

# Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenten Hämmerverfahren im Stahlwasserbau

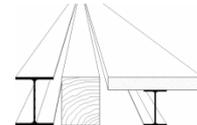
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer  
Dipl.-Ing. (FH) SFI Konrad Kudla  
Dipl.-Ing. Philipp Weidner

Universität Stuttgart  
KIT Stahl- und Leichtbau  
Universität Stuttgart  
KIT Stahl- und Leichtbau



## Universität Stuttgart

Institut für Konstruktion und Entwurf  
*Schwerpunkte: Stahlbau, Holzbau und Verbundbau*  
Prof. Dr.-ing. Ulrike Kuhlmann



## KIT Stahl- und Leichtbau

Versuchsanstalt für Stahl, Holz & Steine  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer



## Auftraggeber



## Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Dipl.-Ing. Ulrike Gabrys





## **Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahlwasserbau**

### **Vorwort**

Der vorliegende Bericht beschreibt Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren (HFH) im Stahlwasserbau. Diese Untersuchungen wurden an der Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf und am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, durchgeführt. Ziel des Projektes war es, Erkenntnisse hinsichtlich der Anwendbarkeit von HFH an Schweißnahtdetails bei normalfesten Baustählen (S235) zu erlangen. Die bisher durchgeführten Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeitssteigerung durch HFH decken lediglich den Bereich mit Werkstoffstreckgrenzen größer 360 N/mm<sup>2</sup> ab.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Ermüdungsversuche an HiFIT- und PIT-nachbehandelten Schweißnahtdetails durchgeführt. Es wurden vier Versuchsserien geprüft, um unterschiedliche Belastungshistorien und Nachbehandlungszustände abzubilden. Als Referenz wurde die nicht nachbehandelte Serie 1 herangezogen, um die kerbfallspezifische Ermüdungsfestigkeit des unbehandelten Schweißnahtdetails zu ermitteln.

In Serie 2 wurden Versuchskörper geprüft, deren Schweißnähte nach dem Schweißen HFH-nachbehandelt wurden. Diese Serie entspricht dem Zustand bei einem Neubau mit einer Nachbehandlung vor der ersten planmäßigen Belastung.

Um die Situation bei vorbeanspruchten, bestehenden Bauwerken abzubilden, an denen eine Lebensdauererlängerung durch Schweißnahtnachbehandlung erreicht werden soll, wurde die Serie 3 konzipiert. In Serie 3 wurden Versuchskörper bis zur rechnerischen Lebensdauer vorbeansprucht und anschließend HFH-nachbehandelt. Nach der HFH-Behandlung wurden die Versuchskörper weiter zyklisch bis zum Prüfkörperbruch beansprucht.

Ziel der Serie 4 war es, eine Reparaturmaßnahme abzubilden. Hierfür wurden Versuchskörper bis zum ersten erkennbaren Anriss beansprucht, reparaturgeschweißt und im Anschluss an die Reparatur nachbehandelt. Nach dieser HFH-Nachbehandlung wurden die Prüfkörper bis zum Bruch geprüft. Die Versuchsergebnisse wurden mit den im Hintergrundbericht zu DIN EN 1993-1-9 [6] festgelegten statistischen Verfahren ausgewertet und die Ergebnisse der verschiedenen Serien bzw. die der Nachbehandlungsverfahren gegenübergestellt.

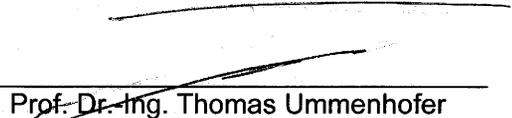
Zur Überprüfung und Charakterisierung der Veränderung des Randschichtzustandes durch die HFH-Nachbehandlung wurden für die beiden untersuchten Nachbehandlungsverfahren die Eigenspannungen, ausgehend von der Oberfläche bis zu einer Tiefe von maximal 1,4 mm, messtechnisch ermittelt. Zudem wurde die Eindringtiefe der Nachbehandlungsspuren an den nachbehandelten Proben gemessen.

## Danksagung

Die in diesem Bericht vorgestellten Untersuchungen wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau beauftragt. Wir bedanken uns bei den beiden Unternehmen Pitec GmbH und Dynatec GmbH für die Durchführung der HFH Nachbehandlung an den Versuchskörpern. Des Weiteren gilt unser Dank der Firma Paul Brobeil, die die Fräsarbeiten als Spende übernommen haben. Bedanken möchten wir uns ebenfalls bei der MPA Stuttgart für die Unterstützung und Durchführung der REM Untersuchungen.



Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann



Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer



Dipl.-Ing. (FH) SFI Konrad Kudla



Dipl.-Ing. Philipp Weidner

Stuttgart, März 2013

Karlsruhe, März 2013

**Inhaltsverzeichnis**

<b>VORWORT</b> .....	<b>I</b>
<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>II</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>III</b>
<b>1 HÖHERFREQUENTE HÄMMERVERFAHREN (HFH)</b> .....	<b>7</b>
1.1 Anwendung und Wirkungsweise .....	7
1.2 Beschreibung des Pitec-Gerätes.....	8
1.3 Beschreibung des HiFIT-Gerätes.....	9
<b>2 ERMÜDUNGSVERSUCHE</b> .....	<b>10</b>
2.1 Ausgangssituation .....	10
2.2 Stahlauswahl .....	11
2.3 Herstellung der Prüfkörper .....	11
2.4 Prüfmaschinen.....	13
2.4.1 Prüfeinrichtung Materialprüfanstalt Stuttgart.....	13
2.4.2 Prüfeinrichtung KIT, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine.....	14
2.5 Versuchsserie 1 .....	15
2.5.1 Durchführung Versuchsserie 1 .....	15
2.5.2 Ergebnisse Versuchsserie 1.....	16
2.6 Versuchsserie 2.....	19
2.6.1 Durchführung der Versuchsserie 2.....	19
2.6.2 Versuchsergebnisse Serie 2.1.....	20
2.6.3 Versuchsergebnisse Serie 2.2.....	22
2.6.4 Bewertung der Versuchsergebnisse.....	23
2.7 Versuchsserie 3.....	25
2.7.1 Durchführung der Versuchsserie 3.....	25
2.7.2 Versuchsergebnisse Serie 3.....	25
2.7.3 Auswertung der Versuchsergebnisse.....	28
2.8 Versuchsserie 4.....	29
2.8.1 Durchführung der Versuchsserie 4.....	29
2.8.2 Versuchsergebnisse Serie 4.....	30
2.8.3 Bewertung der Bruchflächen .....	33
2.8.4 Bewertung der Versuchsergebnisse.....	35
<b>3 ERMITTLUNG DER EINDRUCKTIEFE</b> .....	<b>36</b>
3.1 Durchführung der Untersuchungen .....	36
3.2 Bewertung der Eindrucktiefen .....	38
<b>4 EIGENSPANNUNGSMESSUNG</b> .....	<b>39</b>

4.1	Ermittlung der Eigenspannungen durch röntgenografische Messungen .....	39
4.2	Definition der Eigenspannungsrichtung.....	39
4.3	Ermittlung der Eigenspannungen durch die Bohrlochmethode .....	39
4.4	Durchgeführte Messungen und Darstellung der Ergebnisse .....	39
4.4.1	Übersicht.....	39
4.4.2	Längseigenspannungen .....	40
4.4.3	Quereigenspannungen .....	41
4.4.4	Tiefenprofile .....	41
4.5	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse .....	43
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>44</b>
5.1	Ermüdungsversuche.....	44
5.2	Eindrucktiefe .....	45
5.3	Eigenspannungen.....	45
5.4	Fazit .....	45
5.5	Vergleich der Ergebnisse mit vorhandenen Untersuchungen.....	47
5.6	Ausblick .....	48
<b>6</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>ANHANG A.....</b>	<b>53</b>
9.1	Datenblätter Serie 1.1.....	53
9.2	Datenblätter Serie 1.2.....	67
9.3	Datenblätter Serie 2.1.....	81
9.4	Datenblätter Serie 2.2.....	113
9.5	Datenblätter Serie 3.1.....	139
9.6	Datenblätter Serie 3.2.....	173
9.7	Datenblätter Serie 4.1.....	203
9.8	Datenblätter Serie 4.2.....	243
<b>10</b>	<b>ANHANG B.....</b>	<b>279</b>
10.1	Behandlungsbericht HiFIT .....	279
10.2	Behandlungsbericht PIT Serie 2 und Serie 3 .....	280
10.3	Behandlungsbericht PIT Serie 4.....	285
<b>11</b>	<b>ANHANG C.....</b>	<b>291</b>
	Dokumentation der REM Untersuchung.....	291
<b>12</b>	<b>ANHANG D.....</b>	<b>295</b>
12.1	Dokumentation der Eindrucktiefenmessung HiFIT.....	295
12.2	Dokumentation der Eindrucktiefenmessung PIT .....	296

---

<b>13</b>	<b>ANHANG E</b> .....	<b>297</b>
	Dokumentation der Eigenspannungsmessungen .....	297
<b>14</b>	<b>ANHANG F</b> .....	<b>301</b>
	Materialzeugnisse.....	301
<b>15</b>	<b>ANHANG G</b> .....	<b>307</b>
	Protokoll Schweißparameter .....	307



## 1 Höherfrequente Hämmerverfahren (HFH)

### 1.1 Anwendung und Wirkungsweise

Durch die Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren kann die Ermüdungsfestigkeit kritischer Kerbdetails wirksam gesteigert werden. Die Wirkungsweise einer HFH-Nachbehandlung basiert im Wesentlichen auf drei Effekten:

- Ausrundung der Kerbe am Schweißnahtübergang durch plastische Umformung (Verringerung der Kerbwirkung des Nahtübergangsbereiches)
- Lokale Erhöhung des Rissbildungswiderstandes durch Kaltverfestigung der Rand-schicht
- Einbringen von Druckeigenstressungen durch Kaltverformen

Neuere Untersuchungen [3], [5] belegen, dass die ermüdungsfestigkeitssteigernde Wirkung hauptsächlich auf die beiden letztgenannten Effekte zurückzuführen ist. Untersuchungen in [3] an nachbehandelten und anschließend normalgeglühten Proben haben gezeigt, dass - unter der Voraussetzung einer ordnungsgemäßen Ausführung der Schweißnaht - die sich durch die plastische Verformung ergebende Ausrundung der Kerbe einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat. Die festigkeitssteigernde Wirkung beruht im Wesentlichen auf den eingebrachten Druckeigenstressungen und der Kaltverfestigung im nachbehandelten Bereich. Das liegt vor allem daran, dass in Schweißverbindungen und vor allem im Nahtübergangsbereich nach dem Abkühlen an der Oberfläche sowie im oberflächennahen Bereich der Schweißverbindung Zugeigenstressungen vorliegen. Da diese Zugeigenstressungen Werte bis zur Höhe der Streckgrenze des Werkstoffs annehmen können und sich mit den Lastspannungen überlagern, erhöhen diese das die Materialermüdung maßgeblich dominierende kritische Zugspannungsniveau. Durch eine HFH-Behandlung wird das aus dem Schweißvorgang resultierende Eigenstressfeld maßgeblich verändert und es werden Druckeigenstressungen im Bereich der nachbehandelten Zone eingebracht, die sich mit den Lastspannungen aus äußeren Beanspruchungen überlagern und dadurch zu einer Reduktion des resultierenden Zugspannungsniveaus führen. Nach Weich [3] ist neben der oberflächlich eingebrachten Druckeigenstressungen auch die Tiefenwirkung von Bedeutung. In [5] wurden für die untersuchten HFH-Verfahren Druckeigenstressungen bis zu einer Tiefe von 1,5 – 2 mm nachgewiesen. In den tieferen Bereichen liegen aus Gleichgewichtsgründen Zugeigenstressungen vor.

Die maximal eintragbaren Druckeigenstressungen stehen im Zusammenhang mit der Streckgrenze des nachzubehandelnden Materials. Demnach bieten höherfestere Werkstoffe mehr Potenzial im Hinblick auf eine HFH-Nachbehandlung. Dieser Effekt konnte in bereits durchgeführten Forschungsarbeiten von Dürr [4] und Ummenhofer [5] für die Baustähle S355, S460 und S690 bestätigt und quantifiziert werden. Für einen niederfesten Baustahl S235 liegen entsprechende Untersuchungen derzeit noch nicht vor. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Wirksamkeit einer HFH-Nachbehandlung an Probekörpern aus dem Werkstoff S235 untersucht.

Die Anwendung von HFH ist für Kerbdetails geeignet, bei denen das Versagen vom Nahtübergang ausgeht. Bauteile, bei denen die primäre Ermüdungsrissbildung ausgehend von der Schweißnahtwurzel auftritt, sind für eine HFH-Behandlung nicht geeignet. Abbildung 1.1 zeigt exemplarisch Kerbdetails im Anwendungsbereich der untersuchten HFH-Verfahren. Bei der Beurteilung der möglichen Steigerung der Ermüdungsfestigkeit des Kerbdetails ist eine infolge der HFH-Behandlung bedingte Verlagerung des Rissausgangsortes hin zur Schweiß-

nahtwurzel in Betracht zu ziehen. Festzustellen bleibt aber, dass auch in diesem Fall eine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit erzielt werden kann. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Wirkungsweise der beiden HFH-Verfahren PIT und HiFIT näher untersucht.

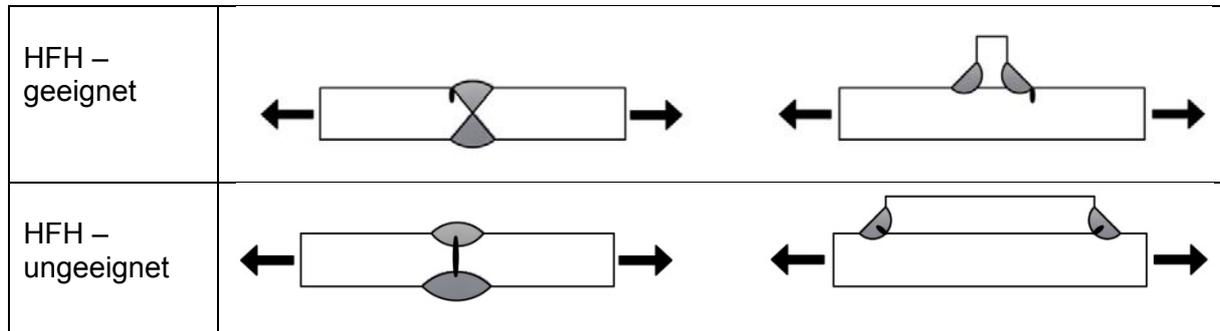


Abbildung 1.1: Anwendbarkeit HFH bei unterschiedlichen Kerbdetails

## 1.2 Beschreibung des Pitec-Gerätes

Pneumatic Impact Treatment (PIT) ist ein höherfrequentes Hämmerverfahren, das zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten entwickelt wurde. Sowohl die Frequenz, 0 bis 200 Hz, als auch die Schlagkraft können unabhängig voneinander stufenlos geregelt werden. Durch gehärtete Bolzen mit variablem Durchmesser werden mechanische Impulse mit einem Luftdruck von 4 bis 5 bar über einen druckluftgesteuerten „Muskel“ auf die zu behandelnde Oberfläche ausgeübt. Um die entstehenden Vibrationen durch das höherfrequente Hämmern für den Bediener möglichst gering zu halten und die Reproduzierbarkeit unabhängig vom Anpressdruck des Bedieners zu gewährleisten, arbeitet das System gegen ein Federsystem. Dadurch wird das Handgerät von der Schlagkraft vollkommen entkoppelt. Das Handgerät und die Steuereinheit sind in Abbildung 1.2 dargestellt. Tabelle 1.1 zeigt die Einstellmöglichkeiten des Pitec Systems. Weitere Informationen können entnommen [11] und [13] werden.



