

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Report, Published Version

**Gabrys, Ulrike**

## **Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit an geschmiedeten Hängeranschlüssen. FuE-Abschlussbericht. FuE 8202**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106997>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

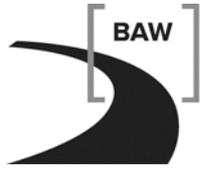
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2011): Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit an geschmiedeten Hängeranschlüssen. FuE-Abschlussbericht. FuE 8202. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

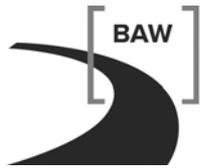
Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten



**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Ermittlung  
der Ermüdungsfestigkeit  
an geschmiedeten  
Hängeranschlüssen  
FuE 8202  
A39510110194  
  
Abschlussbericht**



**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Auftrag vom: 03.09.2007, Az.: WS13

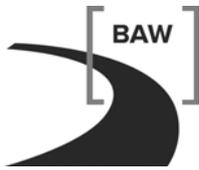
Auftrags-Nr.: FuE 8202; BAW-Nr. A39510110194

Aufgestellt von:

|               |                            |
|---------------|----------------------------|
| Abteilung:    | Bautechnik                 |
| Referat:      | Massivbau                  |
| Bearbeiter:   | Deutscher                  |
| Referat:      | Stahlbau, Korrosionsschutz |
| Bearbeiterin: | Gabrys                     |

Karlsruhe, 11.11.2011

Der Abschlussbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

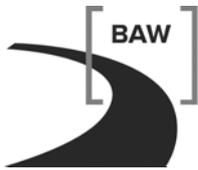


## Zusammenfassung

Ziel der Untersuchungen war es, eine quantitative Einschätzung der Ermüdungsfestigkeit von geschmiedeten Hängeranschlüssen durch Versuche zu verifizieren und den Anschluss als Kerbdetail einzustufen. Im Auftrag der BAW wurden am Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit in Darmstadt Schwingfestigkeitsversuche durchgeführt.

Nach den bis jetzt vorliegenden Informationen stellt der geschmiedete Hängeranschluss aufgrund des ermüdungstoleranten Verhaltens eine zu beachtende Alternative zum geschweißten Anschluss dar. Die Bundesanstalt für Wasserbau empfiehlt bei vergleichbaren geschmiedeten Hängeranschlüssen höchstens den Kerbfall K140 für Ermüdungsfestigkeitsnachweise anzunehmen. Bei Betriebsfestigkeitsnachweisen ist eine Wöhlerlinienneigung von  $m = 5$  zu berücksichtigen.

Mit den Ergebnissen der Ermüdungsfestigkeitsversuche und der Angabe des Kerbdetails werden Bemessungs- und Konstruktionsregeln zur wirtschaftlichen und ermüdungssicheren Ausführung von geschmiedeten Hängeranschlüssen zur Verfügung gestellt. In dem vorliegenden Bericht werden weitere Informationen zur Herstellung, zu den Materialeigenschaften und zur Gestaltung von geschmiedeten Hängeranschlüssen angegeben.



## Inhaltsverzeichnis

## Seite

|   |                              |    |
|---|------------------------------|----|
| 1 | Vorbemerkung                 | 1  |
| 2 | Herstellung                  | 3  |
| 3 | Materialeigenschaften        | 5  |
| 4 | Angabe von Entwurfparametern | 6  |
| 5 | Ermüdungsfestigkeit          | 9  |
| 6 | Bewertung                    | 13 |
| 7 | Literatur                    | 14 |

## **Bildverzeichnis**

## **Seite**

|   |    |
|---|----|
| <i>Bild 1: Geschmiedete Hängeranschlüsse / Hünxer Brücke, Wesel-Datteln-Kanal</i> | 1  |
| <i>Bild 2: Hünxer Brücke, Wesel-Datteln-Kanal</i>                                 | 2  |
| <i>Bild 3: Herstellungsprozess / Anker-Schroeder, Dortmund</i>                    | 3  |
| <i>Bild 4: Hängeranschluss mit Bezeichnungen der geometrischen Größen</i>         | 6  |
| <i>Bild 5: Versuchsstand beim LBF und Abmessungen der Versuchskörper</i>          | 9  |
| <i>Bild 6: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche aus Anlage 2</i>             | 11 |
| <i>Bild 7: Überhöhte Schweißnaht zwischen Spaten und Anschlussblech</i>           | 12 |

## **Tabellenverzeichnis**

## **Seite**

|   |    |
|---|----|
| <i>Tabelle 1: Abmessungen von bereits ausgeführten Spaten / Anker-Schroeder, Dortmund</i> | 4  |
| <i>Tabelle 2: Materialkennwerte vor und nach dem Schmiedevorgang</i>                      | 5  |
| <i>Tabelle 3: Ergebnisse der Ermüdungsfestigkeitsversuche aus Anlage 2</i>                | 10 |

## **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1: Beispiel zur Vordimensionierung

Anlage 2: LBF-Bericht Nr. 281204: Ermüdungsversuche zum Einsatz von geschmiedeten Hängeranschlüssen an Stabbogenbrücken. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt, März 2011.

## 1 Vorbemerkung

Brücken sind nicht vorwiegend ruhenden Lasten ausgesetzt und müssen gegen Versagen infolge Ermüdung nachgewiesen werden. Dies gilt insbesondere für Hängeranschlüsse an Stabbogenbrücken, die folgenden ermüdungswirksamen Wechselbelastungen ausgesetzt sein können:

- Wirbelerregte Querschwingungen
- Regen-Wind-induzierte Schwingungen
- Verkehrslasten
- Handaufschaukeln

Die Ermüdungsfestigkeit ist im Wesentlichen von der inneren und äußeren Kerbwirkung abhängig. Die innere Kerbwirkung stellt sich durch das sehr heterogene Metallgefüge ein. Unter Belastung können sich im Gefüge Spannungsspitzen einstellen, die weit über die Nennspannung hinaus gehen. Äußere Kerben wie Querschnittsprünge, Schweißnähte, Korrosionsnarben, etc., stören den Kraftfluss im Hängeranschluss und verursachen dadurch örtliche Spannungsspitzen. Daher ist es ersichtlich, dass sowohl bei der Herstellung als auch bei der Detailausbildung eine möglichst geringe Kerbschärfe erzeugt werden sollte. Zu bemerken ist, dass die Ermüdungsfestigkeitsnachweise nach dem Leitfaden (2007-12) und DIN EN 1993-1-9 (2005-07) von einem ausreichenden Korrosionsschutz während der gesamten Lebensdauer ausgehen.



*Bild 1: Geschmiedete Hängeranschlüsse / Hünxer Brücke, Wesel-Datteln-Kanal*

Mit dem Leitfaden (2007-12) zum Anhang II-H des DIN-Fachberichtes 103 und dem Nationalen Anhang DIN EN 1993-2/NA (2010-12) werden für geschweißte Hängeranschlüsse Nachweisverfahren und Konstruktionshinweise gegeben, die eine ermüdungssichere Ausbildung ermöglichen. Bei dem oben genannten Leitfaden konnte auf vorhandene Kerbdetails zurückgegriffen werden, die für geschmiedete Hängeranschlüsse noch nicht zur Verfügung stehen. Ziel der Untersuchungen ist es, eine quantitative Einschätzung der Ermüdungsfestigkeit von geschmiedeten Hängeranschlüssen durch Versuche zu verifizieren und den Anschluss als Kerbdetail einzustufen. Mit den Ergebnissen der Ermüdungsfestigkeitsversuche und der Angabe des Kerbdetails werden Bemessungs- und Konstruktionsregeln zur wirtschaftlichen und ermüdungssicheren Ausführung von geschmiedeten Hängeranschlüssen zur Verfügung gestellt. In dem vorliegenden Bericht werden weitere Informationen zur Herstellung, zu den Materialeigenschaften und zur Gestaltung von geschmiedeten Hängeranschlüssen angegeben.



*Bild 2: Hünxer Brücke, Wesel-Datteln-Kanal*

## 2 Herstellung

Nach Angabe eines Herstellers wird das warmgewalzte Rundmaterial für die Hänger einer Stabbogenbrücke nach einer Ultraschallprüfung in drei Arbeitsgängen umgeformt. Im ersten Schritt wird das Stabende ca. 35 Minuten auf 1100 °C im Ofen erwärmt, um anschließend das benötigte Volumen für die vorab festgelegte Trapezgeometrie des Anschlussbereiches einzustauen. Danach wird das Volumen in einem zweiten Arbeitsgang in eine spezielle Geometrie umgeformt, um eine optimale Materialverteilung für den letzten Arbeitsgang zu gewährleisten. Dieser wird in einer Presse durchgeführt, bei dem das Material in die gewünschte endnahe Trapezform gepresst wird. Der konische Verlauf und die Spatendicke des trapezförmigen Spatens, der später zwischen dem Rundstab und dem anzuschweißenden Anschlussblech liegt, werden durch geneigte Druckplatten in der Presse vorgegeben. Der Pressvorgang dauert einige Sekunden. Der Spaten wird mit einem geringen Übermaß hergestellt. Durch anschließendes Normalglühen der Spatenenden bei 30 °C – 50 °C oberhalb der A3-Linie (gemäß Eisen-Kohlenstoff-Schaubild, ca. 911 °C) werden innere Spannungen abgebaut und ein gleichmäßiges Gefüge mit ausreichenden Zähigkeits- und Festigkeitseigenschaften hergestellt.



Bild 3: Herstellungsprozess / Anker-Schroeder, Dortmund

Die Abkühlung der Werkstücke erfolgt ohne gezielte Temperaturführung an der Luft. Mit einem Brennschnitt wird die genaue trapezförmige Spatenform nach Schablone angeschnitten. Dadurch können größere Toleranzen in der Spatenbreite und große Außermittigkeiten der Spaten gegenüber der Hängerachse (Rundstahlmitte) ausgeschlossen werden. Die Schnittkante und die Spatenfläche werden anschließend kerbfrei beschliffen. Ungünstige oberflächennahe Aufhärtungen durch den Brennschnitt werden somit reduziert. Die Oberflächen sollten mindestens die Güteklasse C nach DIN EN 10221 (1996-01) erreichen. Auf eine Feuerverzinkung sollte verzichtet werden, da die Gefahr des Verziehens besteht. Parallel dazu wird eine zusätzliche Spaten-Probe unter gleichen Randbedingungen hergestellt. An dieser werden anschließend die Materialeigenschaften im geschmiedeten Bereich überprüft.

Das Verhältnis von Spatenbreite zur Spatenlänge ist durch den Schmiedevorgang aufgrund der erforderlichen Materialverteilung am Stabende beschränkt. Die Tabelle 1 zeigt die geometrischen Verhältnisse, die bereits an Brücken mit geschmiedeten Hängern ausgeführt wurden.

| Stabdurchmesser<br>[mm] | Spatenhöhe<br>le<br>[mm] | Spatenbreite<br>b*<br>[mm] | Spatendicke<br>t<br>[mm] |
|-------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 70                      | 315                      | 265                        | 20                       |
| 82                      | 420                      | 380                        | 20/25                    |
| 90                      | 440                      | 400                        | 25/30                    |
| 110                     | 500                      | 420                        | 35                       |
| 220                     | 585                      | 585                        | 65                       |

Tabelle 1: Abmessungen von bereits ausgeführten Spaten / Anker-Schroeder, Dortmund

Die oberen und unteren Spaten werden aus konstruktiven Gründen und für eine gleichmäßigere Stabsteifigkeit des Hängers in Brückenlängs- und Querrichtung in der Regel um 90° verdreht hergestellt. Die Winkelverdrehung ist bei der Herstellung auf ein Mindestmaß zu beschränken und nach der Herstellung zu überprüfen. Nach Herstellerangaben kann von einer Herstellungstoleranz  $\leq 2^\circ$  ausgegangen werden. Durch die leichte Überdicke der Spaten ist ein Beis Schleifen an das Anschlussblech möglich. Neben der Winkelkontrolle zwischen dem oberen und unteren Schmiedeteil ist gemäß Lehmann E. (2000) nach dem Herstellungsprozess die Gesamtlänge, die Abweichung zur Längsachse, die Spatengeometrie und -symmetrie zu prüfen. Die Norm DIN EN 10060 (2004-02) ist bezüglich der Fertigungstoleranzen zu beachten. Die Querschnittsfläche nimmt im Spatenbereich im Vergleich zum Rundstahlquerschnitt gemäß Anlage 1 zu.

### 3 Materialeigenschaften

Im Aufsatz von Schütz et al. (2006) wird erwähnt, dass sich die Verwendung von Stahl der Festigkeitsklasse S235 nachteilig auf die Hängerkonstruktion auswirkt. Bei der Verwendung eines höherfesten Stahls, z. B. S355, kann eine schlankere Geometrie gewählt werden. Dies reduziert u. a. die Knotensteifigkeit und somit die Momentenbeanspruchung. Der Einsatz von S355J2 oder besserer Güte wird daher empfohlen. Wie Hamme (2011) beschreibt, werden derzeit bei einem Brückenneubau des Landesbetriebes Straßenbau Nordrhein-Westfalen geschmiedete Hänger aus Feinkornbaustahl S420NL verwendet. Auch bei Feinkornbaustahl kann das durch den Schmiedevorgang veränderte feine Gefüge durch Normalisieren wieder hergestellt werden. Stahlsorten die eine Festigkeitserhöhung durch mechanische Walzvorgänge erhalten haben, sind für die Herstellung geschmiedeter Hängeranschlüsse nicht geeignet. Durch den Schmiedevorgang und die Kornneubildung beim anschließenden Normalisieren geht die durch den Walzvorgang gewonnene Festigkeitssteigerung verloren.

