

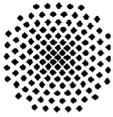
# Versuchsbericht

## Experimentelle Untersuchungen zur ermüdungssteigernden Wirkung des PIT-Verfahrens

**Auftraggeber:** PITEC GmbH  
Wolfgrubenstraße 7  
88525 Heudorf

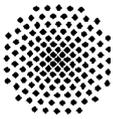
**Datum des Berichts:** 21.10.2009

**Umfang des Berichts:** 39 Seiten und 7 Anlagen (114 Seiten insgesamt)



## Inhalt

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Anlass und Ziel der Versuche .....</b>                         | <b>4</b>  |
| <b>2. Pneumatic Impact Treatment (PIT) .....</b>                     | <b>5</b>  |
| 2.1. Technologie und Wirkungsweise .....                             | 5         |
| 2.2. Ausrüstung, Geräte und Bedienung.....                           | 6         |
| <b>3. Versuchsprogramm .....</b>                                     | <b>7</b>  |
| 3.1. Überblick .....   | 7         |
| 3.2. Bezeichnungssystematik .....                                    | 7         |
| <b>4. Versuchskörper .....</b>                                       | <b>8</b>  |
| 4.1. Wahl und geometrische Abmessungen der Versuchskörper .....      | 8         |
| 4.2. Werkstoffe .....  | 9         |
| 4.3. Herstellung der Versuchskörper .....                            | 11        |
| 4.3.1. Schweißen .....   | 11        |
| 4.3.2. Ausarbeitung der Versuchskörper.....                          | 12        |
| 4.3.3. Durchführung der Nachbehandlung und Behandlungsparameter..... | 12        |
| <b>5. Schwingversuche.....</b>                                       | <b>14</b> |
| 5.1. Anlass und Konzept .....  | 14        |
| 5.2. Versuchsvorbereitungen.....                                     | 14        |
| 5.2.1. Geometrieaufnahme .....                                       | 14        |
| 5.2.2. Dehnungsmessstreifen (DMS) .....                              | 15        |
| 5.3. Versuchseinrichtung.....  | 15        |
| 5.4. Versuchsdurchführung .....                                      | 16        |
| 5.5. Versuchsergebnisse.....   | 17        |
| 5.5.1. Allgemein.....  | 17        |
| 5.5.2. Rissentstehung und Versagen .....                             | 18        |
| 5.6. Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse .....            | 19        |
| 5.7. Versuchsergebnisse Kreuzstoß, Werkstoff S355J2 .....            | 20        |
| 5.8. Versuchsergebnisse Kreuzstoß, Werkstoff S690QL .....            | 22        |
| 5.9. Versuchsergebnisse Stumpfstoß, Werkstoff S355J2 .....           | 24        |
| 5.10. Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse .....             | 25        |
| <b>6. Untersuchungen zum Randschichtzustand .....</b>                | <b>27</b> |
| 6.1. Untersuchungsgegenstand.....                                    | 27        |
| 6.2. Eigenspannungsmessungen .....                                   | 27        |
| 6.2.1. Allgemein.....  | 27        |
| 6.2.2. Untersuchungsgegenstand .....                                 | 27        |



|  |           |
|--|-----------|
| 6.2.3. Messverfahren und Messpunkte .....            | 27        |
| 6.2.4. Messergebnisse.....                           | 28        |
| 6.3. Geometrievermessung der Eindringtiefe.....      | 30        |
| 6.3.1. Allgemein.....                                | 30        |
| 6.3.2. Messverfahren und Messumfang.....             | 30        |
| 6.3.3. Messergebnisse.....                           | 31        |
| 6.4. Härtemessungen und Gefügebildaufnahmen .....    | 31        |
| 6.4.1. Allgemein und Untersuchungsgegenstand.....    | 31        |
| 6.4.2. Versuchskörper S-AW-355-10 .....              | 31        |
| 6.4.3. Versuchskörper S-PIT-355-10 .....             | 33        |
| 6.4.4. Versuchskörper K-PIT-690-10 .....             | 34        |
| <b>7. Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....</b> | <b>36</b> |
| 7.1. Allgemeines.....                                | 36        |
| 7.2. Schwingversuche .....                           | 36        |
| 7.3. Randschichtveränderungen.....                   | 36        |
| 7.4. Schlussbemerkung.....                           | 37        |
| <b>8. Literatur .....</b>                            | <b>38</b> |
| <b>9. Übersicht Anlagen .....</b>                    | <b>39</b> |



## 1. Anlass und Ziel der Versuche

Eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen gewinnt in vielen Bereichen des Stahl-, Maschinen- und Anlagenbaus zunehmend an Bedeutung. Eine Möglichkeit die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Stahlkonstruktionen zu erhöhen besteht in der Anwendung von modernen Schweißnahtnachbehandlungsverfahren. Hierzu haben sich in jüngster Vergangenheit praxisfreundliche und effektive Verfahren, die unter dem Begriff „höherfrequentes Hämmern“ zusammengefasst werden, entwickelt.

Beim höherfrequenten Hämmern handelt es sich um ein Nachbehandlungsverfahren, bei dem gehärtete Stahlstifte mit einer Frequenz von  $\geq 80$  Hz auf die zu behandelnde Metalloberfläche treffen. Die damit einhergehende plastische Verformung der Oberfläche führt zur Entstehung von Druckeigenspannungen, die als wesentliche Ursache für die Verlängerung der Lebensdauer insbesondere bei Schweißverbindungen anzusehen sind [1].

Beim PIT-Verfahren (Pneumatic Impact Treatment) handelt es sich um ein höherfrequentes Hämmerverfahren zur Nachbehandlung von Schweißnähten mit dem vorrangigen Ziel der Erhöhung der Schwingfestigkeit, vgl. [2]. Im Vergleich zu bestehenden Verfahren, wie z.B. der UIT-Technologie [3], handelt es sich bei dem PIT-Verfahren um eine Neuentwicklung, bei der das Hämmern durch einen pneumatischen Antrieb erfolgt.

Ziel der nachfolgend dokumentierten Versuche ist die experimentelle Untersuchung der Wirkungsweise des PIT-Verfahrens sowie ein Vergleich der Ergebnisse mit dem bereits existierenden UIT-Verfahren. Hierzu wurden im Einzelnen nachfolgende Untersuchungen durchgeführt:

1. Schwingversuche an zwei unterschiedlichen Werkstoffen und zwei unterschiedlichen Kerbdetails zur experimentellen Quantifizierung der ermüdungssteigernden Wirkung der PIT-Behandlung.
2. Untersuchungen der durch die PIT-Behandlung verursachten Randschichtveränderung in Form von Eigenspannungsmessungen, Geometrievermessungen, Härtemessungen und Gefügebilder.



Abbildung 1. Schweißnahtnachbehandlung durch Anwendung des PIT-Verfahrens



## 2. Pneumatic Impact Treatment (PIT)

### 2.1. Technologie und Wirkungsweise

Bei der PIT-Technologie handelt es sich um ein höherfrequentes Hämmerverfahren, das primär zur Ertüchtigung von Schweißnähten entwickelt wurde.

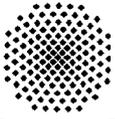
Die mechanischen Impulse werden durch gehärtete Bolzen, die in der Geometrie für die jeweilige Anwendung angepasst sind, auf eine zu behandelnde Oberfläche übertragen.

Die Erzeugung der mechanischen Impulse erfolgt durch einen so genannten fluidischen Muskel (Fluidic Muscle), vgl. Abbildung 2, der Firma FESTO AG & Co. KG in 76726 Esslingen. Hierbei handelt es sich um einen neuartigen und patentierten pneumatischer Antrieb, der bei der PIT-Technologie zur Anwendung kommt. Wird der fluidische Muskel mit Luft befüllt, vergrößert sich dieser im Durchmesser und wird in der Länge kontrahiert. Dadurch wird eine fließend-elastische Bewegung ermöglicht, die sich in Kinematik, Geschwindigkeit und Kraft sehr präzise steuern lässt. Der Antrieb arbeitet insgesamt sehr zuverlässig und verschleißarm. Bei der PIT-Technologie kann dadurch sowohl die Frequenz als auch die Schlagkraft unabhängig voneinander geregelt werden. Dadurch ist es möglich, den verschiedenen Anforderungen der unterschiedlichen Materialien gerecht zu werden.



Abbildung 2. Fluidischer Muskel der Firma Festo, Quelle: [www.festo.com](http://www.festo.com)

Um die Vibrationen durch das höherfrequente Hämmern für den Bediener möglichst gering zu halten, arbeitet das System gegen ein weiteres Federsystem, so dass das Handgerät von der Schlagkraft vollkommen entkoppelt ist. Durch das Federsystem wird gleichzeitig sichergestellt, dass die Anpresskraft des Systems immer gleich groß ist und somit eine gute Reproduzierbarkeit auch durch unterschiedliche Bediener gegeben ist.



## 2.2. Ausrüstung, Geräte und Bedienung

Abbildung 3 zeigt die Ausrüstung bei einer PIT-Behandlung bestehend aus den drei Komponenten:

1. Steuergerät
2. Handgerät
3. Bolzen-Sortiment für unterschiedliche Anwendungen



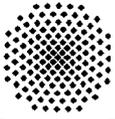
Abbildung 3. PIT-Ausrüstung: Steuergerät, Handgerät und Bolzen-Sortiment

Die Hämmerfrequenz kann am Steuergerät durch 4 Stufen im Bereich von 80–120 Hz eingestellt werden. Durch die parallel mögliche Regulierung des Luftdrucks im Bereich von 3-8 bar für die gewählte Frequenz kann die Schlagkraft stufenlos eingestellt werden. Der Luftverbrauch liegt im Bereich von ca. 150–170 l/min. Durch eine Abführung der Abluft nach vorne zum Bolzen erfolgt eine automatische Kühlung.

Ein separates Steuergerät mit einer SPS-Steuerung ermöglicht eine Eingabe der Behandlungsparameter für die verschiedenen Werkstoffe und Schweißnahtarten über ein Touchscreen-Display. Dadurch ist es möglich, die Behandlungsdaten über einen längeren Zeitraum aufzuzeichnen.

Bei den Hämmerbolzen handelt es sich um gehärtete Stahlstifte mit einem Durchmesser von 8 mm und einer in Abhängigkeit der Behandlungssituation unterschiedlichen Kontur der Bolzenspitze, vgl. Abbildung 3 (rechts). Die derzeit in der Anwendung befindlichen Geräte arbeiten mit nur einem Bolzen. Eine Weiterentwicklung von Geräten mit 2 Bolzen ist im Gange.

Die typische Behandlungs- bzw. Vorschubgeschwindigkeit für die Anwendung bei Stahlwerkstoffen liegt im Bereich von ca. 20 - 30 cm/min.



### 3. Versuchsprogramm

#### 3.1. Überblick

Die Untersuchung der ermüdungssteigernden Wirkung sowie der Änderung der Randschicht Eigenschaften durch die PIT-Behandlung erfolgte an:

- zwei unterschiedlichen Werkstoffen (Baustahl S355J2 und S690QL) sowie an jeweils
- zwei unterschiedlichen Nahtverbindungen bzw. Konstruktionsdetails (Stumpfnah und Kreuzstoß).

In ermüdungstechnischer Hinsicht symbolisiert die Kreuzstoßverbindung hierbei das Konstruktionsdetail einer aufgeschweißten Quersteife, d.h. die Beanspruchung erfolgt an dem durchgehenden Blech, Abbildung 6.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über das gewählte Versuchsprogramm. Insgesamt besteht das Versuchsprogramm aus 10 Versuchskörpern je Serie, d.h. aus insgesamt 80 Versuchskörpern.

Tabelle 1: Übersicht Versuchskörper

| Werkstoff | Stumpfstoßverbindung         |               | Kreuzstoßverbindung          |               |
|-----------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
|           | Schweißzustand (unbehandelt) | PIT-behandelt | Schweißzustand (unbehandelt) | PIT-behandelt |
| S355J2    | X                            | X             | X                            | X             |
| S690QL    | *)                           | *)            | X                            | X             |

\*) aufgrund der Versuchsergebnisse an den Stumpfstoßverbindungen des Werkstoffs S355J2 wurden diese Untersuchungen zurückgestellt

#### 3.2. Bezeichnungssystematik

Für die einzelnen Versuchskörper wurde nachfolgende, in Abbildung 4 dargestellte Bezeichnungssystematik gewählt.

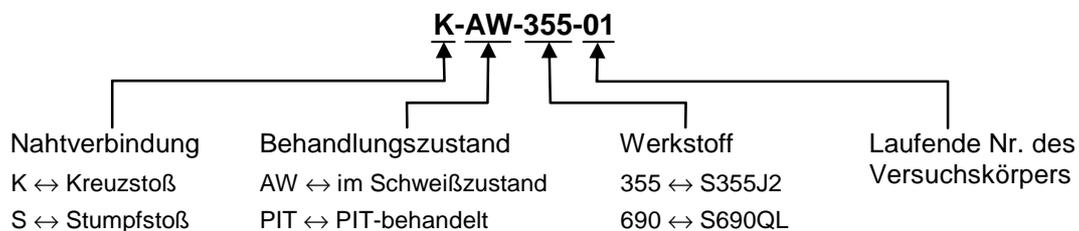
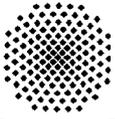


Abbildung 4. Bezeichnungssystematik Versuchskörper



## 4. Versuchskörper

### 4.1. Wahl und geometrische Abmessungen der Versuchskörper

Die Wahl der Versuchskörper als auch deren geometrische Abmessungen erfolgte aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Wesentlichen in Anlehnung an bestehende experimentelle Untersuchungen zu höherfrequenten Hämmerverfahren dokumentiert in [1] und [4].

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die Abmessungen der Stumpf- und Kreuzstoßverbindung. Als Nahtart wurde beim Stumpfstoß eine DV-Naht und beim Kreuzstoß eine einlagige Kehlnaht verwendet. Die Blechdicke aller Versuchskörper betrug  $t = 12$  mm.