Abbildung 1.2: Pitec Handgerät und Steuereinheit

Tabelle 1.1: Einstellmöglichkeiten PIT

Versorgungsluftdruck [bar]	ab 4 - 5
Frequenz [Hz]	0 - 200
Vorschub [mm/s]	3 - 5
Pin-Durchmesser [mm]	variabel
Bolzenform [mm]	R 1,5 - 4

### 1.3 Beschreibung des HiFIT-Gerätes

HiFIT (High Frequency Impact Treatment) ist ein mit Druckluft arbeitendes höherfrequentes Hämmerverfahren zur Nachbehandlung von Schweißnahtübergängen. Die direkt am Gerät stufenlos einstellbare Intensität der Schlagkraft kann durch Prüfung der Eindringtiefe mit einer im Lieferumfang enthaltenden Lehre auf den jeweiligen Werkstoff abgestimmt werden. Der Pinradius an der Spitze des gehärteten Standard-Pins beträgt 1,5 mm. Für eine optimale Handhabung und Zugänglichkeit ist das Gerät leicht und kompakt konstruiert. Für den Betrieb ist ausschließlich eine Druckluftversorgung erforderlich. Das Verfahren wurde von der DYNATEC Gesellschaft für CAE und Dynamik mbH entwickelt und wird derzeit von der Firma Pfeifer vertrieben. Das HiFIT-Gerät ist in Abbildung 1.3 dargestellt. Die empfohlenen Einstellungsparameter zeigt Tabelle 1.2.



Abbildung 1.3: HiFIT Handgerät [14]

Tabelle 1.2: Einstellmöglichkeiten HiFIT

Versorgungsluftdruck [bar]	6 - 8
Frequenz [Hz]	180 - 300
Vorschub [mm/s]	3 - 5
Pin-Durchmesser [mm]	2 - 7
Bolzenform [mm]	Kegel mit Kugel; D =3

## 2 Ermüdungsversuche

### 2.1 Ausgangssituation

Ziel dieses Projektes ist die Untersuchung der Anwendbarkeit von HFH-Verfahren bei geschweißten Bauteilen aus S235JR+N sowie die Beurteilung der Wirksamkeit. Alle in diesem Projekt durchgeführten Ermüdungsversuche am Konstruktionsdetail Quersteife wurden mit einer Belastungsfrequenz von 8 Hz durchgeführt. Mit Serie 1 (unbehandelte Prüfkörper) wurde die Wöhlerlinie der unbehandelten Quersteife ermittelt. Diese dient als Referenz bzw. dem Vergleich mit den Ergebnissen HFH-behandelter Quersteifen und ermöglicht eine Bewertung der potenziellen Steigerung der Ermüdungsfestigkeit durch die untersuchten HFH-Verfahren. In Serie 2 wurden die Prüfkörper im Anschluss an das Schweißen und vor Versuchsbeginn nachbehandelt. Dies entspricht einer Neubausituation, bei dem die Nachbehandlung vor der ersten Belastung durchgeführt wurde. Um den Einfluss der Lebensdauererlängerung infolge einer HFH-Behandlung auf Bestandsbauwerke zu untersuchen wurde die Serie 3 konzipiert. Sie umfasst die Prüfung bis zum Ende der rechnerischen Lebensdauer des Schweißnahtdetails zyklisch vorbeanspruchter und anschließend nachbehandelter Probekörper. Serie 4 zeigt das Potenzial einer Ermüdungsfestigkeitssteigerung durch eine HFH-Behandlung bei reparaturgeschweißten Bauteilen auf. In Tabelle 2.1 ist das Versuchsprogramm dargestellt.

Tabelle 2.1: Versuchsprogramm

Serie	Behandlungszustand	Nachbehandlungsverfahren ,Forschungsstelle, Anzahl der durchgeführten Versuche	
		HiFIT KIT, Versuchsanstalt für Stahl Holz und Steine	PIT Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf
1	Geschweißt, unbehandelt	5	5
2	Geschweißt, nachbehandelt	10	10
3	Geschweißt, zyklisch belastet bis zur rechnerischen Lebensdauer, nachbehandelt	10	10
4	Geschweißt, zyklisch belastet bis zum technischen Anriss, Reparatur-Schweißung, nachbehandelt	10	10

Die Versuchskörper wurden nach dem in Abbildung 2.1 dargestellten System bezeichnet. Die erste Ziffer steht für die Serie. Ziffer zwei steht für das Nachbehandlungsverfahren bzw. für die Forschungsstelle. Die dritte Ziffer dient der Durchnummerierung der Prüfkörper in der jeweiligen Serie.

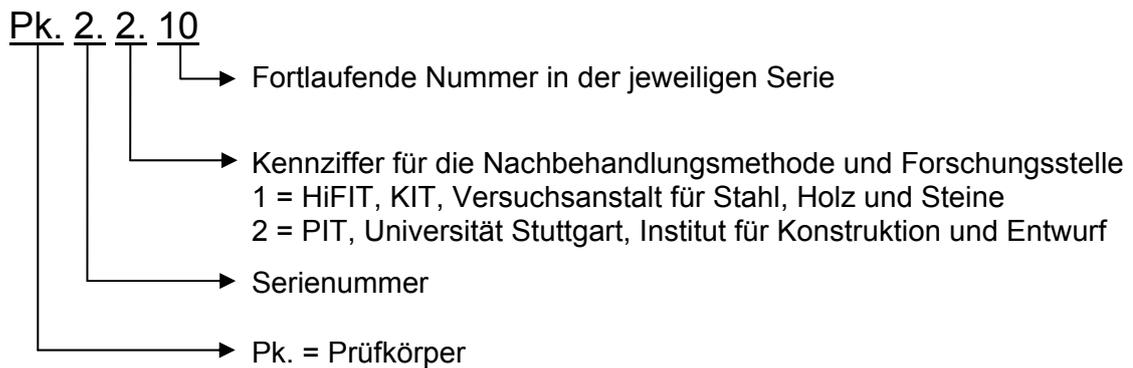


Abbildung 2.1: Prüfkörperbezeichnung

## 2.2 Stahlauswahl

Bei der Werkstoffauswahl wurde das Ziel verfolgt, einen Werkstoff für die Versuche auszuwählen, der die mechanisch-technologischen Kennwerte des Stahls besitzt, der bei existierenden Schleusentoren verbaut wurde. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde nicht nur der Einsatz der HFH-Verfahren bei Neubauten sondern vor allem auch die Instandsetzung und Lebensdauererlängerung von existierenden Schleusentoren betrachtet.

Von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurden an ausgewählten Schleusenbauwerken, die in den 1940er und 1950er Jahren errichtet wurden, Werkstoffkennwerte ermittelt. Anhand von Zugproben wurden u.a. die Streckgrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung der verbauten Stähle ermittelt. Die mechanischen Eigenschaften des in diesem Projekt verwendeten Stahls entsprechen einem S235JR, dessen Kennwerte die Mindestwerte nach DIN EN 10025 [8] erfüllen. Die Streckgrenze liegt unter den Kennwerten des verbauten Stahls der untersuchten Schleusenbauwerke. Der Stahl für die Prüfkörper wurde von der Salzgitter AG mit einem Abnahmeprüfzeugnis 3.1 geliefert. Die Mittelwerte der an ausgewählten Bauwerken ermittelten Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 2.2 den mechanischen Kennwerten des Materials der Prüfkörper gegenübergestellt.

Tabelle 2.2: Übersicht für Werkstoffauswahl

	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Streckgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung [%]
Mittelwert ausgewählter Bauwerke (BAW)	424	313	30,3
Prüfkörper S235JR+N	393	284	39
Mindestwerte nach DIN EN 10025-2 [8]	360 bis 510	235	17

## 2.3 Herstellung der Prüfkörper

Für die Geometrie der Prüfkörper wurde das Kerbdetail Quersteife nach DIN EN 1993-1-9 [1] gewählt, siehe Abbildung 2.2. Das Kerbdetail der aufgeschweißten Quersteife wird bei Schleusentoren häufig verwendet und ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Aus Symmetriegründen und im Hinblick auf die spätere zyklische Prüfung wurde die Steife beidseitig durch Kehlnähte auf das Grundblech aufgeschweißt. Die Kehlnähte wurden einlagig ausgeführt. Um eine gleichbleibende Schweißnahtqualität bei allen Versuchskörpern zu gewährleisten, wurden die Schweißnähte mit einer Lineareinheit ausgeführt, an der ein MAG-Brenner befestigt war, siehe Abbildung 2.4. Eine gleichbleibende Schweißnahtqualität der Prüfkörper ist Grundvoraussetzung für einen späteren Vergleich der erzielten Versuchsergebnisse.

Die Schweißarbeiten wurden vom Steinbeißtransferzentrum für Fügetechnik an der Fachhochschule Ulm durchgeführt. Die Schweißfolge ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Auf die Grundbleche mit den Abmessungen 1200 x 450 mm wurden beidseitig Steifen mit dem WIG-Schweißverfahren geheftet. Geheftet wurde an drei Stellen mit ca. 10 mm Länge. Die eigentlichen Nähte wurden anschließend MAG-geschweißt. Alle verwendeten Bleche besitzen eine nominelle Dicke von 12 mm und wurden durch Brennschneiden aus einer Blechtafel ausgeschnitten.

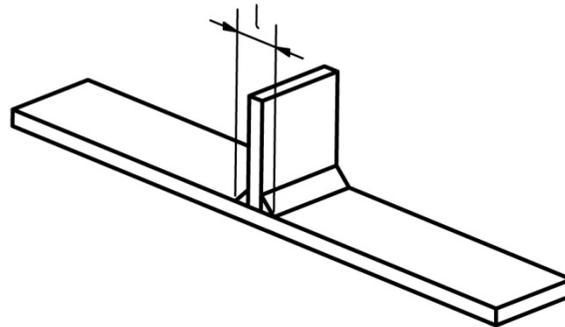


Abbildung 2.2: Konstruktionsdetail Quersteife EC3

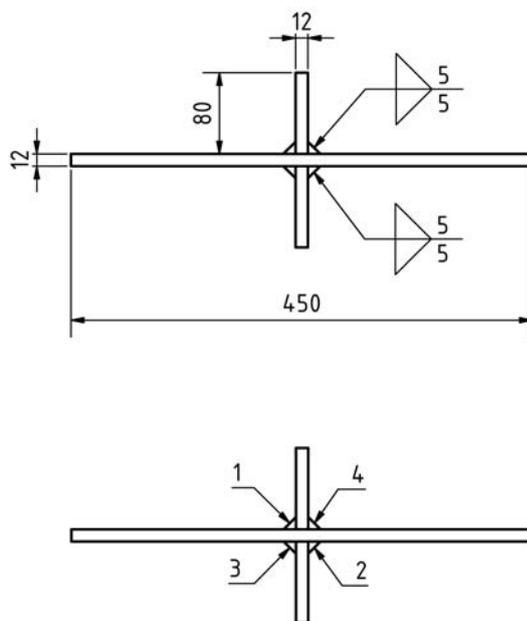


Abbildung 2.3: Prüfkörpergeometrie

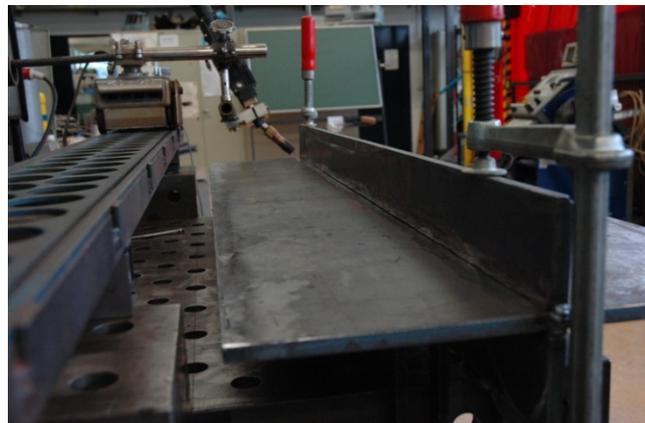


Abbildung 2.4: Schweißeinrichtung MAG

Nach den Schweißarbeiten wurden die 1200 mm langen Versuchskörper mit einer Bandsäge in 60 mm breite Prüfkörper geschnitten, siehe Abbildung 2.5. Die Schnittflächen wurden beidseitig mit einer Fräse bearbeitet um Riefen zu beseitigen. Die Prüfkörper wurden nach den Fräsarbeiten gemäß Abbildung 2.6 vermessen. Die Abmessungen sind in der Prüfkörperrdokumentation in Anhang A dargestellt.

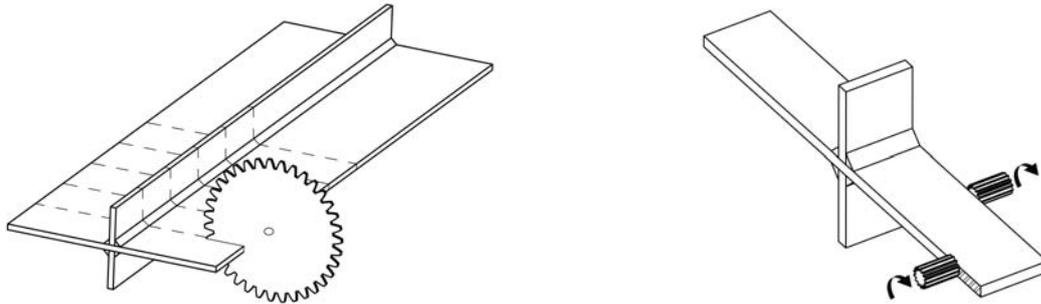


Abbildung 2.5: Versuchskörperherstellung

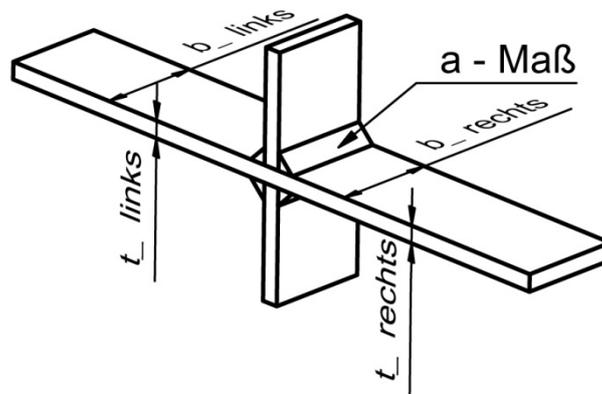


Abbildung 2.6: Gemessene Werte / Dokumentation

## 2.4 Prüfmaschinen

### 2.4.1 Prüfeinrichtung Materialprüfanstalt Stuttgart

Die vom Institut für Konstruktion und Entwurf durchgeführten Ermüdungsversuche wurden auf einer 400 kN-Universalprüfmaschine der Marke Schenck an der Materialprüfanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA)) durchgeführt. Die Prüfkraft wurde über einen Hydraulikzylinder aufgebaut. Die Prüfkraften wurden über Hydraulikspannbacken in den Prüfkörper eingeleitet. Die Prüfeinrichtung ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Der Druck der Spannbacken wurde während der Versuchsdauer konstant gehalten.

