

## AUS FORSCHUNG UND TECHNIK

G. Valtinat, H. Huhn

Technische Universität Hamburg-Harburg

### **Scher-Lochleibungs-Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlbauteilen und gestanzten Löchern unter Betriebsbeanspruchungen**

Bericht Nr. 145

des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V.

GAV-Nr. FD 23

---

Die Untersuchungen wurden vom Bundesminister für Wirtschaft (BMWi) und von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) gefördert, AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11097/N1

# Scher-Lochleibungs-Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlbauteilen und gestanzten Löchern unter Betriebsbeanspruchungen

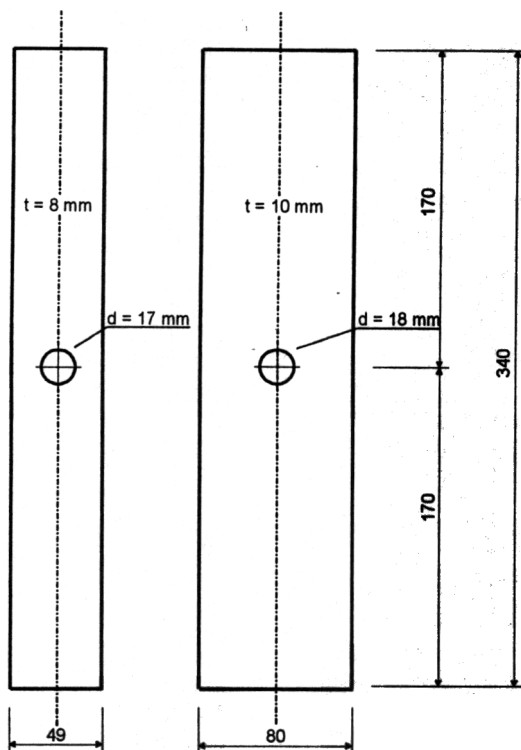
von Günther Valtinat und Holger Huhn,  
Technische Universität Hamburg-Harburg

## Einführung

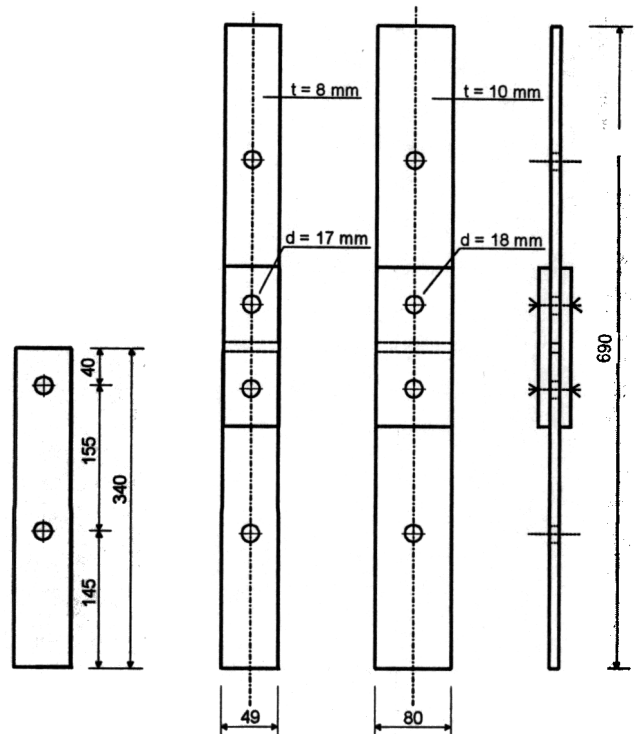
Maste und Türme unterliegen neben den Einwirkungen aus ständigen Lasten insbesondere auch den Windeinwirkungen. Schwankende Windgeschwindigkeiten und wechselnde Windrichtungen erzeugen schwingende Belastungen und Spannungen in dem Bauwerk, in seinen Bauteilen und in den Verbindungen. Die aus den Windlasten herrührenden Schwingungswechsel können sehr hoch werden, so dass die Beanspruchungen bis in den Bereich der Ermüdungsfestigkeit reichen. Die Verwendung von Scher-Lochleibungs-Verbindungen feuerverzinkter Bauteile mit gestanzten Löchern führt zu der Frage, welche Betriebsfestigkeiten diese Verbindungen unter wiederholten Belastungen ertragen können.

Die Kenntnis der Betriebsfestigkeit der Bauteile und der Verbindungen ist erforderlich, um die Lebensdauer des

Bauwerks voraussagen zu können. In einem früheren Forschungsprogramm an der Technischen Universität Hamburg-Harburg wurden low-cycle-fatigue-Versuche an diesen Verbindungen ausgeführt. Diese Veröffentlichung berichtet über analoge Versuche an Bauteilen mit gestanzten und mit gebohrten Löchern und an entsprechenden Scher-Lochleibungs-Verbindungen, jedoch ohne Vorspannung der Schrauben. Von besonderem Interesse war der Einfluss der Kombination von Feuerverzinkung der Bauteile und Stanzung der Löcher auf die Betriebsfestigkeit. Wir nehmen an, dass in Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an Scher-Lochleibungs-Verbindungen mit feuerverzinkten Bauteilen und gestanzten Löchern der Einfluss der Stanzung auf das Material um das Loch herum weitaus größer ist, als er bei vergleichbaren Tests unter low-cycle-fatigue-Beanspruchung oder mit statischer Beanspruchung ermittelt wurde. Zusätzlich zum Lochstanzen kann der Temperatureinfluss während des Feuerverzinkens Alterung des Materials herbeiführen.



**Bild 1:** Versuchsprobekörper für Lochstäbe



**Bild 2:** Versuchsprobekörper für geschraubte SL-Verbindungen (HV-Schrauben M16)

Wenn Untersuchungen mit gebohrten Löchern und mit gestanzten Löchern miteinander verglichen werden, wird festgestellt, dass bei gestanzten Löchern eine geringere Duktilität im Nettoquerschnitt besteht. Unter statischer Belastung sind entweder das Versagen im Nettoquerschnitt oder das Versagen durch Langlochbildung die wichtigen Versagenszustände. Jedoch sind die Bruchbilder bei gestanzten Löchern im Vergleich zu gebohrten Löchern sehr unterschiedlich. Es werden viele Anrisse im Nettoquerschnitt vom Lochrand aus infolge der Aufhärtung des Materials durch das Stanzen initiiert, wovon schließlich einer dieser Anrisse zum Gesamtbruch führt.

In dieser Arbeit werden die früheren Versuchsergebnisse aus low-cycle-fatigue-Versuchen zusammen mit den Resultaten aus den Betriebsfestigkeitsuntersuchungen dargestellt und zur gleichen S-N-Kurve verarbeitet.

Von besonderem Interesse ist der Vergleich dieser S-N-Kurven zu den entsprechenden Verläufen im EUROCODE 3, und zwar sowohl hinsichtlich der Versuchspunkte als auch hinsichtlich der Steigung.

Diese Fragen sollen für Lochstäbe und für SL-Verbindungen durch experimentelle Untersuchungen beantwortet werden.