Infolge der Werkstückwärmerung oberhalb der Rekristallisationstemperatur geht der Grundwerkstoff in eine andere Kristallstruktur über und mit dem anschließenden Druck wird ein Gefüge mit veränderten mechanischen Eigenschaften neu gebildet. Auf Grund des anschließenden Normalglühens wird ein feinkörnigeres Gefüge erzeugt, dessen Festigkeits- und Zähigkeitswerte in der Größenordnung des Grundmaterials liegen muss. Dies ist an Zug- und Kerbschlagbiegeproben nachzuweisen und in einem Abnahmezeugnis zu dokumentieren. Mit dem Kerbschlagbiegeversuch wird das Spröbruchverhalten des Stahls ermittelt. Materialuntersuchungen an bereits ausgeführten Brückenbauwerken zeigen, dass die erforderlichen mechanischen Eigenschaften nach DIN EN 10025-2 (2005-04) auch nach dem Schmiedevorgang und der anschließenden Wärmebehandlung erreicht werden.

|  |               | <b>Streckgrenze</b> | <b>Zugfestigkeit</b> | <b>Dehnung</b> | <b>Kerbschlagarbeit</b> |
|--|---------------|---------------------|----------------------|----------------|-------------------------|
|  |               | N/mm <sup>2</sup>   | N/mm <sup>2</sup>    | %              | Joule                   |
| <b>Ahsener Brücke</b><br>S355 J2+N       | Grundmaterial | 420                 | 580                  | 28             | 172/170/176             |
|  | Spaten        | 384                 | 535                  | 30             | 184/202/218             |
| <b>Hünxer Brücke</b><br>S355 J2G3        | Grundmaterial | 427                 | 599                  | 26             | 122/118/120             |
|  | Spaten        | 371                 | 551                  | 28             | 206/222/186             |
| <b>Maximilian Brücke</b><br>S355 K2G3    | Grundmaterial | 415                 | 582                  | 30             | 148/146/105             |
|  | Spaten        | 383                 | 551                  | 32             | 160/215/178             |
| <b>Lindenhorster Brücke</b><br>S355 K2+N | Grundmaterial | 417                 | 574                  | 28             | 142/130/139             |
|  | Spaten        | 361                 | 502                  | 34             | 205/178/173             |

Tabelle 2: Materialkennwerte vor und nach dem Schmiedevorgang

Die Streckgrenze und die Zugfestigkeit werden leicht reduziert, wobei die Bruchdehnung und die Kerbschlagarbeit im Vergleich zum Grundmaterial zunehmen. Diese leichte Veränderung der Materialeigenschaften wurde tendenziell auch bei den für die Ermüdungsversuche hergestellten Probekörpern festgestellt (siehe Anlage 2).

#### 4 Angabe von Entwurfsparametern

Die Geometrie des Hängeranschlusses ist für einen harmonischen Kraftfluss und minimierter Kerbschärfe zu entwerfen. Die konstruktive Ausbildung von geschmiedeten Hängeranschlüssen erfolgt in Anlehnung an den Leitfaden (2007-12). Die dort aufgeführten Empfehlungen werden auf die besonderen Randbedingungen eines geschmiedeten Hängeranschlusses angepasst. Die angegebenen Empfehlungen sind als Hilfestellung für den Entwurf zu sehen und müssen durch den Nachweis der Tragsicherheit und Ermüdungsfestigkeit bestätigt werden.

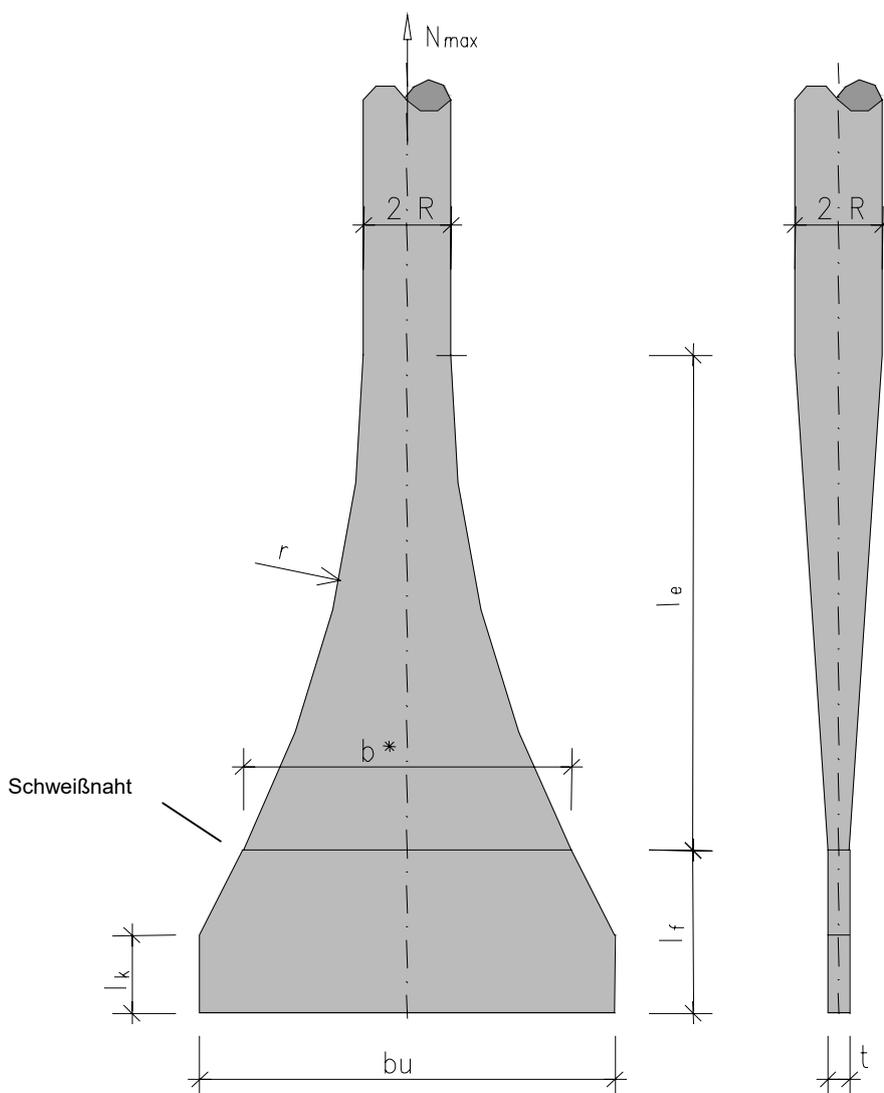


Bild 4: Hängeranschluss mit Bezeichnungen der geometrischen Größen

### Hängerradius R

Die im Auftrag der BAW durchgeführten Parameterstudien von Schütz und Gitterle (2005) zeigen, dass die Ermüdungsbeanspruchung aus Verkehr und Wirbelerregung mit steigendem Hängerdurchmesser zunimmt und somit die Hänger nicht dicker als erforderlich ausgebildet werden sollten. Der Hängerradius wird mit der maximalen Hängernormalkraft und den zulässigen Spannungen nach dem Leitfaden (2007-12), Tabelle 3 bestimmt:

$$R = \sqrt{\frac{N_{\max}}{\pi \cdot \sigma}}$$

### Spatendicke t

Als Spatendicke wird die Materialdicke des Spatenendes und die des Anschlussbleches bezeichnet. Der Spaten sollte nicht dicker ausgeführt werden als erforderlich, um die Einspannwirkung so gering wie möglich zu halten. Die Spatendicke wird nach dem Aufsatz von Schütz et al. (2006) mit

$$t \approx 0,5 \cdot R$$

vordimensioniert. Tendenziell nehmen die Beanspruchungen am Spatenkopf bei kleiner werdender Spatendicke ab und die Beanspruchung der Schweißnaht zu.

### Spatenbreite b\*

Die Spatenbreite  $b^*$  in Höhe der Schweißnaht wird ebenfalls mit der maximalen Hängernormalkraft und der zulässigen Spannung nach dem Leitfaden (2007-12), Tabelle 3 bestimmt:

$$b^* = \frac{N_{\max}}{\sigma \cdot t}$$

Eine Erhöhung der Spatenbreite aufgrund von möglichen Fertigungstoleranzen aus dem Schmiedevorgang braucht nicht berücksichtigt werden, da die endgültige Spatenform nach Schablone ausgeschnitten wird.

### Spatenlänge $l_e$

Um große Steifigkeitssprünge in der Hängeranschlusskonstruktion zu vermeiden, muss der Spaten ausgerundet auslaufen. Die vom Herstellungsprozess abhängige maximale Spatenhöhe  $l_e$  sollte deshalb ausgenutzt werden, um einen möglichst großen Außenradius  $r$  anschneiden zu können.

### Außenradius $r$

Der im Leitfaden (2007-12) aufgezeigte Vorschlag zur Ermittlung des Außenradius kann aufgrund des Verhältnisses von Breite zu Länge beim schmieden nicht erreicht werden. Der Außenradius des Schmiedestücks wird daher geringer ausfallen als bei Knotenblechen mit eingeschweißten Hängerstäben. Durch die Ausnutzung der maximalen Spatenlänge  $l_e$  sollte jedoch beim geschmiedeten Hänger der maximal mögliche Außenradius  $r$  angeschnitten werden.

### Knotenblechbreite $b_u$

Im oben genannten Leitfaden wird eine maximale Knotenblechbreite  $b_u$  angegeben. Auch hier gilt, dass eine geringere Knotenblechbreite die Knotensteifigkeit und damit die Momentenbeanspruchung in Blechebene reduziert. Eine große Torsionssteifigkeit der Versteifungsträger und Biegesteifigkeit der Querträger verringert ebenfalls die Momentenbeanspruchung der Anschlusskonstruktion infolge Verkehr. Die obere Knotenblechbreite wird durch die Brückenbogenbreite bestimmt. Im Bereich der Hauptträger besteht meist ein größerer Gestaltungsspielraum. Wird die Empfehlung aus dem Leitfaden (2007-12) auf eine geschmiedete Anschlusskonstruktion übertragen, sollte die Knotenblechbreite nicht größer als

$$b_u \leq 1,5 \cdot b^*$$

gewählt werden.

### Freie Knotenblechhöhe $l_f$

Die Beanspruchung im Übergangsbereich zwischen Spaten und Hänger wird bei einem größeren Abstand zum Versteifungsträger reduziert, so dass von Schütz et al. (2006) empfohlen wird, den Rundstahlhänger „in einem größeren Abstand (freie Knotenblechhöhe  $l_f$ ) vom Versteifungsträger/Querträger bzw. Bogen“ beginnen zu lassen.

## 5 Ermüdungsfestigkeit

Der Spaten und das Anschlussblech werden, wie oben bereits erwähnt, nach Schablone brenngeschnitten und nachträglich mechanisch bearbeitet. Bei dieser Ausführung und unter Beachtung der in DIN EN 1993-1-9 (2005-07) bzw. DIN Fachbericht 103 (2009-03) angegebenen Anforderungen an die Ausführungsqualität ist ein von Hand brenngeschnittener Werkstoff für den Kerbfall K125 und ein maschinell brenngeschnittener Werkstoff für den Kerbfall K140 nachzuweisen.

Ob für den geschmiedeten Hängeranschluss eine vergleichbare Kerbschärfe angenommen werden muss, wurde durch Ermüdungsfestigkeitsversuche am Fraunhoferinstitut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, ermittelt. Der Kerbfall des Anschlussdetails wurde mit Dauerfestigkeitsversuchen an 10 Prüfkörpern bestimmt. Die durch den Herstellvorgang erzeugten Eigenspannungen im Bauteil haben einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. Daher wurden die Prüfkörper im Maßstab 1:1 aus S355J2 nach vorgegebener Musterzeichnung hergestellt. Der Hängerdurchmesser der Probekörper betrug 82 mm. Die Gesamtlänge des Hängers wird auf 1,5 m beschränkt. Auf ein Verschleifen der Spatenoberfläche zur Reduzierung der Kerbschärfe wurde bei den Probekörpern verzichtet.

Ein vorab durchgeführter rechnerischer Vergleich der Ermüdungsbeanspruchung der Schweißnaht und des Übergangsbereiches zwischen Hänger und Schmiedestück unter Normkrafteinwirkung zeigt, dass es erforderlich war, die Schweißnaht möglichst kerbarm (blecheben beschliffen) auszubilden, um einen Bruch im Schmiedestück und nicht in der Schweißnaht zu provozieren. Bild 6 zeigt eine eingespannte Probe während des Ermüdungsversuchs am Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit in Darmstadt (LBF) und die Abmessungen der untersuchten Versuchskörper.