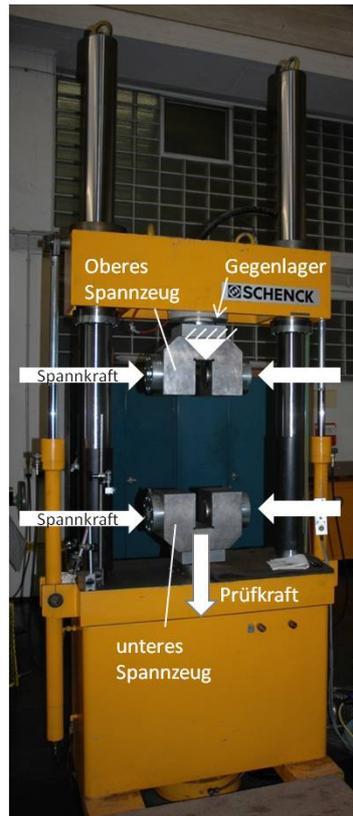
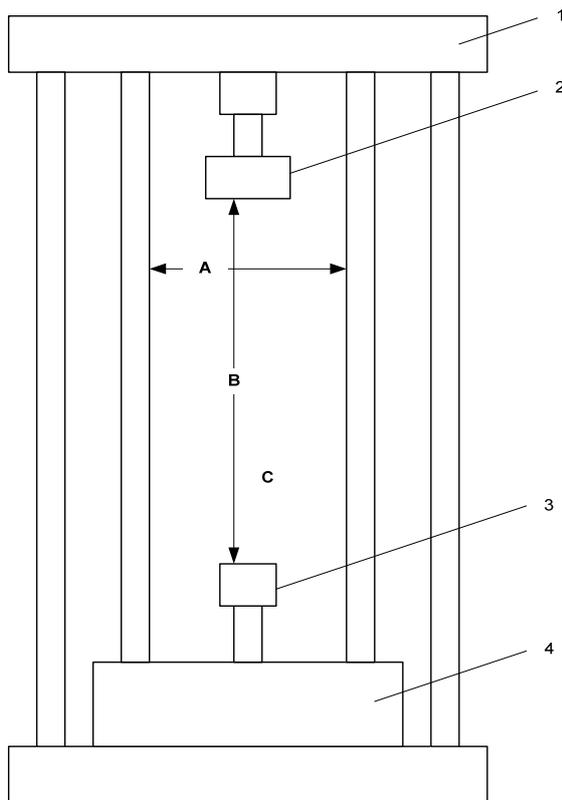


Abbildung 2.7: Prüfmaschine der MPA Stuttgart

#### 2.4.2 Prüfeinrichtung KIT, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Die vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführten Ermüdungsversuche wurden auf einer servohydraulischen Prüfmaschine, Fabrikat Instron (maximale Prüfkraft 250 kN), an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (VA, KIT Stahl- und Leichtbau) durchgeführt. Die Prüfkraft wurde über einen Hydraulikzylinder aufgebracht und über Hydraulikspannbacken in den Prüfkörper eingeleitet. Eine Skizze der Prüfeinrichtung ist in Abbildung 2.8 und der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Der Druck der Spannbacken wurde während der Versuchsdauer konstant gehalten.



- 1 starre Traverse
- 2 oberer Spannkopf
- 3 unterer Spannkopf
- 4 Grundplatte

Abbildung 2.8: Skizze der Prüfeinrichtung



Abbildung 2.9: Versuchsaufbau

## 2.5 Versuchsserie 1

### 2.5.1 Durchführung Versuchsserie 1

Anhand der in Serie 1 durchgeführten Versuche wurde eine Referenzbauteilwöhlerkurve für die vorliegenden Prüfkörper im unbehandelten Zustand ermittelt. Die Ergebnisse der Serie 1 bestätigen, dass die an der MPA Stuttgart durchgeführten Versuche und die an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine durchgeführten Versuche vergleichbare Ergebnisse liefern. Ein merklicher Einfluss der eingesetzten Prüfmaschine auf die erzielten Ergebnisse kann dadurch ausgeschlossen werden. Die Versuchsergebnisse liegen in einem engen Streuband. In beiden Prüflaboren wurden jeweils fünf Ermüdungsversuche durchgeführt. Als Abbruchkriterium wurde der Prüfkörperbruch bzw. ein Erreichen von  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln (Durchläufer) festgelegt. Die Festlegung von  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln beruht auf der Regelung aus dem Hintergrunddokument zu DIN EN 1993-1-9 [6], dass Lastwechselzahlen größer  $2 \cdot 10^6$  nicht in die statistische Auswertung einbezogen und als Durchläufer deklariert werden. Serie 1 diente außerdem dazu, die Wegzunahme abhängig vom Risswachstum bei gleichbleibender Maschinenkraft zu ermitteln.

Anhand dieser Werte konnten die oberen und unteren Weggrenzen der Prüfmaschine festgelegt werden, um damit in Serie 4 den laufenden Versuch bei einem definierten technischen Anriss zu unterbrechen.

### 2.5.2 Ergebnisse Versuchsserie 1

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind in Tabelle 2.3 dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse wurden unter Anwendung der oben beschriebenen Abbruchkriterien ermittelt. Aufgrund der hier vorliegenden scharfen Kerbe am Schweißnahtübergang der Kehlnaht, und der damit verbundenen großen Rissfortschrittsgeschwindigkeit, liegen die Anrisslastwechselzahl und die Bruchlastwechselzahl dicht beieinander. Typische Bruchbilder sind in Abbildung 2.10 bis Abbildung 2.13 dargestellt. Die Auswertung mit einer variablen Steigung  $m = 2,96$  ergibt einen Einhängewert der Wöhlerkurve von  $\Delta\sigma_c = 77,9 \text{ N/mm}^2$ , siehe Abbildung 2.14. Bei einer Auswertung mit der im Hintergrunddokument festgelegten Steigung von  $m = 3$  liegt der Einhängewert der Wöhlerkurve bei  $\Delta\sigma_c = 81,4 \text{ N/mm}^2$ , siehe Abbildung 2.15. In DIN EN 1993-1-9 [1] wird dem Kerbdetail „Quersteife“ der Kerbfall  $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$  zugeordnet.



Abbildung 2.10: Anriss Pk. 1.1.5



Abbildung 2.11: Seitenansicht Anriss Pk. 1.1.5

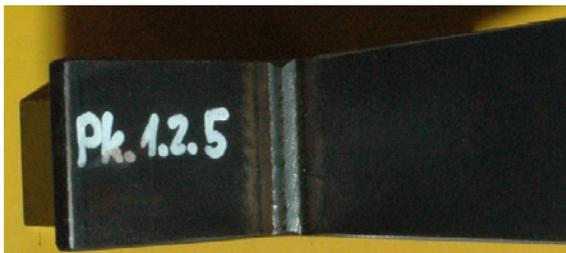


Abbildung 2.12: Ansicht Pk. 1.2.5

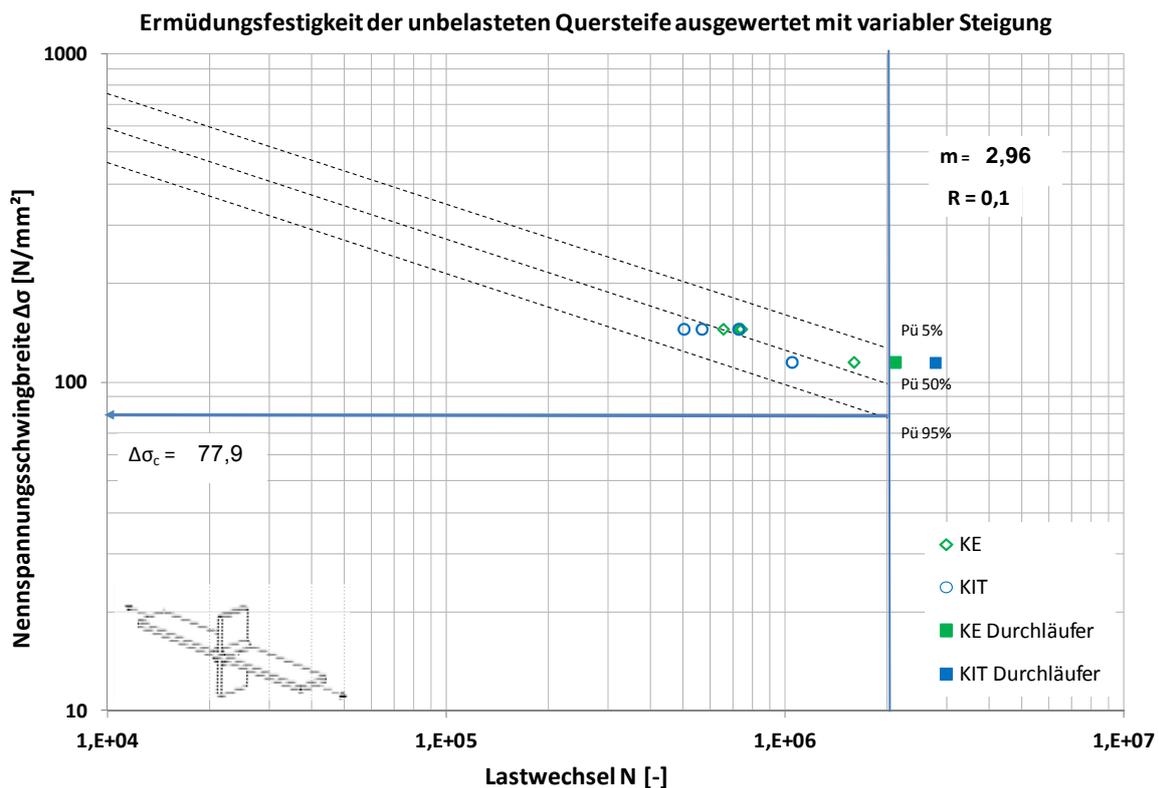


Abbildung 2.13: Bruchfläche Pk. 1.2.5

Tabelle 2.3: Zusammenstellung der Ergebnisse aus Versuchsserie 1

Probekörper	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Lastwechselzahl $N_B$
Pk. 1.1.1	115	1.595.326
Pk. 1.1.2	115	2.110.137 *
Pk. 1.1.3	145	729.729
Pk. 1.1.4	145	742.607
Pk. 1.1.5	145	656.423
Pk. 1.2.1	115	2.765.362 *
Pk. 1.2.2	115	1.046.921
Pk. 1.2.3	145	502.255
Pk. 1.2.4	145	728.210
Pk. 1.2.5	145	567.471

\* Durchläufer ohne Bruch

Abbildung 2.14: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 1;  $m = 2,96$

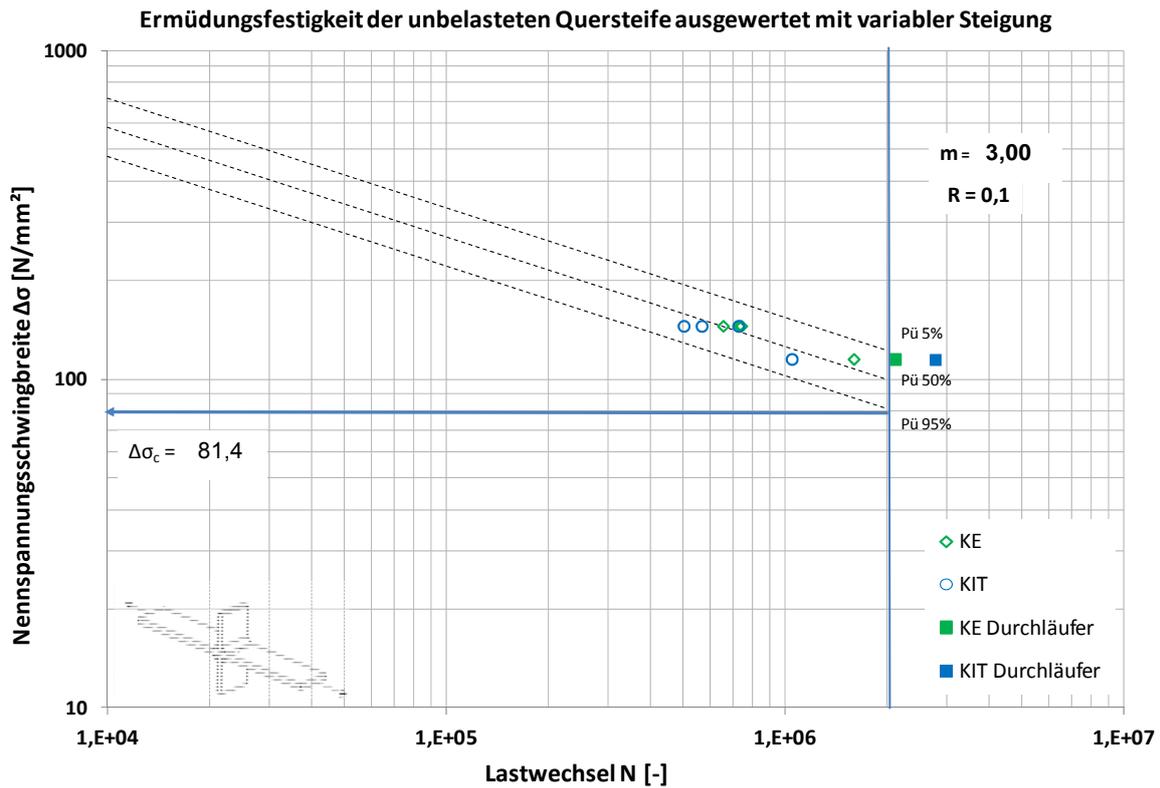


Abbildung 2.15: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 1; m = 3

## 2.6 Versuchsserie 2

## 2.6.1 Durchführung der Versuchsserie 2

In Serie 2 wurden Ermüdungsversuche an HFH-behandelten Prüfkörpern durchgeführt. Die Nachbehandlung wurde nach dem Planfräsen der Schnittflächen durchgeführt. Nachbehandelt wurden ausschließlich die ermüdungskritischen Schweißnahtübergänge am durchgehenden Grundblech, siehe Abbildung 2.16 und Abbildung 2.17.

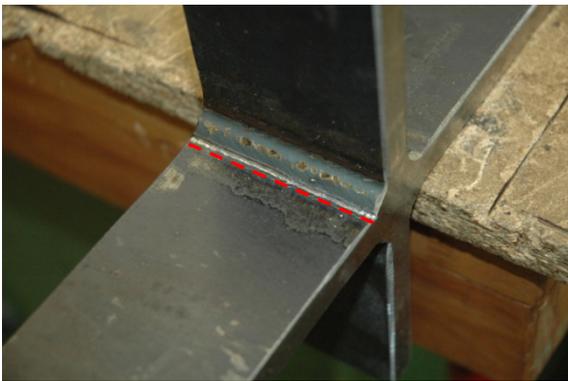


Abbildung 2.16: Lage der nachbehandelten Schweißnahtübergänge



Abbildung 2.17: Durchführung der Nachbehandlung

Am KIT wurde eine Versuchsreihe mit Probekörpern, die mit dem HiFIT-Verfahren nachbehandelt wurden, geprüft. Die zweite Versuchsreihe wurde an der MPA Stuttgart an Probekörpern, die mit der PIT-Technologie nachbehandelt wurden, geprüft. Die Nachbehandlung wurde von den Geräteherstellern im Beisein der Projektbeteiligten durchgeführt. Die Nachbehandlungsparameter sind in Tabelle 2.4 zusammengestellt. Die ausführlichen Behandlungsprotokolle sind in Anhang B aufgeführt.