Die Versuchskörper bestehen aus RSt 37-2 (S 235 JR G2). Als Belastung wird eine einstufige, einaxiale Sinusschwingung im Zugschwellbereich mit einer servohydraulischen Hydropuls-Prüfmaschine kraftkontrolliert aufgebracht. In Bild 1 sind die Versuchskörper für die Lochstäbe und in Bild 2 für die SL-Doppellaschen-Verbindungen dargestellt. Die HV-

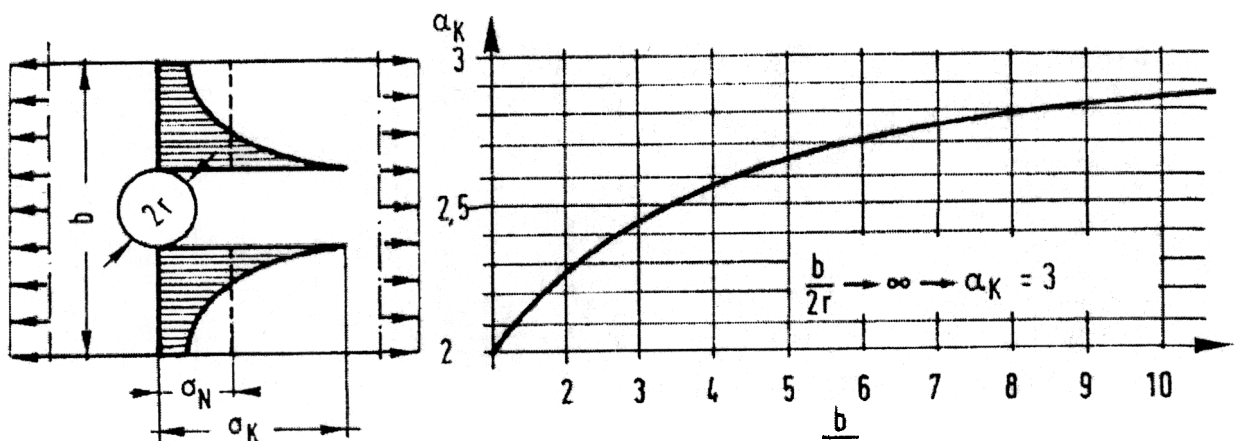
Schrauben der SL-Verbindungen werden, nachdem der Schraubenschaft an der Lochwandung des Stabes zur Anlage kommt, nur handfest angezogen, um eine Beeinflussung aus möglicher Schraubenvorspannung auszuschließen.

Die Probekörper sind so dimensioniert, daß im Ermüdungsverhalten ein Nettoquerschnittsversagen des Stabes und kein Versagen der Schrauben bzw. der Laschen auftritt. Als Bezugsbasis werden Versuchskörper mit den Abmessungen von  $b/t = 80/10$  und einem aufgetragenen Spannungsverhältnis von Unterspannung zu Oberspannung von  $\square = \min \sigma / \max \sigma = +0,1$  zugrunde gelegt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden als  $\Delta\sigma$ -N-Kurven mit  $\Delta\sigma$  bezogen auf den Nettoquerschnitt in doppeltlogarithmischem Maßstab aufgetragen.

Ein Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen von feuerverzinkten Lochstäben mit gestanzten Löchern für Versuchskörperabmessungen von  $b/t = 80/10$  und  $49/8$  zeigt, daß bei den Versuchskörpern mit den Abmessungen  $b/t = 49/8$  eine höhere Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma$  bei gleicher Lastwechselzahl  $N$  bis zum Schwingbruchversagen aufgebracht werden kann (Bild 3). Dieses resultiert aus der unterschiedlichen Kerbspannung im Kerbgrund. Die Kerbspannungsspitze  $\sigma_K$  ergibt sich durch Multiplikation aus der Nettospannung  $\sigma_N$  und dem Kerbfaktor  $\alpha_K$ . Der Kerbfaktor  $\alpha_K$  beschreibt die Geometrie der Kerbe und der Probe. In zahlreichen Veröffentlichungen werden Werte für die Kerbfaktoren angegeben (Bild 4).

**Bild 3:** Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen von feuerverzinkten Lochstäben mit gestanzten und gebohrten Löchern für Versuchskörperabmessungen von  $b/t = 80/10$  und  $49/8$

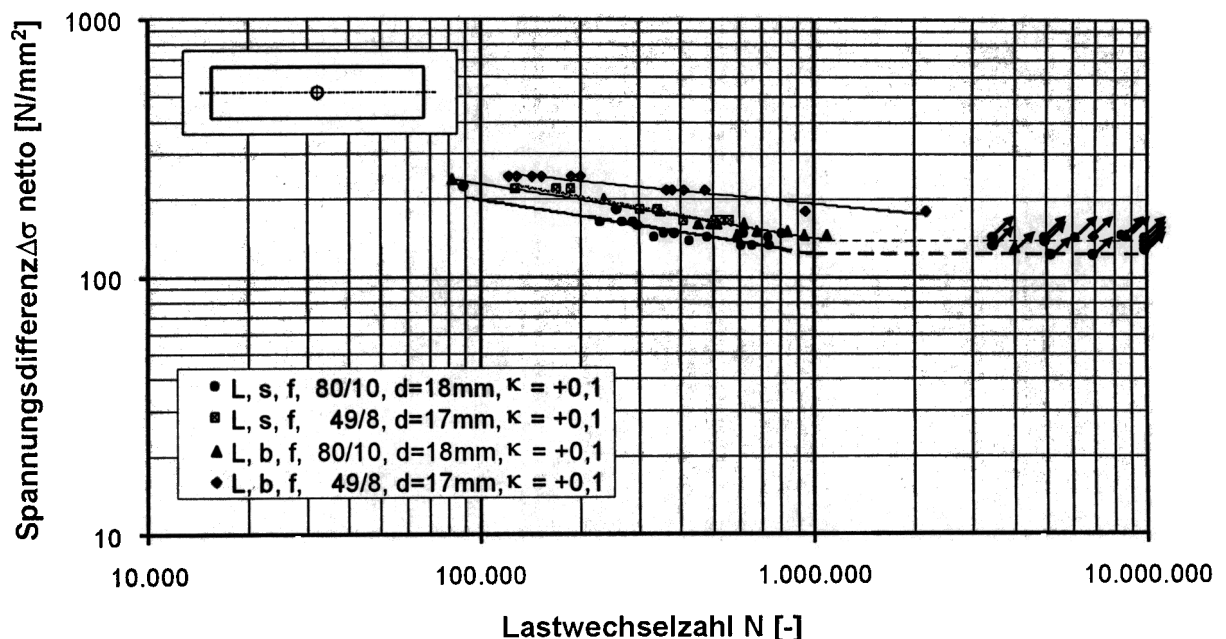


Alternativ kann der Kerbfaktor mittels FEM-Berechnungen ermittelt werden. Um einen Vergleich zwischen den vorhandenen Versuchskörpern mit unterschiedlichen Abmessungen zu ermöglichen, müssen im jeweiligen Kerbgrund die gleichen Kerbspannungen  $\sigma_K$ , also  $\sigma_{K(80/10)}$  gleich  $\sigma_{K(49/8)}$ , vorhanden sein. Dadurch, daß der Kerbfaktor  $\alpha_{K(80/10)}$  größer ist als der Kerbfaktor  $\alpha_{K(49/8)}$ , ergibt sich für den Versuchskörper mit den Abmessungen  $b/t = 49/8$  eine höhere Nettospannung  $\sigma_N$  und damit auch eine höhere Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma$ . Angewendet auf die vorliegenden Versuche erhält man bei der Übertragung der Ermüdungsfestigkeitskurve von den Lochstäben mit den Abmessungen  $b/t = 80/10$  auf

die Lochstäben mit den Abmessungen  $b/t = 49/8$  eine übertragene Ermüdungsfestigkeitskurve, die mit einem Fehler kleiner als 10 % von den experimentellen Werten abweicht.

Für den direkten Vergleich der unterschiedlich hergestellten Löcher sind in Bild 3 ebenfalls die Ergebnisse für die Versuchskörper mit gebohrten Löchern eingetragen. Die Versuchskörper mit gebohrten Löchern verhalten sich günstiger und erreichen Lastwechselzahlen, die im Mittel um den Faktor 2 größer sind als die korrespondierenden gestanzten Löcher.