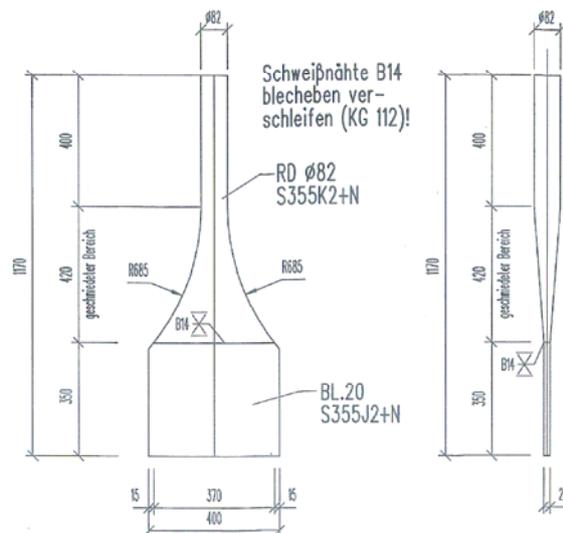


Bild 5: Versuchsstand beim LBF und Abmessungen der Versuchskörper

Alle Schweißnähte der zu untersuchenden Probekörper wurden zerstörungsfrei gemäß DIN EN 1435 (2002-09) untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten, dass keine zu beanstandenden Fehler in der Schweißnaht vorlagen. Des Weiteren wurde an einem Probekörper umfassende Materialuntersuchungen (Chem. Analyse, Zugprüfungen, Kerbschlagbiegeprüfungen) durchgeführt. Auch hier waren alle Ergebnisse ohne Beanstandung.

Als wesentliche Einflussgröße zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit ist die Spannungsschwingbreite zu nennen, die sich aus der Differenz der Spannung bei Maximallast und der Spannung bei Minimallast ergibt. Für die Ermittlung der Wöhlerlinie wurden die Versuche mit drei verschiedenen Lastniveaus gefahren (siehe Tabelle 3). Die Größe der Maximallasten wurde so gewählt, dass unter Berücksichtigung der vorhandenen Querschnittsflächen und der Annahme eines Kerbfalls K140 bei Lastspielzahlen bis  $N = 2 \times 10^6$  Risse im Probekörper zu erwarten waren. Um die Prüfzeit zu minimieren, wurden die Versuche mit einer Frequenz von 5 Hz in einem servohydraulischen Prüfstand unter Axialbelastung durchgeführt. Das konstante Spannungsverhältnis aus minimaler Spannung und maximaler Spannung betrug  $R = 0,1$ . Die Proben wurden solange belastet, bis entweder ein Riss auftrat, oder die Grenzlastspielzahl von  $N = 2 \times 10^6$  erreicht wurde. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche am Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit zusammengestellt.

**Hängeranschlüsse für Stabbogenbrücken**  
**Werkstoff: S 355 J2**

**Vorgaben für die Schwingfestigkeitsversuche:**

Frequenz  $f = 5 \text{ s}^{-1}$ , Grenzschnitzspielzahl  $N_G = 2 \cdot 10^6$

| Versuch Nr. | Proben-Nr. | Last-amplitude $F_a$ in kN | max. Last $F_o$ in kN | min. Last $F_u$ in kN | Last-verhält-nis R | Schwingspiele N | Bruchlage/Anmerkungen  |
|-------------|------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|------------------------|
| 1           | 1          | 511,5                      | 1136,7                | 113,7                 | 0,1                | 2 000 000       | ohne Versagen          |
| 1a          | 1          | 750,0                      | 1666,7                | 166,7                 | 0,1                | 41 790          | Einspannbruch          |
| 2           | 6          | 750,0                      | 1666,7                | 166,7                 | 0,1                | 225 640         | Rundstab <sup>1)</sup> |
| 3           | 9          | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1                | 1 018 280       | Rundstab <sup>1)</sup> |
| 4           | 5          | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1                | 784 310         | Einspannbruch          |
| 5           | 7          | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1                | 1 365 090       | Einspannbruch          |
| 6           | 15         | 750,0                      | 1666,7                | 166,7                 | 0,1                | 305 110         | Schweißnaht            |
| 7           | 16         | 750,0                      | 1666,7                | 166,7                 | 0,1                | 295 080         | Schweißnaht            |
| 8           | 20         | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1                | 364 960         | Rundstab <sup>2)</sup> |
| 9           | 21         | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1                | 971 880         | Schweißnaht            |
| 10          | 14         | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1                | 925 920         | Spaten                 |

<sup>1)</sup>: Übergang zum angestauchten Bereich

<sup>2)</sup>: freie Schaftlänge

Tabelle 3: Ergebnisse der Ermüdungsfestigkeitsversuche aus Anlage 2

Dem Bild 7 kann bei doppellogarithmischer Skalierung die aus den Versuchsergebnissen entwickelte Wöhlerlinie entnommen werden.

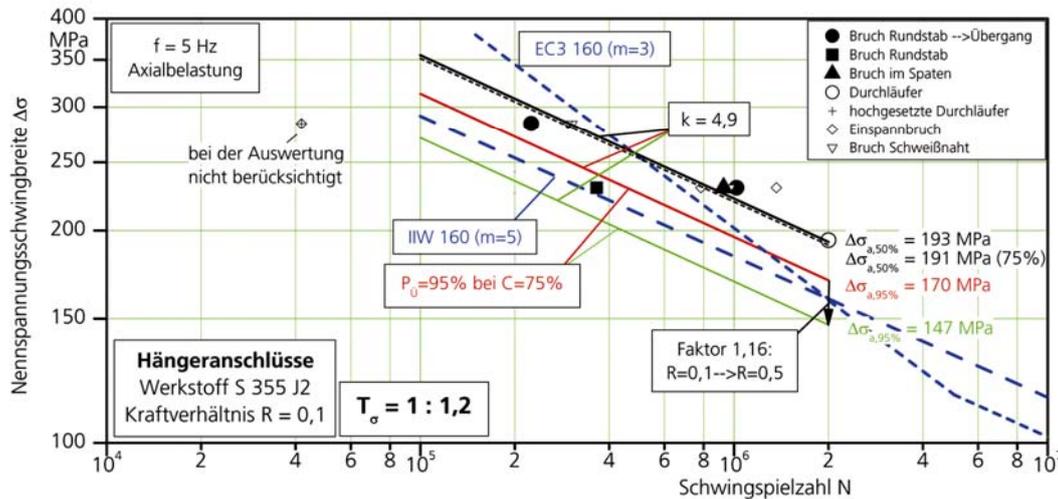


Bild 6: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche aus Anlage 2

Zur Berechnung der ertragbaren Spannungsschwingbreite für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % ist das Streumaß der Ergebnisse maßgebend. Nach Vorgabe in DIN EN 1990 (2010-12) und Hobbacher (2008) ist für die weitere Berechnung das Streumaß der Stichprobe anzusetzen. Aus den Ergebnissen der Stichprobe ergibt sich das Streumaß von  $T_{\sigma} = 1:1,19$  und für die weitere Auswertung wurde aus diesem Grunde ein Streumaß von  $T_{\sigma} = 1:1,2$  angenommen. Für ein Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$ , mit dem die Versuche durchgeführt wurden, ergibt sich somit eine ertragbare Spannungsschwingbreite für  $2 \cdot 10^6$  Schwingspiele von  $\Delta\sigma$  ( $P_{\bar{u}} = 95\%$ ,  $R = 0,1$ ) = 170 MPa. Die Wöhlerlinie wurde mit Umrechnungsfaktoren auf ein Spannungsverhältnis  $R = 0,5$  gemäß Hobbacher (2008) angepasst. Als ertragbare Spannungsschwingbreite bei  $2 \times 10^6$  ( $R = 0,5$ ) Lastspielen konnte ein Wert von 147 MPa mit einer Wöhlerlinienneigung von  $m = 4,9$  bestimmt werden. In Hobbacher (2008) wird die Wöhlerlinienneigung mit  $k$  bezeichnet (siehe Bild 6). Nach DIN EN 1993-1-9 (2005-07) wird der Kerbfall K140 für einen „maschinell brenngeschnittenen Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung“ angenommen. Die Wöhlerlinienneigung wird dort jedoch standardisiert mit  $m = 3$  angesetzt.

Als maßgebende Stellen für die Bildung von Ermüdungsrissen kann der Übergang zwischen Spaten und Rundstahlhänger genannt werden. Die Versuchsergebnisse zeigen weiter, dass trotz der blecheben verschliffenen Schweißnaht die Ermüdungsfestigkeit des Hängeranschlusses auch von der Kerbschärfe der Schweißnaht bestimmt wird (3 Schweißnahtbrüche). Daher wird empfohlen, dass die Schweißnähte zwischen Spaten und Anschlussblech bei Brückenneubauten in Sondergüte (kerbfrei) ausgeführt, und anschließend blecheben in Lastrichtung verschliffen werden (Kerbfall K112). Bild 7 zeigt eine überhöhte Schweißnaht zwischen dem geschmiedeten Spaten und dem Anschlussblech. Eine kerbschärfere Ausführung mit einer Nahtüberhöhung wird in Abhängigkeit der Schweißposition und der Nahthöhe durch den Ansatz eines ungünstigeren Kerbfalls quittiert.

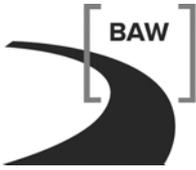


*Bild 7: Überhöhte Schweißnaht zwischen Spaten und Anschlussblech*

In der DIN EN 1993-1-9 (2005-07) werden für Schweißnahtüberhöhungen folgende Kerbfälle angegeben:

- Beidseitige Schweißung mit ZFP, keine Schweißnahtnachbehandlung,  
 Nahtüberhöhung < 10 % der Nahtbreite (Wannenlage!) **K90**
- Beidseitige Schweißung mit ZFP, keine Schweißnahtnachbehandlung  
 Nahtüberhöhung < 20 % der Nahtbreite **K80**

Zu bemerken ist, dass durch den Montageablauf die Schweißnahterstellung in Wannenlage nicht immer gegeben ist.



## 6 Bewertung

Nach obigen Ausführungen und der Zusammenfassung der bis jetzt vorliegenden Informationen stellt der geschmiedete Hängeranschluss aufgrund des ermüdungstoleranten Verhaltens eine zu beachtende Alternative zum geschweißten Anschluss dar.

Die Bundesanstalt für Wasserbau empfiehlt bei vergleichbaren geschmiedeten Hängeranschlüssen höchstens den Kerbfall K140 für Ermüdungsfestigkeitsnachweise anzunehmen. Bei Betriebsfestigkeitsnachweisen ist eine Wöhlerlinienneigung von  $m = 5$  zu berücksichtigen.

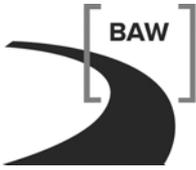
Bundesanstalt für Wasserbau  
Karlsruhe, 11.11.2011

Im Auftrag

(Dipl.-Ing. Deutscher)

## 7 Literatur

- DIN EN 1435 (2002-09): Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen; Durchstrahlung von Schmelzschweißverbindungen; Deutsche Fassung EN 1435:1997 + A1:2002, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2002.
- DIN EN 1990 (2010-12): DIN EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC:2010; Anhang D; Versuchsgestützte Bemessung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- DIN EN 1993-1-9 (2005-07): DIN EN 1993-1-9: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9 Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9: 2005, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005.
- DIN EN 1993-2/NA (2010-12): DIN EN 1993-2/NA: Nationaler Anhang-National festgelegte Parameter-Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten-Teil 2: Stahlbrücken, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- DIN EN 10025-2 (2005-04): DIN EN 10025-2: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle; Deutsche Fassung EN 10025-2:2004, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005.
- DIN EN 10060 (2004-02): DIN EN10060: Warmgewalzte Rundstäbe aus Stahl – Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße; Deutsche Fassung EN 10060:2003, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.
- DIN EN 10221(1996-01): DIN EN10221: Oberflächengüteklassen für warmgewalzten Stabstahl und Walzdraht; Technische Lieferbedingungen, Deutsche Fassung EN 10221:1995, Beuth Verlag GmbH, Berlin,1996.
- DIN-Fachbericht 103 (2009-03): Stahlbrücken, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- Hamme M. (2011): Entwurf und Ausführung, Neubau der Schnettkerbrücke; 11. Symposium Brückenbau in Leipzig. Brückenbau. In: Construction & Engineering, Ausgabe 1, 2011.
- Hombacher, A. (2008): Fatigue design of welded joints and components, Recommendations of IIW, Joint Working Group XIII-XV, XII-1539/XV-845-96, The International Institute of Welding.
- Lehmann E. (2000): Bau von drei Bogenbrücken im Zuge der brandenburgischen Autobahnen. In: Sonderheft Brandenburgische Autobahnamt, 2000.
- Leitfaden (2007): Leitfaden zum Anhang II-H, Hänger von Stabbogenbrücken des DIN-Fachberichtes 103:2009-03, Bundesanstalt für Straßenwesen und Bundesanstalt für Wasserbau, Ausgabe Dezember 2007.
- Schütz K.G., Ehmann R., Gitterle M. (2006): Winderregte Hängerschwingungen an Stabbogenbrücken. In: Der Prüflingenieur, Oktober 2006.



Schütz K.G., Gitterle M. (2005): Schwingungen von Hängern an Stabbogenbrücken, Weiterentwicklung der technischen Regelwerke. Erstellt für die Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, 2005 und 2006 (unveröffentlicht).

Sedlacek G., Bohmann D. (1998): Hängeranschluss der Dehmseebrücke, Untersuchung der Auswirkung der Anschlußausbildung für die Hängerstäbe auf die Ermüdung. RWTH Aachen, Januar 1998 (unveröffentlicht).