Tabelle 2.4: Behandlungsparameter

Behandlungsparameter	HiFIT	PIT
Versorgungsluftdruck [bar]	5 - 7	5 - 7
Frequenz [Hz]	ca. 180	90 (Stufe 2)
Vorschub [mm/s]	3,5 - 5	3,5 - 5,0
Intensitätseinstellung [°]	160	-
Vorschubwinkel stechend [°]	70 - 90	80 - 110
Neigung zum Grundmaterial [°]	60 - 80	60 - 80
<i>Pin</i> durchmesser / Bolzendurchmesser [mm]	3	4
<i>Pin</i> form / Bolzenform [mm]	$R = 1,5$	$R = 2$

Durch die Nachbehandlung wurde seitlich der Nachbehandlungszone ein Grat aufgeworfen, siehe Abbildung 2.18 und Abbildung 2.19. Dieser wurde mit einer Schlichtfeile vor Versuchsbeginn entfernt. In den Abbildungen ist außerdem deutlich zu erkennen, dass die Oberfläche der PIT-Nachbehandlung in der Nachbehandlungszone rauer ist als die Oberfläche in der HiFIT-Nachbehandlungszone.

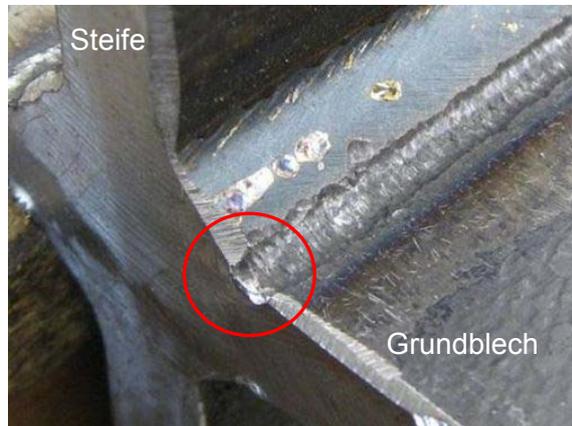


Abbildung 2.18: PIT-nachbehandelter Versuchskörper mit seitlichem Grat



Abbildung 2.19: HiFIT-nachbehandelter Versuchskörper mit seitlichem Grat

## 2.6.2 Versuchsergebnisse Serie 2.1

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind in Tabelle 2.5 dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf das bereits für Serie 1 definierte Abbruchkriterium. Der Bruchausgang lag bei allen Prüfkörpern in der Nachbehandlungsspur am Schweißnahtübergang. Typische Bruchbilder sind in Abbildung 2.20 und Abbildung 2.21 dargestellt. Bei einer Auswertung nach dem Verfahren des Hintergrunddokuments zu EN 1993-1-9 [6] wird die Steigung zu  $m = 3$  festgelegt. Da bei Versuchen an nachbehandelten Proben die Ermüdungsfestigkeitskurven in der Regel flacher verlaufen, erfolgen die nachfolgenden Auswertungen mit variabler Steigung. Abbildung 2.22 zeigt die Auswertung der Serie 2.1 mit einer Steigung von  $m = 11,8$ . Für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95% ermittelt sich der Einhängewert der Wöhlerkurve bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln zu  $\Delta\sigma_c = 179,1 \text{ N/mm}^2$ .

Tabelle 2.5: Übersicht Ergebnisse Versuchsreihe 2.1

Probekörper	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Lastwechselzahl $N_{\text{Bruch}}$
Pk. 2.1.1	175	2.000.006 *
Pk. 2.1.2	250	109.229
Pk. 2.1.3	200	2.000.001 *
Pk. 2.1.4	225	813.288
Pk. 2.1.5	225	783.730
Pk. 2.1.6	225	294.931
Pk. 2.1.7	250	107.611
Pk. 2.1.8	200	1.257.559
Pk. 2.1.9	200	2.000.000 *
Pk. 2.1.10	250	117.273

\* Durchläufer ohne Bruch



Abbildung 2.20: Bruchausgang Pk. 2.1.2



Abbildung 2.21: Seitenansicht Pk. 2.1.2

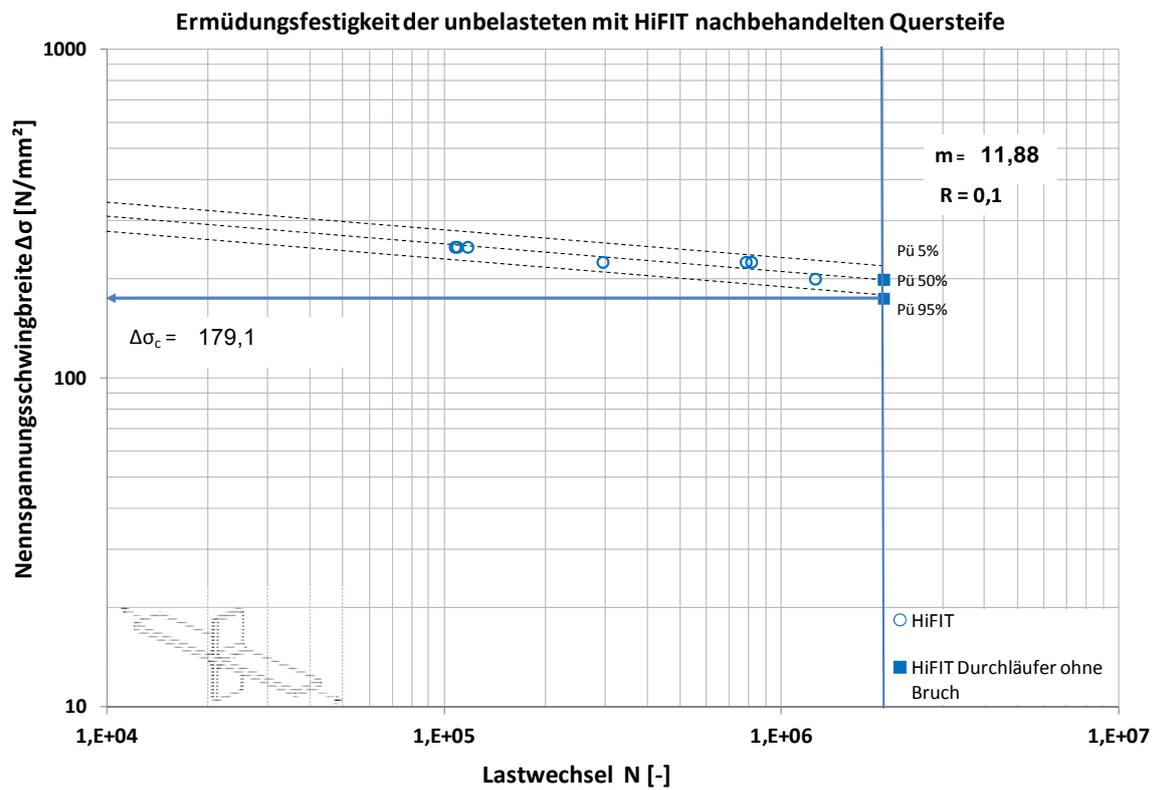


Abbildung 2.22: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 2.1;  $m = 11,88$

### 2.6.3 Versuchsergebnisse Serie 2.2

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind in Tabelle 2.6 dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf das bereits für Serie 1 definierte Abbruchkriterium. Der Bruchausgang lag bei allen Prüfkörpern in der Nachbehandlungsspur am Schweißnahtübergang. Typische Bruchbilder sind in Abbildung 2.23 und Abbildung 2.24 dargestellt. Bei einer Auswertung nach dem Verfahren des Hintergrunddokuments zu EN 1993-1-9 [6] wird die Steigung zu  $m = 3$  festgelegt. Da bei Versuchen an nachbehandelten Proben die Ermüdungsfestigkeitskurven in der Regel flacher verlaufen, erfolgen die nachfolgenden Auswertungen mit variabler Steigung. Abbildung 2.25 zeigt die Auswertung der Serie 2.2 mit einer Steigung von  $m = 11,9$ . Für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95% ermittelt sich der Einhängewert der Wöhlerkurve bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln zu  $\Delta\sigma_c = 169,5 \text{ N/mm}^2$ .

Tabelle 2.6: Übersicht Ergebnisse Versuchsreihe 2.2

Probekörper	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Lastwechselzahl $N_{\text{Bruch}}$
Pk. 2.2.1	200	2.050.000 *
Pk. 2.2.2	200	2.050.000 *
Pk. 2.2.3	225	1.501.728
Pk. 2.2.4	250	164.734
Pk. 2.2.5	175	2.545.211 *
Pk. 2.2.6	225	2.007.320 *
Pk. 2.2.7	225	2.781.478 *
Pk. 2.2.8	250	109.652
Pk. 2.2.9	200	1.425.410
Pk. 2.2.10	250	133.288

\* Durchläufer ohne Bruch



Abbildung 2.23: Bruchfläche mit markiertem Bruchausgang Pk. 2.2.9

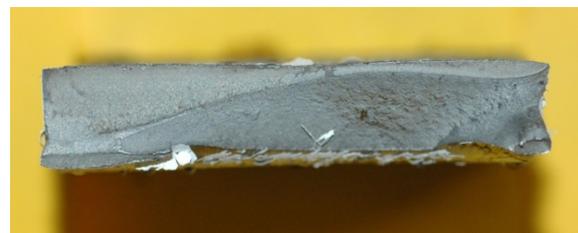


Abbildung 2.24: Bruchfläche Pk. 2.2.9

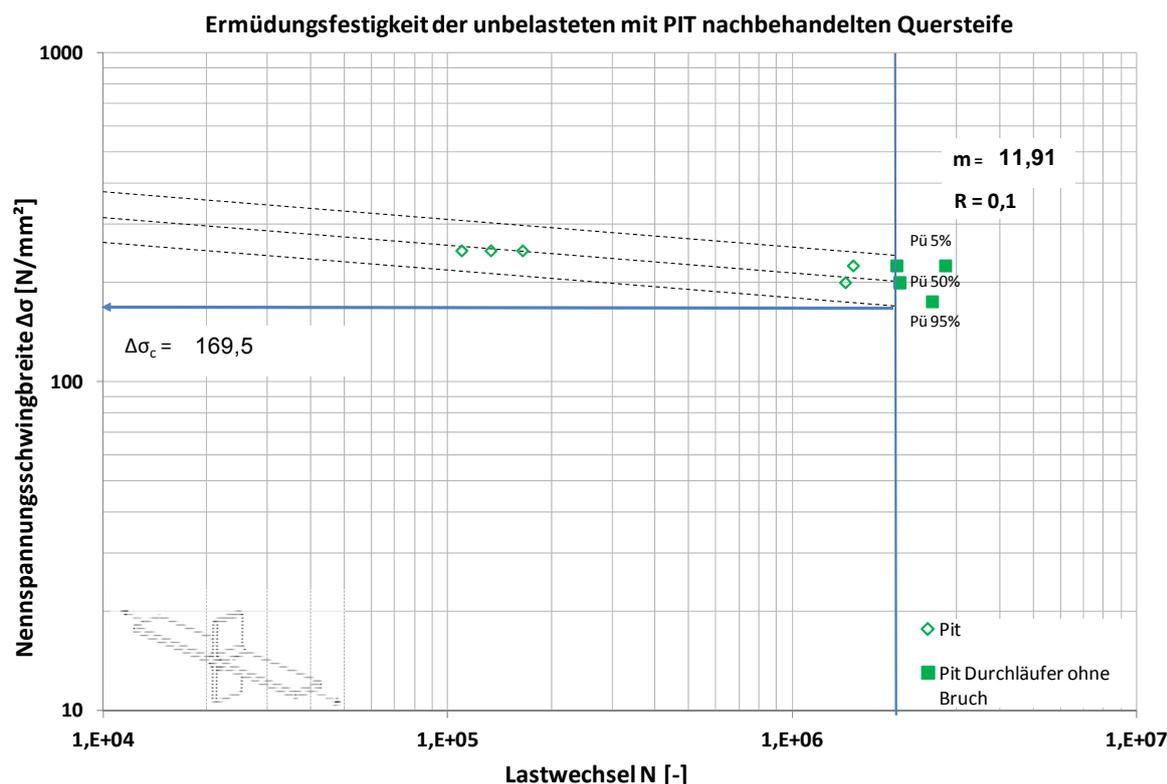


Abbildung 2.25: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 2.2;  $m = 11,91$

#### 2.6.4 Bewertung der Versuchsergebnisse

Bei Betrachtung der Versuchsergebnisse der Serie 2 ist auffällig, dass für beide HFH-Verfahren sowohl die Neigungen der Wöhlerkurven als auch die Einhängewerte bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln sehr dicht beieinander liegen. Die Abweichung der untersuchten Verfahren liegt bei unter 7 %. Die Ergebnisse zeigen, dass die beiden untersuchten Nachbehandlungsverfahren gleichwertige Ergebnisse liefern. Die zuvor separat dargestellten Ergebnisse der Serie 2 wurden in einem weiteren Wöhlerdiagramm gemeinsam ausgewertet. Die Wöhlerkurve mit einer freien Neigung von  $m = 11,8$  und einem Einhängewert von  $\Delta\sigma_c = 182,3$  N/mm<sup>2</sup> bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln ist in Abbildung 2.26 dargestellt. Gegenüber den Versuchsergebnissen der Serie 1 sowie dem Kerbfall nach DIN EN 1993-1-9 [1] ergibt sich eine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit um den Faktor 2,3 bezogen auf den Einhängewert bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln.

Die im Vergleich zu Ergebnissen für höherfeste Stähle ermittelte flachere Neigung (siehe Tabelle 2.7) deutet eine Verringerung des Effektes der Nachbehandlung im Bereich der Kurzzeitfestigkeit an. Dies deckt sich mit der Theorie, dass bei einem Stahl mit einer niedrigeren Streckgrenze die eingebrachten Druckeigenstressungen kleiner sind, als die Druckeigenstressungen die bei höherfesten Baustählen eingebracht werden können. Das resultierende Zugspannungsniveau liegt bei gleicher äußerer Beanspruchung aufgrund des geringeren Eigenstressungseintrages somit höher.