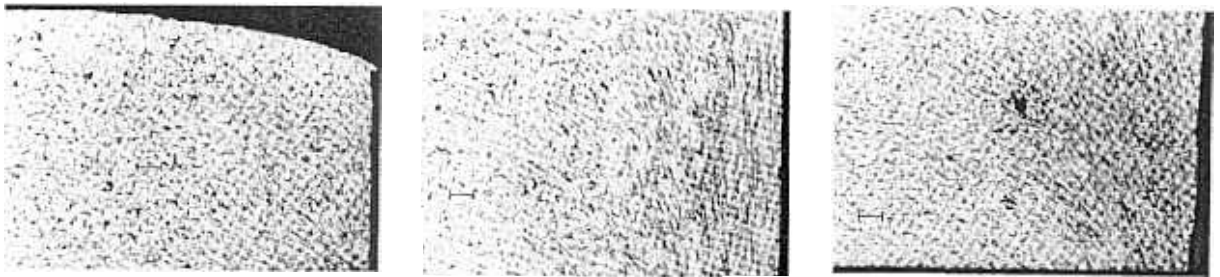
**Bild 4:** Spannungsverlauf im Nettoquerschnitt eines Lochstabes nach STEINHARDT und Kerbfaktor  $\alpha_K$  nach PETERSEN



Der Stanzvorgang führt aufgrund der Kaltverformungen am Lochrand zu einer Veränderung der Duktilität, die die Betriebsfestigkeit negativ beeinflusst. Beim Durchfahren des Stanzstempels durch den Werkstoff bildet sich am oberen Lochrand nach Eintritt des Stempels eine Kanteneinzugszone aus (Bild 5a). In diesem Bereich fließt das Material in Schneidrichtung des Stempels vom Rand in das Loch hinein. Das plastische Fließen geht in die sich anschließende Glattschnittzone (Bild 5b) über. Danach folgt die Austrittszone des Stanzstempels (Bild 5c), die sich deutlich durch eine rauhere Oberfläche von der Glattschnittzone unterscheidet und etwas konisch aufgeweitet ist. Nach Austritt des Stanzstempels aus dem Werkstoff entsteht auf der Werkstückunterseite ein kleiner Grat, der in der Regel werksseitig vom Stahlbaubetrieb entgratet wird. Die Austrittszone kann mit ihrer rauhen Oberfläche den Ausgangspunkt für die Rißinitialisierung bei Schwingbeanspruchungen bilden. Aus dem

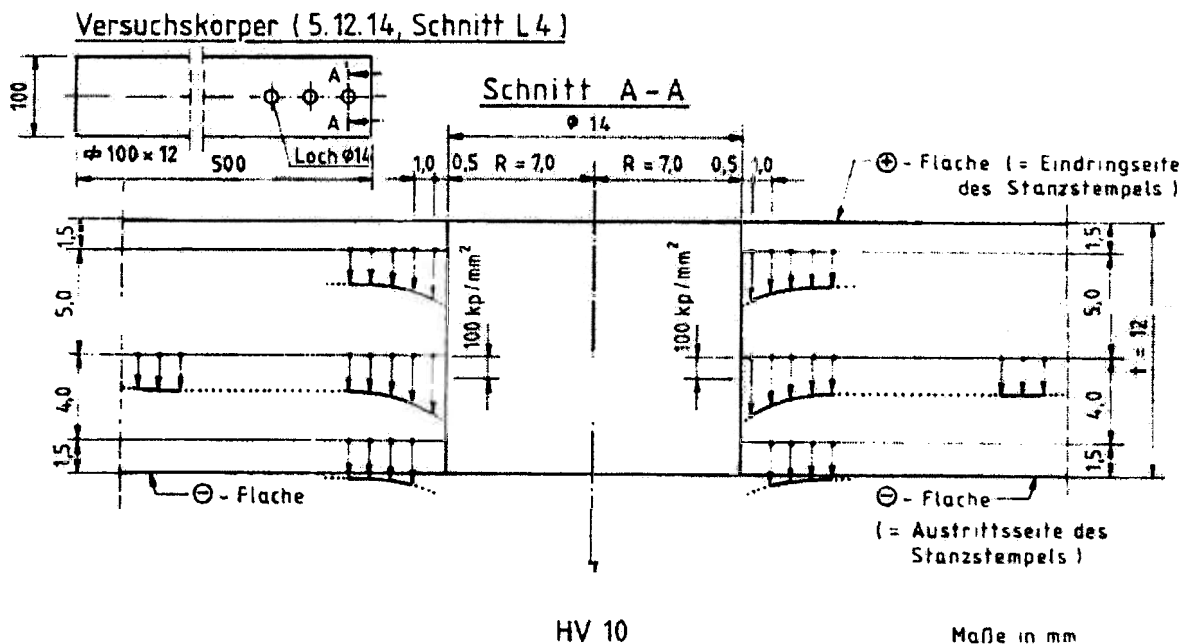
Stanzvorgang resultierende Anrisse sind nicht auszuschließen.

Härtemessungen in Schliffen parallel zur Oberfläche mit jeweils 1 mm Abstand haben gezeigt, daß im engeren Lochbereich ein Anstieg der Härte zu verzeichnen ist, der nach ca. 1,5 bis 2,0 mm abklingt. Im unbeeinflussten Bereich des Materials ist der Härteverlauf konstant (Bild 6). Die Lochränder der gebohrten Löcher sind dagegen über die Blechdicke als gleichmäßig glatt und die Kanten als scharf zu beurteilen. Ein Härteanstieg im Lochbereich ist nicht zu erwarten.



**Bild 5:** Schliffbilder zur Darstellung des Materialflusses am Rand des gestanzten Loches (Eichstrich 0,1 mm)

- a) Eindringzone des Stanzstempels (Kanteneinzugzone)
- b) Zone in Blechmitte des Werkstücks (Glattschnittzone)
- c) Austrittszone des Stanzstempels (Austrittszone)



**Bild 6:** Härteverlauf in verschiedenen Ebenen des gestanzten Stabmaterials um das Loch herum

- 1,5 mm unterhalb der Eintrittsfläche des Stanzstempels
- etwa in Blechmitte
- 1,5 mm oberhalb der Austrittsfläche des Stanzstempels

Bei den Lochstäben mit den Versuchskörperabmessungen  $b/t = 80/10$  stellt sich bei den gestanzten und gebohrten Löchern der Schwellwert der Ermüdungsfestigkeit als Grenze, unterhalb welcher keine Ermüdungsschädigung mehr eintritt, bei ca. 1 Mio. Lastwechseln ein. Die zugehörigen  $\Delta\sigma$ -Werte an diesem Grenzpunkt betragen für gestanzte Löcher

ca. 123 N/mm<sup>2</sup> und für gebohrte Löcher ca. 138 N/mm<sup>2</sup>. Die  $\Delta\sigma$ -N-Kurven nehmen ab hier einen waagerechten Verlauf an. Bis zu diesem Knick betragen die Neigungen der parallelen Ermüdungsfestigkeitskurven ca.  $m = 4,8$ .

Die vorgenommenen Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an SL-Doppellaschen-Verbindungen ergeben im Vergleich mit den reinen Lochstäben die gleichen Tendenzen (Bild 7). Die SL-Verbindungen mit den Versuchskörperabmessungen von

$b/t = 49/8$  liegen aufgrund ihrer Geometrie wieder oberhalb der breiteren Versuchskörper mit  $b/t = 80/10$ , und die Verbindungen mit gestanzten Löchern verhalten sich ungünstiger als Verbindungen mit gebohrten Löchern.