Anlage 1: Beispiel zur Vordimensionierung

$$N_{d,max} = 1000kN$$

$$R = \sqrt{\frac{N_{d,max}}{\pi \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{1000 \cdot 1000}{\pi \cdot 190}} = 40,9mm$$

gew.: R= 40mm ; D=80mm

$$t = 0,5 \cdot R = 0,5 \cdot 40 = 20mm$$

gew.: t = 20mm

$$b^* = \frac{N_{d,max}}{\sigma \cdot t} = \frac{1000 \cdot 1000}{190 \cdot 20} = 263mm$$

gew.: b\*= 300mm

$$l_e = \max. l_e \text{ gemäß Tabelle 1}$$

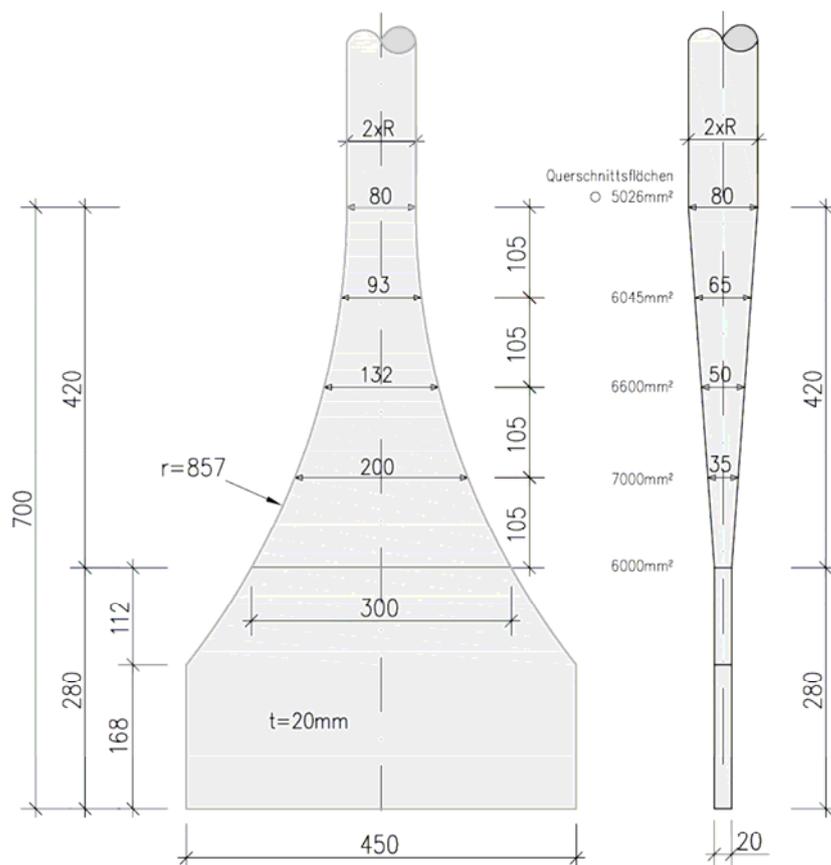
gew.: l<sub>e</sub>= 420mm

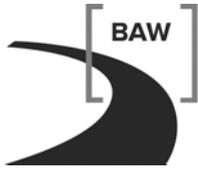
$$\rightarrow r = 857mm$$

gew.: r=857mm

$$bu \leq 1,5 \cdot b^* = 1,5 \cdot 300 = 450mm$$

gew.: bu= 450mm





## Anlage 2

# **Ermüdungsversuche zum Einsatz von geschmiedeten Hängeranschlüssen an Stabbogenbrücken**

LBF-Bericht Nr. 281204 – Abschlussbericht

**Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF**

März 2011

Darmstadt

# Ermüdungsfestigkeitsversuche zum Einsatz von geschmiedeten Hängeranschlüssen an Stabbogenbrücken

Auftraggeber **Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kußmaulstraße 17  
76187 Karlsruhe

Auftrag Nr. 4000/4220 – BAW 05/2010

Forschungsstelle **Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF**  
Bartningstraße 47  
64289 Darmstadt

LBF-Bericht Nr. 281204 – Abschlussbericht

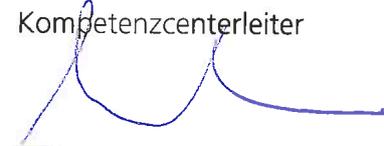
Umfang 33 Seiten, 7 Tabellen, 14 Bilder

Datum 14. März 2011

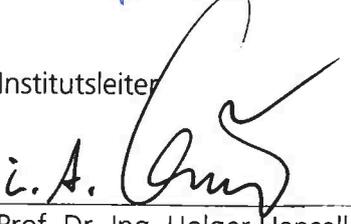
Projektleiter

  
Dr.-Ing. Klaus Lipp

Kompetenzcenterleiter

  
Dr.-Ing. Heinz Kaufmann

Institutsleiter

  
i. A. Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka

C. P. Jannis  
17. April 2011

# Inhalt

|                 | Seite  |
|-----------------|--|
| <b>1</b>        | <b>Aufgabenstellung</b> <b>4</b>   |
| <b>2</b>        | <b>Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse</b> <b>5</b>                                     |
| <b>3</b>        | <b>Dokumentation der Probengeometrie</b> <b>6</b>  |
| 3.1             | Allgemeine Angaben 6   |
| 3.2             | Prüfobjekt und Probenahme 6  |
| 3.3             | Versuchsdurchführung 6   |
| 3.4             | Ergebnisse 6   |
| <b>4</b>        | <b>Zerstörungsfreie Schweißnahtprüfung</b> <b>7</b>  |
| 4.1             | Allgemeine Angaben 7   |
| 4.2             | Prüfobjekt 7   |
| 4.3             | Prüfverfahren 7  |
| 4.4             | Ergebnisse 7   |
| <b>5</b>        | <b>Materialkontrollprüfungen</b> <b>8</b>  |
| 5.1             | Allgemeine Angaben zur Ermittlung der mechanischen<br>Kennwerte sowie der chemischen Analyse 8 |
| 5.2             | Prüfobjekt und Probenahme 8  |
| 5.3             | Prüfverfahren 9  |
| 5.4             | Ergebnisse 9   |
| 5.5             | Allgemeine Angaben zur Dokumentation des Gefüges des<br>geschmiedeten Spatens 9                |
| 5.6             | Prüfobjekt und Probenahme 9  |
| 5.7             | Prüfverfahren 9  |
| 5.8             | Ergebnisse 9   |
| <b>6</b>        | <b>Ermüdungsfestigkeitsversuche</b> <b>10</b>  |
| 6.1             | Allgemeine Angaben 10  |
| 6.2             | Prüfobjekt 10  |
| 6.3             | Prüfverfahren 10   |
| 6.4             | Versuchsaufbau und -durchführung 10  |
| 6.5             | Ergebnisse 11  |
| <b>7</b>        | <b>Einordnung der Ergebnisse in eine Kerbfallgruppe</b> <b>12</b>                              |
| <b>8</b>        | <b>Schrifttum</b> <b>14</b>  |
| <b>Tabellen</b> | <b>15 - 19</b>   |
| <b>Bilder</b>   | <b>20 - 33</b>   |

## 1 Aufgabenstellung

Die Ermüdungsfestigkeit von geschmiedeten Hängeranschlüssen ist durch experimentelle Schwingfestigkeitsversuche zu verifizieren und als Kerbdetail nach DIN EN 1993-1-9 [ 1 ] einzustufen. Die Versuche werden mit Original-Prüfkörpern im Maßstab 1:1 aus einem Stahl S355 J2 durchgeführt, die seitens dem BAW nach vorgegebener Geometrie und nach Schablone (geschmiedeter Spaten, Kerbgruppe 140) hergestellt und zur Verfügung gestellt werden.

Die Versuche sollen an insgesamt mindestens 10 Prüfkörpern bei drei unterschiedlichen Spannungsschwingbreiten, 209 MPa, 176 MPa und 140 MPa und einem Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$  durchgeführt werden. Abhängig von den erhaltenen Ergebnissen sind ggf. die Prüflasten in Absprache mit dem BAW zu verifizieren.

Versuchsbegleitend sind folgende weitere Untersuchungen vorzunehmen:

- Auszumessen der jeweiligen Probengeometrie,
- zerstörungsfreie Prüfung der vorhandenen Schweißnähte (Durchstrahlungsprüfung) sowie
- Materialkontrollprüfungen der angeschweißten Bleche sowie des Rundstabs (zylindrischer Probenteil).

Ergänzend wurden auch Materialkontrollprüfungen für den geschmiedeten Spatenbereich der Proben vereinbart.

## 2 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche resultieren in einer ertragbaren Spannungsschwingbreite von  $\Delta\sigma_{50\%} = 193$  MPa für  $2 \cdot 10^6$  Schwingspiele und eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50%, bezogen auf den Nennquerschnitt des Rundstabes mit einem Durchmesser von 82 mm. Die Neigung der Wöhlerlinie wurde mittels linearer Regressionsrechnung bestimmt und beträgt  $k_{50\%} = 4,9$ . Das Streumaß der Versuchsergebnisse beträgt im Bereich der Zeitfestigkeit  $T_\sigma = 1 : 1,19$ .

Als schwingbruchkritische Bereiche der Schmiedehänger erweisen sich der Rundstab, speziell der Übergang zum geschmiedeten Spatenbereich, sowie die Schweißnaht des am Spaten angeschweißten Blechs. Es wurde nur ein Versagen im geschmiedeten Spatenbereich erhalten.

Unter Zugrundelegung des rechnerischen Streumaßes von  $T_\sigma = 1 : 1,2$ , dies entspricht einer Streuung aus den durchgeführten Schwingfestigkeitsversuchen, sowie einem Lastverhältnis von  $R = 0^1$ , wird für die geschmiedeten Hänger eine Kerbfallklasse für den Eurocode 3 von 160 bestätigt. Selbst bei einem größeren angenommenen Streumaß von  $T_\sigma = 1 : 1,3$  ist die Kerbfallklasse von 160 anzusetzen.

Nach der IIW-Richtlinie wäre unter Annahme von vorliegenden hohen Zug-eigenstressungen bei einem Streumaß von  $T_\sigma = 1 : 1,2$  die FAT-Klasse von 140 bestätigt. Bei einem größeren angenommenen Streumaß von  $T_\sigma = 1 : 1,3$  wäre die FAT-Klasse von 125 anzusetzen.

Bei Bauteilen, bei denen keine oder nur sehr geringe Eigenstressungen vorliegen, kann die zulässige Schwingbreite nach der IIW-Richtlinie, die auf ein Spannungsverhältnis von  $R = 0,5$  bezogen ist, für ein Spannungsverhältnis von  $R = 0$  mit einem Korrekturfaktor von  $f_E = 1,2$  angehoben werden. Unter diesen Umständen wäre auch bei Anwendung der IIW-Richtlinie für Bauteile mit geringen Eigenstressungen die zulässige Spannungsschwingbreite für ein Spannungsverhältnis von  $R = 0$  mit derjenigen des Eurocode 3 vergleichbar.

<sup>1</sup> : Eine eindeutige Angabe zum Spannungsverhältnis der Bemessungswöhlerlinien ist im Eurocode 3 nicht gegeben. Als Bezugsgröße wird hier  $R = 0$  unterstellt.

## 3 Dokumentation der Probengeometrie

### 3.1 Allgemeine Angaben

Geometrie ausmessen und dokumentieren:

Beginn der Prüfung:  
August 2010

Abschluss der Prüfung:  
September 2010

### 3.2 Prüfobjekt

Die Probenform der angelieferten Proben ist in **Bild 1** dargestellt.

### 3.3 Versuchsdurchführung

Zur Dokumentation der Probengeometrie sind mindestens die Abmessungen Spatendicke, -breite und -höhe im Bereich der Schweißnaht sowie der Stangendurchmesser auszumessen. In Abstimmung mit dem BAW sind die Abmessungen nach **Bild 2** dokumentiert worden. Die Messung erfolgte mittels eines kalibrierten digitalen Kontrollmessschiebers.

### 3.4 Ergebnisse

Die Messergebnisse zur Dokumentation der Probengeometrie sind in **Tabelle 1** zusammengefasst

## 4 Zerörungsfreie Schweißnahtprüfung

### 4.1 Allgemeine Angaben

Durchstrahlungsprüfung nach DIN EN 1435:

Unterauftragnehmer: **Fa. Gamma Service**  
Langener Str. 12  
63329 Egelsbach

Unterauftrag: 010 / 212426 / 800

Beginn der Prüfung:  
20. September 2010

Abschluss der Prüfung:  
20. September 2010

### 4.2 Prüfobjekt

Die zerstörungsfreie Prüfung erfolgte an der Stumpfnah, mit der das Hängeranschlussblech an den Spaten geschweißt wurde, siehe **Bild 1**.

### 4.3 Prüfverfahren

Die Schweißnahtprüfung erfolgte gemäß DIN EN 1435 „Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Durchstrahlung von Schweißverbindungen“. Die Bewertung erfolgte entsprechend nach DIN EN 12517-1 „Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Teil 1: Bewertung von Schweißverbindungen in Stahl, Nickel, Titan und ihre Legierungen mit Durchstrahlung – Zulässigkeitsgrenzen“

### 4.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Schweißnahtprüfung sind auf **Bild 3** und **4** zusammengefasst. Alle Schweißnähte waren hierbei ohne Beanstandung begutachtet.