Tabelle 2.7: Übersicht der Wöhlerkurvenneigungen aus Versuchen abgeschlossener Projekte

Konstruktionsdetail	Verfahren	Material	Neigung m
Quersteife [10] t = 12mm	PIT	S355J2	12,8
Quersteife [12] t = 30mm	UIT	S460M	6,3
Quersteife [10] t = 12mm	PIT	S690QL	7,0
Längssteife [3] t = 16mm	HiFIT / UIT	S355J2	5,0
Längssteife [3] t = 16mm	HiFIT / UIT	S690 QL	4,0
Stumpfstoß [3] t = 16mm	HiFIT / UIT	S355J2	6,0
Stumpfstoß [3] t = 16mm	HiFIT / UIT	S690 QL	3,0

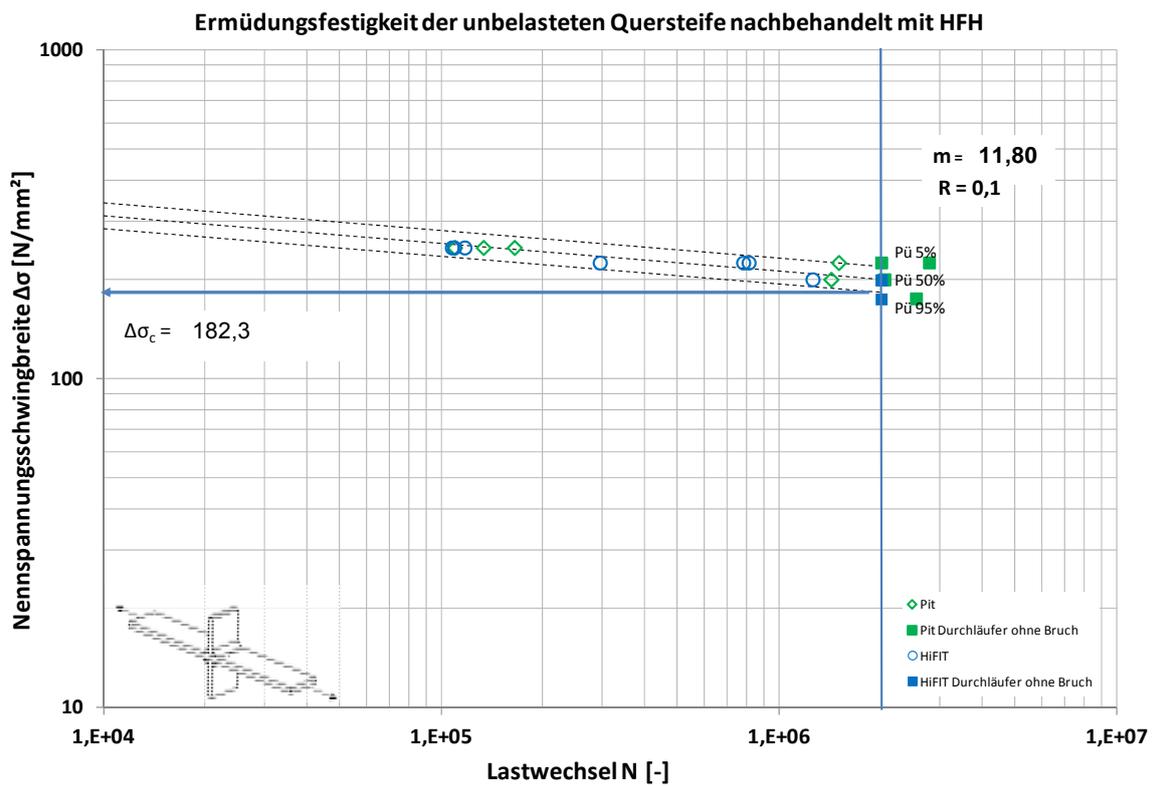


Abbildung 2.26: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 2, gemeinsame Auswertung; m = 11,80

## 2.7 Versuchsserie 3

### 2.7.1 Durchführung der Versuchsserie 3

Anhand Serie 3 wurde die Möglichkeit der Lebensdauererlängerung von bereits bis zur rechnerischen Lebensdauer vorbeanspruchten Schweißkonstruktionen untersucht. Die Probekörper wurden im geschweißten Zustand vorbeanspruchte. Es wurden drei Spannungsschwingbreitenniveaus gewählt und für diese die rechnerische Bruchlastwechselzahl  $N_{B1}$  für die erste Belastungsstufe bestimmt (Belastungsstufe 1). Die rechnerischen Bruchlastwechselzahlen  $N_{B1}$  wurden anhand der aus Serie 1 ermittelten Wöhlerkurve für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95% ermittelt. Die rechnerischen Bruchlastwechselzahlen  $N_{B1}$  sind in Tabelle 2.8 zusammengestellt.

Nach der zyklischen Vorbelastung bis zum Erreichen von  $N_{B1}$  wurden die Prüfkörper ausgebaut, mit dem jeweiligen HFH-Verfahren nachbehandelt und bis zum Prüfkörperbruch weiterbelastet (Belastungsstufe 2). Es wurden 10 HiFIT-behandelte Prüfkörper am KIT sowie 10 PIT-behandelte Prüfkörper an der MPA Stuttgart geprüft. Bei Erreichen von  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln wurden die Versuche abgebrochen und gemäß [6] als Durchläufer deklariert. Im Verlaufe der Versuchsserie zeigte sich, dass die für die Vorbeanspruchung gewählten Spannungsschwingbreitenniveaus (Belastungsstufe 1) zu niedrig angesetzt waren und größtenteils Durchläufer erzielt wurden, die nicht in die Auswertung mit eingehen. Im Sinne einer aussagekräftigen statistischen Auswertung wurde bei je 3 Prüfkörpern je Verfahren die Belastungsstufe 2 auf  $225 \text{ N/mm}^2$  erhöht.

Tabelle 2.8: Rechnerische Bruchlastwechselzahlen abhängig von der Spannungsschwingbreite

Anzahl der Prüfkörper je Spannungsschwingbreitenniveau	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Rechnerische Bruchlastwechselzahl $N_{B1}$
3	145	364.535
4	175	208.143
3	200	139.813

### 2.7.2 Versuchsergebnisse Serie 3

Die einzelnen Belastungsstufen und die zu jeder Belastungsstufe gehörenden Lastwechselzahlen für die entsprechenden Beanspruchungsniveaus sind in Tabelle 2.9 und Tabelle 2.10 zusammengestellt. Bei den grau schraffierten Versuchskörpern wurde die Belastungsstufe 2 aus dem zuvor genannten Grunde erhöht. Die zu den Ergebnissen gehörenden Diagramme, siehe Abbildung 2.27 und Abbildung 2.28, zeigen für jedes Verfahren getrennt dargestellt, die Lastwechselzahlen für beide Belastungsstufen auf den jeweiligen Spannungsschwingbreitenniveaus. Die durch die Kreise markierten Versuchsergebnisse zeigen die gesamten Lastwechselzahlen aus der Belastungsstufe 1 addiert mit denen der Belastungsstufe 2. Die durch Kreuze markierten Ergebnisse zeigen lediglich die Lastwechselzahlen der Belastungsstufe 1. Die durch Quadrate markierten Ergebnisse repräsentieren die Durchläufer. In den Diagrammen sind teilweise die Kreuze mit den zugehörigen Kreisen durch Linien verbunden. Dies soll zeigen, bei welchen Versuchskörpern die Spannungsschwingbreite erhöht wurde.

Tabelle 2.9: Belastungsstufen und erreichte Lastwechselzahl Versuchsreihe 3.1

Prüfkörper	Belastungsstufe 1		Belastungsstufe 2	
	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_1$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Lastwechselzahl $N_{B1}$	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_2$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchlastwechselzahl $N_{B2}$
Pk. 3.1.1	145	364.535	145	2.000.000*
Pk. 3.1.2	145	364.535	225	326.270
Pk. 3.1.3	145	364.535	225	139.228
Pk. 3.1.4	175	208.143	175	2.170.338*
Pk. 3.1.5	175	208.143	175	866.561
Pk. 3.1.6	175	208.143	175	2.000.000*
Pk. 3.1.7	175	208.143	225	585.308**
Pk. 3.1.8	200	139.813	200	2.000.000*
Pk. 3.1.9	200	139.813	200	2.000.000*
Pk. 3.1.10	200	139.813	200	1.773.533

\* Durchläufer ohne Bruch

\*\* Bruch im Grundmaterial nahe Einspannung

Ermüdungsfestigkeit der unbelasteten Quersteife HiFIT Nachbehandlung nach der Belastungsstufe 1

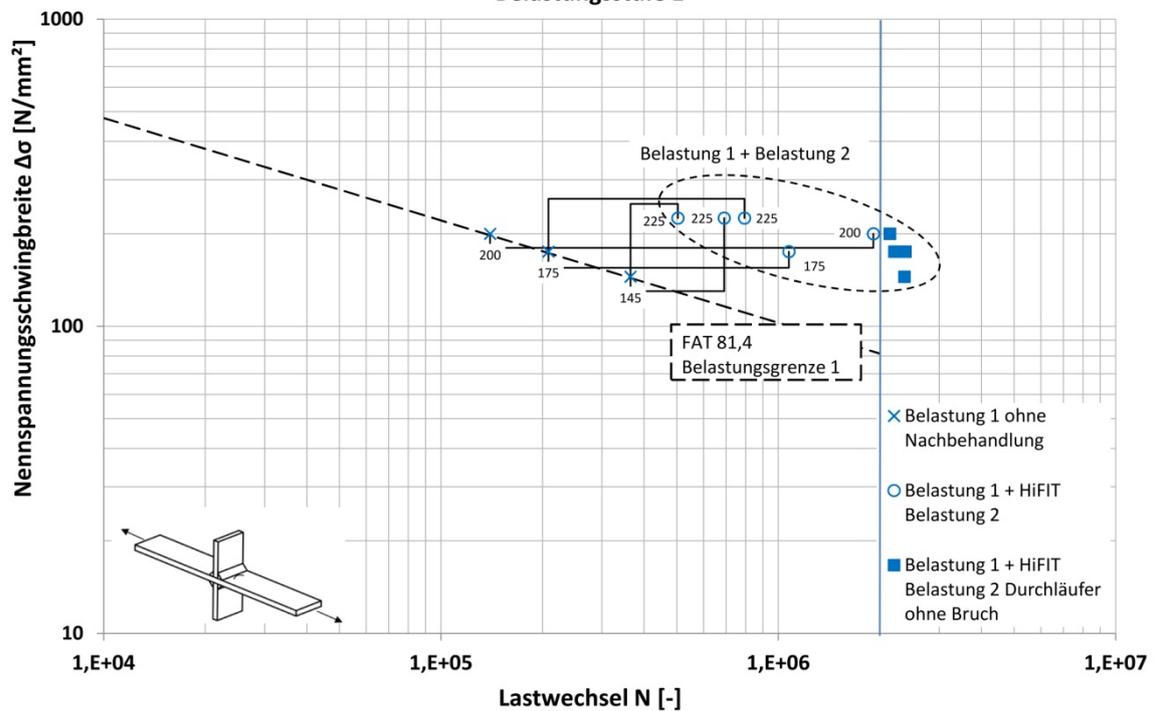


Abbildung 2.27: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 3.1

Tabelle 2.10: Belastungsstufen und erreichte Lastwechselzahl Versuchsreihe 3.2

Prüfkörper	Belastungsstufe 1		Belastungsstufe 2	
	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_1$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Lastwechselzahl $N_{B1}$	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_2$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruch-Lastwechselzahl $N_{B2}$
Pk. 3.2.1	145	364.535	145	2.000.000*
Pk. 3.2.2	145	364.535	225	827.159
Pk. 3.2.3	145	364.535	225	1.263.781
Pk. 3.2.4	175	208.143	175	2.000.000*
Pk. 3.2.5	175	208.143	175	2.000.000*
Pk. 3.2.6	175	208.143	175	2.000.000*
Pk. 3.2.7	200	139.813	225	281.150
Pk. 3.2.8	200	139.813	200	1.707.853
Pk. 3.2.9	200	139.813	200	2.000.000*
Pk. 3.2.10	200	139.813	200	2.000.000*

\* Durchläufer ohne Bruch

\*\* Bruch im Grundmaterial nahe Einspannung

Ermüdungsfestigkeit der unbelasteten Quersteife PIT Nachbehandlung nach der Belastungsstufe 1

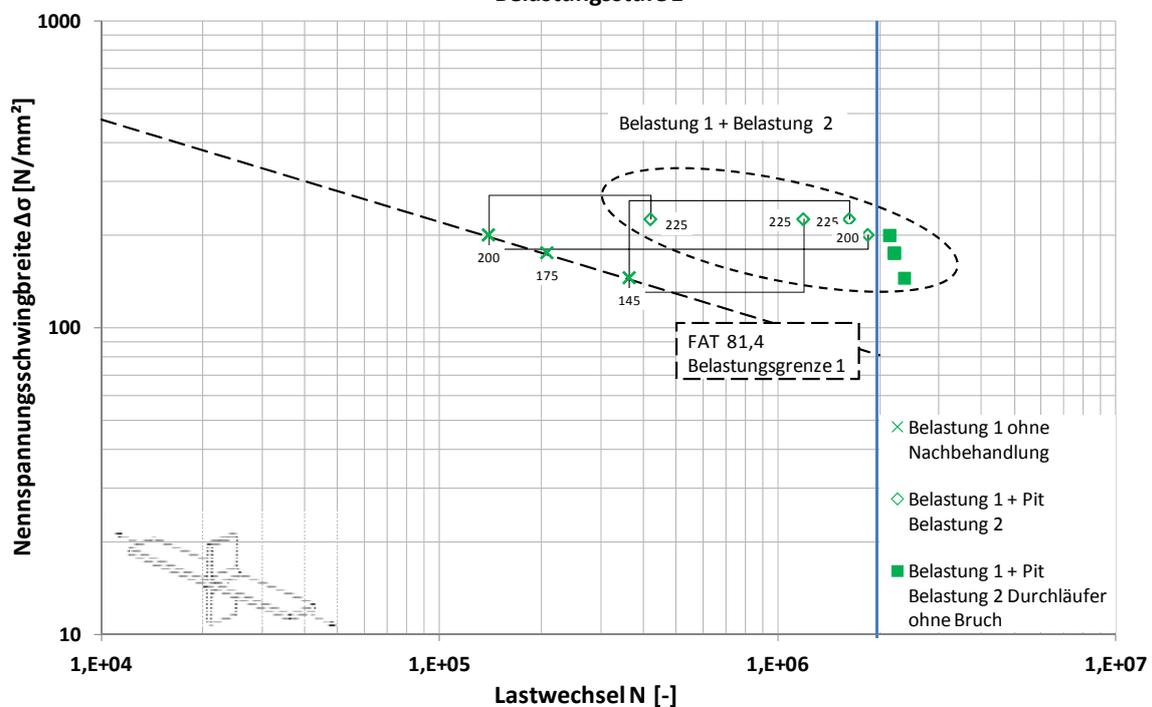
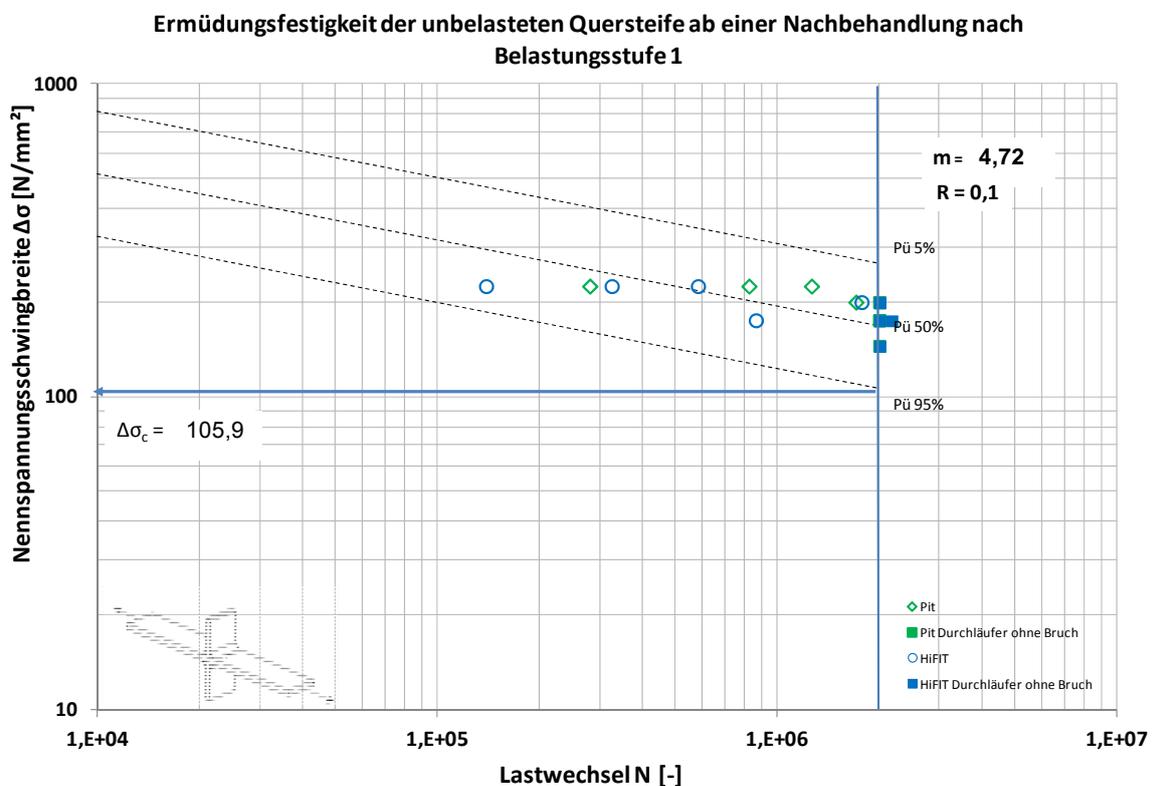