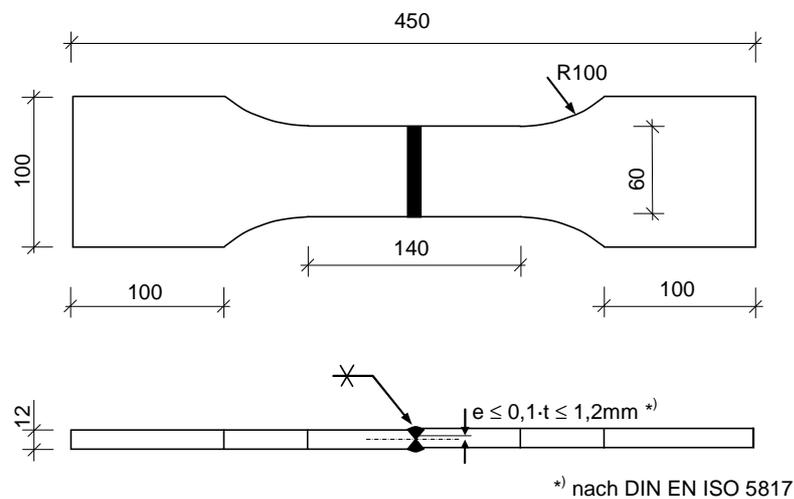


Abbildung 5: Stumpfstoß, Versuchskörper und Abmessungen

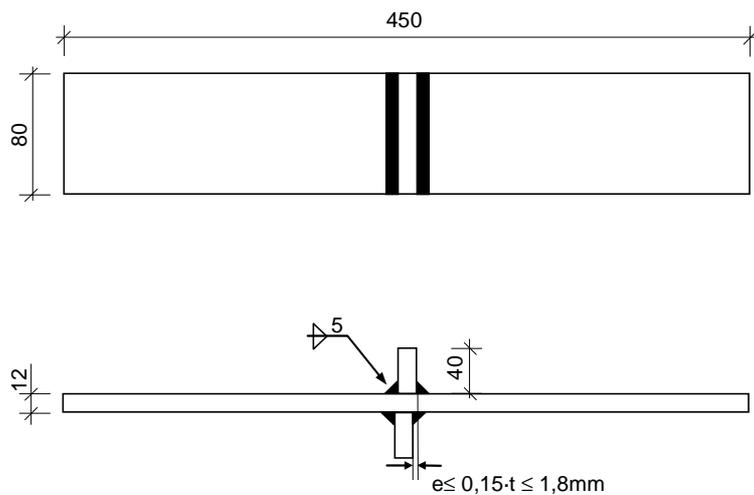
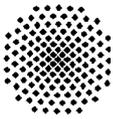


Abbildung 6: Kreuzstoß, Versuchskörper und Abmessungen



## 4.2. Werkstoffe

Für die Herstellung der Versuchskörper kamen als Werkstoffe die Stahlsorten S355J2 und S690QL jeweils in der Blechdicke  $t = 12$  mm zum Einsatz. Beim S355J2 handelt es sich gemäß DIN EN 10025-2:2005 um einen unlegierten Baustahl mit einer Mindeststreckgrenze von  $355 \text{ N/mm}^2$ . Beim Werkstoff S690QL handelt es sich gemäß DIN EN 10025-6:2005 um einen wasservergüteten höherfesten Baustahl mit einer Mindeststreckgrenze von  $690 \text{ N/mm}^2$ .

In Tabelle 2 bis 4 sind für beide Werkstoffe die chemischen Zusammensetzungen und die mechanischen Kennwerte aus dem Zugversuch und den Kerbschlagbiegeuntersuchungen zusammengefasst. Alle Kennwerte sind durch ein Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach DIN EN 10204:2004 belegt und konnten im Rahmen ergänzender Werkstoffuntersuchungen, dokumentiert in Anlage 1, im Wesentlichen bestätigt werden. Die Werkstoffe zeigen sowohl hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung als auch den mechanischen Kennwerten keine besonderen Auffälligkeiten. Die Anforderungen der Liefornormen sind eingehalten.

Abbildung 7 zeigt zwei Mikroschliffe des Grundwerkstoffs S355J2. Es handelt sich um ein typisches zeitlig aufgebautes ferritisch-perlitisches Gefüge.

Abbildung 8 zeigt Mikroschliffe des Grundwerkstoffs S690QL und ein für wasservergütete höherfeste Stähle typisches Vergütungsgefüge aus Zwischenstufe.

Tabelle 2. Chemische Zusammensetzung des Versuchswerkstoffs S355J2,  $t = 12$  mm

|                              | Chemische Zusammensetzung in % der Masse |         |         |        |        |                        |        |         |         |         |         |        |         |         |        |
|------------------------------|--|---------|---------|--------|--------|------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
|                              | C max.                                   | Si max. | Mn max. | P max. | S max. | Al <sub>ges</sub> max. | N max. | Cu max. | Mo max. | Ni max. | Cr max. | V max. | Nb max. | Ti max. | B max. |
| Schmelzanalyse DIN 10025-2   | 0,23                                     | 0,60    | 1,70    | 0,035  | 0,035  | ---                    | ---    | 0,55    | ---     | ---     | ---     | ---    | ---     | ---     | ---    |
| Schmelzanalyse gemäß Zeugnis | 0,139                                    | 0,504   | 1,56    | 0,017  | ,0014  | 0,045                  | ---    | 0,30    | ---     | ---     | ---     | ---    | ---     | ---     | ---    |
| Stückanalyse gemäß Anlage 1  | 0,15                                     | 0,34    | 1,46    | 0,013  | 0,002  | 0,026                  | 0,002  | 0,02    | 0,01    | 0,01    | 0,02    | <,001  | 0,020   | 0,013   | <,0001 |

CEV =  $C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15 = 0,40 < 0,45$  (mit den Werten der Stückanalyse)

Tabelle 3. Chemische Zusammensetzung des Versuchswerkstoffs S690QL,  $t = 12$  mm

|                              | Chemische Zusammensetzung in % der Masse |         |         |        |        |         |        |        |         |         |         |         |         |         |        |         |  |
|------------------------------|--|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|--|
|                              | C max.                                   | Si max. | Mn max. | P max. | S max. | Al max. | N max. | B max. | Cr max. | Cu max. | Mo max. | Nb max. | Ni max. | Ti max. | V max. | Zr max. |  |
| Schmelzanalyse DIN 10025-6   | 0,20                                     | 0,80    | 1,70    | 0,025  | 0,015  | ---     | 0,015  | 0,005  | 1,50    | 0,50    | 0,70    | 0,06    | 2,0     | 0,05    | 0,12   | 0,15    |  |
| Schmelzanalyse gemäß Zeugnis | 0,17                                     | 0,31    | 0,81    | 0,008  | 0,001  | ,037    | ---    | ,0015  | 0,28    | ,009    | 0,21    | 0,002   | 0,05    | ,022    | 0,007  | ---     |  |
| Stückanalyse gemäß Anlage 1  | 0,14                                     | 0,30    | 0,86    | 0,010  | 0,002  | ,048    | 0,007  | ,0024  | 0,64    | 0,16    | 0,42    | <,001   | 0,72    | ,002    | 0,050  | 0,001   |  |

CEV =  $C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15 = 0,56 < 0,65$  (mit den Werten der Stückanalyse)



Tabelle 4. Mechanische Kennwerte des Versuchswerkstoffes S355J2, t = 12 mm

|                                | Streckgrenze<br>$R_{eH}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Zugfestigkeit<br>$R_m$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Bruchdehnung<br>A5<br>[%] | Kerbschlagzähigkeit<br>KV bei T = -20°C<br>[J] |
|--------------------------------|--|--|---------------------------|--|
| Mindestwerte<br>DIN EN 10025-2 | 355  | 470 - 630                                      | 22                        | 27   |
| Angaben gemäß<br>Zeugnis       | 422  | 557  | 35                        | 178 - 197 - 188                                |
| Angaben gemäß<br>Anlage 1      | 441  | 585  | 29                        | 55 - 173 - 166                                 |

Tabelle 5. Mechanische Kennwerte des Versuchswerkstoffes S690QL, t = 12 mm

|                                | Streckgrenze<br>$R_{eH}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Zugfestigkeit<br>$R_m$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Bruchdehnung<br>A5<br>[%] | Kerbschlagzähigkeit<br>KV<br>[J]         |
|--------------------------------|--|--|---------------------------|--|
| Mindestwerte<br>DIN EN 10025-6 | 690  | 770 - 940                                      | 14                        | 40 J bei T = -20°C<br>30 J bei T = -40°C |
| Angaben gemäß<br>Zeugnis       | 781  | 827  | 17                        | 157 - 163 - 162<br>bei T = -40°C         |
| Angaben gemäß<br>Anlage 1      | 830  | 888  | 20                        | 202 - 201 - 197<br>bei T = -20°C         |

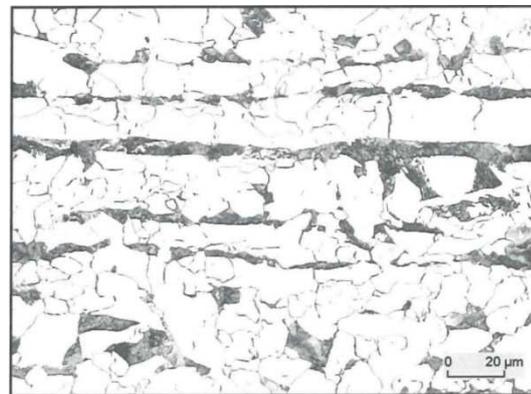
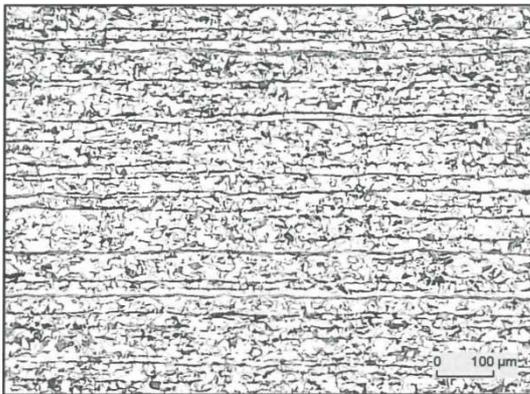


Abbildung 7. Mikroschliffe Grundwerkstoff S355J2

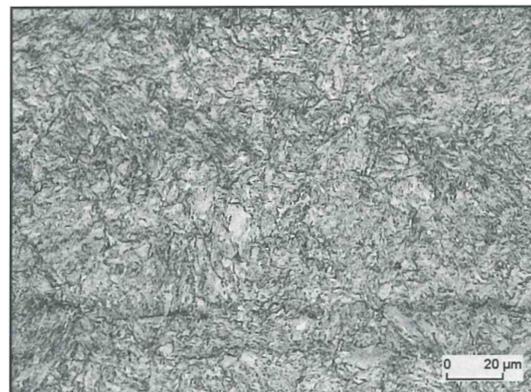
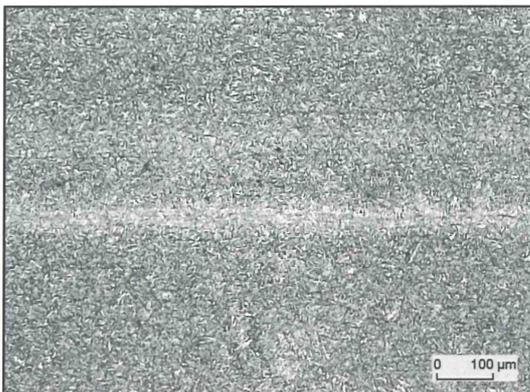
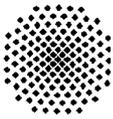


Abbildung 8. Mikroschliffe Grundwerkstoff S690QL



### 4.3. Herstellung der Versuchskörper

#### 4.3.1. Schweißen

Das Schweißen der Versuchskörper erfolgte durch das STZ Fügetechnik an Metallen und Kunststoffen im Labor für Schweißtechnik an der FH Ulm durch einen vollmechanisierten MAG-Prozess.

Die Festlegung der Schweißprozessparameter erfolgte in Anlehnung an SEW 088:1993 bzw. DIN EN 1011-2:2001.

In Tabelle 6 sind beispielhaft die Schweißprozessparameter für die Stumpfstoßverbindungen aus dem Werkstoff S690QL in Anlehnung an eine WPS zusammengefasst. Die Prozessparameter für alle weiteren Schweißverbindungen sind vollständig in Anlage 2 dokumentiert.

Nach Abschluss der Schweißarbeiten erfolgte eine Sichtprüfung zur Beurteilung der Schweißnahtunregelmäßigkeiten in Anlehnung an DIN EN ISO 5817:2006. Hierbei konnten keine Beanstandungen festgestellt werden.

Tabelle 6. Informationen zum Schweißen der Stumpfstoße aus S690QL

| Einzelheiten zur Schweißverbindung           |            |                                   |                 |                           |                          |                       |                                |                         |
|--|------------|-----------------------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Schweißverbindung:                           |            | PIT-Proben                        |                 |                           | Grundwerkstoff:          |                       | S690QL                         |                         |
| Ort / Datum:                                 |            | Ulm / Dezember 2008               |                 |                           | Werkstückdicke:          |                       | 12mm                           |                         |
| Hersteller:                                  |            | Labor für Schweißtechnik, FH Ulm  |                 |                           | Nahtart:                 |                       | Stumpfnah, DV-Naht             |                         |
| Schweißprozess:                              |            | MAG 135                           |                 |                           | Schweißposition:         |                       | PA                             |                         |
| Gestaltung der Verbindung / Schweißfolge     |            |                                   |                 |                           |                          |                       |                                |                         |
|  |            |                                   |                 |                           |                          |                       |                                |                         |
|  |            |                                   |                 |                           |                          |                       |                                |                         |
|  |            |                                   |                 | * HWR = Hauptwalzrichtung |                          |                       |                                |                         |
| Einzelheiten für das Schweißen               |            |                                   |                 |                           |                          |                       |                                |                         |
| Schweißnaht                                  | Prozess    | Drahtdurchmesser [mm]             | Stromstärke [A] | Spannung [V]              | Stromart Polung          | Drahtvorschub [m/min] | Schweißgeschwindigkeit [m/min] | Streckenenergie [kJ/mm] |
| 1  | 135 Impuls | 1,0                               | 212             | 30                        | DC / +                   | 11,0                  | 0,42                           | 0,91                    |
| 2  |            |                                   | 250             | 32                        |                          |                       |                                | 1,14                    |
| Einzelheiten zum Zusatzwerkstoff/Hilfsstoffe |            |                                   |                 |                           |                          |                       |                                |                         |
| Schweißzusatz:                               |            | DIN EN 12534                      |                 |                           | Vorwärmtemperatur:       |                       | --                             |                         |
| Hersteller- und Bez.:                        |            | G 69 Mn3NiCrMo, Ø1,0mm, Fa. Fließ |                 |                           | Zwischenlagentemperatur: |                       | < 65°                          |                         |
| Schutzgas:                                   |            | DIN EN 439 – M21, Fa. Linde       |                 |                           | Brenneranstellung:       |                       | 0°lotrecht                     |                         |
| Durchflussmenge:                             |            | 14 l/min                          |                 |                           | Schweißwinkel:           |                       | 10°stechend                    |                         |

Zur Überprüfung der sachgerechten Ausführung der Schweißverbindungen wurden an den drei Versuchskörpern S-AW-355-10, S-PIT-355-10 und K-AW-690-10 ergänzende metallografische Untersuchungen vorgenommen. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Anlage 2 dokumentiert.

#### 4.3.2. Ausarbeitung der Versuchskörper

Nach dem Verschweißen der Bleche erfolgte eine mechanische Ausarbeitung der einzelnen Versuchskörper. Hierzu wurden die verschweißten Blechtafeln zunächst mittels eines Sägeschnitts geteilt und im Anschluss daran erfolgte dann ein mechanisches Fräsen der einzelnen Versuchskörper zur Erzielung der in Abbildung 5 bzw. Abbildung 6 dargestellten endgültigen Kontur. Das Sägen als auch das Fräsen erfolgte unter Kühlung, um thermische Werkstoffbeeinflussungen auszuschließen.