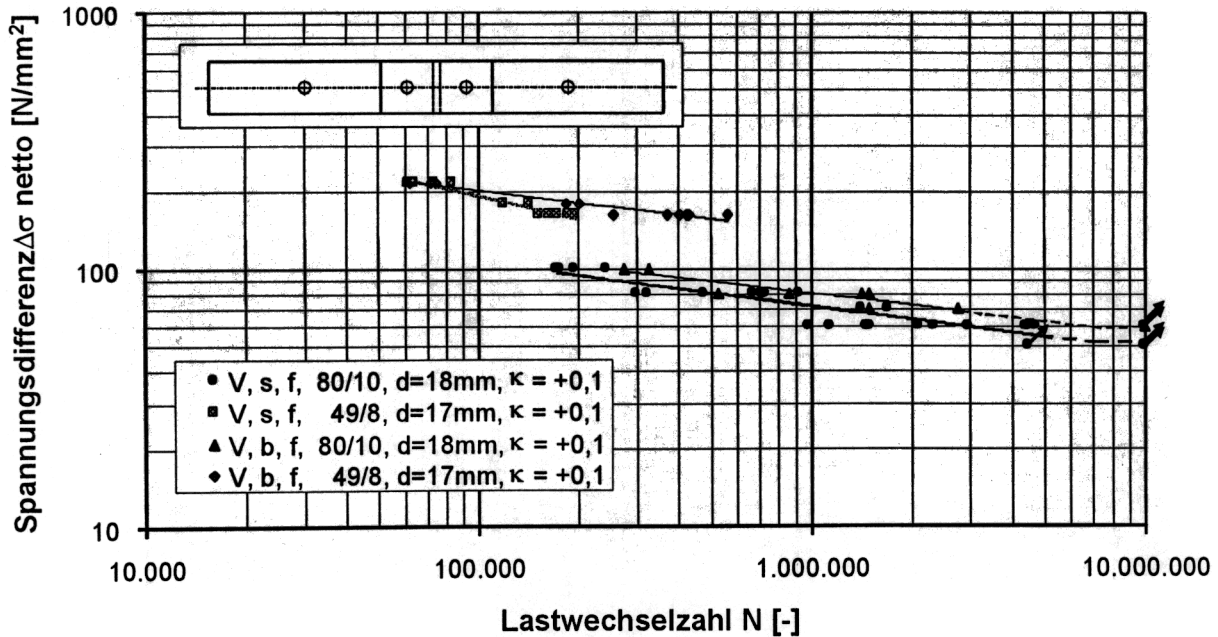


Bild 7: Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen von feuerverzinkten SL-Doppellaschen-Verbindungen mit gestanzten und gebohrten Löchern für Versuchskörperabmessungen von  $b/t = 80/10$  und  $49/8$

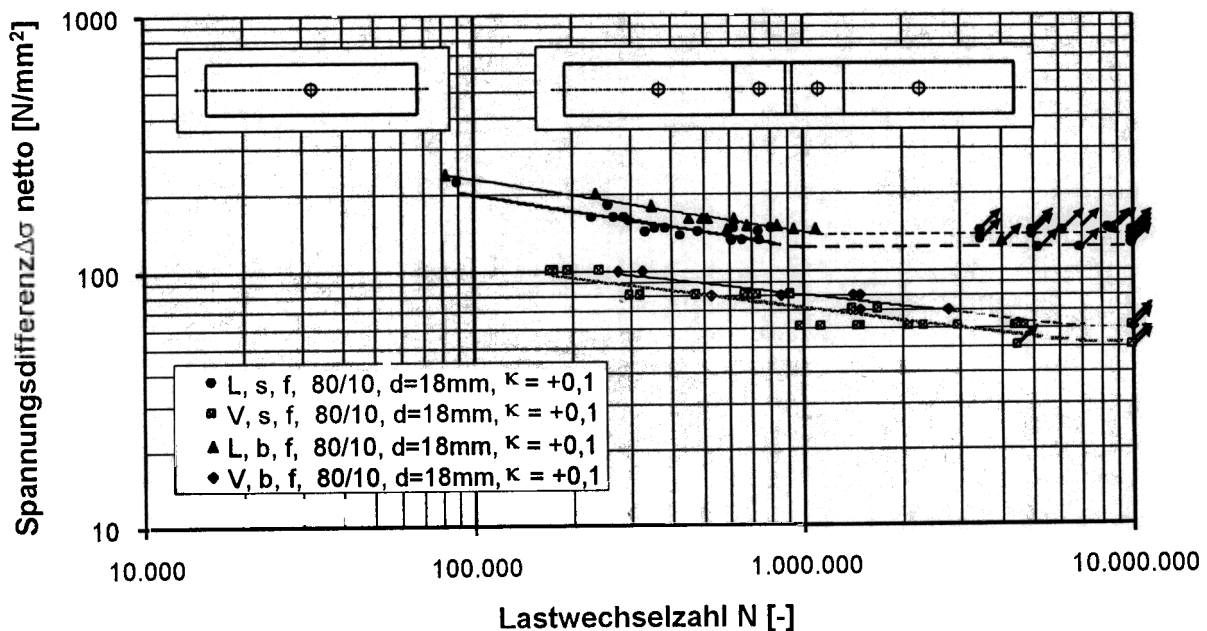


Bild 8: Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen von feuerverzinkten Lochstäben und SL-Verbindungen mit gestanzten und gebohrten Löchern für Versuchskörperabmessungen von  $b/t = 80/10$

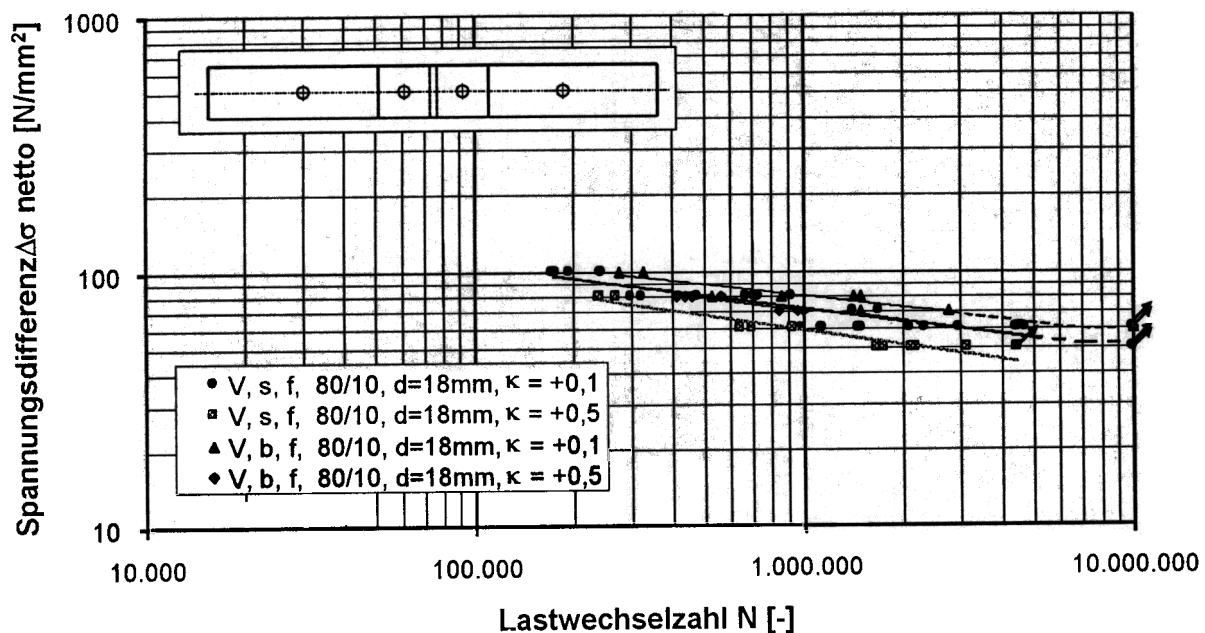
Bei den Verbindungen liegt der Schwellwert der Ermüdungsfestigkeit mit  $\Delta\sigma = 52 \text{ N/mm}^2$  für gestanzte Löcher und  $\Delta\sigma = 60 \text{ N/mm}^2$  für gebohrte Löcher und mit ca. 7 Mio. Lastwechseln deutlich ungünstiger als bei reinen Lochstäben. Eine direkte Gegenüberstellung von Lochstäben und SL-Verbindungen für Versuchskörper mit den Abmessungen von  $b/t = 80/10$  ist in Bild 8 gegeben. Wie zu erwarten, ertragen die Lochstäbe eine höhere Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma$  bei gleicher Lastwechselzahl  $N$  bis zum Schwingbruchversagen als die geschraubten SL-Verbindungen.