## 5 Materialkontrollprüfungen

### 5.1 Allgemeine Angaben zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte sowie der chemischen Analyse

Zug- und Kerbschlagbiegeversuche, chemische Analyse:

Unterauftragnehmer: **IfG-Service GmbH**  
Sohnstraße 70  
40237 Düsseldorf

Unterauftrag: 010 / 212400 / 800

Beginn der Prüfung: August 2010      Abschluss der Prüfung: Januar 2011

### 5.2 Prüfobjekt und Probenahme

An einer der gelieferten Proben sind aus dem angeschweißten Blech und am Rundstab je zwei Zugproben sowie sechs Kerbschlagbiegeproben parallel zur Stabachse zu entnehmen. Für die Probenahme wurde die Probe Nr. 2 ausgewählt. Wunschgemäß wurden weitere Proben nachträglich aus dem geschmiedeten Spatenbereich dieser Probe entnommen, **Bild 5**.

Als Zugproben wurden Proben nach DIN 50125 der Form B hergestellt. Für die Zugversuche aus dem angeschweißten Blech sowie dem Rundmaterial wurden Zugproben B14 x 70 und aus dem geschmiedeten Spatenbereich Zugproben B10 x 50 gefertigt.

Die Kerbschlagbiegeversuche wurden mit Charpy-V-Proben nach DIN EN 10045 durchgeführt. Für jeden Entnahmebereich wurden drei Versuche unter Raumtemperatur sowie unter  $T = -20^{\circ}\text{C}$  durchgeführt.

Zusätzlich wurde für das Blech sowie für das Schmiedematerial (Rundstab) die chemische Zusammensetzung bestimmt.

### 5.3 Prüfverfahren

- Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1: 2009 B20 A4
- Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN 10045

### 5.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der chemischen Analyse sind zusammenfassend in **Tabelle 2**, die Ergebnisse der Zugversuche in **Tabelle 3** und die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche für den Rundstab, den geschmiedeten Spatenbereich sowie für das Blech zusammenfassend in **Tabelle 4 bis 6** dargestellt. Die Werte des Schmiedestahls aus dem von der BAW erhaltenen Abnahmeprüfzeugnis sind hier zum Vergleich ebenfalls mit eingetragen. Ein Abnahmezeugnis für den Blechwerkstoff wurde dem LBF nicht übermittelt.

### 5.5 Allgemeine Angaben zur Dokumentation des Gefüges des geschmiedeten Spatens

Anfertigung eines Makroschliffs:

Beginn der Prüfung:  
August 2010

Abschluss der Prüfung:  
November 2010

### 5.6 Prüfobjekt und Probenahme

An der Probe Nr. 2 wurde für den geschmiedeten Spatenbereich zudem ein Makroschliff zur ergänzenden Validierung des Materials entnommen. Der Makroschliff war quer zur Stabachse und mit einem Mindestabstand von 50 mm zur Schweißnaht zu entnehmen. Die genaue Entnahmeposition ist in **Bild 6** dokumentiert.

### 5.7 Prüfverfahren

Die metallografische Untersuchung ist nicht Gegenstand der Akkreditierung.

### 5.8 Ergebnisse

Nach dem Ätzen nach Oberhoffer lässt sich der Faserverlauf des geschmiedeten Spatenbereichs im Makroschliff, **Bild 7**, darstellen. Im Kernbereich sind deutlich mehr Seigerungen gegenüber dem Randbereich zu erkennen.

## 6 Ermüdungsfestigkeitsversuche

### 6.1 Allgemeine Angaben

Schwingfestigkeitsversuche unter Einstufenbelastung:

Beginn der Prüfung:  
Oktober 2010

Abschluss der Prüfung:  
Dezember 2010

### 6.2 Prüfobjekt

Die Probenform der angelieferten Proben ist in **Bild 1** dargestellt. Die Prüfkörper wurden im Maßstab 1 : 1 aus dem Stahl S355 J2 nach vorgegebener Geometrie und nach Schablone (geschmiedeter Spaten, Kerbgruppe 140) seitens BAW hergestellt. Als Stabdurchmesser wurde 82 mm gewählt. Das Hängeranschlussblech ist mit einer Stumpfnah an den Spaten geschweißt und blecheben in Lastrichtung verschliffen (Kerbgruppe 112).

### 6.3 Prüfverfahren

Die Versuchsdurchführung erfolgt nach der Verfahrensbeschreibung VB 101 „Wöhler- und Zufalllastenversuche an Proben“.

### 6.4 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Schwingfestigkeitsversuche wurden in einem servohydraulischen Prüfstand mit einer Nennlast von 2500 kN unter Axialbelastung mit einem Lastverhältnis von  $R_f = 0,1$  durchgeführt. Die Belastungsfrequenz betrug 5 Hz. Die Belastungsvorgabe erfolgte mit einer amplitudenadaptiven Regelung.

Die Proben wurden über eine hydraulische Spannvorrichtung mit der Belastungseinheit verbunden. Der Versuchsaufbau ist in **Bild 8** dokumentiert.

Das Versagenskriterium war definiert als „Bruch“ bzw. deutlich sichtbarer Riss. Die Schadenserkenkung erfolgte automatisiert über die Versuchseinrichtung

(Wegüberschreitung bzw. Steifigkeitsabfall). Aufgetretene Risse im Schweißnahtbereich zwischen geschmiedetem Spaten und Blech (**Bild 9**) wurden, sofern möglich, durch Reparaturschweißung beseitigt und der Versuch fortgesetzt.

## 6.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche sind in **Tabelle 7** zusammengestellt und in **Bild 10** im Wöhlerdiagramm dargestellt. Die Neigung der Wöhlerlinie wurde mittels linearer Regressionsrechnung bestimmt und beträgt  $k_{50\%} = 4,9$ . Das Streumaß der Versuchsergebnisse beträgt im Bereich der Zeitfestigkeit  $T_{\sigma} = 1 : 1,19$ . Die ertragbare Spannungsschwingbreite ist auf den Nennquerschnitt des Rundstabes mit einem Durchmesser von 82 mm bezogen und wurde für  $2 \cdot 10^6$  Schwingspiele und einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50% ermittelt zu  $\Delta\sigma_{50\%} = 193$  MPa.

Als schwingbruchkritische Bereiche der Schmiedehänger erweist sich der Rundstab, speziell der Übergang zum geschmiedeten Spatenbereich, sowie die Schweißnaht des am Spaten angeschweißten Blechs. Es wurde nur ein Versagen im geschmiedeten Spatenbereich erhalten. Für die Auswertung der Ergebnisse wurden auch die Proben, die im Einspannbereich (Rundstab) bzw. in der Schweißnaht gebrochen sind, als regulärer gebrochene Proben bewertet, obwohl das Versagen im Spaten erst zu einem späteren Zeitpunkt später erfolgt wäre.

Typische Schäden sind zusätzlich zu den Rissen im Schweißnahtbereich auf den **Bildern 11** und **12** dokumentiert.

## 7 Einordnung der Ergebnisse in eine Kerbfallgruppe

Ergänzend zur Durchführung der Schwingfestigkeitsversuche ist der untersuchte Anschluss als Kerbdetail nach DIN EN 1993-1-9 einzustufen. Die Bemessungswöhlerlinien gelten hiernach für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_0 = 95\%$  bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von  $C = 75\%$ . Die erhaltene Wöhlerlinie für die Versuchsergebnisse ist daher unter Berücksichtigung der Vorgaben auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95% bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von  $C = 75\%$  umzurechnen.

Unter Berücksichtigung einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 75% reduziert sich die ermittelte ertragbare Spannungsschwingbreite für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_0 = 50\%$  von  $\Delta\sigma = 193$  MPa auf  $\Delta\sigma = 191$  MPa, **Bilder 13 und 14**.

Zur Berechnung der ertragbaren Spannungsschwingbreite für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95% ist das Streumaß der Ergebnisse maßgebend. Nach Vorgabe der Eurocode sowie der IIW-Richtlinie ist für die weitere Berechnung das Streumaß der Stichprobe anzusetzen. Aus den Ergebnissen der Stichprobe ergibt sich ein Streumaß von  $T_\sigma = 1 : 1,19$  und für die weitere Auswertung wurde aus diesem Grund ein Streumaß von  $T_\sigma = 1 : 1,2$  angenommen, **Bild 13**. Für ein Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$ , mit dem die Versuche durchgeführt wurden, ergibt sich somit eine ertragbare Spannungsschwingbreite für  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen von  $\Delta\sigma (P_0 = 95\%, R = 0,1) = 170$  MPa.

Als Spannungsverhältnis für die Bemessungswöhlerlinien des Eurocode 3 [ 1 ] wurde  $R = 0$  unterstellt; eine eindeutige Angabe hierzu ist im Eurocode 3 nicht gegeben. Bei diesem Lastverhältnis sind hohe Eigenspannungen in den Strukturen bereits berücksichtigt. Liegen keine oder nur geringe Eigenspannungen in den Strukturen vor, z. B. durch Spannungsarmglühen, so wird dies nur für Spannungsverhältnisse von  $R < 0$  berücksichtigt [ 1, 3 ]. Für die hier untersuchten Proben ist somit die Kerbfallklasse 160 nach Eurocode 3 bestätigt.

In der IIW-Richtlinie [ 2 ] gelten die FAT-Klassen für ein Spannungsverhältnis von  $R = 0,5$  (Annahme hoher Zugeigenspannungen). Bei vorliegenden hohen Zugeigenspannungen wäre die hier ermittelte Spannungsschwingbreite von 170 MPa ( $R = 0,1$ ) somit mit einem Faktor von 1,16 auf  $\Delta\sigma (P_0 = 95\%, R = 0,5) = 147$  MPa zu reduzieren. Nach der IIW-Richtlinie wäre somit eine FAT-Klasse von 140 bestätigt.

Bei Bauteilen, bei denen keine oder nur sehr geringe Eigenspannungen vorliegen, kann die zulässige Schwingbreite nach der IIW-Richtlinie für ein Spannungsverhältnis von  $R = 0$  mit einem Korrekturfaktor von  $f_E = 1,2$  angehoben werden. Unter diesen Umständen wäre auch bei Anwendung der IIW-Richtlinie für Bauteile mit geringen Eigenspannungen die zulässige Spannungsschwingbreite für ein Spannungsverhältnis von  $R = 0$  mit derjenigen des Eurocode 3 vergleichbar.

Auch bei einem angenommenen größeren Streumaß von z. B.  $T_\sigma = 1 : 1,3$  wäre für den Eurocode die Kerbfallklasse 160 noch bestätigt, **Bild 14**. Für die IIW-Richtlinie könnte jedoch für dieses Streumaß nur eine FAT-Klasse von 125 bestätigt werden.

## 8 Schrifttum

- [ 1 ] DIN EN 1993-1-9:  
EUROCODE 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –  
Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9: 2005 + AC: 2009  
Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [ 2 ] Hobbacher, A.:  
Fatigue design of welded joints and components,  
Recommendations of IIW, Joint Working Group XIII-XV,  
XIII-1539-96/XV-845-96,  
The International Institute of Welding, Abington Publishing
- [ 3 ] Haibach, E.:  
Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung,  
3., korrigierte und ergänzte Auflage, Springer Verlag, 2006

| Probe Nr. | ØD<br>in mm | Breite B <sub>G</sub><br>in mm | Breite B <sub>1</sub> <sup>1)</sup><br>in mm | Länge L <sub>G</sub><br>in mm | Länge L <sub>1</sub> <sup>2)</sup><br>in mm | Länge L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub><br>in mm | Höhe H <sub>s</sub> <sup>3)</sup> R<br>in mm | Höhe H <sub>s</sub> <sup>3)</sup> L<br>in mm |
|-----------|-------------|--------------------------------|--|-------------------------------|---|---|--|--|
| 1         | 82,27/82,41 | 401,0                          | 391,0  | 1203                          | 333,8                                       | 771,0   | 19,80  | 19,79  |
| 2         | 82,04/81,52 | 399,4                          | 396,8  | 1200                          | 336,6                                       | 771,7   | 19,40  | 19,40  |
| 3         | 82,34/82,17 | 399,8                          | 390,8  | 1203                          | 344,5                                       | 783,5   | 19,65  | 19,45  |
| 4         | 82,11/82,00 | 400,2                          | 388,0  | 1201                          | 346,2                                       | 778,0   | 19,45  | 19,45  |
| 5         | 82,25/82,24 | 400,7                          | 396,9  | 1202                          | 345,2                                       | 781,0   | 19,30  | 19,50  |
| 6         | 82,30/82,29 | 400,6                          | 394,9  | 1200                          | 343,1                                       | 770,3   | 19,63  | 19,40  |
| 7         | 82,17/81,82 | 399,8                          | 394,5  | 1197                          | 334,0                                       | 765,7   | 19,00  | 19,30  |
| 8         | 82,28/82,18 | 400,7                          | 389,6  | 1203                          | 347,8                                       | 786,0   | 19,11  | 19,51  |
| 9         | 82,20/82,25 | 399,6                          | 389,2  | 1203                          | 345,5                                       | 746,6   | 19,05  | 19,17  |
| 10        | 82,22/82,62 | 400,7                          | 395,1  | 1203                          | 346,0                                       | 783,5   | 19,38  | 19,03  |
| 11        | 81,90/82,05 | 400,6                          | 398,3  | 1202                          | 338,4                                       | 801,0   | 19,45  | 19,58  |
| 12        | 81,94/82,16 | 399,6                          | 397,6  | 1204                          | 336,5                                       | 782,7   | 19,65  | 19,70  |
| 13        | 82,11/82,00 | 400,6                          | 397,4  | 1202                          | 344,6                                       | 765,4   | 19,37  | 19,60  |
| 14        | 82,26/82,20 | 400,1                          | 397,4  | 1205                          | 344,8                                       | 776,7   | 19,55  | 19,50  |
| 15        | 82,20/82,43 | 399,6                          | 388,9  | 1200                          | 341,1                                       | 751,0   | 19,40  | 19,35  |
| 16        | 82,35/82,30 | 399,5                          | 398,4  | 1199                          | 337,8                                       | 784,2   | 19,33  | 19,35  |
| 17        | 82,28/82,25 | 399,3                          | 393,6  | 1201                          | 340,8                                       | 792,0   | 19,27  | 19,22  |
| 18        | 82,17/82,21 | 399,7                          | 399,2  | 1204                          | 341,7                                       | 782,4   | 19,65  | 19,55  |
| 19        | 82,06/82,33 | 399,5                          | 393,9  | 1203                          | 341,9                                       | 773,0   | 19,18  | 19,22  |
| 20        | 82,32/82,29 | 400,2                          | 396,1  | 1202                          | 341,6                                       | 776,3   | 19,47  | 19,44  |
| 21        | 82,58/82,17 | 399,3                          | 388,5  | 1199                          | 345,1                                       | 777,9   | 19,38  | 19,48  |