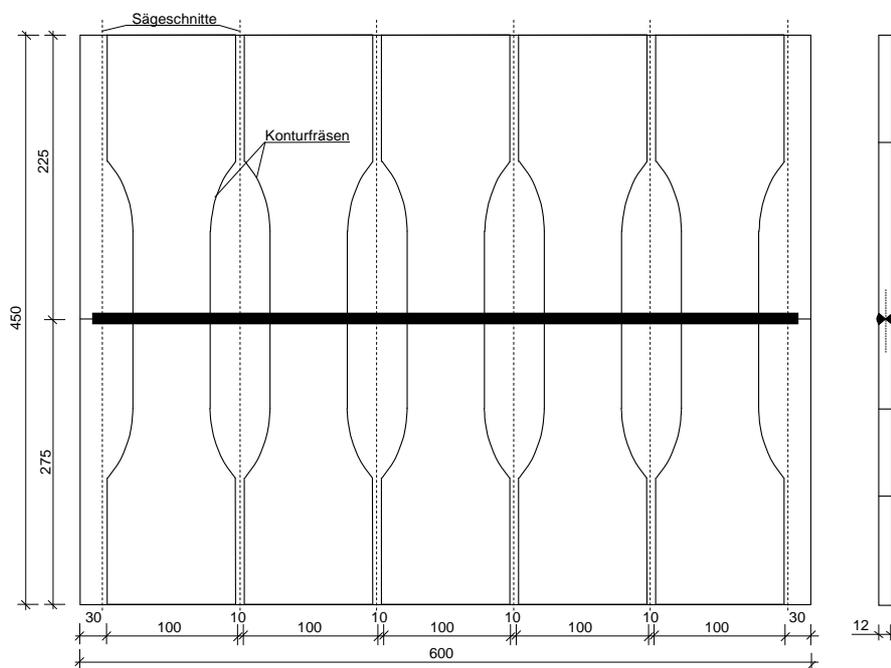


Abbildung 9. Ausarbeitung der einzelnen Versuchskörper am Beispiel der Stumpfstoße

#### 4.3.3. Durchführung der Nachbehandlung und Behandlungsparameter

Die Durchführung der Schweißnahtnachbehandlung unter Anwendung der PIT-Technologie erfolgte an den ausgearbeiteten Versuchskörpern beim Auftraggeber gemäß den PIT-Behandlungsberichten in Anlage 3 und unter Anwesenheit der Autoren. Die Nachbehandlung erfolgte stets an den ermüdungskritischen Stellen, d.h. an den Schweißnahtübergängen. Abbildung 10 zeigt beispielhaft die PIT-Behandlung der Kreuzproben. Die Qualität der Nachbehandlung wurde anhand der Kontur der Behandlungspur visuell überprüft. In Abbildung 11 ist exemplarisch der nachbehandelte Nahtübergang dargestellt. Ein Überschneiden der einzelnen Bolzeneindrücke zu einer nahezu gleichmäßigen Spur ist deutlich zu erkennen.

In Tabelle 7 sind die Behandlungsparameter im Detail zusammengefasst.

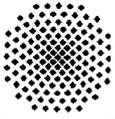


Abbildung 10. PIT-Behandlung des Kreuzstoßes

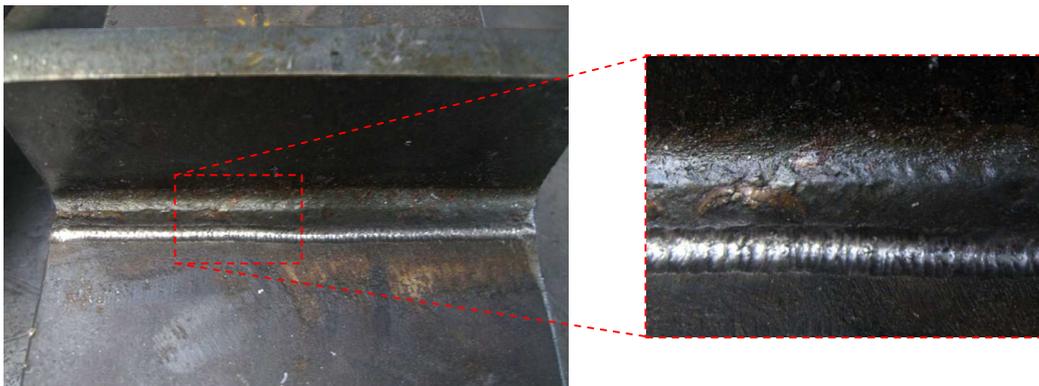


Abbildung 11. PIT-behandelter Nahtübergang am Kreuzstoß

Tabelle 7. Behandlungsparameter

|  |         |
|--|---------|
| Bolzendurchmesser, $d$ [mm]              | 8       |
| Bolzenlänge, $l$ [mm]                    | 80      |
| Bolzenradius im Kopfbereich $r$ [mm]     | 2       |
| Betriebsdruck, $p$ [bar]                 | 6       |
| Intensitätsstufe Gerät, [-]              | 2       |
| Hämmerfrequenz, $f$ [Hz]                 | 90      |
| Applikationswinkel, $\alpha$ [°]         | 50 – 70 |
| Behandlungsgeschwindigkeit, $v$ [cm/min] | 20 – 30 |



## 5. Schwingversuche

### 5.1. Anlass und Konzept

Die Schwingversuche dienen zur Quantifizierung der Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit der PIT-Behandlung durch Vergleich der Ermüdungsfestigkeit unbehandelter, d.h. im Schweißzustand belassener Proben mit PIT-behandelten Proben. Die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit erfolgte dabei durch klassische Dauerschwingversuche im Einstufenkollektiv zur Bestimmung von *Wöhlerlinien*. Hierzu wurde folgende Vorgehensweise festgelegt:

- insgesamt 9 Probekörper je *Wöhlerlinie* (1 Versuchskörper als Reserve)
- 3 - 4 unterschiedliche Spannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma$  á 2 - 3 Probekörper
- reine Zugbeanspruchung
- konstantes Spannungsverhältnis von  $R = +0,1$
- die Probekörper wurden bis zum Auftreten eines deutlich sichtbaren Risses bzw. Bruch belastet
- Schwingspielzahl im Bereich von  $5 \cdot 10^4$  -  $5 \cdot 10^6$ .

### 5.2. Versuchsvorbereitungen

#### 5.2.1. Geometrieaufnahme

Im Vorfeld der Versuche erfolgte eine detaillierte Aufnahme der geometrischen Abmessungen der einzelnen Versuchskörper.

Bei den Kreuzstoßverbindungen waren dies neben der Blechdicke  $t$  und der Probenbreite  $b$  die Schweißnahtdicke  $a$  sowie der Versatz  $e$  der gegenüberliegend angebrachten Steifen, vgl. Abbildung 12 links.

Bei den Stumpfstoßverbindungen wurden neben der Blechdicke  $t$  und der Probenbreite  $b$  zusätzlich die Nahtüberhöhungen  $\ddot{u}$ , der Versatz der Blechachsen  $e$  sowie die Winkelabweichung  $\alpha$  der Bleche aufgenommen, vgl. Abbildung 12 rechts.

Für die einzelnen Versuchskörper sind alle Daten in Anlage 4 - 6 dokumentiert.

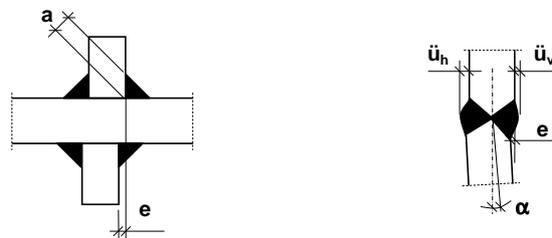


Abbildung 12. Geometriekenngrößen am Kreuzstoß und Stumpfstoß

### 5.2.2. Dehnmessstreifen (DMS)

Am Versuchskörper K-AW-690-07 wurden ergänzende Dehnmessungen durchgeführt, um

- den Dehnungs- bzw. Spannungszustand innerhalb der Probe zu überprüfen,
- nähere Aussagen über das Rissintieungsverhalten zu erhalten, sowie
- die Größe der Strukturspannung abzuschätzen.

Abbildung 13 zeigt hierfür die Positionierung der Dehnmessstreifen (DMS). Die Anordnung der DMS erfolgte in dem typ. Abstand von 0,4-t (4,8 mm) und 1,0-t (12 mm) vom Schweißnahtfußpunkt. Mit dem 30 mm vom Schweißnahtfußpunkt entfernt angeordneten Dehnmessstreifen erfolgte die Messung im ungestörten Bereich.

Als DMS kam der Typ FLA-2 der Firma Preusser Messtechnik mit einer Gitterlänge von 2 mm und einer Breite von 1,5 mm zum Einsatz.

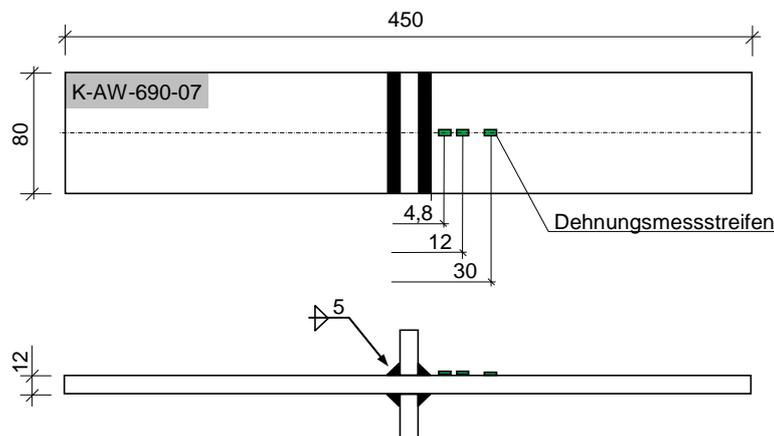


Abbildung 13. Position der Dehnmessstreifen (DMS) am Versuchskörper K-AW-690-07

### 5.3. Versuchseinrichtung

Die Schwingversuche wurden an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA)) in der Abteilung 21 „Baukonstruktionen und Bauteilprüfung“ durchgeführt. Die Versuche fanden im Zeitraum 19.01 – 23.06.2009 statt.

Die Durchführung der Versuche erfolgte auf einer servo-hydraulischen Universalprüfmaschine der Firma Schenck mit einer maximalen Prüfkraft von 1.000 kN.

Abbildung 14 zeigt den Versuchsaufbau mit einer eingebauten Kreuzprobe.

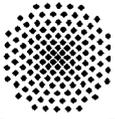


Abbildung 14. Versuchsaufbau und eingebauter Versuchskörper K-AW-690-01

#### 5.4. Versuchsdurchführung

Alle Versuche wurden zugschwellend mit einem konstanten Spannungsverhältnis von  $R \cong +0,1$  und konstanter Lastschwingbreite  $\Delta F$  beansprucht, wobei der Zeitverlauf der dynamischen Belastung eine Sinusform besaß, vgl. Abbildung 15.

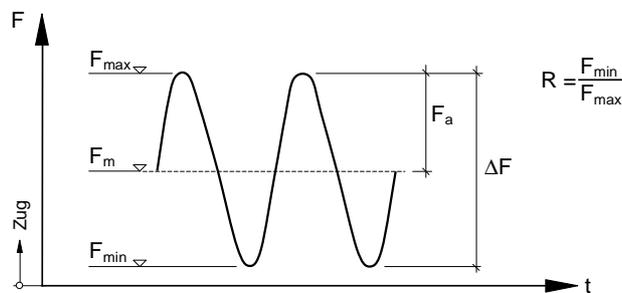
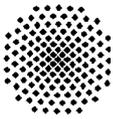


Abbildung 15. Last-Zeit-Verlauf der Beanspruchung inkl. Kenngrößen

Die erreichten Prüffrequenzen lagen in Abhängigkeit der Kraftschwingbreite  $\Delta F$  im Bereich von 5 - 11 Hz.

Die Versuche wurden ohne Unterbrechung bis zum Durchriss oder vollständigen Bruch gefahren. Dabei war die beobachtete Schwingspielzahl vom Durchriss bis zum vollständigen Bruch im Vergleich zur Gesamtschwingspielzahl vernachlässigbar gering.



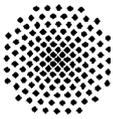
## 5.5. Versuchsergebnisse

### 5.5.1. Allgemein

Eine umfassende Zusammenstellung der Versuchsergebnisse kann Anlage 4 - 6 entnommen werden. Die Darstellung der Versuchsergebnisse ist hierbei für jeden einzelnen Versuchskörper durch ein entsprechendes Formblatt gegeben, in dem detaillierte Angaben zur Beanspruchung, zur Geometrie, dem Behandlungszustand und zur Rissentstehung dokumentiert sind. Abbildung 16 zeigt ein Beispiel für den Versuchskörper K-PIT-355-01.

|  |                                 |   |                                 |
|--|---------------------------------|---|---------------------------------|
| <b>Projekt</b>   | Schwingversuche, Fa. PITEC GmbH |   |                                 |
| <b>Wöhler-Serie</b>  | K-PIT-355                       | <b>Prüfdatum</b>  | 05.03.2009                      |
| <b>Probekörper-Nr.</b>   | 01                              | <b>Werkstoff</b>  | S355J2 nach DIN EN 10025-2:2005 |
| <b>Nachbehandlung</b>  | PIT-behandelt                   | <b>Blechdicke</b>   | 12mm                            |
| <b>Probekörperform und -abmessungen</b>                          |                                 | <b>Schweißnahtnachbehandlung</b>                          |                                 |
|  |                                 | gemäß Behandlungsbericht<br>Fa. PITEC GmbH vom 07.01.2009 |                                 |
|  |                                 | <b>Schweißprozess</b>                                     |                                 |
|  |                                 | MAG, 135<br>vollmechanisiert                              |                                 |
|  |                                 | <b>Querschnittsabmessungen</b>                            |                                 |
|  |                                 | t   | 11,80 [mm]                      |
|  |                                 | b   | 80,20 [mm]                      |
|  |                                 | a*  | 4,8 [mm]                        |
|  |                                 | e   | 0,5 [mm]                        |
|  |                                 | A = t · b   | 945,1 [mm <sup>2</sup> ]        |
|  |                                 | <b>Materialkennwerte</b>                                  |                                 |
|  |                                 | R <sub>eH</sub>   | 441 [N/mm <sup>2</sup> ]        |
|  |                                 | R <sub>m</sub>  | 585 [N/mm <sup>2</sup> ]        |
|  |                                 | <b>Belastung</b>  |                                 |
|  |                                 | sinusförmig, Einstufenkollektiv                           |                                 |
|  |                                 | F <sub>max</sub>  | 315,0 [kN]                      |
|  |                                 | F <sub>min</sub>  | 31,0 [kN]                       |
|  |                                 | F <sub>m</sub>  | 173,0 [kN]                      |
|  |                                 | ΔF  | 284,0 [kN]                      |
|  |                                 | R = F <sub>min</sub> /F <sub>max</sub>                    | 0,1 [-]                         |
|  |                                 | Frequenz  | 9,0 [Hz]                        |
| <b>Prüfmaschine</b> 1 MN, Fa. Schenck                            |                                 |   |                                 |
| <b>Prüftemperatur</b> T 20 [°C]                                  |                                 |   |                                 |
| <b>Spannungsschwingbreite</b> Δσ = ΔF/A 300 [N/mm <sup>2</sup> ] |                                 |   |                                 |
| <b>Schwingspiele bis Bruch</b> N 1.426.998 [-]                   |                                 |   |                                 |
| <b>Rissentstehung und Versagen</b>                               |                                 |   |                                 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Schweißnahtübergang          |                                 |   |                                 |
| <input type="checkbox"/> Grundmaterial                           |                                 |   |                                 |
| <input type="checkbox"/> Einspannstelle                          |                                 |   |                                 |
| <b>Bemerkungen</b>   |                                 |   |                                 |
| -----  |                                 |   |                                 |
| * Mittelwert der einzelnen Nähte                                 |                                 |   |                                 |

Abbildung 16. Beispiel der Dokumentation der Schwingversuche, Probe K-PIT-355-01



Die Ermittlung der Spannungsschwingbreite erfolgte als Nennspannung auf Grundlage der Kraftschwingbreite  $\Delta F$  und der vorhandenen Ist-Querschnittsfläche  $A$  des Bleches in unmittelbarer Nähe der Schweißnaht.