Bei den Versuchen mit SL-Verbindungen wurde in den Versuchskörpern (Bild 2) hinter dem zu prüfenden Loch für die Schraubenverbindung, in einem Abstand von 155 mm noch ein weiteres Loch eingebracht, um in ein und demselben Versuchskörper das Schwingverhalten von SL-Verbindungen und von Lochstäben gleichzeitig zu untersuchen; dieses zusätzlich eingebrachte Loch hat dann schon eine Lastwechselzahl der Verbindung vorweg erhalten. Bei allen bisher durchgeführten Versuchen kam es zu einem Nettoquerschnittsversagen der SL-Verbindungen, ohne daß an den Lochwänden des zusätzlichen Loches Schädigungen zu beobachten waren.

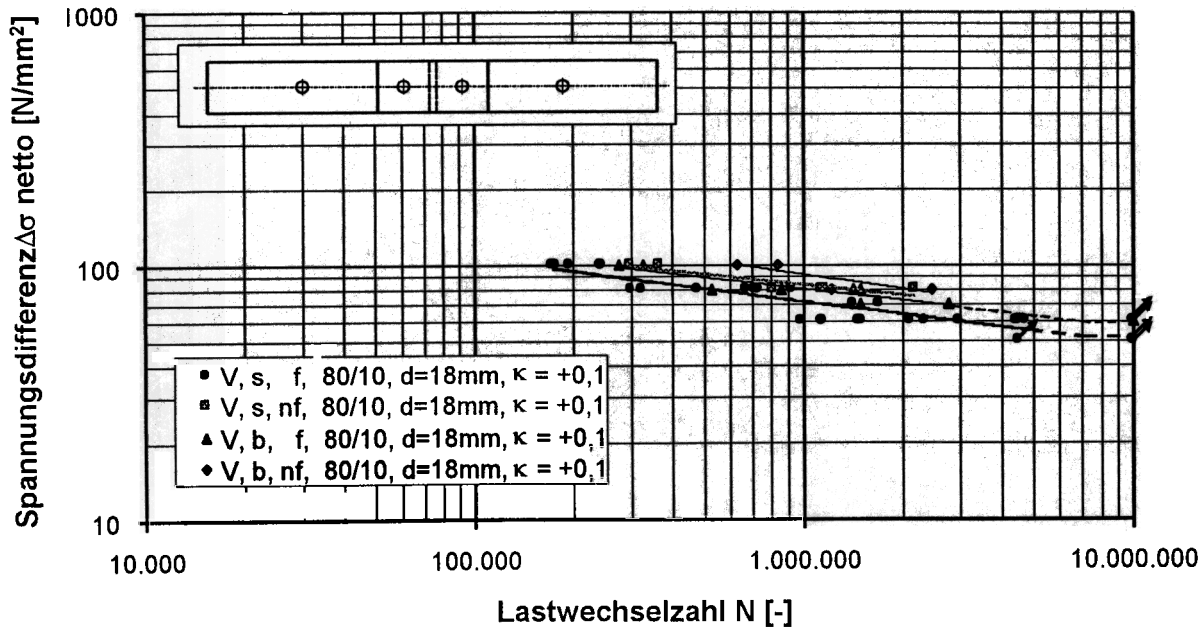
Bei den SL-Verbindungen liegen die Neigungen der Ermüdungsfestigkeitskurven zwischen  $m = 5,9$  und  $6,7$ . Die Ermüdungsfestigkeitskurven verlaufen damit etwas flacher als bei den Lochstäben.

In einer weiteren Untersuchung wurde das Spannungsverhältnis von  $\sigma = +0,1$  auf  $\sigma = +0,5$  erhöht. Die Vergrößerung des Spannungsverhältnisses führt bei gleichem  $\Delta\sigma$  zu einer Erhöhung der zugehörigen Oberspannung um den Faktor 1,8 und damit verbunden zu einer höheren Belastung der Versuchskörper. Die Lebensdauer wird dadurch entsprechend vermindert (Bild 9). Die gestanzten Löcher der SL-Verbindungen verhalten sich bezüglich ihres Schwingverhaltens wieder ungünstiger als die korrespondierenden gebohrten Löcher.

Zur Ermittlung des Einflusses der Feuerverzinkung, die im Anschluß an das Stanzen bzw. Bohren der Löcher erfolgt, werden Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an feuerverzinkten und an nicht feuerverzinkten SL-Verbindungen mit gestanzten und gebohrten Löchern durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 10 gegenübergestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Lebensdauer der dynamisch belasteten SL-Verbindungen durch die Feuerverzinkung und zusätzlich durch das Stanzen herabgesetzt wird. Dieses gilt in gleichem Verhältnis für die gestanzten und die gebohrten Löcher. Der Faktor, ausgedrückt in Lastwechselzahlen, beträgt ca. 2,0. Die Abbildung zeigt auch, daß das Schwingverhalten der nicht feuerverzinkten Verbindungen mit gestanzten Löchern in etwa identisch ist mit dem Schwingverhalten der feuerverzinkten Verbindungen mit gebohrten Löchern.



**Bild 9:** Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen von feuerverzinkten SL-Verbindungen mit gestanzten und gebohrten Löchern für Versuchskörperabmessungen von  $b/t = 80/10$  und einem Spannungsverhältnis von  $\sigma = +0,1$  bzw.  $\sigma = +0,5$



**Bild 10:** Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen von feuerverzinkten und nicht feuerverzinkten SL-Verbindungen mit gestanzten und gebohrten Löchern für Versuchskörperabmessungen von  $b/t = 80/10$

Um einen Vergleich zwischen zugbeanspruchten SLP-Verbindungen und SL-Verbindungen zu ermöglichen, werden in einer weiteren Versuchsreihe SLP-Verbindungen untersucht (Bild 11). Bei der Herstellung der SLP-Verbindung werden HV-Schrauben M18 paßgenau eingebaut, ohne die Löcher aufzureiben. Die erreichten Lastwechselzahlen zeigen, daß bei den Verbindungen mit den gestanzten Löchern die  $\Delta\sigma$ -N-Kurve der SLP-Verbindung geringfügig über denen der SL-Verbindungen liegt. Bei den Verbindungen mit den gebohrten Löchern ist eher ein schwach umgekehrter Trend erkennbar. Da diese Untersuchung aber nur Pilotversuchscharakter hat, müssen weitere Probekörper für SLP-Verbindungen geprüft werden, um gesicherte Aussagen treffen zu können. Wie Bild 11 zeigt, liegen die  $\Delta\sigma$ -N-Kurven der SLP- und SL-Verbindungen aber sehr dicht zusammen, so daß allem Anschein nach das Schwingverhalten der beiden Verbindungsarten nahezu gleich eingestuft werden kann.

Das Bild 12 zeigt eine Zusammenstellung aller experimentellen Ergebnisse mit Lochstäben. Solche Stäbe werden nach EUROCODE 3 in die Detailkategorie 125 eingestuft. Zwischen  $10.000$  und  $5 \times 10^6$  Lastwechseln verläuft die S-N-Kurve mit der Steigung  $m = 3,0$ . Ab  $5 \times 10^6$  Lastwechseln ändert sich die Steigung zu  $m = 5,0$  bis der Verlauf ab  $10^8$  Lastwechseln horizontal wird. Die Versuchsergebnisse bis 2 Mio. Lastwechsel liegen unter der S-N-Kurve von EUROCODE 3. Diese ist auf der Basis 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit mit einem Vertrauensbereich von 95 % festgelegt, wohingegen unsere Versuchsergebnisse bei einer 50%igen Überlebenswahrscheinlichkeit liegen. Die statistische Analyse bestätigt, daß die experimentellen Ergebnisse unterhalb der S-N-Kurve des EUROCODE 3 liegen. Dies führt zu der Schlussfolgerung, daß die Benutzung der Betriebsfestigkeitskurve des EUROCODE 3 für feuerverzinkte Lochstäbe mit gebohrten oder gestanzten Löchern nicht sicher ist.



