · t = 80 · 8

- von Verbindungen und Lochstäben nicht feuerverzinkter Ausführung mit gestanzten Löchern,
- von Verbindungen und Lochstäben mit feuerverzinkten Bauteilen und gestanzten Löchern bei verschiedener Ausnutzung des Nettoquerschnitts und bei verschiedener Ausnutzung der Lochleibungspressungen zwischen Schraube und Lochwandung,
- von Verbindungen und Lochstäben mit feuerverzinkten Bauteilen und einerseits gestanzten, andererseits gebohrten Löchern

zu erhalten. Ziel war ferner die Beantwortung der Frage, ob die aus Nutzlasten zu erwartenden Beanspruchungen von Verbindungen und Lochstäben mit diesen Merkmalen mindestens zwischen 10.000 und 100.000 mal ertragen werden können (dies war eine Eigenschaft, die die nach dem alten Berechnungskonzept der zulässigen Spannungen bemessenen Konstruktionen in der Regel auszeichnete).

Bei Lochstäben von nicht feuerverzinkten und feuerverzinkten Bauteilen mit gestanzten Löchern kann dieses Verhalten bestätigt werden.

Bei Lochstäben von nicht feuerverzinkten und feuerverzinkten Bauteilen mit gebohrten Löchern kann diese Eigenschaft allemal bestätigt werden.

Bei Verbindungen von feuerverzinkten Bauteilen mit gestanzten Löchern kann diese Eigenschaft nicht grundsätzlich mit einer ausreichenden Sicherheit gewährleistet werden. Entscheidend ist hierbei die Höhe der Lochleibungsbeanspruchung zwischen Schraube und Lochwandung. Liegt diese niedrig - das bedeutet etwa in der Höhe der 1,5fachen Streckgrenze -, kann man davon ausgehen, daß die vorgenannte Eigenschaft eingehalten ist.

Die Ergebnisse aus den vergleichenden Untersuchungen zeigen, daß die üblicherweise in den zuständigen Berechnungsnormen gemachten Unterschiede zwischen der Betriebsfestigkeit von Lochstäben und von Verbindungsstäben, die dort nur gering sind, im allgemeinen für den low-cycle-fatigue-Bereich nicht zutreffen. Die low-cycle-fatigue-Festigkeit der Lochstäbe liegt erheblich (bis zum mehr als 10fachen) über der low-cycle-fatigue-Festigkeit der Verbindungen.

Die Firma Buthmann GmbH Ingenieur-Stahlbau in Hamburg hat zum Teil die Bearbeitung des Versuchsmaterials sowie den Transport übernommen. Das Material selbst wurde zum Teil von der Firma

Stahl-handel Carl Spaeter GmbH, Niederlassung Hamburg, zur Verfügung gestellt. Die Feuerverzinkung besorgte die Firma Norddeutsche Großverzinkerei Carl Sager, Hamburg. Diese drei Firmen haben ihre Leistungen kostenlos zur Verfügung gestellt. Die fachlich-technische Begleitung und die administrative Abwicklung erfolgte sehr umsichtig durch den Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V. (GAV), Düsseldorf. Die Finanzierung des Vorhabens wurde von der Arbeitsgemeinschaft Industrielles Forschungsvereinigungen AiF und vom Bundesministerium für Wirtschaft zur Verfügung gestellt. Ich danke den genannten drei Firmen, der Forschungsvereinigung GAV und den Forschungsmittelgebern AiF und BMWi für ihre tatkräftige Unterstützung.

## SCHRIFTENVERZEICHNIS

- [1] Valtinat, G.: Der Einsatz der Feuerverzinkung im Stahlbau - im Hinblick auf Schraubenverbindungen. Herausgegeben von der Beratung Feuerverzinken, Hagen, in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Ausschuß für Stahlbau, Köln, dem Deutschen Stahlbauverband, Köln, dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Düsseldorf und dem Verband Deutscher Feuerverzinkereien, Hagen. 1976
- [2] Scheer, J.: Lochleibungsfestigkeit von geschraubten Verbindungen mit gestanzten Löchern unter vorwiegend ruhender Belastung. Bericht Nr. 6053 des Instituts für Stahlbau an der Technischen Universität Braunschweig, Dezember 1989 und Kurzberichte aus der Bauforschung/Dezember 1990, Bericht Nr. 139.
- [3] Valtinat, G. und P. Dangelmaier: Schraubenverbindungen mit gestanzten Löchern in zugbeanspruchten, feuerverzinkten Bauteilen. Bericht Nr. 119 des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Forschungsbericht AiF 7448, GAV FD 18, Arbeitsbereich Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Düsseldorf 1993.
- [4] Valtinat, G. und M. Wilhelm: Vergleich des Last-Verschiebungs-Verhaltens und der Traglast von Schraubenverbindungen mit gestanzten und gebohrten Löchern in zugbeanspruchten, feuerverzinkten Bauteilen. Bericht Nr. 129 des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Forschungsvorhaben AiF-Nr. 9305, GAV-Nr. FD 20, Arbeitsbereich Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Düsseldorf 1995.
- [5] Valtinat, G., J. Grycz, und M. Wilhelm: Feuerverzinkte Stahlbau-Verbindungen mit hochfesten Schrauben und gestanzten Löchern. Vortrags- und Diskussionsveranstaltung 1990 des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., herausgegeben vom Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Düsseldorf 1991.
- [6] Valtinat, G., F. Albrecht und P. Dangelmaier: Gleitfeste Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlteilen und reibfesten Beschichtungen oder anderen reibbeiwert erhöhenden Maßnahmen. Bericht Nr. 122 des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Forschungsvorhaben AiF-Nr. 7571, GAV-Nr. FG 23, Arbeitsbereich Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Düsseldorf 1993.
- [7] Valtinat, G.: Gleitfeste vorgespannte Verbindungen mit gestanzten Langlöchern bei feuerverzinkten Stahlbauteilen für Fassaden-Unterkonstruktionen. Bericht Nr. 132 des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Forschungsvorhaben AiF-Nr. 9266 GAV-Nr. FG 25, Arbeitsbereich Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Düsseldorf 1996.
- [8] Valtinat, G.: Low-cycle-fatigue-Verhalten und Schwingfestigkeitsuntersuchungen an Schraubenverbindungen mit feuerverzinkten Bauteilen und gestanzten Löchern. Forschungsbericht des Arbeitsbereichs Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Heft 6 für den Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Forschungsvorhaben AiF Nr. 9864, GAV-Nr. FD 21, Hamburg 1996.