<sup>1)</sup>: Breite B<sub>1</sub> bei Position L<sub>1</sub>    <sup>2)</sup>: Länge L<sub>1</sub> definiert bei Anstieg der Dicke (H>H<sub>s</sub>)    <sup>3)</sup>: Höhe H<sub>s</sub> bei (L<sub>1</sub> - 20)mm, R: rechts, L: links

**Tabelle 1:** Abmessungen der Probekörper

| <b>Chemische Analyse „Rundstab“</b> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |    |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|----|
| Bezeichnung                         | C     | Si    | Mn    | P     | S     | Cr    | Ni    | Mo    | Cu    | Sn    | N     | Al    | Nb    | Ti     | V     | B  |
|                                     | in %  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | ppm    |       |    |
| 719263*                             | 0,166 | 0,242 | 1,430 | 0,014 | 0,017 | 0,060 | 0,031 | 0,009 | 0,023 | 0,001 | 0,010 | 0,024 | 0,029 | 0,001  | --    | -- |
| Probe 2                             | 0,15  | 0,24  | 1,43  | 0,012 | 0,013 | 0,055 | 0,024 | 0,007 | 0,020 | --    | --    | 0,022 | 0,029 | <0,001 | 0,006 | <5 |

| <b>Chemische Analyse „Blech“</b> |      |      |      |       |       |       |       |        |       |    |    |       |        |        |       |    |
|----------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|----|----|-------|--------|--------|-------|----|
| Bezeichnung                      | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr    | Ni    | Mo     | Cu    | Sn | N  | Al    | Nb     | Ti     | V     | B  |
|                                  | in % |      |      |       |       |       |       |        |       |    |    |       |        | ppm    |       |    |
| Probe 2                          | 0,15 | 0,26 | 1,52 | 0,012 | 0,006 | 0,035 | 0,028 | <0,005 | 0,014 | -- | -- | 0,034 | <0,001 | <0,001 | 0,005 | <5 |

\*: Werte des Abnahmezeugnisses

**Tabelle 2:** Chemische Analyse für Rundstab und Blech

### Mechanische Kennwerte Schmiedehänger Nr. 2

| Bezeichnung   |     | 719263*  | Probe 1 | Probe 2 | Probe 1 | Probe 2 | Probe 1 | Probe 2 |
|---|-----|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|   |     | Rundstab |         |         | Spaten  |         | Blech   |         |
| R <sub>p0,2</sub> bzw. <sup>H</sup> R <sub>eH</sub> | MPa | 417*     | 381     | 359     | 361*    | 377*    | 354     | 352     |
| R <sub>m</sub>                                      | MPa | 574      | 504     | 528     | 502     | 497     | 528     | 526     |
| A   | %   | 28,0     | 26,0    | 30,9    | 34,0    | 34,1    | 30,5    | 26,8    |
| Z   | %   | --       | 75      | 76      | 74      | 75      | 67      | 73      |

\*: Werte des Abnahmezeugnisses

**Tabelle 3:** Mechanische Kennwerte für Rundstab, Spatenbereich und Blech

### Kerbschlagbiegung „Rundstab“

| Bezeichnung | Probenform | Prüftemperatur | Kerbschlagarbeit |     |     |
|-------------|------------|----------------|------------------|-----|-----|
|             |            |                | J                |     |     |
| 719263*     | KCV        | RT             | --               | --  | --  |
| Mittelwert  |            |                | --               |     |     |
| 719263*     | KCV        | -20°C          | 142              | 130 | 139 |
| Mittelwert  |            |                | 137              |     |     |
| Probe 2     | Charpy-V   | RT             | 209              | 226 | 208 |
| Mittelwert  |            |                | 214              |     |     |
| Probe 2     | Charpy-V   | -20°C          | 220              | 225 | 275 |
| Mittelwert  |            |                | 240              |     |     |

\*: Werte des Abnahmezeugnisses

**Tabelle 4:** Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche für den Rundstab

| <b>Kerbschlagbiegung „Blech“</b> |            |                |                  |     |     |
|----------------------------------|------------|----------------|------------------|-----|-----|
| Bezeichnung                      | Probenform | Prüftemperatur | Kerbschlagarbeit |     |     |
|                                  |            |                | J                |     |     |
| 719263*                          | KCV        | RT             | --               | --  | --  |
| Mittelwert                       |            |                | --               |     |     |
| 719263*                          | KCV        | -20°C          | --               | --  | --  |
| Mittelwert                       |            |                | --               |     |     |
| Probe 2                          | Charpy-V   | RT             | 156              | 149 | 161 |
| Mittelwert                       |            |                | 155              |     |     |
| Probe 2                          | Charpy-V   | -20°C          | 101              | 83  | 94  |
| Mittelwert                       |            |                | 93               |     |     |

\*: Werte des Abnahmezeugnisses

**Tabelle 5:** Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche für das Blech

| <b>Kerbschlagbiegung „Spaten“</b> |            |                |                  |     |     |
|-----------------------------------|------------|----------------|------------------|-----|-----|
| Bezeichnung                       | Probenform | Prüftemperatur | Kerbschlagarbeit |     |     |
|                                   |            |                | J                |     |     |
| Probenlage                        |            |                | 1                | 2   | 3   |
| Schmiedehänger 2                  | Charpy-V   | RT             | 205              | 178 | 173 |
| Mittelwert                        |            |                | 185              |     |     |
| Probenlage                        |            |                | 4                | 5   | 6   |
| Schmiedehänger 2                  | Charpy-V   | -20°C          | 142              | 195 | 158 |
| Mittelwert                        |            |                | 165              |     |     |

**Tabelle 6:** Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche für den Spaten

**Hängeranschlüsse für Stabbogenbrücken**  
**Werkstoff: S 355 J2**

**Vorgaben für die Schwingfestigkeitsversuche:**

Frequenz  $f = 5 \text{ s}^{-1}$ , Grenzschwingspielzahl  $N_G = 2 \cdot 10^6$

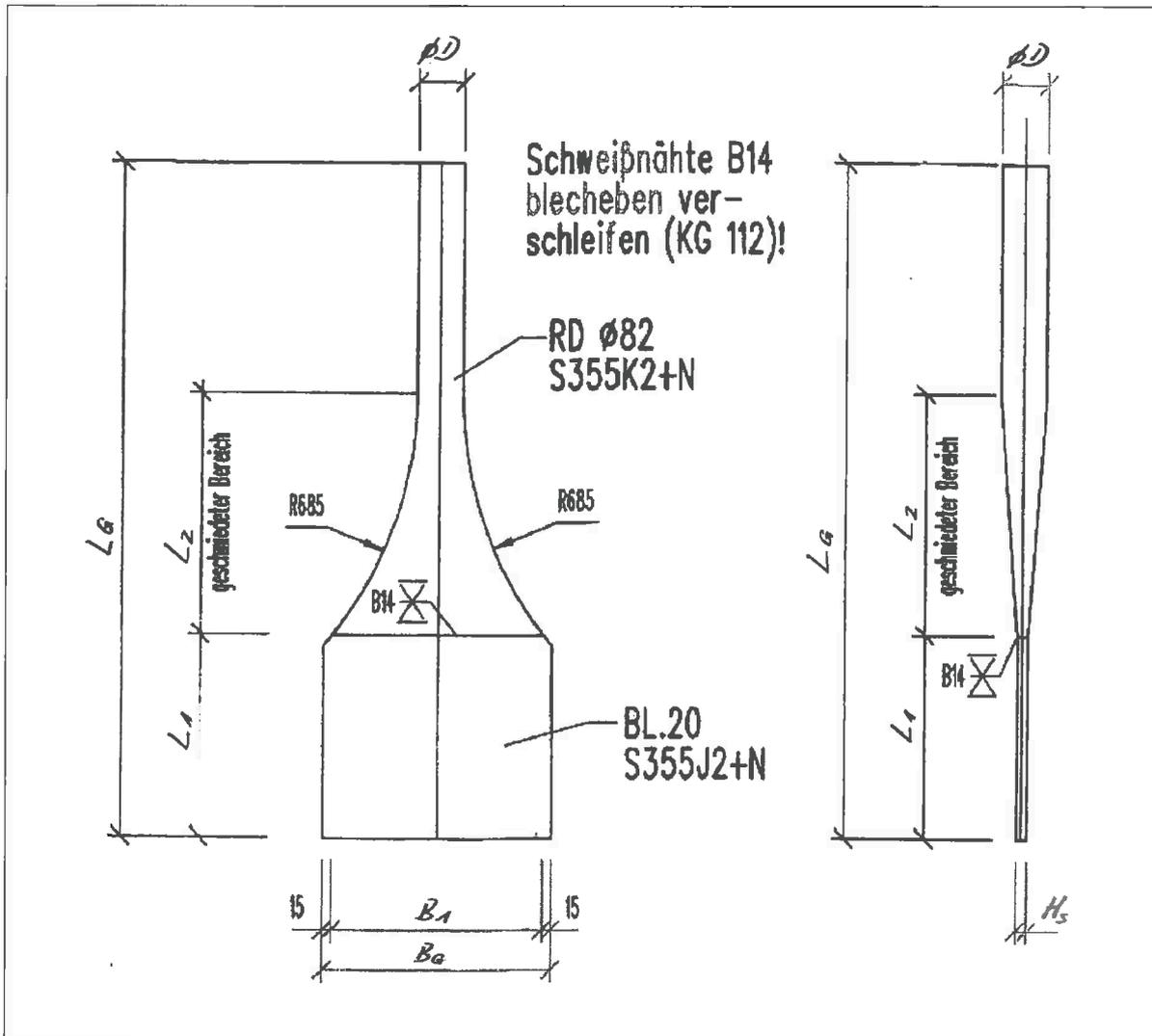
| Versuch Nr. | Proben-Nr. | Last-amplitude $F_a$ in kN | max. Last $F_o$ in kN | min. Last $F_u$ in kN | Last-verhältnis R | Schwingspiele N | Bruchlage/Anmerkungen  |
|-------------|------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|------------------------|
| 1           | 1          | 511,5                      | 1136,7                | 113,7                 | 0,1               | 2 000 000       | ohne Versagen          |
| 1a          | 1          | 750,0                      | 1666,7                | 166,7                 | 0,1               | 41 790          | Einspannbruch          |
| 2           | 6          | 750,0                      | 1666,7                | 166,7                 | 0,1               | 225 640         | Rundstab <sup>1)</sup> |
| 3           | 9          | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1               | 1 018 280       | Rundstab <sup>1)</sup> |
| 4           | 5          | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1               | 784 310         | Einspannbruch          |
| 5           | 7          | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1               | 1 365 090       | Einspannbruch          |
| 6           | 15         | 750,0                      | 1666,7                | 166,7                 | 0,1               | 305 110         | Schweißnaht            |
| 7           | 16         | 750,0                      | 1666,7                | 166,7                 | 0,1               | 295 080         | Schweißnaht            |
| 8           | 20         | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1               | 364 960         | Rundstab <sup>2)</sup> |
| 9           | 21         | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1               | 971 880         | Schweißnaht            |
| 10          | 14         | 607,0                      | 1348,9                | 134,9                 | 0,1               | 925 920         | Spaten                 |