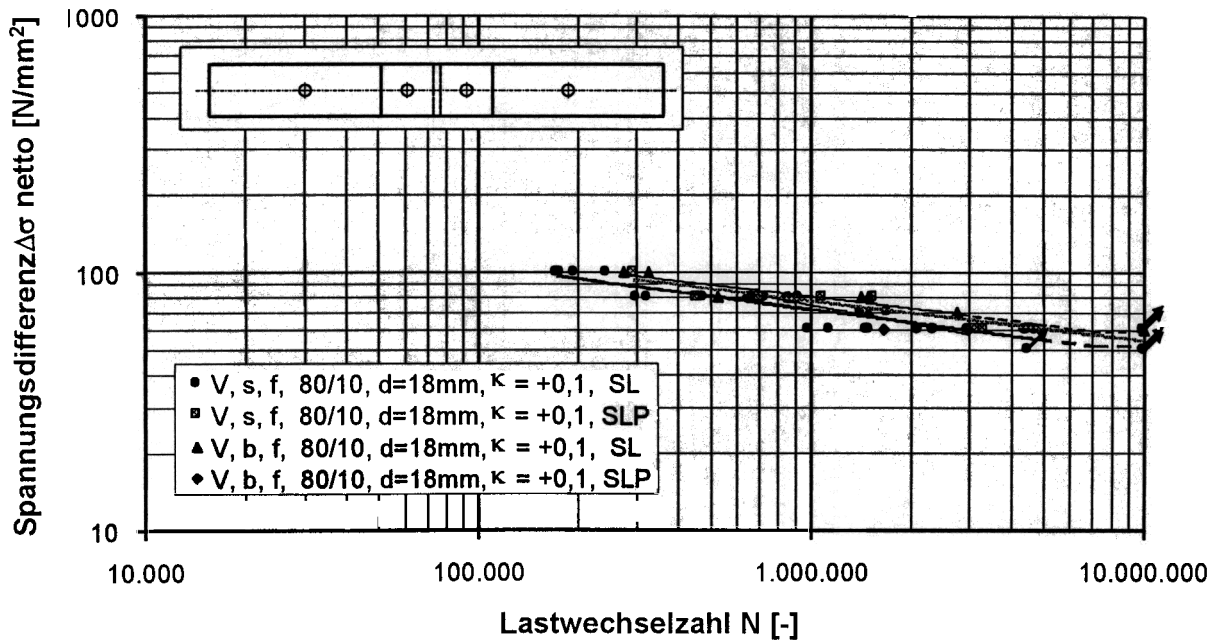


Bild 11: Vergleich der erreichten Lastwechselzahlen von feuerverzinkten SL- und SLP-Verbindungen mit gestanzten und gebohrten Löchern für Versuchskörperabmessungen von b/t = 80/10

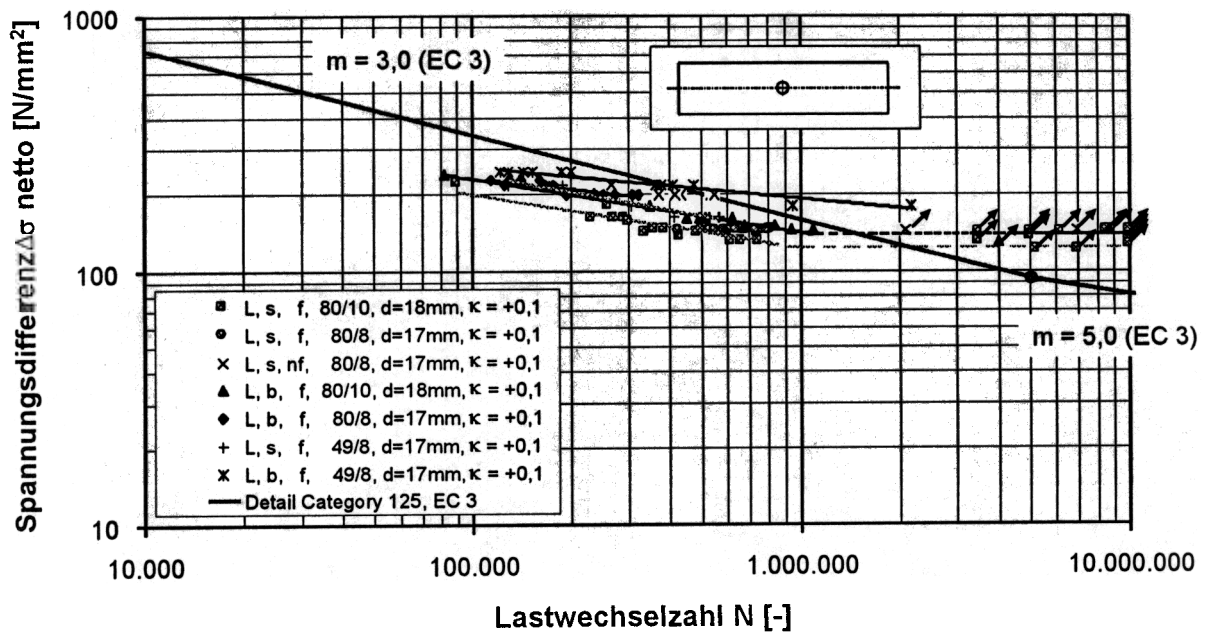


Bild 12: Vergleich der in low-cycle-fatigue-Versuchen und in Betriebsfestigkeitsversuchen erreichten Lastwechselzahlen und der zugehörigen S-N-Kurven für Lochstäbe mit der zuständigen S-N-Kurve aus dem EUROCODE 3 (Detail Kategorie 125)

Die Untersuchungsergebnisse für Scher-Lochleibungs-Verbindungen sind im Bild 13 dargestellt. Alle Ergebnisse der low-cycle-fatigue-Versuche und der Betriebsfestigkeitsversuche sind in diesem Diagramm zusammengefasst. Für Scher-Lochleibungs-Verbindungen ist nach EUROCODE 3 die Detailkategorie 112 maßgebend. Das Bild 13 zeigt, dass sämtliche Versuchsergebnisse unterhalb der zuständigen Betriebsfestigkeitskurve des EUROCODE 3 liegen.

Demnach kann aus diesen Untersuchungen festgehalten werden, dass die Verwendung des EUROCODE 3 zur Festlegung der Betriebsfestigkeit von feuerverzinkten Bauteilen mit gestanzten oder gebohrten Löchern nicht sicher ist. Daher muss die Anwendung des EUROCODE 3 bei diesen Verbindungen nochmals ausführlich diskutiert werden, oder es müssen andere Maßnahmen zur Erhöhung der Betriebsfestigkeit durchgeführt werden.