Abbildung 2.28: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 3.2

### 2.7.3 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Serie 2 zeigen, dass die Anwendung beider Nachbehandlungsverfahren zu einer vergleichbaren Steigerung der Ermüdungsfestigkeit führt. Deshalb wurden die Ergebnisse beider Verfahren der Serie 3 gemeinsam statistisch ausgewertet. Abbildung 2.29 zeigt die Ergebnisse der Serien 3.1 und 3.2 gemeinsam in einem Diagramm für die Belastungsstufe 2 ausgewertet. Die Wöhlerkurve gibt den nach einer Lebensdauererweiterungsmaßnahme durch HFH anzusetzenden Kerbfall an, wenn die HFH-Behandlung bei Erreichen der rechnerischen Lebensdauer durchgeführt wird. Die Neigung der Wöhlerkurve verläuft mit  $m = 4,72$  deutlich steiler gegenüber der in Serie 2 ermittelten Steigung. Der Einhängewert  $\Delta\sigma_c = 105,9 \text{ N/mm}^2$  bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln liegt niedriger als in Serie 2, aber dennoch geringfügig höher als der in Serie 1 an unbelasteten Referenzproben erzielte Wert von  $\Delta\sigma_c = 81,4 \text{ N/mm}^2$ . Die Lebensdauer konnte bei den durchgeführten Versuchen somit nach der ersten Belastungsgeschichte durch die HFH-Behandlung wieder auf den Ursprungswert eines unbelasteten Kerbdetails zurückgesetzt werden und somit in den Zustand eines Neuteils versetzt werden.



## 2.8 Versuchsserie 4

### 2.8.1 Durchführung der Versuchsserie 4

Die Serie 4 soll ein instandgesetztes Bauteil abbilden, in dem bereits unter der vorliegenden Betriebsbelastung ein Ermüdungsanriss entstanden war. Dieser Ermüdungsanriss sei zum Beispiel bei einer Bauwerksinspektion detektiert und im Rahmen einer Instandsetzung reparaturgeschweißt worden. Bekanntermaßen liegt nach einer Reparaturschweißungsmaßnahme eine geringere Ermüdungsfestigkeit als bei Neubauten vor und die Ermüdungsrisse entstehen häufig wieder an derselben Stelle. In Serie 4 wurde deshalb die Möglichkeit der Ermüdungsfestigkeitssteigerung durch HFH an reparaturgeschweißten Nähten untersucht.

Es wurde analog der zuvor geprüften Serien das Konstruktionsdetail der unbelasteten Quersteife untersucht. Die Versuchskörper wurden in Belastungsstufe 1 bis zum technischen Anriss beansprucht. Die Anrisstiefe betrug 1,5 – 6 mm an den Schweißnahtübergängen. Im Anschluss an Belastungsstufe 1 wurden die Prüfkörper aus der Prüfmaschine ausgebaut. An die Prüfkörper wurden An- und Auslaufbleche angeschweißt. Als An- und Auslaufbleche wurden Winkelstähle verwendet, die an der unbelasteten Quersteife angeheftet wurden, um Heftstellen am später wieder zu belastenden Grundblech zu vermeiden, siehe Abbildung 2.30.



Abbildung 2.30: An- und Auslaufwinkel



Abbildung 2.31: PT-Prüfung

Nach dem Anschweißen der An- und Auslaufbleche wurden die Risse an den Schweißnahtübergängen mit einem Winkelschleifer bis zum Rissgrund ausgeschliffen. Es wurden lediglich die Schweißnahtübergänge ausgeschliffen, an denen durch eine Sichtkontrolle Anrisse erkennbar waren. Vor der zyklischen Belastung in Belastungsstufe 1 wurden die Prüfkörper im Bereich der Schweißnähte mit Farbe weiß gefärbt, um Anrisse besser erkennen zu können. Die Nahtvorbereitung für die Reparaturschweißung wurde auch bis in die An- und Auslaufbleche verlängert, siehe Abbildung 2.31. Durch Magnetpulverprüfung (MT) und Farbeindringprüfung (PT) wurde am Grund der Schweißnahtvorbereitung überprüft, ob die Rissspitze vollständig ausgeschliffen wurde. Nach der Reinigung der Prüfkörper wurde die Reparaturschweißung mit dem MAG-Verfahren ausgeführt, anschließend wurden die An- und Auslaufbleche abgetrennt. An den entstandenen Schnittflächen wurden an ausgewählten Prüfkörpern Makroschliffe durchgeführt. Es zeigten sich teilweise vorhandene Wurzelbindefehler in der Reparaturschweißung, die auch durch eine Ultraschalluntersuchung bestätigt wurden, siehe Abbildung 2.32 und Abbildung 2.33.



Abbildung 2.32: Wurzelbindefehler



Abbildung 2.33: Wurzelbindefehler 200-fach vergrößert

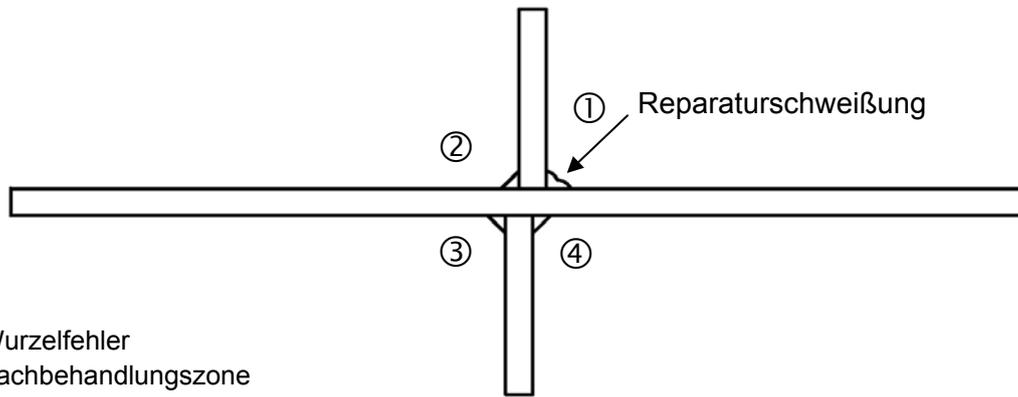
Da solch eine Unregelmäßigkeit nach DIN EN ISO 6580 [6] unzulässig ist, wurde bei allen Prüfkörpern dieser Serie die Reparaturschweißung nach einem erneuten Ausschleifen wiederholt. Dies entspricht dem prinzipiellen Vorgehen bei Sanierungsmaßnahmen und deckt den ungünstigsten Fall in der Praxis ab.

Nach dem Abtrennen der An- und Auslaufbleche wurden alle Schweißnahtübergänge zum Grundblech, auch die, an denen keine Reparaturschweißung durchgeführt wurde, HFH-behandelt. Lediglich an den Reparaturnähten selbst wurden alle Übergänge behandelt. Nach der HFH-Behandlung wurden die Prüfkörper wiederum in die Prüfmaschine eingebaut und in Belastungsstufe 2 bis zum Bruch geprüft.

### 2.8.2 Versuchsergebnisse Serie 4

Die in der Belastungsstufe 1 bis zum technischen Anriss der Prüfkörper erreichten Lastwechselzahlen und die Lastwechselzahlen aus der Belastungsstufe 2 bis zum Prüfkörperbruch sind in Tabelle 2.11 und Tabelle 2.12 zusammengestellt. Bei den Versuchen traten die Anrisse an den reparaturgeschweißten Nähten ① sowie auch an den gegenüberliegenden Nähten ②③④ auf. Die Ermüdungsbrüche gingen von Wurzelfehlern (WF), der Nachbehandlungszone (NH) und von vorhandenen Rissen (Riss) aus, die durch die Nachbehandlung überhämmert wurden. Abbildung 2.34 zeigt die Lage der Ausgangspunkte der Prüfkörperbrüche.

In Abbildung 2.35 und Abbildung 2.36 sind die Lastwechselzahlen bis zum technischen Anriss und dem Prüfkörperbruch für die Serien 4.1 und 4.2 dargestellt. Die in den Diagrammen eingetragene Ermüdungsfestigkeitskurve für  $\Delta\sigma_c = 81 \text{ N/mm}^2$  bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln resultiert aus den Ergebnissen der Serie 1. Eingehend auf die verwendeten Symbole, zeigen die durch Kreuze markierten Ergebnisse die Belastungsstufe 1 und die nicht ausgefüllten Quadrate und Kreise die Belastungsstufe 2. Es ist zu erkennen, dass die Lastwechsel der Belastungsstufe 1 etwas über der in Serie 1 ermittelnden Ermüdungsfestigkeitskurve liegen. Die Ergebnisse des jeweiligen Prüfkörpers sind durch Linien verbunden.



WZ...Wurzelfehler  
 NH...Nachbehandlungszone  
 Riss...Riss bereits vor der Behandlung vorhanden

Abbildung 2.34: Lage des Bruchausganges

Tabelle 2.11: Belastungsstufen und erreichte Lastwechselzahlen Versuchsserie 4.1

Prüfkörper	Belastungsstufe 1		Belastungsstufe 2		Bruch- ausgang siehe Abbildung 2.34
	Spannungsschwing- breite $\Delta\sigma_1$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Last- wechsel $N_{B1}$	Spannungsschwing- breite $\Delta\sigma_2$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchlast- wechsel $N_{B2}$	
Pk. 4.1.2	175	342.915	175	484.344	① + WZ
Pk. 4.1.3	175	357.298	175	627.401	① + WZ
Pk. 4.1.4	200	191.277	200	361.410	② + Riss
Pk. 4.1.5	200	167.368	200	518.301	① + NH
Pk. 4.1.6	200	238.759	200	720.777	③ + Riss
Pk. 4.1.7	225	256.750	225	555.648	② + Riss
Pk. 4.1.8	225	174.681	225	284.592	① + NH
Pk. 4.1.9	225	112.929	225	100.873	① + NH
Pk. 4.1.10	225	91.106	225	260.442	① + NH
Pk. 4.1.11	175	365.383	175	2.000.000*	-

\* Durchläufer ohne Bruch

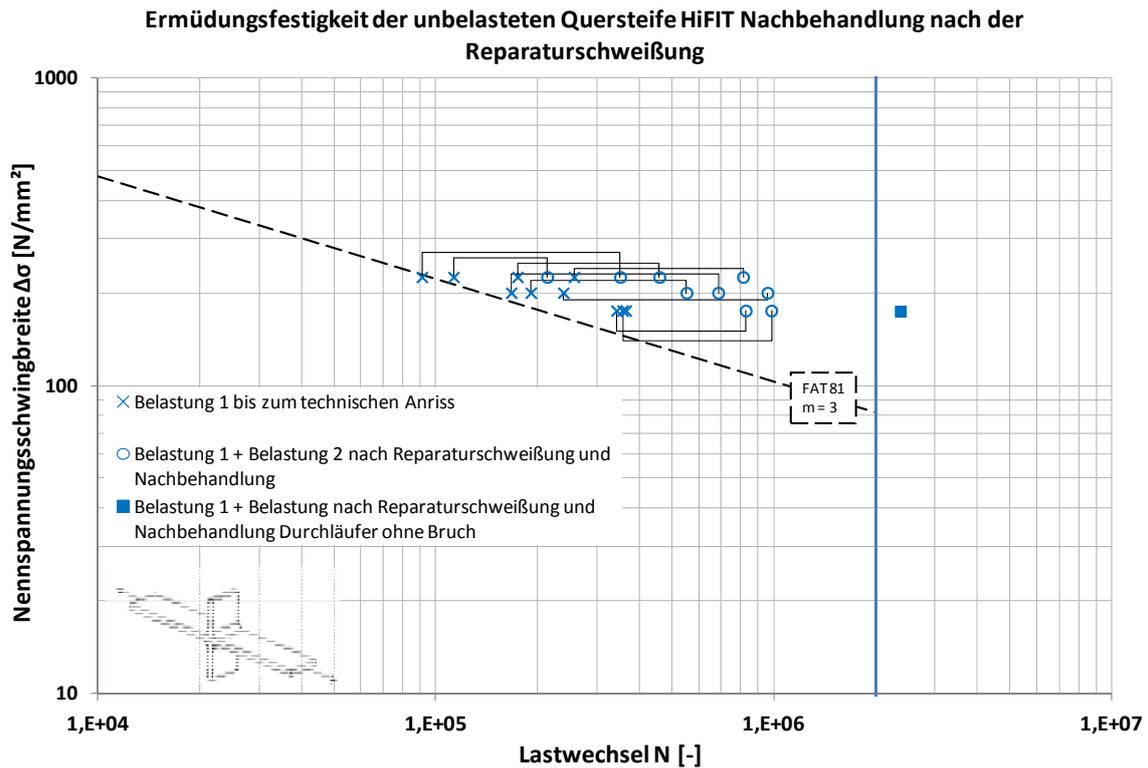


Abbildung 2.35: Belastungsstufe 1 und Belastungsstufe 2, Versuchsserie 4.1

Tabelle 2.12: Belastungsstufen und erreichte Lastwechselzahlen Versuchsserie 4.2

Prüfkörper	Belastungsstufe 1		Belastungsstufe 2		Bruchausgang siehe Abbildung 2.34
	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_1$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Lastwechsel $N_{B1}$	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_2$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchlastwechsel $N_{B2}$	
Pk. 4.2.1	175	287.334	175	2.000.000*	-
Pk. 4.2.2	175	297.790	175	2.000.000*	-
Pk. 4.2.3	175	328.725	175	2.000.000*	-
Pk. 4.2.4	200	195.118	200	128.015	③ + Riss
Pk. 4.2.5	200	168.070	200	1.946.914	③ + Riss
Pk. 4.2.6	200	182.242	200	423.840	② + NH
Pk. 4.2.7	225	111.808	225	213.192	① + WF
Pk. 4.2.8	225	131.058	225	192.924	③ + Riss
Pk. 4.2.9	225	127.313	225	175.126	③ + Riss
Pk. 4.2.10	225	145.676	225	15.995	③ + Riss