### 5.5.2. Rissentstehung und Versagen

Die Versuchskörper versagten üblicherweise und erwartungsgemäß am Schweißnahtübergang. Abbildung 17 und 18 zeigen hierzu zwei typische Beispiele der Bruchflächen am unbehandelten Versuchskörper K-AW-690-02 und am PIT-behandelten Versuchskörper K-PIT-355-06. Eine Veränderung von Bruchform und Bruchfläche durch die Nachbehandlung war nicht erkennbar.



Abbildung 17. Bruchfläche Versuchskörper K-AW-690-02



Abbildung 18. Bruchfläche Versuchskörper K-PIT-355-06

In Einzelfällen und insbesondere bei den Stumpfstoßen war die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit so groß bzw. die Kerbwirkung am Nahtübergang derart gering, dass sich teilweise die Anrisse und das Versagen ins Grundmaterial oder in den Einspannbereich verlagerten. Abbildung 19 gibt hierzu ein Beispiel am Versuchskörper S-PIT-355-07. Der Ermüdungsbruch erfolgte im Grundmaterial ausgehend von einer Korrosionskerbe an der Walzoberfläche.



Abbildung 19. Bruch im Grundmaterial des Versuchskörpers S-PIT-355-07

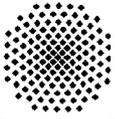


Abbildung 20 zeigt zwei weitere Beispiele für das Versagen im Grundmaterial der Proben S-PIT-355-05 und K-PIT-355-02.

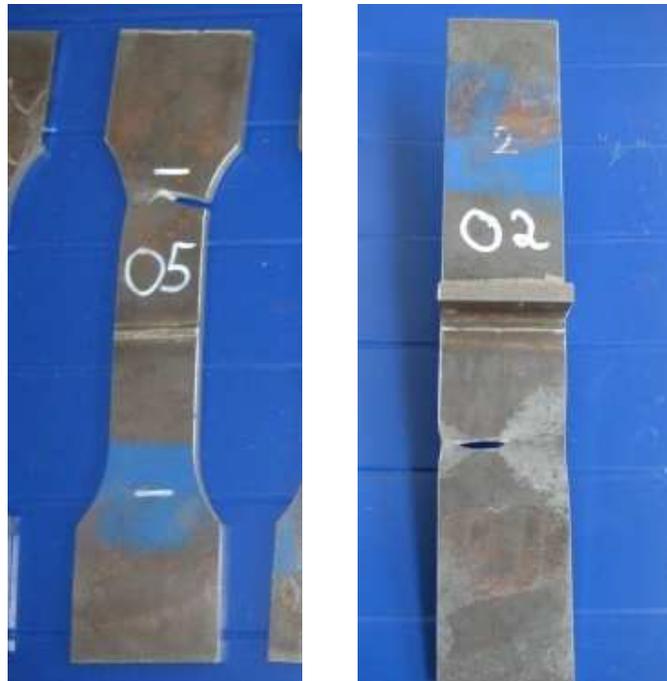


Abbildung 20. Versagen der Proben S-PIT-355-05 und K-PIT-355-02

## 5.6. Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse

Die bei den Schwingversuchen ermittelten Bruchlastspielzahlen unterliegen in Abhängigkeit des gewählten Lastniveaus großen Streuungen, die eine statistische Auswertung zur Bestimmung der *Wöhler*linien bzw. Ermüdungsfestigkeitskurven notwendig machen. Es erfolgte daher eine statistische Auswertung der Versuchsergebnisse gemäß dem Hintergrundbericht zur DIN EN 1993-1-9 [6], vgl. [5]. Danach wird der charakteristische Wert der Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_C$  (Kerbklasse nach DIN EN 1993-1-9 [6] bzw. FAT-Klasse nach [7]) als der Wert definiert, der sich bei einer 95%igen Überlebenswahrscheinlichkeit ( $P_{\overline{0.95}}$ ) für den Logarithmus der Lastspielzahl  $N$  mit einem zweiseitigen Vertrauensintervall des Mittels von 75% ( $V_{75\%}$ ) bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln ergibt. Unter Berücksichtigung des Vertrauensintervalls entspricht dies in etwa einer effektiven Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,7%.

Abbildung 21 zeigt schematisch das Verfahren zur Bestimmung von  $\Delta\sigma_C$ . Die Bestimmung des Mittelwerts der *Wöhler*kurve, beschrieben durch die Steigung  $m$  und die Konstante  $b$  erfolgt durch eine lineare Regression der logarithmischen Werte von  $N$  und  $\Delta\sigma$ . Die Annahme einer einheitlichen Steigung  $m$  der Mittelwertkurve und der charakteristischen Kurve führt schließlich aufgrund der geforderten Überlebenswahrscheinlichkeit bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln zum charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_C$ .

Die Auswertung der Versuche erfolgte jeweils für eine variable Neigung  $m$  der *Wöhler*linie sowie eine vorgegebene bzw. feste Neigung der *Wöhler*linie. Grundmaterialbrüche wurden bei der Auswertung mit berücksichtigt, Durchläufer ( $N \geq 5 \cdot 10^6$  Lastwechsel) hingegen nicht.

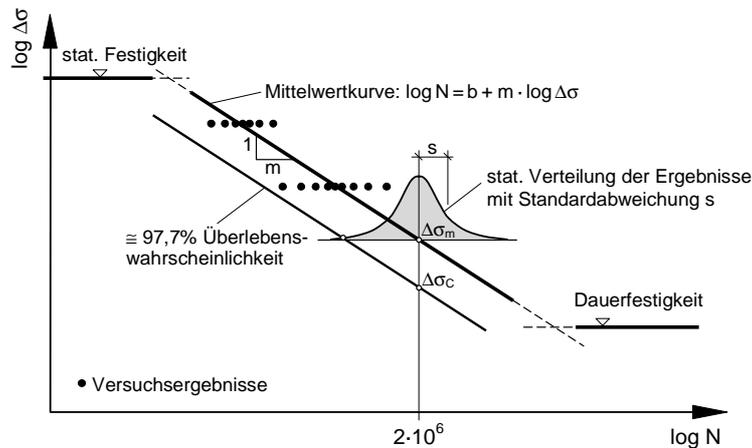
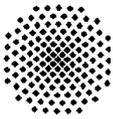


Abbildung 21. Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse

### 5.7. Versuchsergebnisse Kreuzstoß, Werkstoff S355J2

Tabelle 8 und Tabelle 9 fassen die Ergebnisse der Ermüdungsversuche an den unbehandelten und PIT-behandelten Kreuzstößen aus dem Werkstoff S355J2 zusammen. Abbildung 22 zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse im Ermüdungsfestigkeitsdiagramm.

Tabelle 8. Ergebnisse der Schwingversuche, Kreuzstoß, Werkstoff S355J2

| Nachbehandlung  | Probe        | Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Schwingspielzahl bis Bruch N [-] | Rissentstehung |
|---|--------------|--|----------------------------------|----------------|
| Schweißzustand (unbehandelt)  | K-AW-355-01  | 300  | 67.921                           | Nahtübergang   |
|   | K-AW-355-02  | 300  | 64.159                           |                |
|   | K-AW-355-03  | 170  | 574.631                          |                |
|   | K-AW-355-04  | 170  | 456.289                          |                |
|   | K-AW-355-05  | 125  | 1.400.261                        |                |
|   | K-AW-355-06  | 125  | 3.712.215                        |                |
|   | K-AW-355-07  | 225  | 185.219                          |                |
|   | K-AW-355-08  | 225  | 168.630                          |                |
|   | K-AW-355-09  | 125  | 1.933.751                        |                |
| PIT-behandelt   | K-PIT-355-01 | 300  | 1.426.998                        | Nahtübergang   |
|   | K-PIT-355-02 | 300  | 762.972                          | Grundmaterial  |
|   | K-PIT-355-03 | 340  | 137.721                          | Nahtübergang   |
|   | K-PIT-355-04 | 340  | 116.159                          |                |
|   | K-PIT-355-05 | 315  | 711.012                          |                |
|   | K-PIT-355-06 | 315  | 298.866                          |                |
|   | K-PIT-355-07 | 280  | 799.250                          |                |
|   | K-PIT-355-08 | 280  | 2.287.011                        | Einspannung    |
|   | K-PIT-355-09 | 315  | 337.639                          | Nahtübergang   |
| Werkstoff S355J2<br>Blechdicke $t = 12\text{mm}$<br>Spannungsverhältnis $R = 0,1$ |              |  |                                  |                |

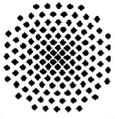


Tabelle 9. Statistische Auswertung der Schwingversuche, Kreuzstoß, Werkstoff S355J2

|                              | Anzahl Versuche n [-] | Steigung der Wöhlerlinie m [-] | Standardabweichung s [-] | Mittelwert $\Delta\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Fraktilwert (Kerbfallklasse) $\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|--|--|
| Schweißzustand (unbehandelt) | 9                     | 4,0 (variabel)                 | 0,128                    | 125,0  | 106,8  |
|                              |                       | 3,0 (fest)                     | 0,210                    | 109,6  | 76,5   |
| PIT-behandelt                | 9                     | 12,7 (variabel)                | 0,210                    | 277,2  | 254,5  |
|                              |                       | 5,0 (fest)                     | 0,329                    | 234,8  | 143,2  |

Werkstoff S355J2  
 Blechdicke t = 12mm  
 Spannungsverhältnis R = 0,1

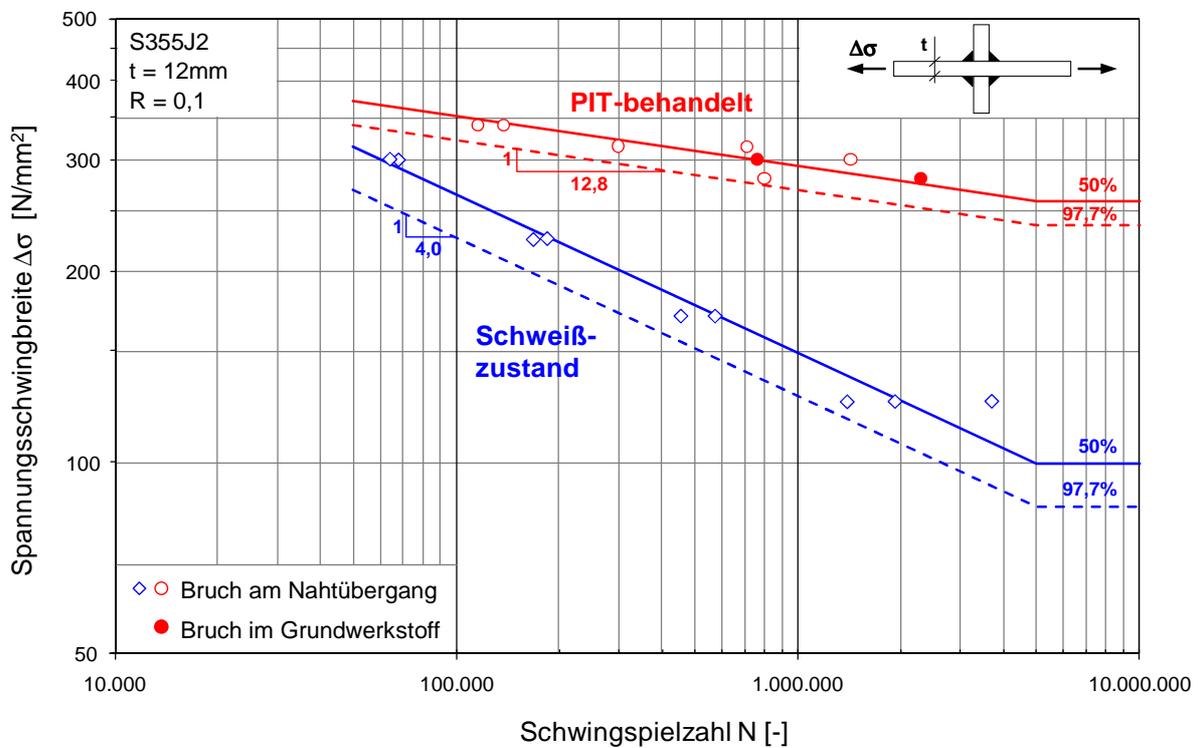
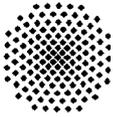


Abbildung 22. Darstellung der Versuchsergebnisse im Ermüdungsfestigkeitsdiagramm



## 5.8. Versuchsergebnisse Kreuzstoß, Werkstoff S690QL

In Tabelle 10 und Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Ermüdungsversuche an den unbehandelten und PIT-behandelten Kreuzstößen aus dem Werkstoff S690QL zusammengefasst. Abbildung 23 zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse im Ermüdungsfestigkeitsdiagramm.