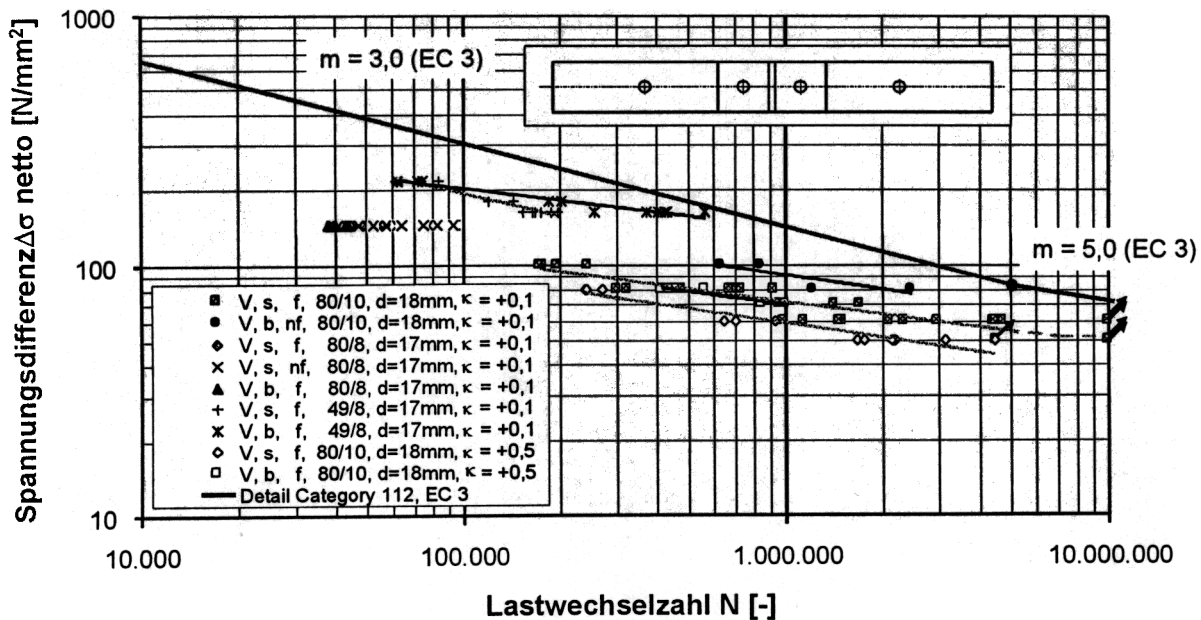
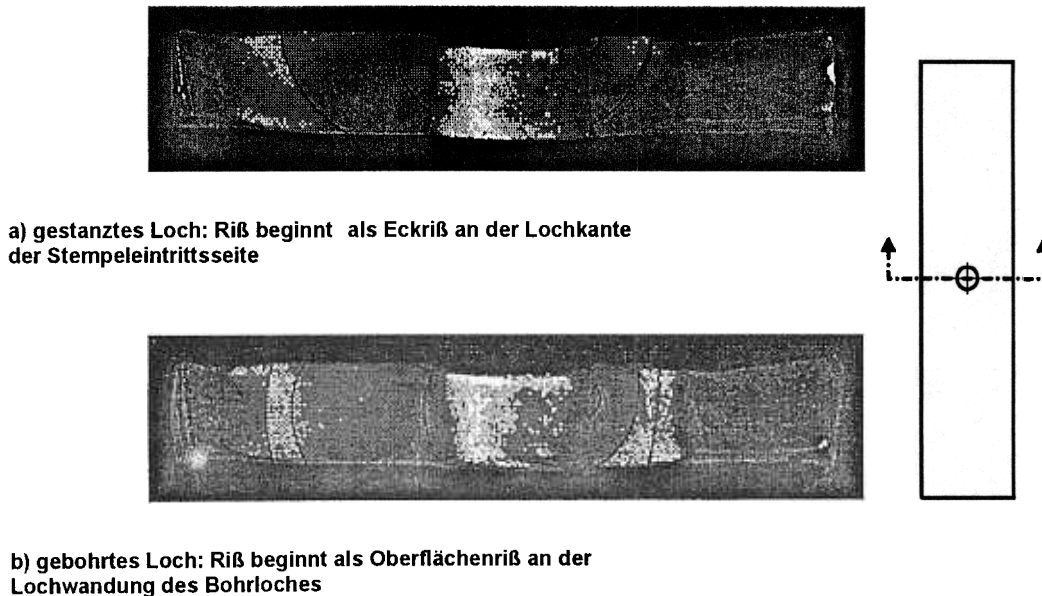


Bild 13: Vergleich der in low-cycle-fatigue-Versuchen und in Betriebsfestigkeitsversuchen erreichten Lastwechselzahlen und der zugehörigen S-N-Kurven für Scher-Lochleibungs-Verbindungen mit der zuständigen S-N-Kurve aus dem EUROCODE 3 (Detailkategorie 112)

#### Betriebsfestigkeitsversagen

Die im Rahmen der Untersuchungen angefallenen Bruchflächen wurden einer genaueren Prüfung unterzogen, um Anhaltspunkte für die Rissinitiation zu erhalten. Stellvertretend für die vielen durchgeführten visuellen Überprüfungen sollen die Bilder 14a und 14b die typischen Rissausgangslagen mitteilen. Die anfängliche Vermutung, dass die Anrisse in der Austrittszone des Stanzstempels beginnen, hat sich nicht bestätigt. Der am häufigsten auftretende Rissaus-

gangspunkt liegt in der Regel am oberen Lochrand im Nettoquerschnitt. Von hier aus breitet sich der Ermüdungsriss kontinuierlich in eine Hälfte des Nettoquerschnittes oder gelegentlich in beide Hälften des Nettoquerschnittes aus (Bild 14a). Bei gebohrten Löchern wurde der Rissausgangspunkt häufig im mittleren Bereich des Bohrloches im Nettoquerschnitt beobachtet, die Ausbreitung verlief in ähnlicher Weise wie zuvor (Bild 14b).



**Bild 14:** Rißausgangspunkt und Rißbild nach dem Schwingversagen

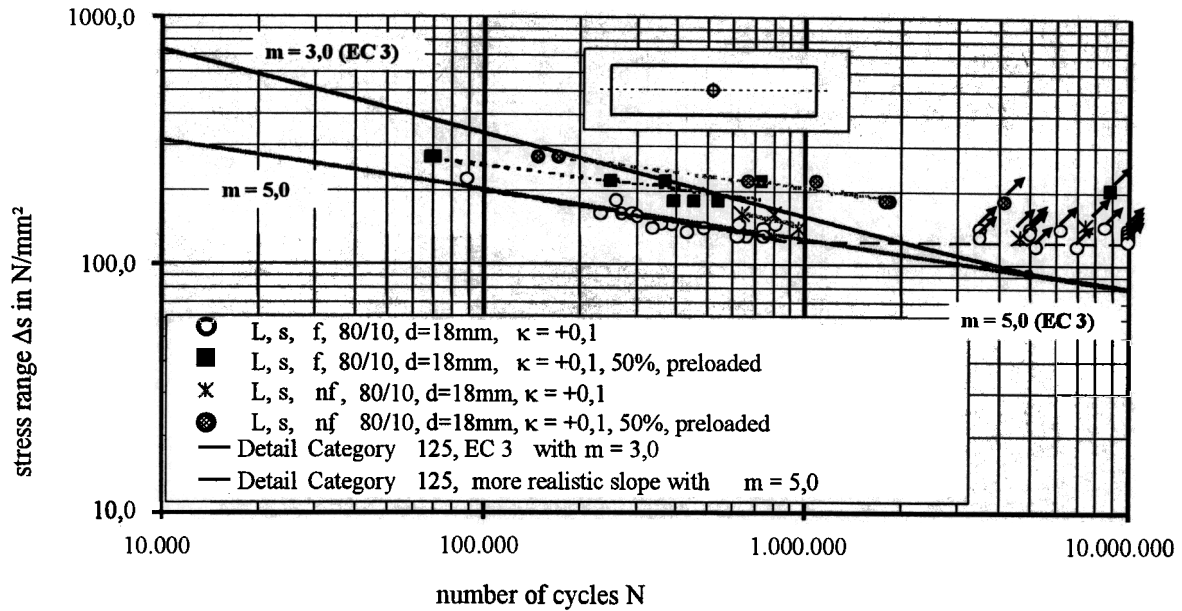
#### Vorversuche zur Verbesserung der Betriebsfestigkeit

Die Untersuchungsergebnisse zum Betriebsfestigkeitsverhalten von feuerverzinkten Stahlbauteilen mit gestanzten Löchern haben gezeigt, dass gegenüber dem EUROCODE 3 deutliche Abminderungen in Kauf genommen werden müssen. Ideen, wie dieses ohne großen Aufwand und auch von der Praxis mit wirtschaftlichen Mitteln verbessert werden kann, liegen vor. Aus eigenen Mitteln und zur Vorbereitung eines entsprechenden Forschungsantrages wurden daher Schwingfestigkeitsuntersuchungen mit Scher-Lochleibungs-Verbindungen von feuerverzinkten Stahlbauteilen mit gestanzten und gebohrten Löchern mit auf 50 % der vorgeschriebenen Werte vorgespannten HV-Schrauben durchgeführt. Durch die Querverpressung entsteht eine geschützte Zone um das Loch herum, die den Rissfortschritt verzögert und die Betriebsfestigkeit erhöht. Experimentelle Untersuchungen an genieteten Stahlbauteilen aus alten Eisenbahnbrücken, bei welchen die Niete durch vorgespannte HV-Schrauben ersetzt wurden, haben diese Idee bestätigt [1-3].