\* Durchläufer ohne Bruch

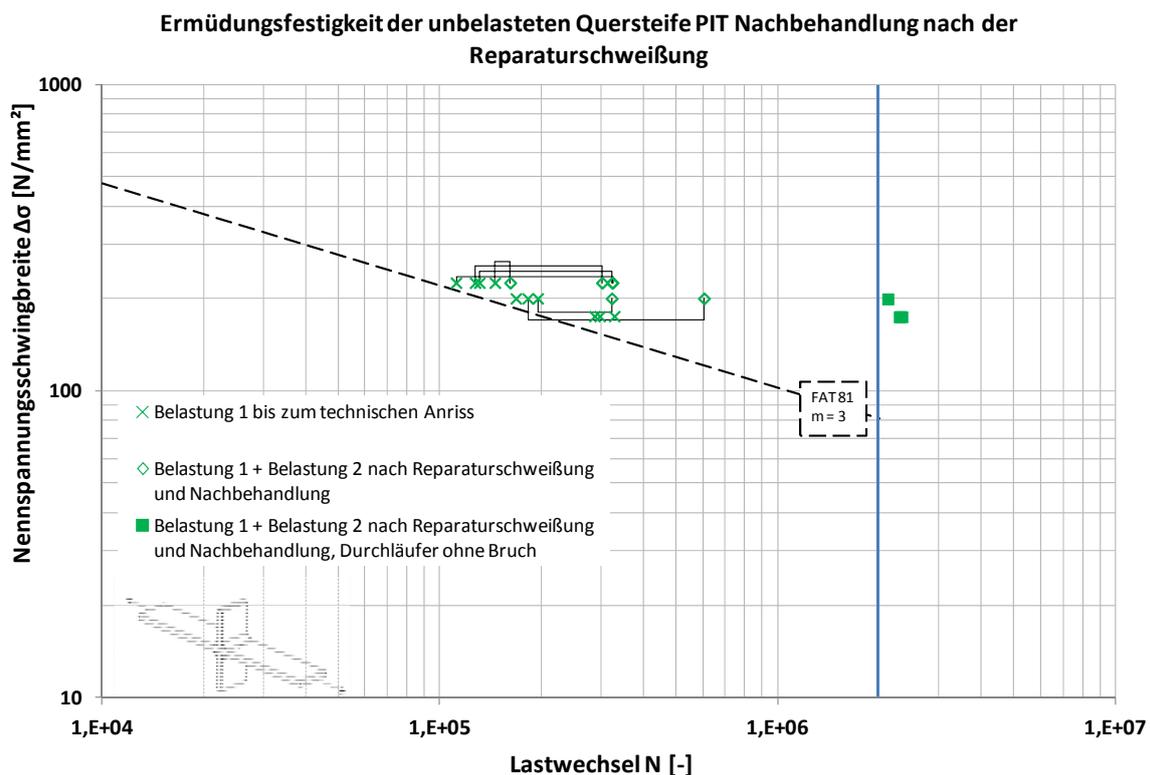


Abbildung 2.36: Belastungsstufe 1 und Belastungsstufe 2, Versuchserie 4.2

### 2.8.3 Bewertung der Bruchflächen

Nach dem Ende der Ermüdungsversuche wurden die Bruchflächen der Versuchskörper genauer untersucht um die Versuchsergebnisse zu bewerten. Die nachfolgend dargestellten Beschreibungen der Bruchflächen der Serie 4 treffen gleichermaßen für Versuchskörper zu, die mit HiFIT nachbehandelt wurden wie auch für Versuchskörper, die mit PIT nachbehandelt wurden.

Teilweise waren bei Versuchskörpern auf den Bruchflächen blaue Anlauffarben erkennbar. Diese Versuchskörper versagten auf der gegenüberliegenden Seite der reparaturgeschweißten Naht. In Abbildung 2.37 ist dargestellt, aus welcher Richtung die Bruchfläche in den nachfolgenden Abbildungen betrachtet wird. Abbildung 2.38 zeigt die zugehörige Ermüdungsbruchfläche, in der eine eindeutige blaue Verfärbung erkennbar ist. Desweiteren ist deutlich zu erkennen, an welchem Bereich der Ermüdungsbruch in den instabilen Restbruch übergeht. Der markierte Detailbereich wird in den nachfolgenden Abbildungen stufenweise vergrößert, um die Entstehung der Anlauffarben zu klären.

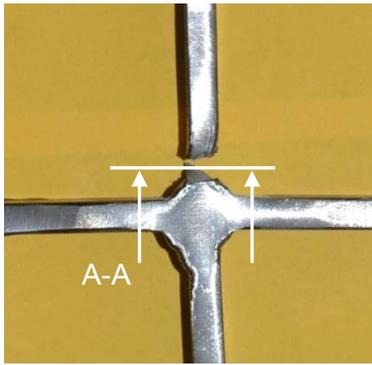


Abbildung 2.37: Betrachtungsrichtung

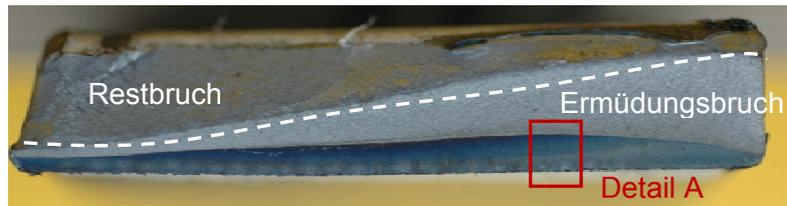


Abbildung 2.38: Ansicht A-A

Der in Abbildung 2.39 dargestellte vergrößerte Detailbereich A zeigt den Verlauf der Anlauffarben auf der Bruchfläche. Im Bereich 1 der Ermüdungsbruchfläche sind Anlauffarben zu erkennen, die von Grau in Kornblumenblau verlaufen. Nach [9] deutet dies auf einen Anlass-temperaturverlauf von 300°C bis 360°C hin. Der Farbübergang der kornblumenblauen Fläche verläuft schlagartig in den Bereich 2 ohne erkennbare Verlaufserscheinung. Abbildung 2.40 zeigt eine Darstellung unter dem Rasterelektronenmikroskop. Der Detailbereich 1 wurde im Randbereich aufgenommen und ist in Abbildung 2.41 vergrößert dargestellt. An der Bruchkante zeigen die starken Deformationen die Tiefenwirkung der Nachbehandlung.

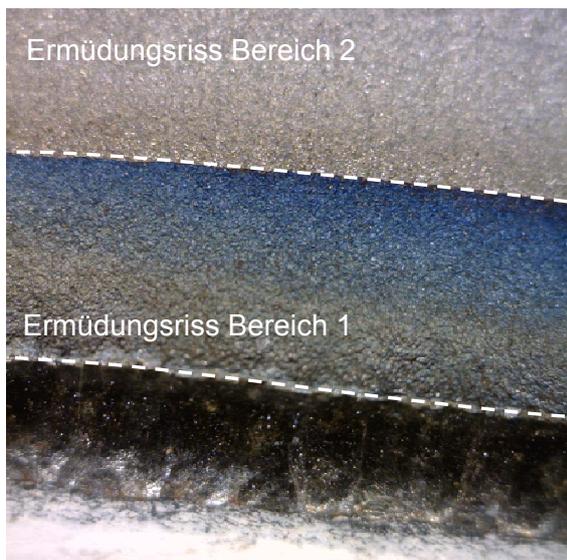


Abbildung 2.39: Vergrößerung Detail A

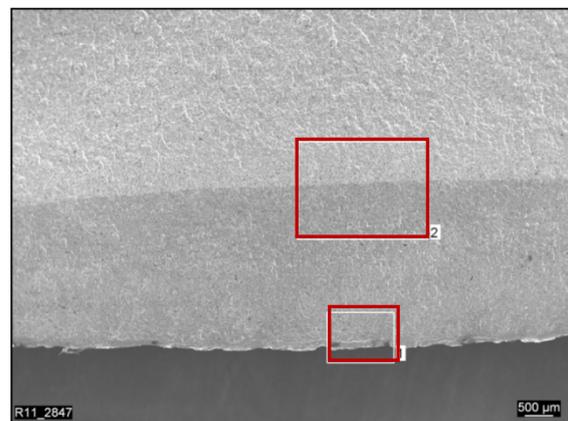


Abbildung 2.40: Übersichtsbild der Bruchfläche mit blau angelaufenem Anriß

Der Detailbereich 2 ist in Abbildung 2.42 stark vergrößert dargestellt und zeigt den Übergang von der kornblumenblauen Fläche in den Ermüdungsriß, Bereich 2, der keine Anlauffarben aufweist. Die Abstufungen der Rastlinien zeigen, dass an dieser Stelle eine Veränderung in der Schwingbeanspruchung stattgefunden hat. Dies ist durch den Ein- und Ausbau der Prüfkörper aus der Prüfmaschine zu erklären. Die Veränderung der Rastlinien zeigt somit, dass die Anlauffarben bei der Reparaturschweißung auf der gegenüberliegenden Seite der reparaturgeschweißten Naht entstanden sind. Die Untersuchung zeigt außerdem, dass gegenüberliegend von der Reparaturschweißung weitere mikroskopische Ermüdungsrisse vorhanden waren, die bei der Begutachtung der Prüfkörper (Sichtprüfung) nicht festgestellt wurden.

Bei der Nachbehandlung wurden diese Anrisse überhämmert und durch das Reparaturschweißen sind an den Rissflanken Anlauffarben entstanden. Weitere Abbildungen aus den REM-Untersuchungen sind in Anhang D zusammengestellt.

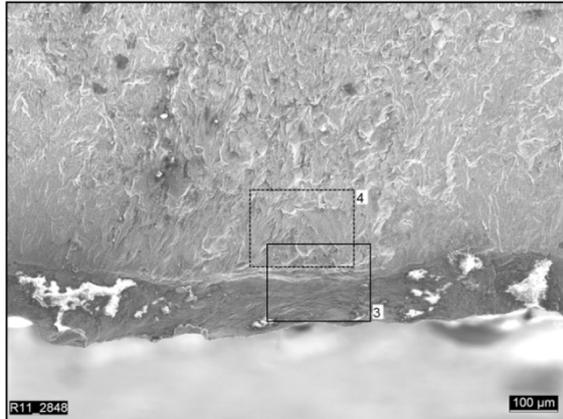


Abbildung 2.41: Ausschnitt 1 aus Abbildung 2.40, gehämmerte Oberfläche im Bereich der Bruchkante

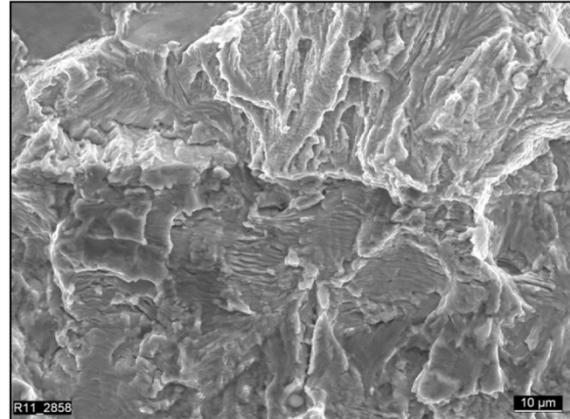


Abbildung 2.42: Ausschnitt 2 aus Abbildung 2.40, Übergang Ermüdungsriß (blau angelaufen) zu weiterführenden Ermüdungsrisssen II (= Rastlinien)

#### 2.8.4 Bewertung der Versuchsergebnisse

Durch die hier durchgeführten Versuche wurden mögliche ungünstige Fälle aus der praktischen Anwendung mit abgedeckt:

1. Ausbessern der Reparaturschweißung auf Grund von Schweißnahtunregelmäßigkeiten vor der Nachbehandlung
2. Ermüdungsriß ausgehend von inneren Schweißnahtunregelmäßigkeiten
3. Bei der Sanierung übersehene Ermüdungsrisse wurden durch HFH „überhämmert“

Durch diese teilweisen ungünstigen Bedingungen kann davon ausgegangen werden, dass die Versuchsergebnisse konservative Werte liefern.

Wie bereits bei den Versuchsserien 2 und 3 wurden auch bei der Versuchsserie 4 die Ergebnisse der beiden Verfahren aus zuvor genannten Gründen gemeinsam statistisch ausgewertet. Abbildung 2.43 zeigt die gemeinsame Auswertung ausschließlich für die Belastungsstufe 2. Die Wöhlerkurve zeigt den neu anzusetzenden Kerbfall nach einer Reparaturschweißung und anschließender Nachbehandlung. Der Einhängewert  $\Delta\sigma_c = 87,6 \text{ N/mm}^2$  bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln liegt im Bereich des unbehandelten Kerbdetails und 7,2 % unterhalb der Ermüdungsfestigkeit der Serie 3. Die Steigung zeigt mit  $m = 4,27$  und einer Abweichung von weniger als 0,2 % zu Serie 3 einen identischen Verlauf. Für die durchgeführten Versuche konnte die Ermüdungsfestigkeit durch die nachbehandelte Reparaturschweißung für die angerissenen Proben praktisch wieder auf die ursprünglichen Werte des unbehandelten Kerbdetails zurückgesetzt werden.

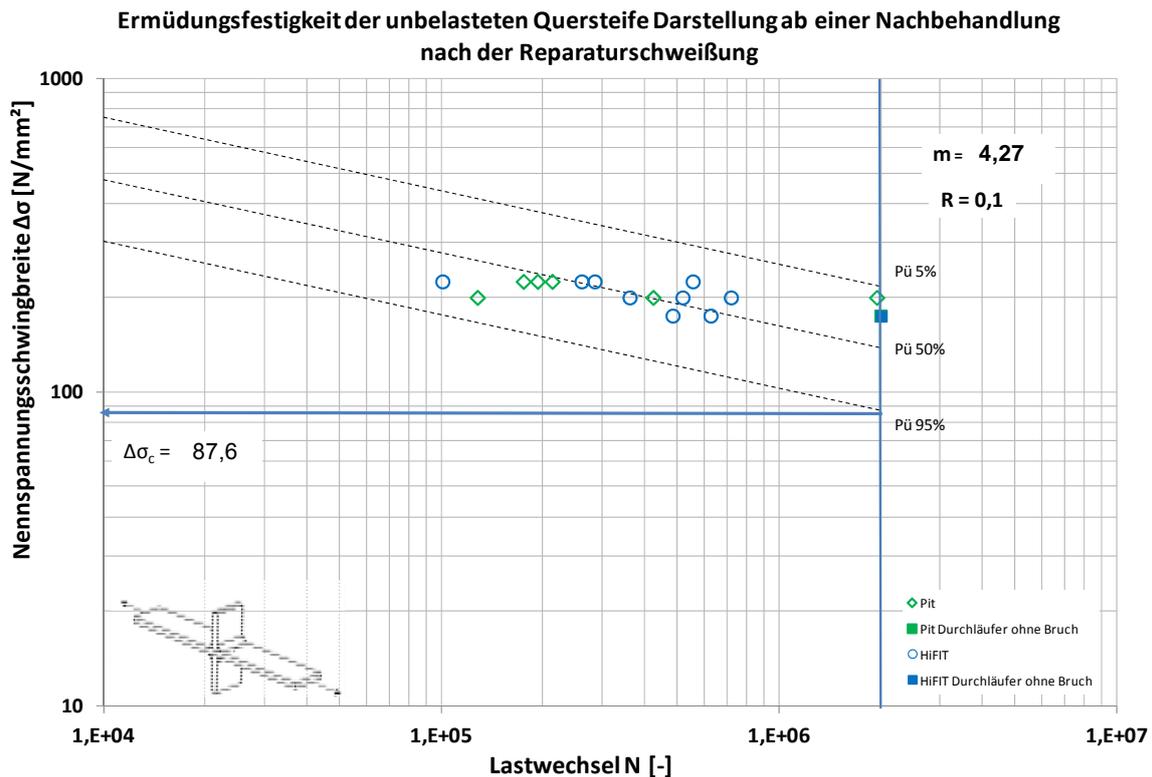


Abbildung 2.43: Ermüdungsfestigkeitskurve Belastungsstufe 2; Serie 4;  $m = 4,27$

### 3 Ermittlung der Eindringtiefe

#### 3.1 Durchführung der Untersuchungen

Zur Ermittlung der Eindringtiefe wurden an 6 Versuchskörpern, jeweils 3 pro Verfahren, aus den Versuchsserien 2, 3 und 4 Silikonabdrücke von den nachbehandelten Schweißnahtübergängen angefertigt. Die ausgehärteten Silikonabdrücke wurden jeweils in fünf Teile geschnitten. Die entstandenen Schnittflächen zeigen den Negativabdruck der Schweißnaht und der Nachbehandlungszone. In Abbildung 3.1 ist der Querschnitt eines Silikonabdruckes mit Vermaßung der Eindringtiefe dargestellt.