Tabelle 10. Ergebnisse der Schwingversuche, Kreuzstoß, Werkstoff S690QL

| Nachbehandlung   | Probe         | Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Schwingspielzahl bis Bruch N [-] | Rissentstehung |
|--|---------------|--|----------------------------------|----------------|
| Schweißzustand (unbehandelt)   | K-AW-690-01   | 300  | 106.797                          | Nahtübergang   |
|  | K-AW-690-02   | 300  | 123.652                          |                |
|  | K-AW-690-03   | 225  | 537.534                          |                |
|  | K-AW-690-04   | 225  | 415.846                          |                |
|  | K-AW-690-05   | 190  | 1.028.720                        |                |
|  | K-AW-690-06   | 190  | 575.000                          |                |
|  | K-AW-690-07   | 190  | 1.034.355                        |                |
|  | K-AW-690-08   | 150  | 3.517.443                        |                |
|  | K-AW-690-10   | 150  | 1.833.757                        |                |
|  | PIT-behandelt | K-PIT-690-01   | 340                              |                |
| K-PIT-690-02   |               | 340  | 478.283                          |                |
| K-PIT-690-03   |               | 315  | 759.450                          |                |
| K-PIT-690-04   |               | 315  | 1.270.270                        |                |
| K-PIT-690-05   |               | 400  | 193.512                          |                |
| K-PIT-690-06   |               | 400  | 228.100                          |                |
| K-PIT-690-07   |               | 280  | 3.277.551                        | Einspannbruch  |
| K-PIT-690-08   |               | 280  | 2.119.665                        | Nahtübergang   |
| K-PIT-690-09   |               | 280  | 5.000.000                        | Durchläufer    |
| Werkstoff S355J2<br>Blechdicke t = 12mm<br>Spannungsverhältnis R = 0,1 |               |  |                                  |                |

Tabelle 11. Statistische Auswertung der Schwingversuche, Kreuzstoß, Werkstoff S690QL

|  | Anzahl Versuche n [-] | Steigung der Wöhlerlinie m [-] | Standardabweichung s [-] | Mittelwert $\Delta\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Fraktilwert (Kerbfallklasse) $\Delta\sigma_C$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|--|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|--|--|
| Schweißzustand (unbehandelt)   | 9                     | 4,4 (variabel)                 | 0,117                    | 158,4  | 139,3  |
|  |                       | 3,0 (fest)                     | 0,204                    | 139,5  | 98,0   |
| PIT-behandelt  | 9                     | 7,0 (variabel)                 | 0,110                    | 288,3  | 266,4  |
|  |                       | 5,0 (fest)                     | 0,283                    | 272,6  | 227,4  |
| Werkstoff S690QL<br>Blechdicke t = 12mm<br>Spannungsverhältnis R = 0,1 |                       |                                |                          |  |  |

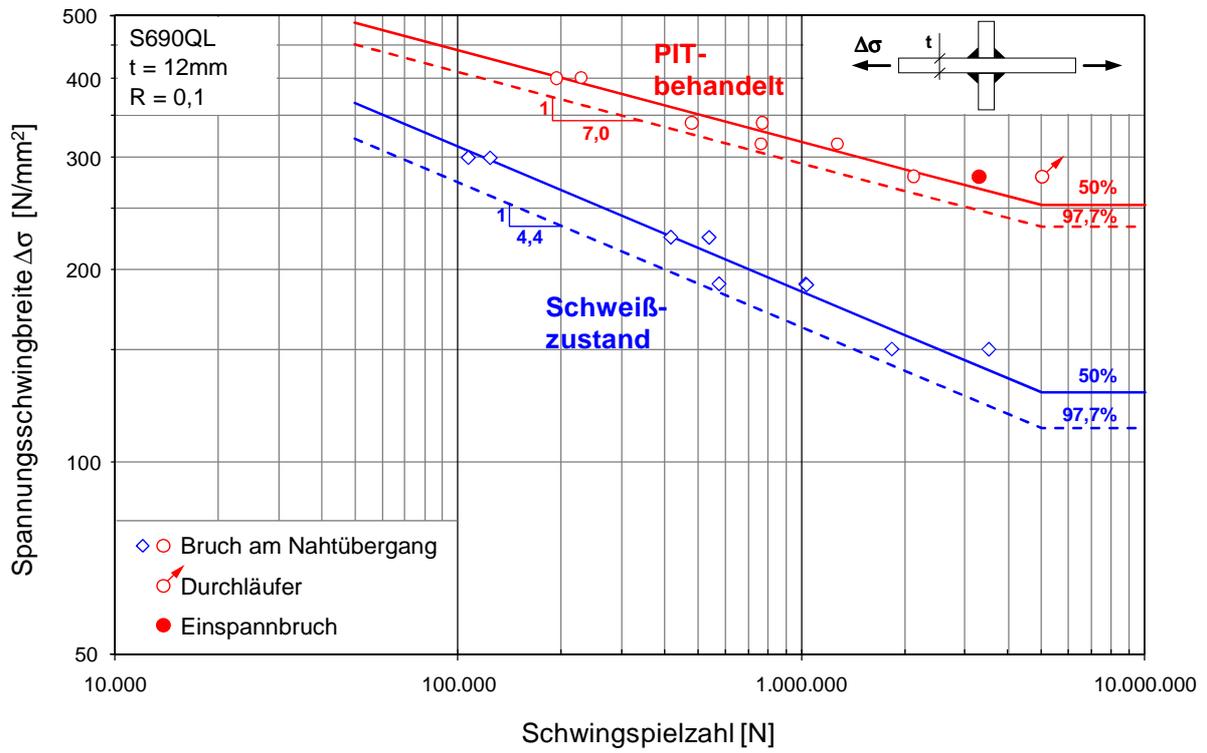
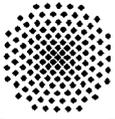
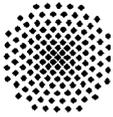


Abbildung 23. Darstellung der Versuchsergebnisse im Ermüdungsfestigkeitsdiagramm



## 5.9. Versuchsergebnisse Stumpfstoß, Werkstoff S355J2

Tabelle 12 und Tabelle 13 fassen die Ergebnisse der Ermüdungsversuche an den unbehandelten und PIT-behandelten Stumpfstoßen aus dem Werkstoff S355J2 zusammen. Abbildung 23 zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse im Ermüdungsfestigkeitsdiagramm.

Tabelle 12. Ergebnisse der Schwingversuche, Stumpfstoß, Werkstoff S355J2

| Nachbehandlung   | Probe        | Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Schwingspielzahl bis Bruch N [-] | Rissentstehung    |
|--|--------------|--|----------------------------------|-------------------|
| Schweißzustand (unbehandelt)   | S-AW-355-01  | 301  | 219.446                          | Nahtübergang      |
|  | S-AW-355-02  | 301  | 202.870                          |                   |
|  | S-AW-355-03  | 224  | 630.570                          | Ausrundungsradius |
|  | S-AW-355-04  | 224  | 777.319                          | Nahtübergang      |
|  | S-AW-355-05  | 181  | 1.917.412                        |                   |
|  | S-AW-355-06  | 181  | 1.088.195                        |                   |
|  | S-AW-355-07  | 181  | 2.475.336                        | Einspannstelle    |
|  | S-AW-355-08  | 224  | 1.249.695                        | Nahtübergang      |
| PIT-behandelt  | S-PIT-355-01 | 320  | 441.966                          | Grundmaterial     |
|  | S-PIT-355-02 | 320  | 359.971                          | Ausrundungsradius |
|  | S-PIT-355-03 | 350  | 89.025                           | Nahtübergang      |
|  | S-PIT-355-04 | 350  | 261.245                          | Grundmaterial     |
|  | S-PIT-355-05 | 291  | 570.704                          | Ausrundungsradius |
|  | S-PIT-355-06 | 291  | 801.626                          | Nahtübergang      |
|  | S-PIT-355-07 | 261  | 824.437                          | Grundmaterial     |
|  | S-PIT-355-08 | 261  | 1.634.772                        | Nahtübergang      |
| Werkstoff S355J2<br>Blechdicke t = 12mm<br>Spannungsverhältnis R = 0,1 |              |  |                                  |                   |

Tabelle 13. Statistische Auswertung der Schwingversuche, Stumpfstoß, Werkstoff S355J2

|  | Anzahl Versuche n [-] | Steigung der Wöhlerlinie m [-] | Standardabweichung s [-] | Mittelwert $\Delta\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Fraktilwert (Kerbfallklasse) $\Delta\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|--|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|--|--|
| Schweißzustand (unbehandelt)   | 8                     | 4,1 (variabel)                 | 0,145                    | 177,2  | 148,2  |
|  |                       | 3,0 (fest)                     | 0,182                    | 162,8  | 117,5  |
| PIT-behandelt  | 8                     | 6,7 (variabel)                 | 0,183                    | 244,7  | 209,7  |
|  |                       | 5,0 (fest)                     | 0,274                    | 227,1  | 174,9  |
| Werkstoff S690QL<br>Blechdicke t = 12mm<br>Spannungsverhältnis R = 0,1 |                       |                                |                          |  |  |

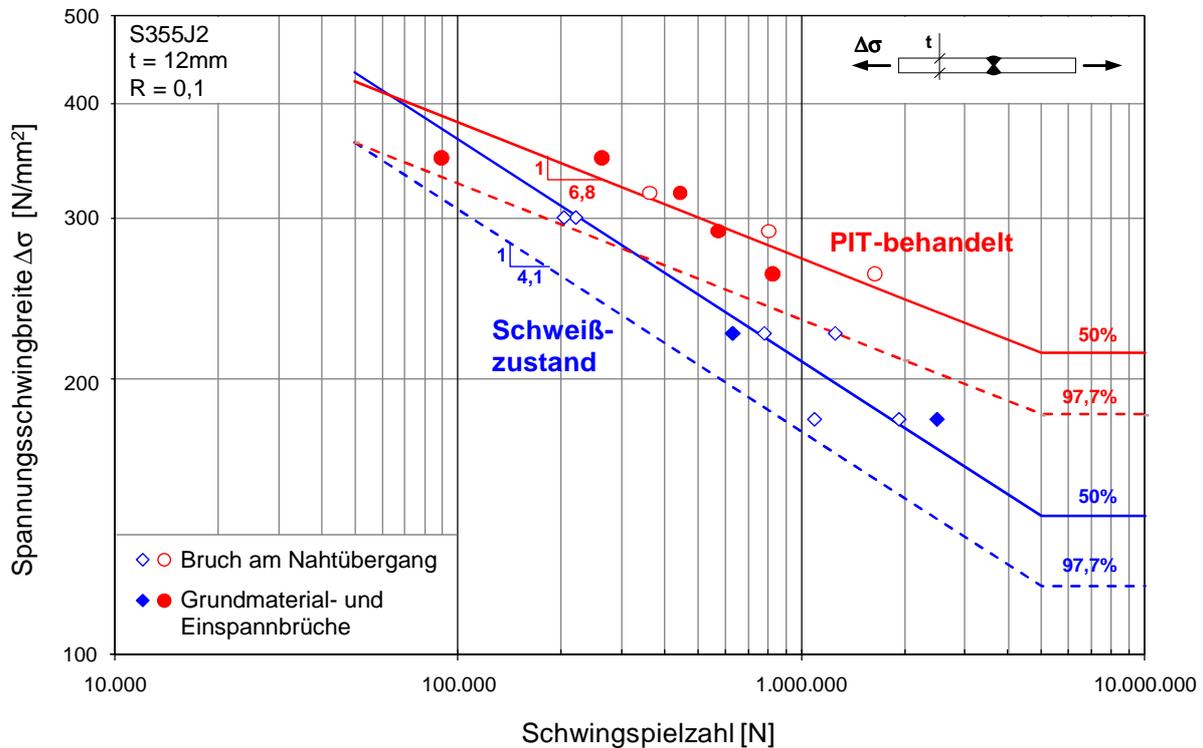
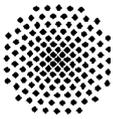


Abbildung 24. Darstellung der Versuchsergebnisse im Ermüdungsfestigkeitsdiagramm

### 5.10. Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse

Die Effektivität und Wirkung einer Schweißnahtnachbehandlung lässt sich üblicherweise durch den Vergleich bzw. den Quotient der Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_{NB}$  von nachbehandelten Schweißnähten zur Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_{AW}$  von unbehandelten Schweißnähten in Form eines Erhöhungsfaktors  $k$  wie folgt darstellen, vgl. [8]:

$$k = \frac{\Delta\sigma_{NB}}{\Delta\sigma_{AW}} \quad (1)$$

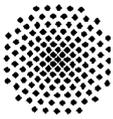
mit

$\Delta\sigma_{NB}$  Wert der Ermüdungsfestigkeit bei  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen von nachbehandelten Schweißnähten

$\Delta\sigma_{AW}$  Wert der Ermüdungsfestigkeit bei  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen von unbehandelten, d.h. im Schweißzustand (Englisch AW = as welded) belassenen Schweißnähten

$k$  Erhöhungsfaktor für die Ermüdungsfestigkeit bei Anwendung einer Schweißnahtnachbehandlung.

Nachfolgende Tabelle 13 enthält eine Zusammenstellung der im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen ermittelten Erhöhungsfaktoren  $k$  bei Anwendung einer PIT-Behandlung. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Versuchskörpern wird der Vergrößerungsfaktor zum einen unter Verwendung der Mittelwerte der Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_m$  bei  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen ermit-



telt - im Folgenden als  $k_m$  bezeichnet - und zum anderen unter Verwendung der charakteristischen Werte der Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_C$  bei  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen, und als  $k_C$  bezeichnet. Weiterhin wurden die Ermüdungsfestigkeitswerte unter Annahme einer variablen Neigung der *Wöhlerlinie* verwendet.

Aus Vergleichsgründen sind in Tabelle 13 weiterhin die Vergrößerungsfaktoren dargestellt, die sich im Rahmen der in [1] bzw. [4] durchgeführten vergleichbaren Untersuchungen bei Anwendung einer UIT-Behandlung ergaben.

Im vorliegenden Fall führen die durchgeführten Untersuchungen bei Anwendung einer PIT-Behandlung zu vergleichbaren Ergebnissen wie die einer UIT-Behandlung.

Tabelle 14. Zusammenfassung und Vergleich von Erhöhungsfaktoren  $k$  für die Ermüdungsfestigkeit bei Anwendung einer PIT- und UIT-Behandlung

|  | Kreuzstoß S355     |                    | Kreuzstoß S690         |                        | Stumpfstoß S355    |                    |
|--|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
|  | $k_m$              | $k_C$              | $k_m$                  | $k_C$                  | $k_m$              | $k_C$              |
| PIT-Behandlung gemäß Versuche  | 2,22               | 2,38               | 1,82                   | 1,92                   | 1,38               | 1,41               |
| UIT-Behandlung gemäß [1], [4]  | 2,03 <sup>1)</sup> | 2,16 <sup>1)</sup> | 1,74 <sup>1), 3)</sup> | 1,78 <sup>1), 3)</sup> | 1,31 <sup>2)</sup> | 1,41 <sup>2)</sup> |
| <sup>1)</sup> Ergebnisse gemäß [1]<br><sup>2)</sup> Ergebnisse gemäß [4]<br><sup>3)</sup> Werte basieren auf der Annahme einer feste Neigung der <i>Wöhlerlinien</i> |                    |                    |                        |                        |                    |                    |

## 6. Untersuchungen zum Randschichtzustand

### 6.1. Untersuchungsgegenstand

Zur Untersuchung der durch die PIT-Behandlung verursachten Randschichtveränderung wurden nachfolgende Messungen durchgeführt:

1. Eigenspannungsmessungen,
2. Geometriemessung der Eindringtiefe,
3. Härtemessungen und Gefügebildaufnahmen.

### 6.2. Eigenspannungsmessungen

#### 6.2.1. Allgemein

Die ermüdungssteigernde Wirkung der Schweißnahtnachbehandlung durch Hämmern wird wesentlich durch die am ermüdungskritischen Schweißnahtübergang eingebrachten Druckeigenstressungen bestimmt. Aus diesem Grund wurden ergänzende Eigenspannungsmessungen durchgeführt. Auf Wunsch des Auftraggebers wurde bei den Eigenspannungsmessungen zusätzlich noch der Einfluss des Bolzenradius  $r$  variiert.