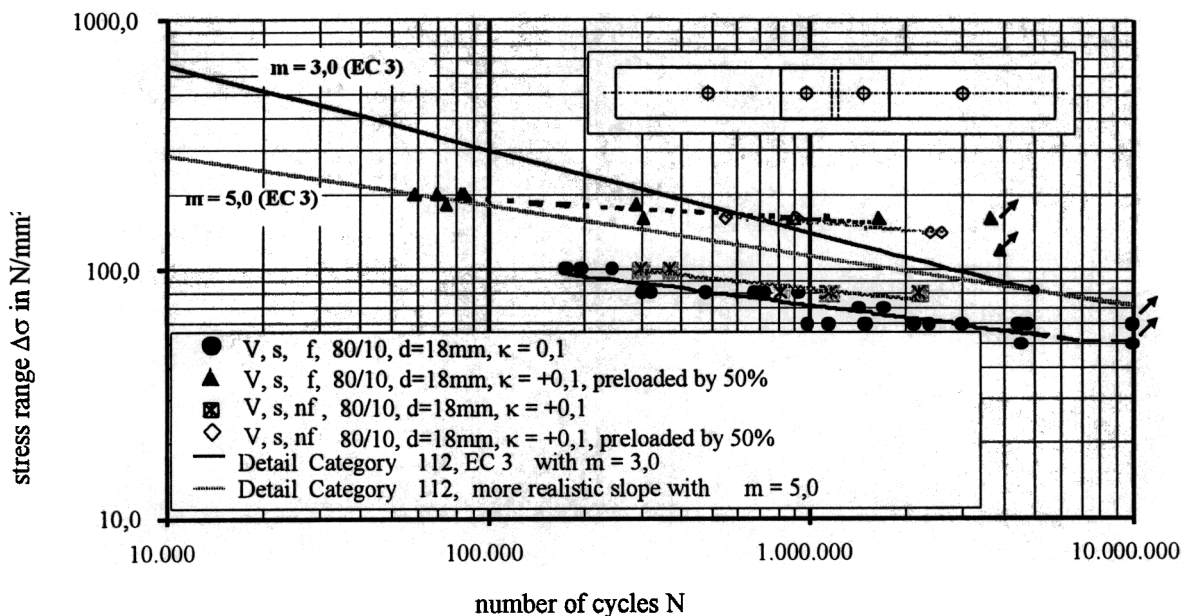
Die Prüfungen verliefen sowohl mit Stäben mit gestanzten Löchern, in die eine HV-Schrauben mit 50 % Vorspannung eingeschraubt wurde, als auch mit Scher-Lochleibungs-Verbindungen mit gestanzten Löchern, in die ebenfalls HV-Schrauben mit 50 %iger Vorspannung eingeschraubt wurden, erfolgversprechend.

Das **Bild 15** gibt mit gefüllten Kreisen und der oberen punktierten Linie erste Betriebsfestigkeitsergebnisse für nicht feuerverzinkte Lochstäbe mit gestanzten Löchern und 50 %iger Vorspannung an. Gefüllte Quadrate und die zugehörige punktierte Linie stellen allererste Ergebnisse für feuerverzinkte Lochstäbe mit gestanzten Löchern und eingesetzter HV-Schraube mit 50 %iger Vorspannung dar. Die Steigerung, ausgedrückt in Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma$ , beträgt ca. 1,4.

Derselbe positive Effekt kann anhand des **Bildes 16** für entsprechende Verbindungen mit auf 50 % vorgespannten HV-Schrauben festgestellt werden. Hierbei ergibt sich eine Steigerung, ausgedrückt in Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma$ , von mindestens 1,75.



**Bild 15:** Vergleich zwischen den S-N-Kurven für nicht feuerverzinkte und feuerverzinkte Lochstäbe mit gestanzten Löchern, in die eine HV-Schraube mit 50 %iger Vorspannung eingesetzt ist, und der S-N-Kurve aus dem EUROCODE 3 (Detailkategorie 125).



**Bild 16:** Vergleich zwischen den S-N-Kurven für nicht feuerverzinkte und feuerverzinkte Verbindungen mit gestanzten Löchern, in die HV-Schrauben mit 50 %iger Vorspannung eingesetzt sind, und der S-N-Kurve aus dem EUROCODE 3 (Detailkategorie 112).

Beide Verläufe liegen für Lastwechselzahlen zwischen 10.000 und ca. 500.000 unter der entsprechenden Betriebsfestigkeitskurve des EUROCODE 3, jenseits von 1 Mio. Lastwechseln liegen sie darüber.

In einem derzeitigen Versuchsprogramm, finanziert durch das Bundeswirtschaftsministerium, durch die AiF (Nr. 12547N/1) und durch den Gemeinschaftsausschuss Verzinken, werden die hier zugehörigen Fragestellungen einer Lösung zugeführt.

### Zusammenfassung

Es werden experimentelle Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit von Scher-Lochleibungs-Verbindungen feuerverzinkter Bauteile mit gestanzten Löchern mitgeteilt. Die Resultate bestätigen die ursprüngliche Vermutung, dass durch den Stanzprozess und durch den anschließenden Feuerverzinkungsprozess nur mäßige Betriebsfestigkeiten erreicht werden können. Diese liegen sowohl für Lochstäbe als auch für Verbindungen unterhalb der entsprechenden Kurven des EUROCODE 3. Eine Neigung von  $m = 5,0$  der S-N-Kurve würde sich besser an die Versuchsergebnisse anpassen.

Erhebliche Steigerungen der Betriebsfestigkeit können möglicherweise erreicht werden, wenn HV-Schrauben mit voller Vorspannung benutzt werden.

Das Forschungsvorhaben wurde durch das Bundeswirtschaftsministerium Berlin, durch die AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen, Köln, Nr. des Forschungsvorhabens: 11097N/1) und durch den Gemeinschaftsausschuss Verzinken, Düsseldorf (GAV) gefördert. Diesen Forschungsförderungsorganisationen danken wir bestens für die wirkungsvolle Unterstützung.

### Literatur

[1] Valtinat, G.: Restnutzungsdauer bestehender Brückenbauwerke. In Berichte aus Entwicklung, Forschung und Normung 18/1992 - Vorträge der Fachsitzung I zum Deutschen Stahlbautag (Berlin 1992), DASt Deutscher Ausschuss für Stahlbau.

[2] Valtinat, G. and Hadrych, I.: Stahlbau-Schrauben - Internationale Forschung und Entwicklung. Paper presented on the Deutscher Stahlbautag 1998 in Leipzig/Germany.

[3] Hadrych, I.: Wachstum von Ermüdungsrissen an Niet- und Schraubenlöchern unter Berücksichtigung von Vorspannkräften der Verbindungsmittel. Diss. Technical University of Hamburg-Harburg, Hamburg 2000.