<sup>1)</sup>: Übergang zum angestauchten Bereich

<sup>2)</sup>: freie Schaftlänge

**Tabelle 7:** Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche

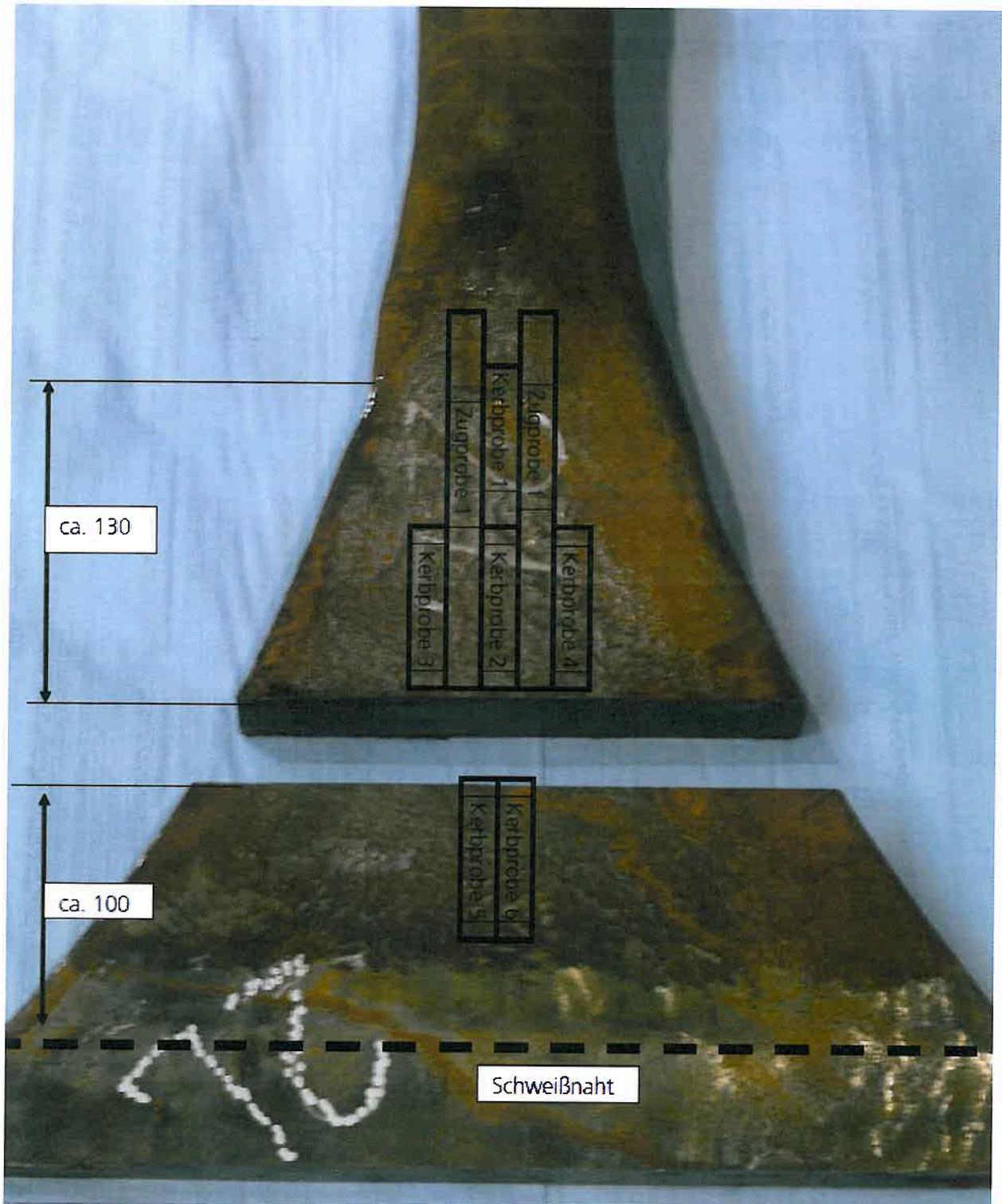




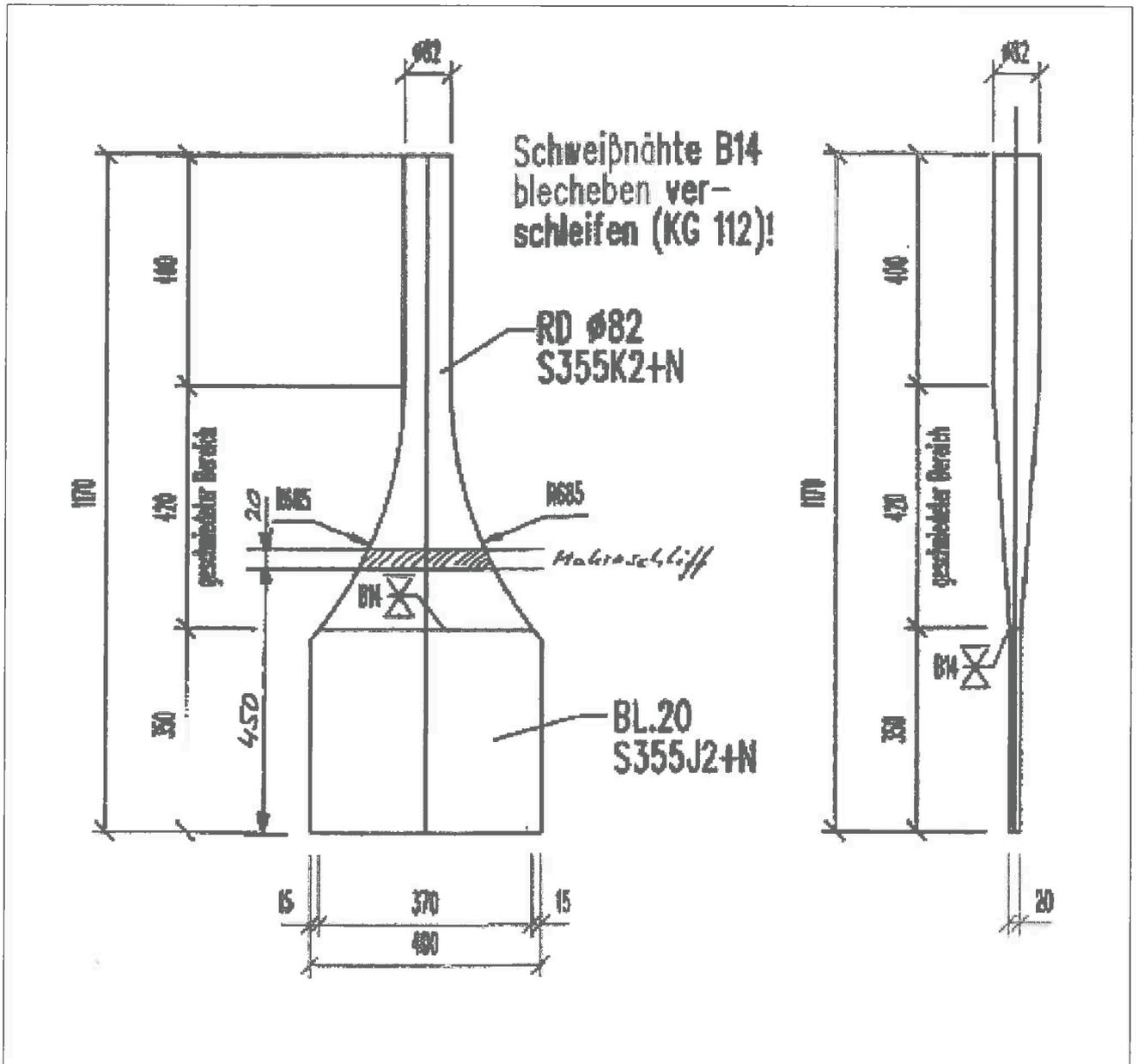
**Bild 2:** Dokumentierte Probenabmessungen





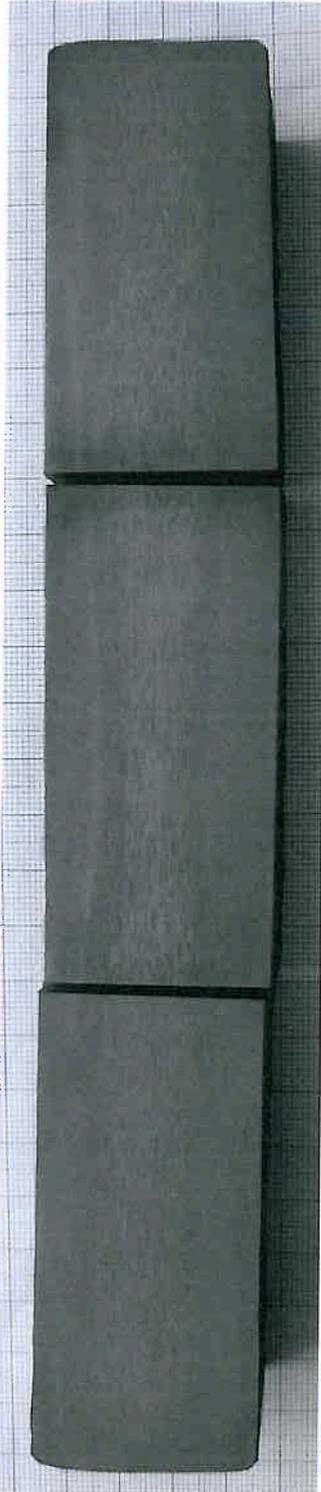


**Bild 5:** Probenlage „Spaten“

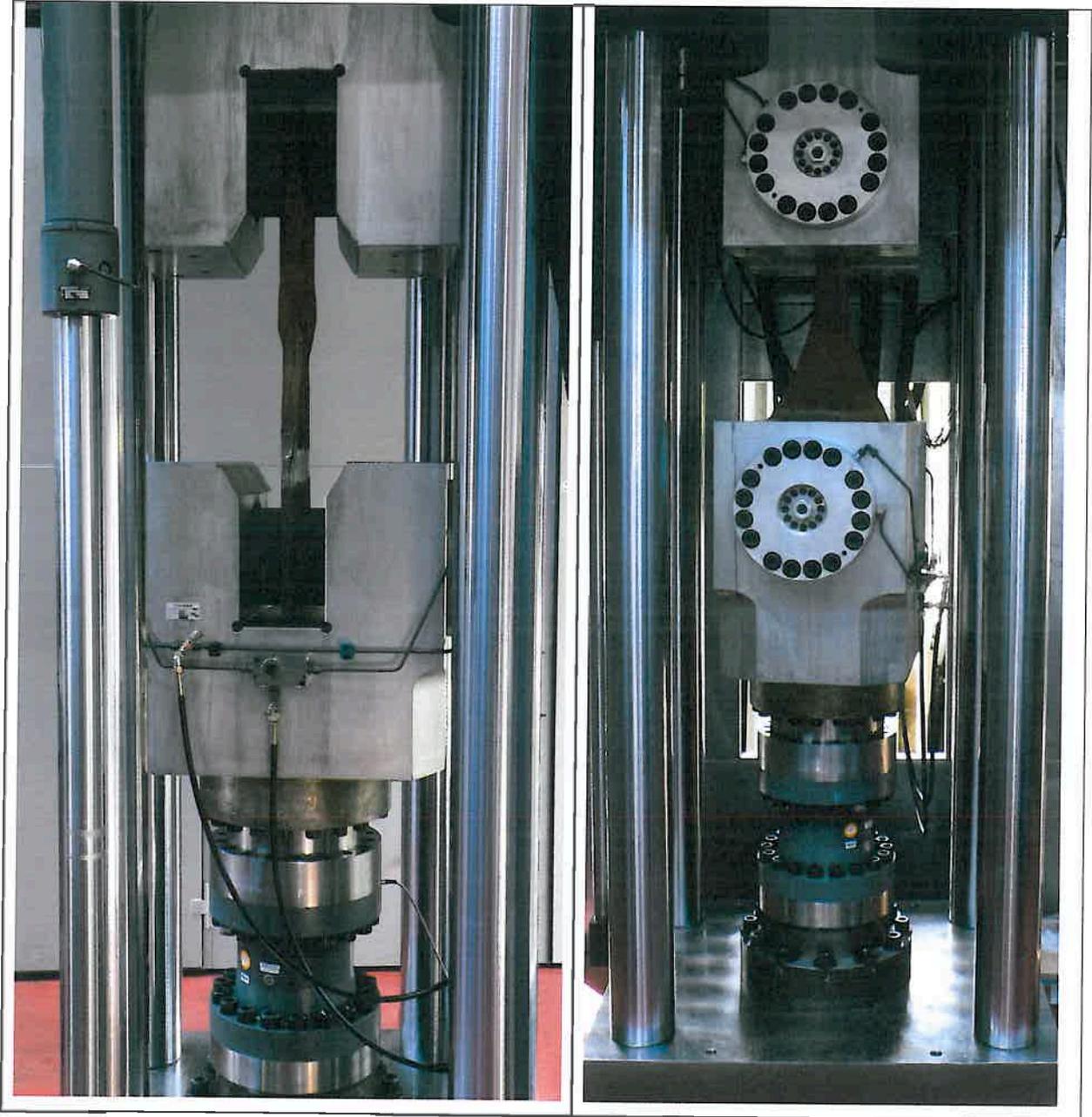


**Bild 6:** Makroschliff

Schmiedehänger, geschmiedeter Bereich:



**Bild 7:** Makroschliff



**Bild 8:** Versuchseinrichtung



**Versuch Nr. 7,  
Schmiedehänger 16:**

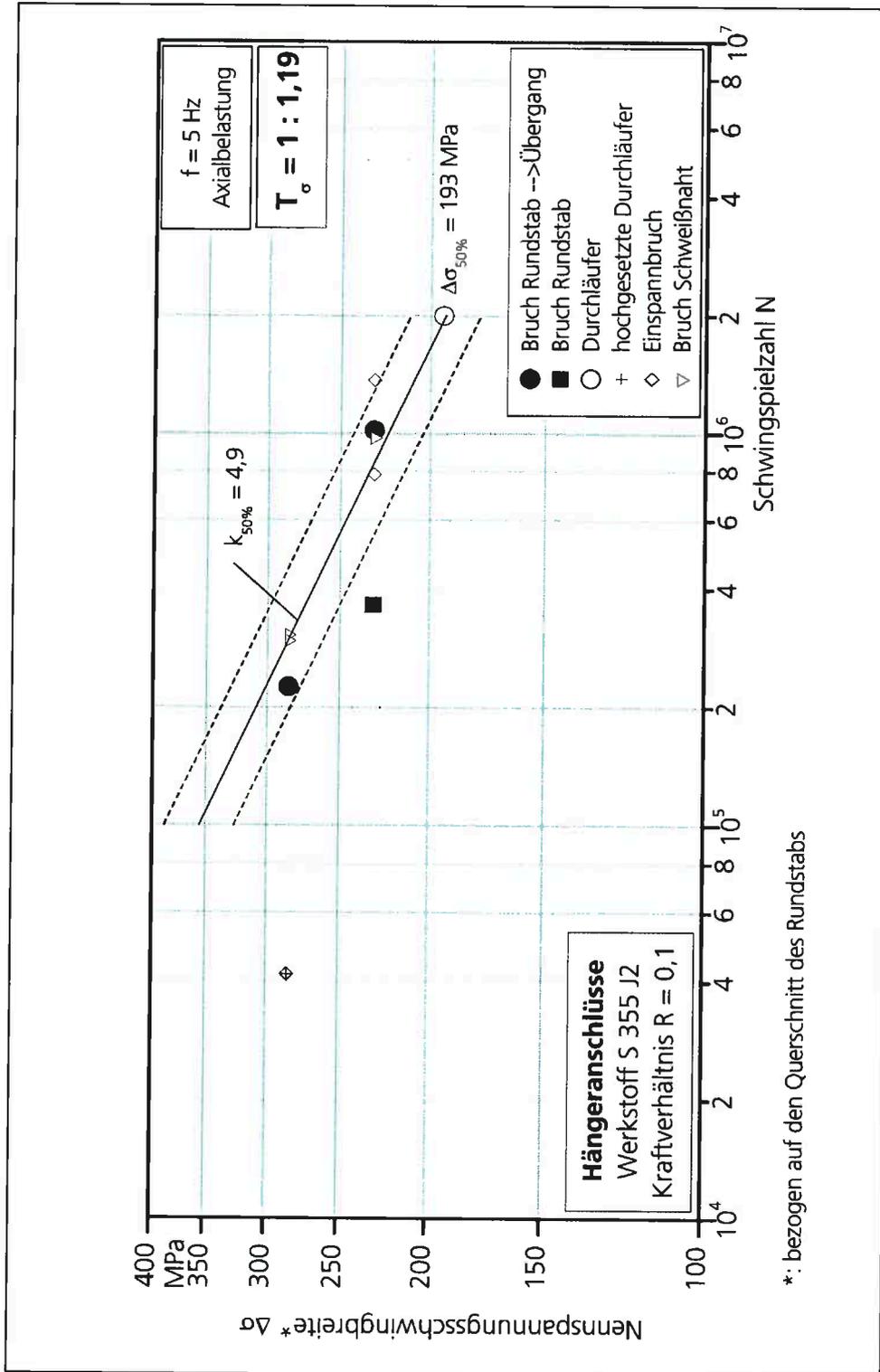
$\Delta F = 1500 \text{ kN}$ ,  $R_f = 0,1$   
 $N_B = 295\ 080$  Schwingspiele,  
Bruch Schweißnaht

Dargestellter Bruch nach  
 $N = 252\ 070$  Schwingspielen.  
Probe wurde anschließend  
reparaturgeschweißt und  
der Versuch fortgesetzt.



**Detailansicht**

**Bild 9:** Typische Risslage an der Schweißnaht zum Anschlussblech



**Bild 10:** Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche



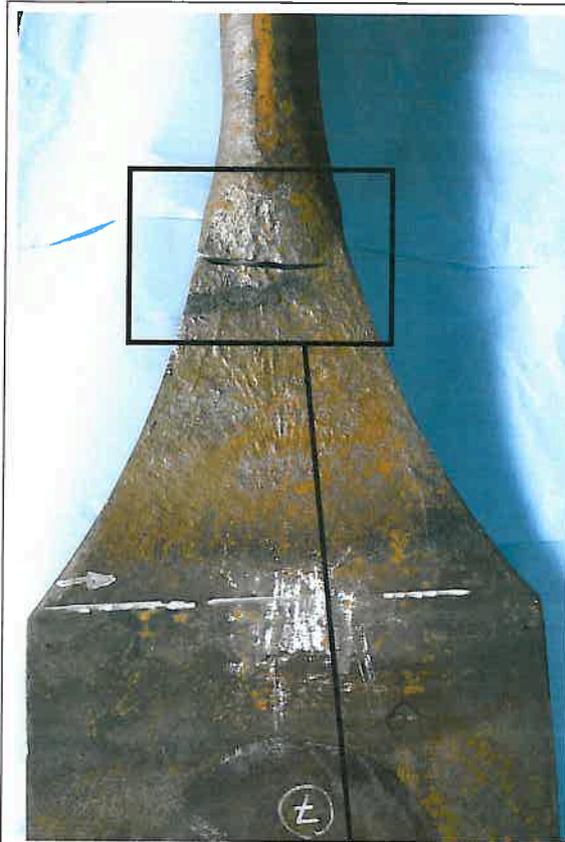
**Versuch Nr. 8,  
Schmiedehänger 20:**

$\Delta F = 1214 \text{ kN}$ ,  $R_F = 0,1$   
 $N_B = 364\,960$  Schwingspiele,  
Bruch Rundstab



**Detailansicht**

**Bild 11:** Risslage im Rundstab



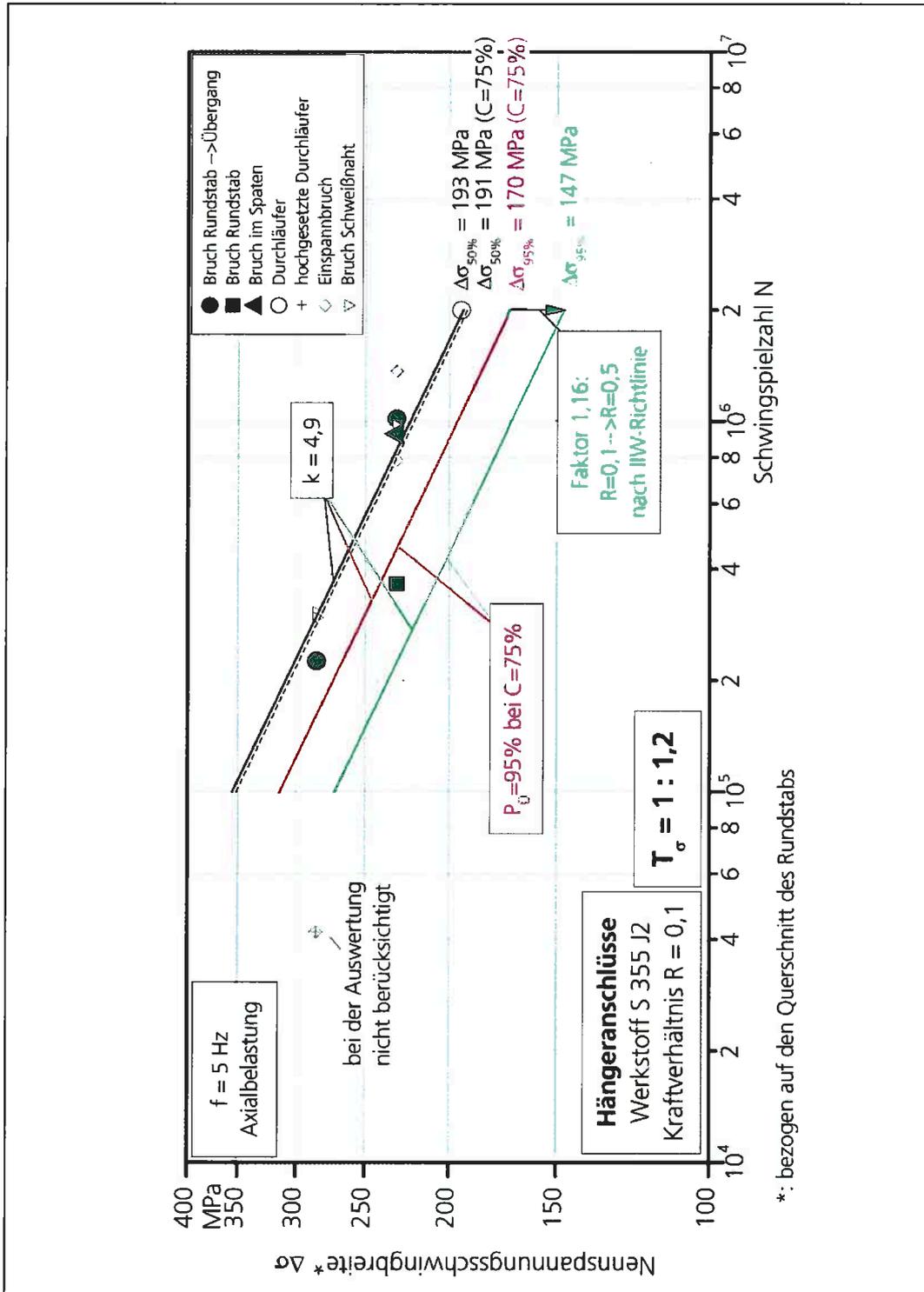
**Versuch Nr. 10,  
Schmiedehänger 14:**

$\Delta F = 1214 \text{ kN}$ ,  $R_F = 0,1$   
 $N_B = 925\ 920$  Schwingspiele,  
Bruch Spaten

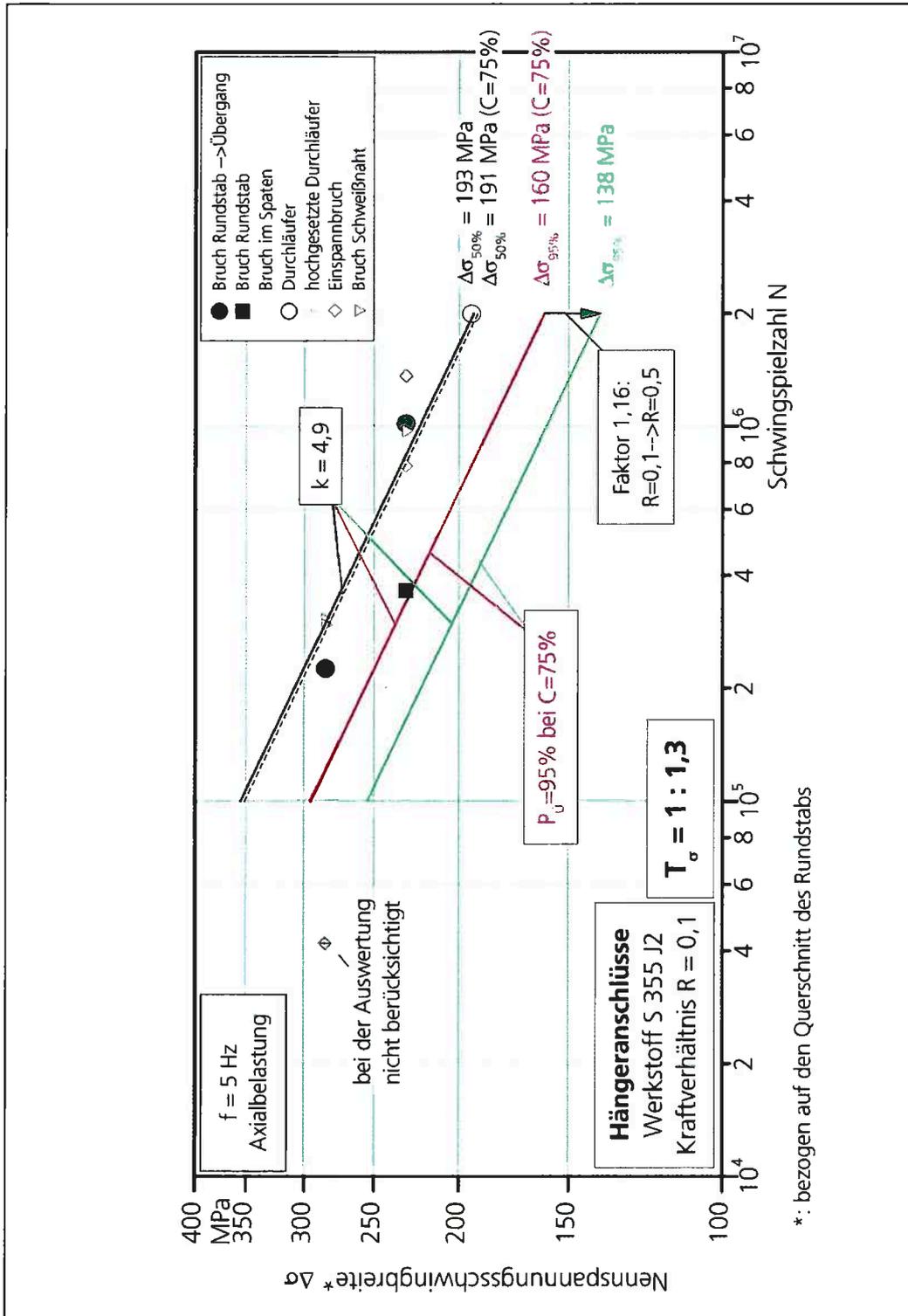


**Detailansicht**

**Bild 12:** Risslage im Spaten



**Bild 13:** Ableitung einer Bemessungswöhlerlinie für ein Streumaß von  $T_\sigma = 1 : 1,2$



**Bild 14:** Ableitung einer Bemessungswöhlerlinie für ein Streumaß von  $T_\sigma = 1 : 1,3$