#### 6.2.2. Untersuchungsgegenstand

Für die Eigenspannungsmessungen wurde eine gesonderte Behandlung des Versuchskörpers K-AW-690-09 vorgenommen. Zu diesem Zweck wurden an der unbehandelten Kreuzprobe drei der vier Nahtübergänge mit einem unterschiedlichem Bolzenradius von  $r = 1,5$  mm,  $2,0$  mm und  $2,5$  mm behandelt, vgl. Abbildung 25. Mit Ausnahme des Bolzenradius wurde die PIT-Behandlung mit den gleichen Parametern wie die Behandlung der Probekörper für Schwingversuche durchgeführt, vgl. Tabelle 7. Die am 11.03.2009 durchgeführte Behandlung ist im Detail in Anlage 3 dokumentiert.

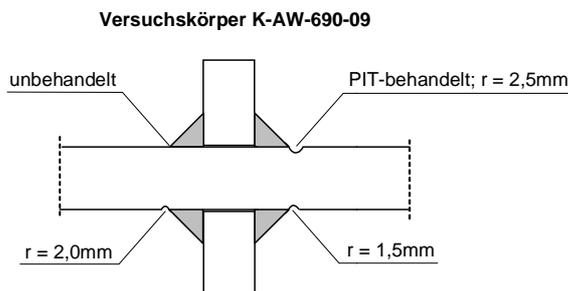


Abbildung 25. PIT-Behandlung des Versuchskörpers K-AW-690-09 mit unterschiedlichen Bolzenradien

#### 6.2.3. Messverfahren und Messpunkte

Die Eigenspannungsmessungen wurden an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA)) in der Abteilung 32 „Beanspruchungsanalysen“ am 03.04.2009 durchgeführt und sind ausführlich in Anlage 7 dokumentiert.

Die Ermittlung der Eigenspannungsmessungen erfolgte unter Anwendung des Bohrlochverfahrens. Der Bohrdurchmesser betrug 1,77 mm. Das Verfahren ist in Anlage 7 beschrieben.

Gemessen wurde jeweils in der Längsachse der Probe und so nah wie möglich am Schweißnahtübergang. Abbildung 26 zeigt schematisch die Lage der Messstellen. Bei den gehämmerten Nahtübergängen lag die Achse der Bohrung in einem Bereich zwischen der tiefsten Stelle des Bolzeneindrucks und dem Randbereich der Eindrückung zum Blech hin, vgl. „Messbereich“ in Abbildung 26 (links) und Abbildung 27.

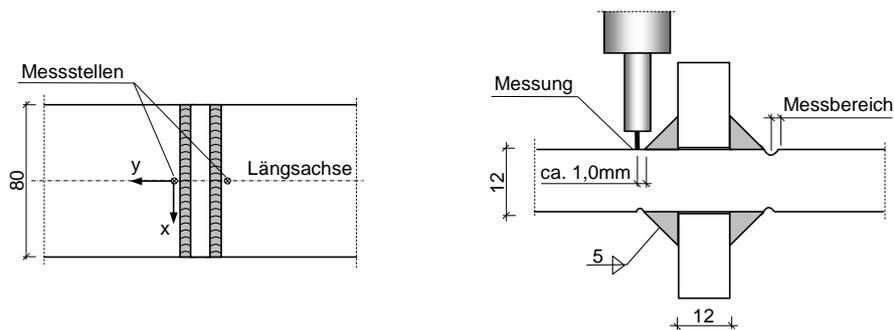


Abbildung 26. Lage der Eigenspannungsmessstellen



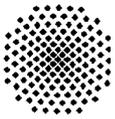
Abbildung 27. Lage der Eigenspannungsmessstellen, Bolzenradius  $r = 2,0 \text{ mm}$

#### 6.2.4. Messergebnisse

In Abbildung 28 sind die ermittelten Eigenspannungen  $\sigma_{ES,y}$  in Querrichtung zur Schweißnahtachse in Abhängigkeit vom Behandlungszustand und den beiden Bolzenradien  $r = 2,0 \text{ mm}$  und  $r = 2,5 \text{ mm}$  über die Bauteiltiefe dargestellt. Abbildung 29 zeigt analog die Eigenspannungen  $\sigma_{ES,x}$  in Längsrichtung der Schweißnaht.

Hinsichtlich der Messergebnisse ist zu erwähnen, dass verfahrensbedingt Eigenspannungen oberhalb der Streckgrenze (im vorliegenden Fall von ca.  $840 \text{ N/mm}^2$ ) nur eine beschränkt gültige Aussage liefern.

Betrachtet man die maßgebenden Eigenspannungen  $\sigma_{ES,y}$  quer zur Schweißnahtachse so zeigen die Messergebnisse, dass im vorliegenden Fall die durch den Schweißvorgang entstan-



denen Zugeigenspannungen in Höhe von ca.  $550 \text{ N/mm}^2$  durch die Anwendung des PIT-Verfahrens bis zu einer Messtiefe von ca.  $1,0 \text{ mm}$  aufgehoben werden.

Die Ergebnisse der Eigenspannungen an den PIT-behandelten Übergängen zeigen keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Bolzenradius  $r$  und Höhe der Eigenspannungen.

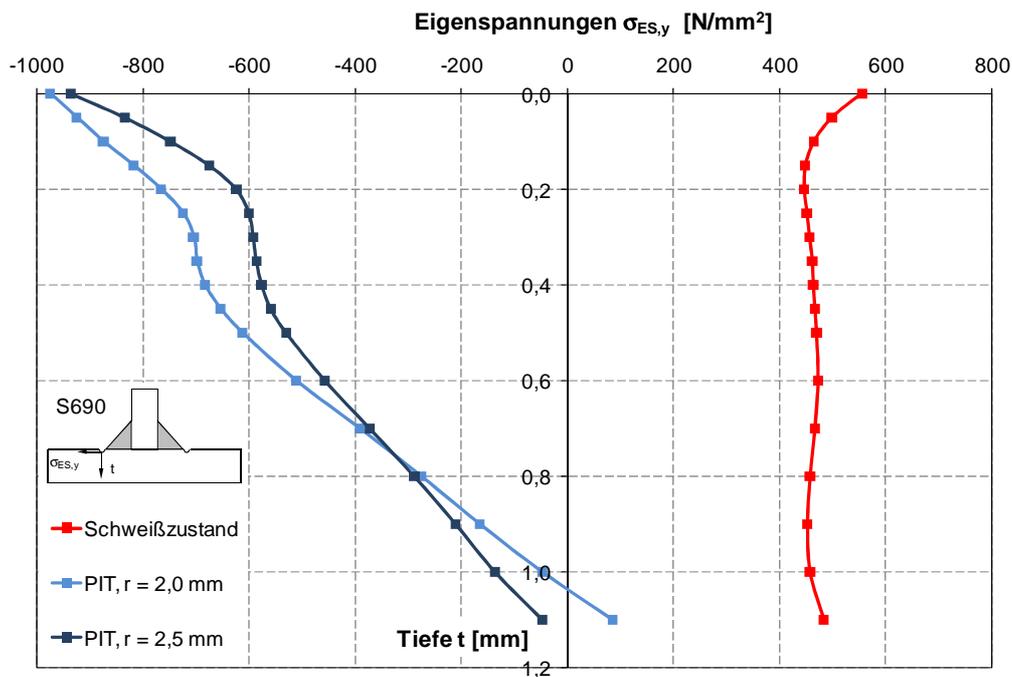


Abbildung 28. Verlauf der Eigenspannungen  $\sigma_{ES,y}$  quer zur Schweißnahtlängsrichtung

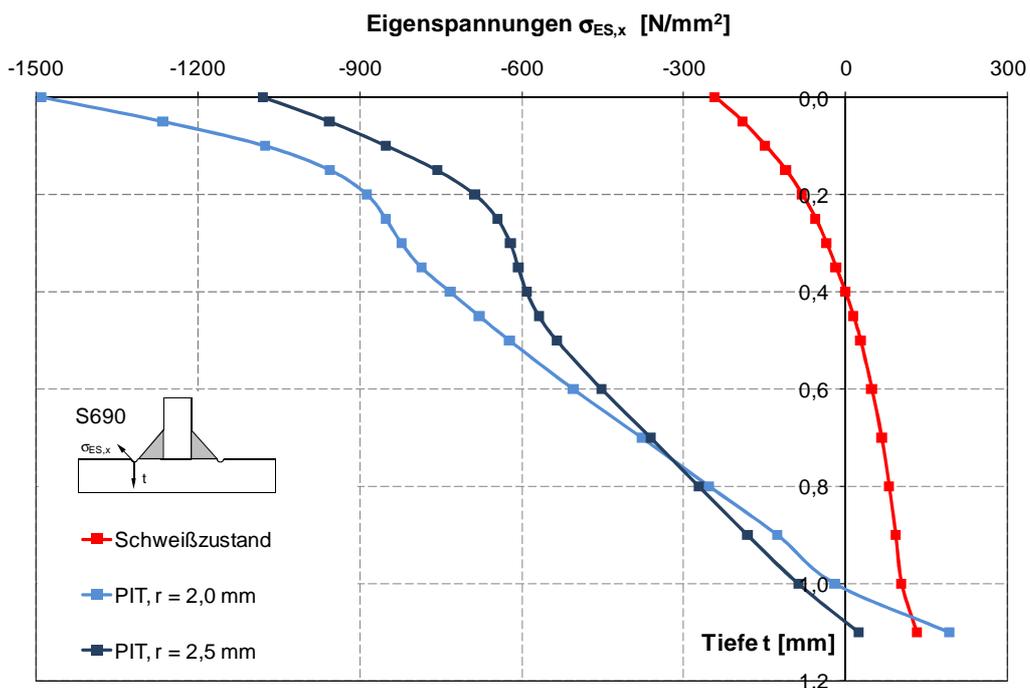
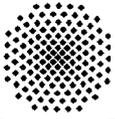


Abbildung 29. Verlauf der Eigenspannungen  $\sigma_{ES,x}$  in Schweißnahtlängsrichtung



### 6.3. Geometrievermessung der Eindrucktiefe

#### 6.3.1. Allgemein

Die durch das Hämmern verursachte Tiefe der plastischen Eindrückung des Nahtübergangs kann u.a. auch als Qualitätsmerkmal der Nachbehandlung angesehen werden, da sie in Zusammenhang mit den dadurch induzierten Eigenspannungen steht. Aus diesem Grund wurde an zwei ausgewählten Versuchskörpern exemplarisch die Eindrucktiefe  $e$  gemessen, vgl. Abbildung 30.

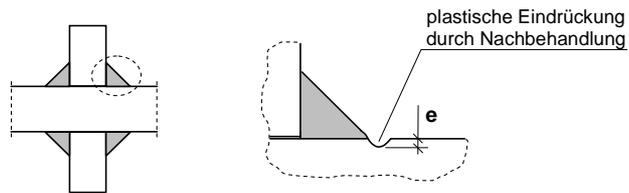


Abbildung 30. Eindrucktiefe  $e$  am Nahtübergang

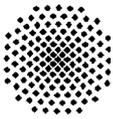
#### 6.3.2. Messverfahren und Messumfang

Die Messungen erfolgten mit einer an einem Ständer angebrachten digitalen Messuhr der Firma Mitutoyo, vgl. Abbildung 31.



Abbildung 31. Vermessung der Eindrucktiefe an einer Stumpfnaht

Die Messung der Eindrucktiefe erfolgte an einer Stumpfstoßverbindung aus dem Werkstoff S355J2 sowie an einer Kreuzstoßverbindung aus dem Werkstoff S690QL. Je Nahtübergang wurde in Schweißnahtlängsrichtung in einem Raster von ca. 10 mm gemessen.



### 6.3.3. Messergebnisse

Tabelle 15 fasst die einzelnen Messergebnisse sowie deren wesentlichen statistischen Kenngrößen zusammen. Die Mittelwerte der Eindrucktiefe liegen im Bereich von 0,12 – 0,19 mm, wobei die Werte am Werkstoff S690QL des Kreuzstoßes (Versuchskörper K-PIT-690-06) etwas geringer ausfallen als beim Werkstoff S355J2 gemessen am Stumpfstoß (Versuchskörper S-PIT-355-04). Die gemessenen Minimalwerte liegen im Bereich 0,09 – 0,13 mm.

Tabelle 15. Messergebnisse der Eindrucktiefe

| Messpunkt-Nr. | S-PIT-355-04<br>Nahtübergang |        |        |        | K-PIT-690-06<br>Nahtübergang |       |       |       |
|---------------|------------------------------|--------|--------|--------|------------------------------|-------|-------|-------|
|               | 1                            | 2      | 3      | 4      | 1                            | 2     | 3     | 4     |
| 1             | 0,1834                       | 0,1456 | 0,1806 | 0,1568 | 0,124                        | 0,089 | 0,120 | 0,145 |
| 2             | 0,1078                       | 0,1792 | 0,1918 | 0,2324 | 0,158                        | 0,115 | 0,162 | 0,166 |
| 3             | 0,1708                       | 0,1876 | 0,2212 | 0,119  | 0,172                        | 0,125 | 0,094 | 0,136 |
| 4             | 0,1134                       | 0,168  | 0,1708 | 0,1428 | 0,120                        | 0,145 | 0,112 | 0,108 |
| 5             | 0,1974                       | 0,2044 | 0,1442 | 0,2212 | 0,108                        | 0,094 | 0,092 | 0,120 |
| 6             | 0,1904                       | 0,1288 | 0,0882 | 0,2394 | 0,128                        | 0,108 | 0,104 | 0,086 |
| 7             |                              |        |        |        | 0,158                        | 0,115 | 0,144 | 0,173 |
| 8             |                              |        |        |        | 0,139                        | 0,193 | 0,165 | 0,102 |
| Mittelwert    | 0,161                        | 0,169  | 0,166  | 0,185  | 0,138                        | 0,123 | 0,124 | 0,130 |
| Standardabw.  | 0,043                        | 0,028  | 0,051  | 0,056  | 0,023                        | 0,033 | 0,032 | 0,033 |
| Max           | 0,197                        | 0,204  | 0,221  | 0,239  | 0,172                        | 0,193 | 0,165 | 0,173 |
| Min           | 0,108                        | 0,129  | 0,088  | 0,119  | 0,108                        | 0,089 | 0,092 | 0,086 |

## 6.4. Härtemessungen und Gefügebildaufnahmen

### 6.4.1. Allgemein und Untersuchungsgegenstand

Die durch die PIT-Behandlung erzeugten plastischen Verformungen des Nahtübergangs wurden exemplarisch durch Schliffbilder und Randschichthärtemessungen untersucht. Gegenstand der Untersuchungen waren nachfolgende Versuchskörper:

- S-AW-355-10
- S-PIT-355-10
- K-PIT-690-10

### 6.4.2. Versuchskörper S-AW-355-10

Beim Versuchskörper S-AW-355-10 handelt es sich um eine unbehandelte, d.h. im Schweißzustand belassene Probe. Die in Abbildung 32 dargestellten Schliffbilder zeigen die wärmebeeinflusste Zone mit einem typischen Zwischenstufengefüge und einem vergleichsweise weichen Schweißnahtübergang. Der Maximalwert der Härte im oberflächennahen Bereich liegt bei 242 HV 0,1 und nimmt mit zunehmender Tiefe ab, vgl. Abbildung 33.

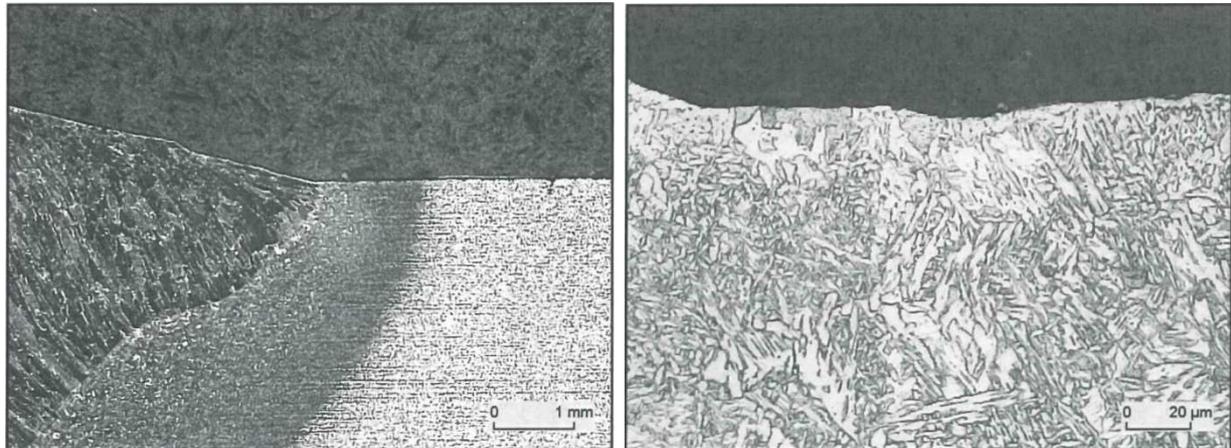
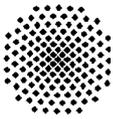


Abbildung 32. Mikroschliffbilder der unbehandelten Probe S-AW-355-10

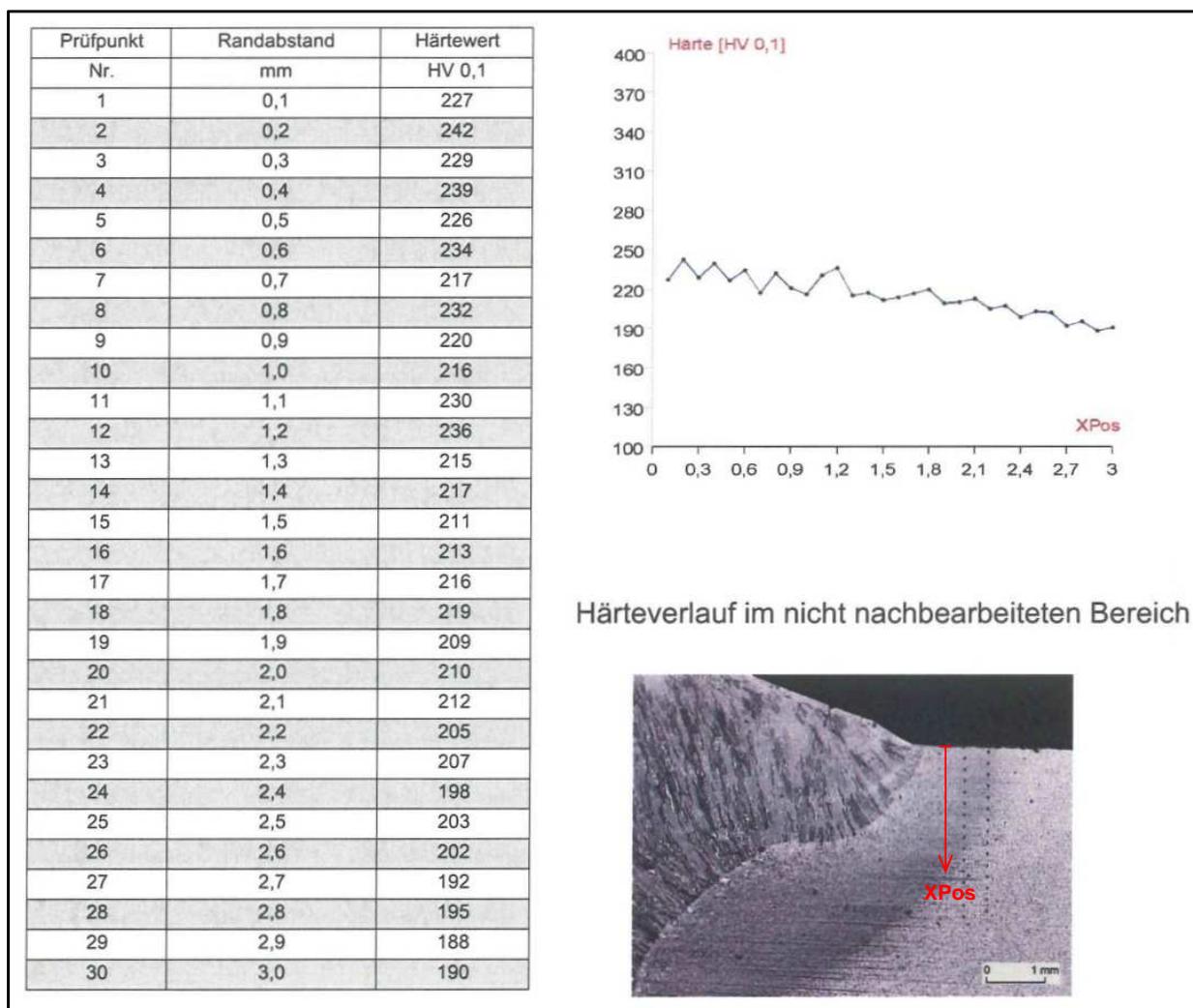


Abbildung 33. Tiefenverlauf der Mikrohärtigkeit HV 0,1 der unbehandelten Probe S-AW-355-10

### 6.4.3. Versuchskörper S-PIT-355-10

Abbildung 34 zeigt Schliffbilder der PIT-behandelten Probe aus dem Werkstoff S355J2 am Nahtübergang des Stumpfstoßes. Im linken Teilbild ist die plastische Eindrückung von ca. 0,2 mm deutlich erkennbar. Im rechten Teilbild ist in einem Bereich bis zu einer Tiefe von ca. 40–60 µm ein durch das Hämmern stark zerklüftetes kaltumgeformtes Gefüge zu erkennen, sowie eine unmittelbar darunter liegende Schicht mit einer deutlichen Ausrichtung des Gefüges in der Art eines Zugbandes.

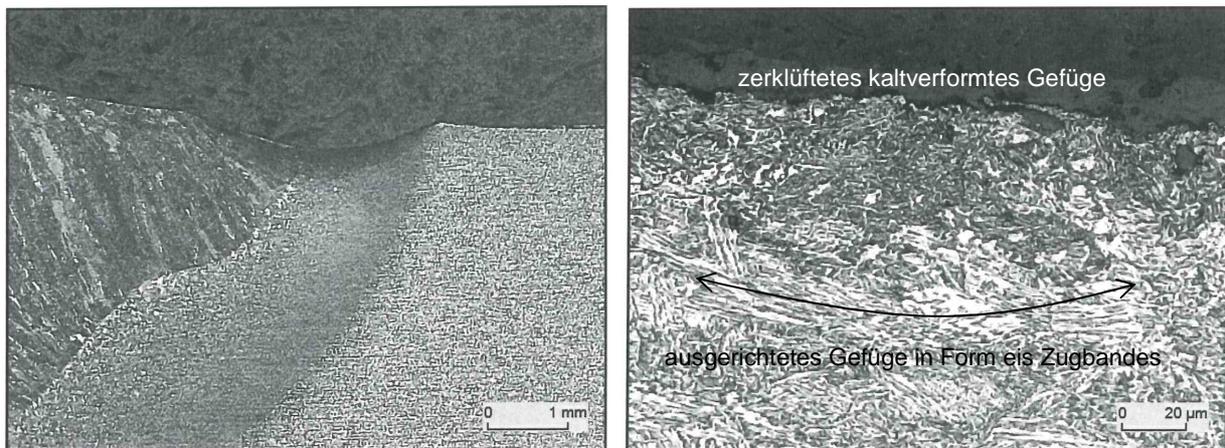


Abbildung 34. Mikroschliffbilder der PIT-behandelten Probe S-PIT-355-10

Der Tiefenverlauf der Härtemessungen ist in Abbildung 35 dargestellt. Infolge der Eindrückung bzw. Kaltumformung der Oberfläche ist ein deutlicher Anstieg der Randschichthärtigkeit und eine damit einhergehende Verfestigung erkennbar. Die hier vorliegenden Messergebnisse zeigen einen deutlichen Härteanstieg bis zu einer Tiefe von ca. 0,4–0,5 mm. Die maximale Härte liegt bei 346 HV<sub>0,1</sub> und liegt damit um ca. 100 HV<sub>0,1</sub> über den maximalen Messergebnissen der unbehandelten Probe, vgl. Abbildung 33.

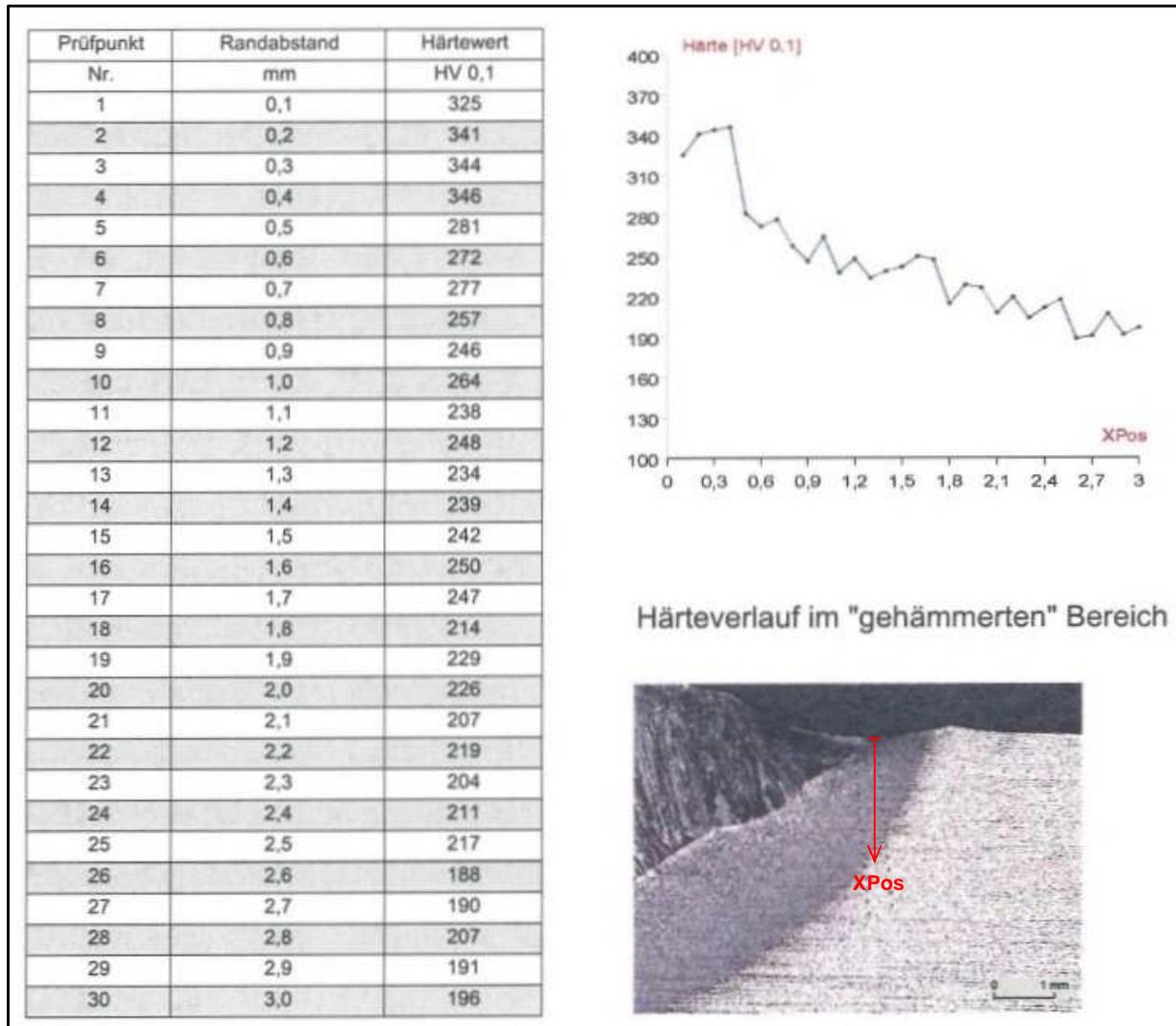
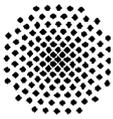


Abbildung 35. Tiefenverlauf der Mikrohärtigkeit HV 0,1 der unbehandelten Probe S-PIT-355-10

#### 6.4.4. Versuchskörper K-PIT-690-10

Abbildung 36 zeigt Schliffbilder des Nahtübergangs am Kreuzstoß der PIT-behandelten Probe K-PIT-690-10 aus dem Werkstoff S690QL. Im Vergleich zum PIT-behandelten Stumpfstoß aus dem Werkstoff S355J2 fällt hier die plastische Eindrückung des Nahtübergangs etwas geringer aus und liegt bei ca. 70 µm. Dies steht im Einklang mit den Messergebnissen der Tabelle 15. In Abbildung 36 (rechts) sind im oberflächennahen Bereich durch die Kaltumformung des Hämmerers verursachte Fältelungen sowie Streckungen der Körner sichtbar.

Der in Abbildung 37 dargestellte Härteverlauf weist nahe der Oberfläche eine Härtesteigerung von ca. 80 HV 0,1 auf, allerdings unterliegen die Messergebnisse einer starken Schwankung.

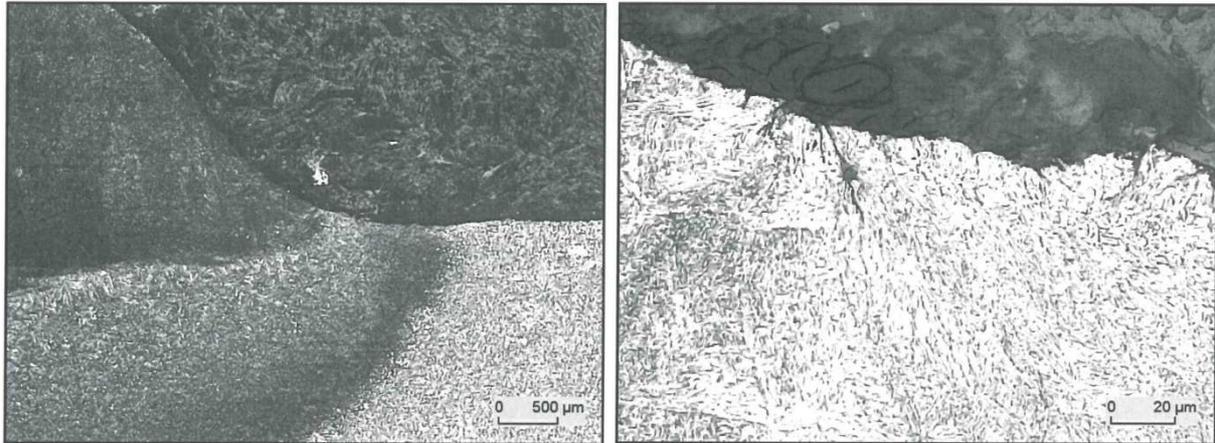


Abbildung 36. Mikroschliffbilder der PIT-behandelten Probe K-PIT-690-10

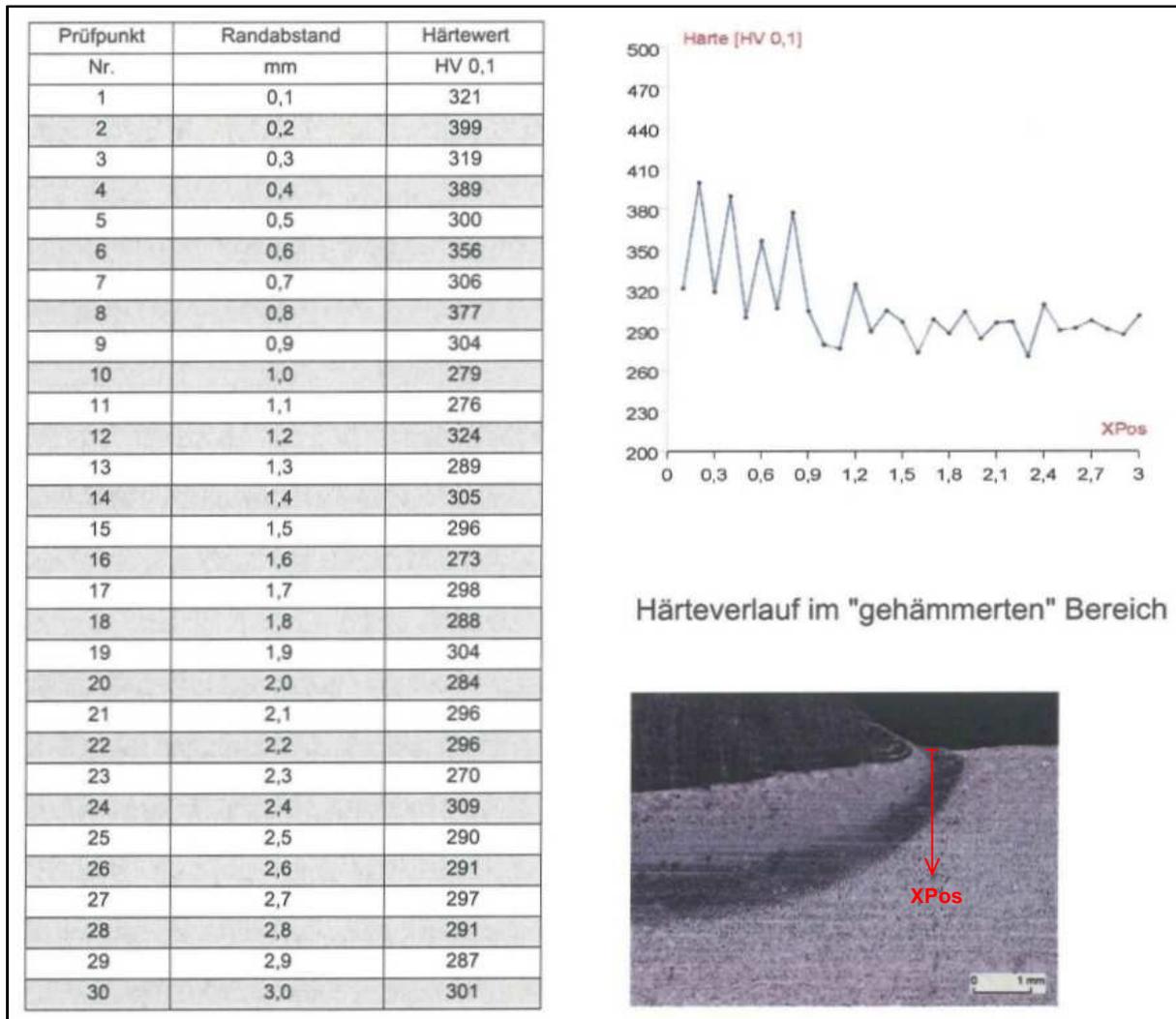


Abbildung 37. Tiefenverlauf der Mikrohärtte HV 0,1 der unbehandelten Probe K-PIT-690-10



## 7. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

### 7.1. Allgemeines

Bei der PIT-Technologie (Pneumatic Impact Treatment) handelt es sich um ein neuartiges und patentiertes höherfrequentes Hämmerverfahren, das primär zur Ertüchtigung bzw. der Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen entwickelt wurde. Beim PIT-Verfahren erfolgt das mechanische Hämmern durch gehärtete Stahlstifte, die mit einer Frequenz von ca. 80 - 120 Hz auf die zu behandelnde Metalloberfläche auftreffen, und pneumatisch durch einen so genannten „fluidischen Muskel“ angetrieben werden. Die durch das Hämmern einhergehende plastische Verformung der Oberfläche führt zur Entstehung von Druckeigenspannungen, die als wesentliche Ursache für die Verlängerung der Lebensdauer von Schweißverbindungen anzusehen sind.

Zur Ermittlung der ermüdungssteigernden Wirkung des PIT-Verfahrens wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen in Form von Schwingversuchen zur Ableitung von Ermüdungsfestigkeitskennwerten sowie ergänzende Untersuchungen zur Veränderung des Randschichtzustandes durchgeführt. Deren Ergebnisse sind nachfolgend zusammenfasst.

### 7.2. Schwingversuche

Insgesamt wurden 52 Schwingversuche an Kleinprüfkörpern zur Ableitung von Ermüdungsfestigkeitskurven an zwei unterschiedlichen Werkstoffen (S355J2 und S690QL) sowie an zwei unterschiedlichen Konstruktionsdetails (Quersteife eines Kreuzstoßes, Querstumpfnah eines Stumpfstoßes) an jeweils 12 mm dicken Blechen durchgeführt. Auf Basis einer statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse in Anlehnung an [6] konnten durch einen Vergleich der Ermüdungsfestigkeit der PIT-behandelten Proben mit den unbehandelten, d.h. im Schweißzustand belassenen Proben folgende Erhöhungsfaktoren für die Ermüdungsfestigkeit bei  $2 \cdot 10^6$  Schwingspielen ermittelt werden:

- $k \cong 2,2 - 2,4$  Konstruktionsdetail Quersteife; Werkstoff S355J2
- $k \cong 1,8 - 1,9$  Konstruktionsdetail Quersteife; Werkstoff S690QL
- $k \cong 1,4$  Konstruktionsdetail Stumpfstoß, Werkstoff S355J2

Im vorliegenden Fall führen die hier durchgeführten Untersuchungen bei Anwendung der PIT-Behandlung zu ähnlichen Ergebnissen bzw. Erhöhungsfaktoren, wie sie bei vergleichbaren Untersuchungen in [1] und [4] für die höherfrequenten Hämmerverfahren UIT oder HIFIT ermittelt wurden.

### 7.3. Randschichtveränderungen

Die Wirkungsweise des PIT-Verfahrens beruht auf den durch den Hämmervorgang erzeugten plastischen Verformungen am Nahtübergang der Schweißverbindungen sowie die daraus resultierende Änderung des Randschichtzustandes. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eigenspannungen  
Eigenspannungsmessungen am unbehandelten und PIT-behandelten Nahtübergang des



Werkstoffs S690QL unter Anwendung der Bohrlochmethode haben gezeigt, dass durch das Hämmern die durch den Schweißvorgang entstandenen Zugeigenspannungen bis zu einer Messtiefe von ca. 1,0 mm vollständig in den Druckbereich verschoben werden. Die maximalen Werte der gemessenen Druckeigenspannungen in der Nähe der Oberfläche lagen im Bereich der Streckgrenze des Grundmaterials.

▪ Eindrücktiefe

Die geometrische Vermessung der durch die PIT-Behandlung entstehenden plastischen Eindrückungen im Bereich des Nahtübergangs hat ergeben, dass in Abhängigkeit des Werkstoffs die Eindrücktiefen im Mittel bei ca. 0,17 mm (Werkstoff S355) und bei ca. 0,12 mm (Werkstoff S690) liegen. Insgesamt wurden beim niederfesten Werkstoff S355J2 höhere Werte ermittelt.

▪ Härtemessungen

Beim Werkstoff S355J2 wurde im oberflächennahen Bereich ein Anstieg der Randschichthärtigkeit von ca. 100 HV 0,1 bis zu einer Tiefe von ca. 0,4 mm im Vergleich zur unbehandelten Probe festgestellt. Die Härtesteigerungen beim Werkstoff S690QL waren etwas geringer und lagen bei ca. 60 – 80 HV 0,1.

▪ Gefügebilder

Anhand verschiedener Mikroschliffe am Werkstoff S355J2 und S690QL konnten die Auswirkungen des Hämmerns auf das Werkstoffgefüge deutlich sichtbar gemacht werden. In allen Fällen war im gehämmerten Bereich nahe der Oberfläche ein zerklüftetes stark kaltumgeformtes und teils ausgerichtetes Gefüge erkennbar.

#### 7.4. Schlussbemerkung

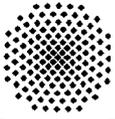
Die hier durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung der ermüdungssteigernden Wirkung des PIT-Verfahrens stehen hinsichtlich der Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit als auch der Änderung des Randschichtzustandes im Einklang mit bisherigen Ergebnissen von vergleichbaren Verfahren wie z.B. UIT und HIFIT, vgl. [1] und [4], und bieten damit eine vielversprechende Möglichkeit zur Verlängerung der Lebensdauer von Schweißkonstruktionen.

Aufgrund des derzeit noch begrenzten Umfangs der Untersuchungen hinsichtlich der Kenngrößen Blechdicke, Spannungsverhältnis und Bauteilabmessungen wird empfohlen die Übertragbarkeit der Ergebnisse im Einzelfall sorgfältig zu überprüfen. Es wird darauf hingewiesen, dass ähnliche Ergebnisse nur unter Einhaltung der hier zugrundegelegten Behandlungsparameter und Eindrücktiefen erzielbar sind. Im Falle der Anwendung ist auf eine qualitativ sachgerechte Ausführung der Schweißnahtnachbehandlung durch Arbeitsanweisungen und Qualitätskontrollen zu achten ist.

Stuttgart, 21. Oktober 2009

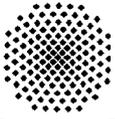
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Dr.-Ing. Hans-Peter Günther  
Ingenieurbüro für Stahlbau und Schweißtechnik  
Felix-Wankel-Str. 6  
73760 Stuttgart



## 8. Literatur

- [1] Kuhlmann, U., Bergmann, J., Dürr, A., Thumser, R.: Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung. AiF-Vorhaben Nr. 13866, P 620, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., 2006.
- [2] <http://www.pitec-gmbh.com/>
- [3] Statnikov, E. et al.: Ultrasound tool for strain strengthening and relaxation treatment. Patent of the RF No. 472782, 1975.
- [4] Ummenhofer, T., et al.: Lebensdauererlängerung neuer und bestehender geschweißter Stahlkonstruktionen. REFRESH-Projekt, Abschlussbericht, 2009.
- [5] Sedlacek G., Hobbacher, A., Nussbaumer, A., Stötzel, J., Tschickardt, D.: Commentary to Eurocode 3 EN 1993 Part 1-9 – Fatigue. Joint Report, Prepared under the JRC – ECCS cooperation agreement for the evolution of Eurocode 3 (programme of CEN / TC 250), preliminary and confidential Edition, October 2007.
- [6] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1.9: Ermüdung. Deutsche Fassung EN 1993-1-9, 2005.
- [7] Hobbacher, A.: Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW/IIS, Doc. XIII-1823-07, version June 2008.
- [8] Günther, H.-P., Kuhlmann, U.: Nachweiskonzepte zur Bemessung ermüdungsbeanspruchter Bauteile unter Berücksichtigung von Schweißnahtnachbehandlungsverfahren durch höherfrequentes Hämmern. Stahlbau 78 (2009), Heft 9.



## 9. Übersicht Anlagen

- Anlage 1. Prüfbericht für Werkstoffe (Prüf-Nr. 9 07 057 S), Germanischer Lloyd Prüflabor GmbH, Stuttgart, 19.08.2009.
- Anlage 2. Parameterdokumentation Schweißen PIT-Proben, STZ Fügetechnik an Metallen und Kunststoffen, Dezember 2008.
- Anlage 3. PIT-Behandlungsberichte vom 07.01.2009 und 11.03.2009, Firma PITEC GmbH.
- Anlage 4. Versuchsergebnisse, Kreuzstoßverbindungen am Werkstoff S355J2 in unbehandeltem und nachbehandeltem Zustand.
- Anlage 5. Versuchsergebnisse, Kreuzstoßverbindungen am Werkstoff S690QL in unbehandeltem und nachbehandeltem Zustand.
- Anlage 6. Versuchsergebnisse, Stumpfstoßverbindungen am Werkstoff S355J2 in unbehandeltem und nachbehandeltem Zustand.
- Anlage 7. Prüfungsbericht, Eigenspannungsmessungen an einer nachbehandelten Schweißprobe, Auftragsnummer 901 7361 000, MPA Stuttgart, 08.04.2009.