Alle Querschnitte wurden digitalisiert und die Eindrücke der Nachbehandlungszone nachgezeichnet und vermessen. Zur Ermittlung der Eindringtiefe wurden zwei Messmethoden herangezogen. Die Ermittlung der Eindringtiefe ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

- a. Die beiden Übergangspunkte vom Radius zum Grundmaterial und vom Radius zum Nahtanstieg wurden durch eine Gerade verbunden. Ein auf der Gerade stehendes Lot bis zum tiefsten Punkt des Radius beschreibt die Eindringtiefe a.
- b. Die Oberfläche des Grundmaterials wird in den Radius hineinverlängert. Ein auf dieser Geraden stehendes Lot bis zum tiefsten Punkt des Radius beschreibt die Eindringtiefe b.

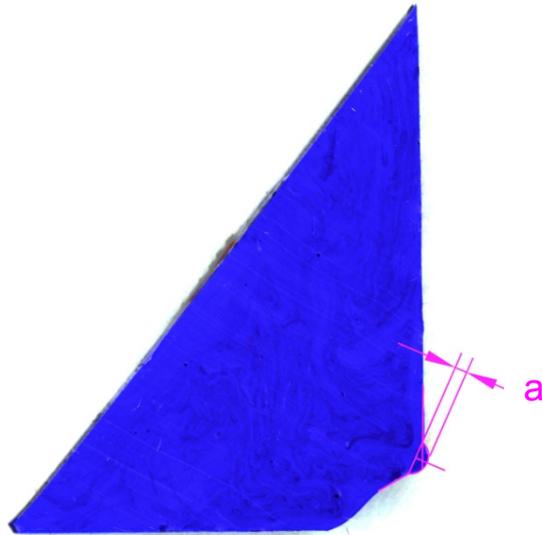


Abbildung 3.1: Querschnitt Silikonabdruck

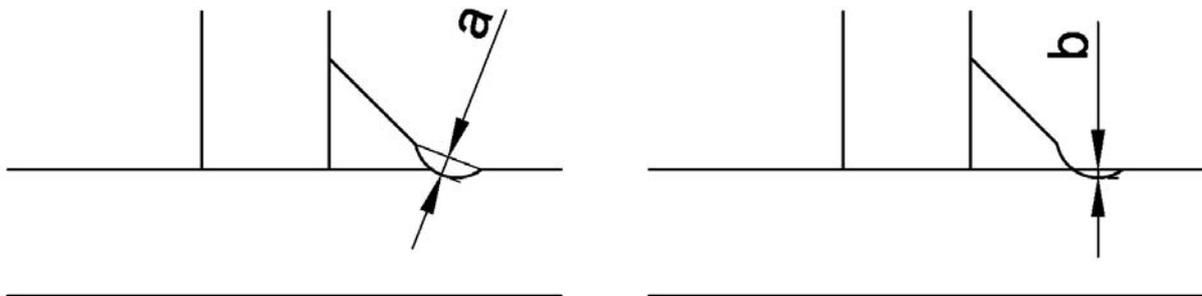


Abbildung 3.2: Definition der Eindrucktiefen a und b

Die genauen Messwerte können den Tabellen im Anhang D entnommen werden. Die Verteilung der Messwerte ist in Abbildung 3.3 für die einzelnen Messreihen in einem Box-Plot dargestellt. In den Boxen liegen 50 % der Messwerte. Die Box wird durch eine horizontale Linie getrennt, die den Median beschreibt. Der Mittelwert der Messreihe ist durch ein Kreuz in der Box dargestellt. Die oberen und unteren Whisker zeigen die Entfernung der maximalen und minimalen Messwerte.

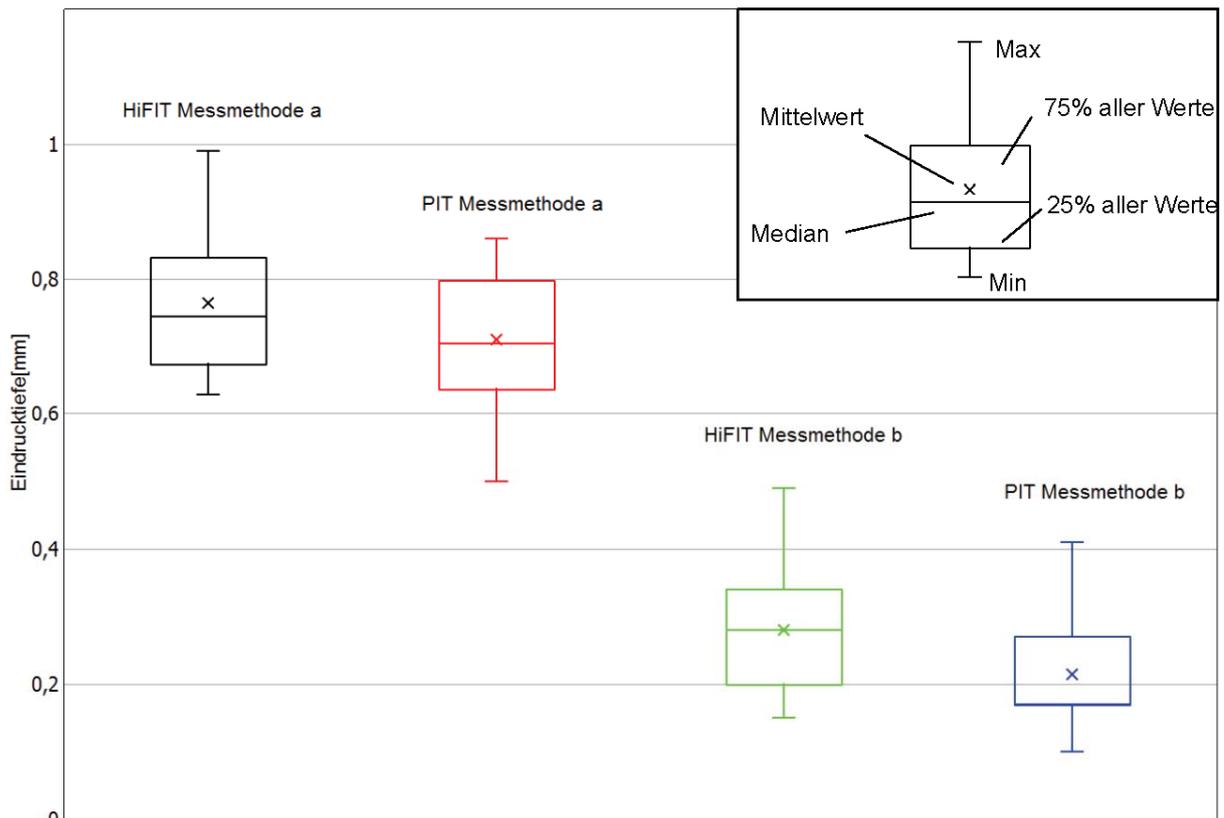


Abbildung 3.3: Verteilung der Messwerte der Eindringtiefen

### 3.2 Bewertung der Eindringtiefen

Durch die hier angewendete Methode wurden die vor der Nachbehandlung vorhandenen geometrischen Bedingungen am Schweißnahtübergang nicht mitbetrachtet. Somit kann die Eindringtiefe nicht als ausschließlich durch die Nachbehandlung verursacht angesehen werden, sondern beinhaltet auch etwaige vorhandene Einbrandkerben etc.. Bei der Eindringtiefe a hat der Applikationswinkel keinen Einfluss auf die gemessene Eindringtiefe. Bei der Eindringtiefe b muss davon ausgegangen werden, dass durch den Applikationswinkel eine Veränderung der Eindringtiefe erreicht wird. Bei Betrachtung der Messwerte ist erkennbar, dass bei dem HiFIT-Verfahren geringfügig tiefere Eindrücke gegenüber dem PIT-Verfahren erzielt werden. In Tabelle 3.1 sind die Mittelwerte und die Abweichungen der Messwerte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse bei Messwert b etwas stärker streuen als bei Messwert a.

Tabelle 3.1: Eindringtiefen

Verfahren	Eindringtiefe	Mittelwert [mm]	Median	Max	Min
HiFIT	a	0,765	0,745	1,00	0,61
PIT	a	0,733	0,735	0,86	0,55
HiFIT	b	0,303	0,305	0,52	0,15
PIT	b	0,214	0,170	0,41	0,10

## 4 Eigenspannungsmessung

### 4.1 Ermittlung der Eigenspannungen durch röntgenografische Messungen

Durch das höherfrequente Hämmern werden, wie in Abschnitt 1 beschrieben, Druckeigenspannungen eingebracht. Diese können mit Hilfe röntgenografischer Verfahren gemessen werden.

Hierbei treffen langwellige Röntgenstrahlen auf die kristalline Struktur des metallischen Werkstoffes auf und werden an den Gitterebenen reflektiert. Sind Eigenspannungen vorhanden, führt das zu Atom- oder Molekülgitterdehnungen, so dass sich der Beugungswinkel der Strahlung aufgrund des veränderten Gitterebenenabstandes ändert, was messtechnisch erfasst werden kann. Anhand des veränderten Gitterebenenabstandes lassen sich die Eigenspannungen bestimmen. Durch röntgenographische Eigenspannungsbestimmung werden nur die oberflächennahen Eigenspannungen ermittelt. Die Messungen erfolgen an der Oberfläche und können durch elektrolytischen Abtrag auch in tieferen Werkstoffbereichen durchgeführt werden.

### 4.2 Definition der Eigenspannungsrichtung

Eigenspannungen werden längs zur Schweißnaht und quer zur Schweißnaht bestimmt. In Abbildung 4.1 ist die Definition der Eigenspannungen für die hier untersuchten Versuchskörper dargestellt.

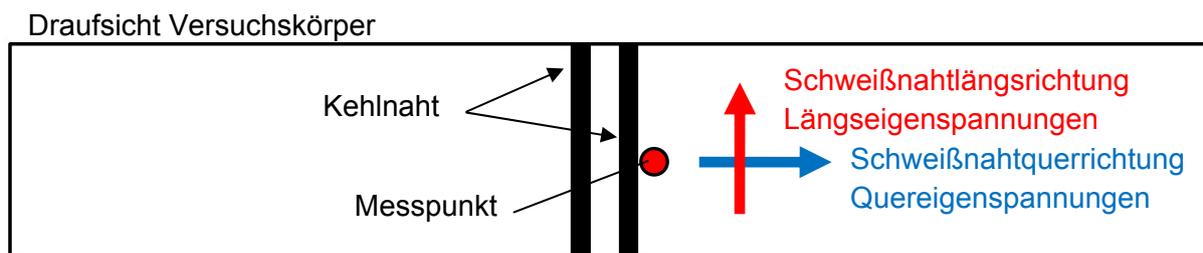


Abbildung 4.1: Definition der Richtungen der gemessenen Eigenspannungen

### 4.3 Ermittlung der Eigenspannungen durch die Bohrlochmethode

Die Bohrlochmethode ist ein zerstörendes Verfahren zur Eigenspannungsmessung und beruht auf dem Prinzip ausgelöster elastischer Dehnungen. Auf die Probe werden Dehnungsmessstreifen in einem Winkel von  $120^\circ$  appliziert und mittig in diese Messrosette wird ein Sackloch eingebracht. Die dabei ausgelösten gemessenen elastischen Dehnungen werden unter Rückgriff auf das verallgemeinerte Hook'sche Gesetz zur Berechnung der ursprünglich vorhandenen Eigenspannungen herangezogen. Diese Methode eignet sich zur Bestimmung der Eigenspannungen in tieferen Werkstoffbereichen.

### 4.4 Durchgeführte Messungen und Darstellung der Ergebnisse

#### 4.4.1 Übersicht

Es wurden für beide Verfahren HiFIT und PIT Oberflächenprofile an HFH-behandelten Proben bestimmt, die allerdings keiner Ermüdungsbeanspruchung ausgesetzt waren (Zustand wie Serie 2 vor Versuchsbeginn). Für jedes Verfahren wurden 2 Proben und je Probe eine bzw. zwei Nachbehandlungszonen untersucht.

Die oberflächennahen Eigenspannungen wurden sowohl in Längsrichtung der Nachbehandlungsspur als auch in Querrichtung bestimmt. Je Eigenspannungsprofil wurden ca. 10 Messpunkte ausgewertet.

#### 4.4.2 Längseigenspannungen

Die einzelnen Messwerte der Längseigenspannungen für HiFIT sind in Abbildung 4.2 und für PIT in Abbildung 4.3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die jeweiligen Messwerte an den drei Messpunkten geringe Streuungen aufweisen und der Nachbehandlungserfolg in den drei Schweißnahtübergangsbereichen als vergleichbar bewertet werden kann. Zwischen den einzelnen Messwerten wurden die Mittelwerte berechnet, die durch die schwarze Kurve dargestellt sind. In Abbildung 4.4 ist ein Vergleich dieser Mittelwerte dargestellt. Es zeigt sich eindeutig, dass die eingebrachten Längseigenspannungen beider Verfahren vergleichbar sind.

#### Eigenspannungen Längsrichtung HiFIT

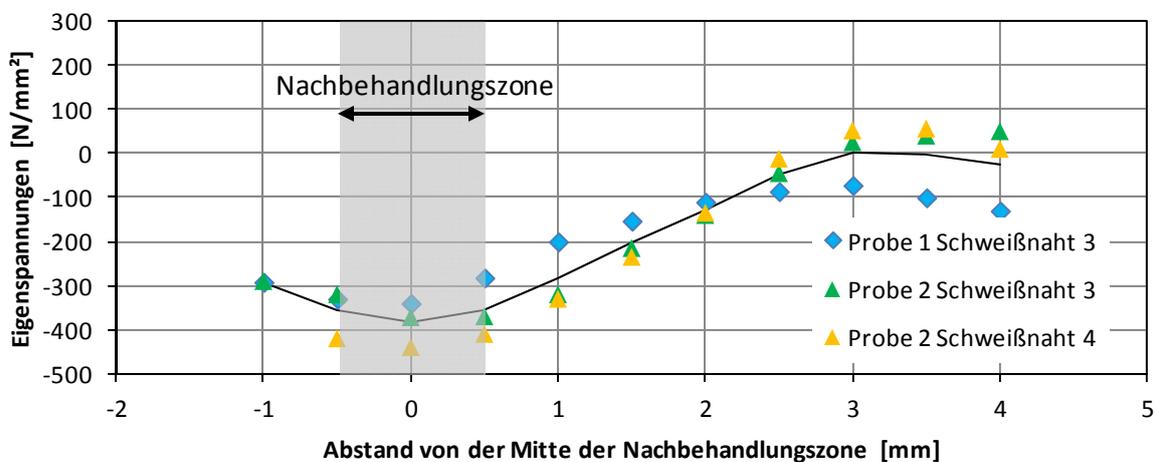


Abbildung 4.2: Eigenspannungen Längsrichtung HiFIT

#### Eigenspannungen Längsrichtung PIT

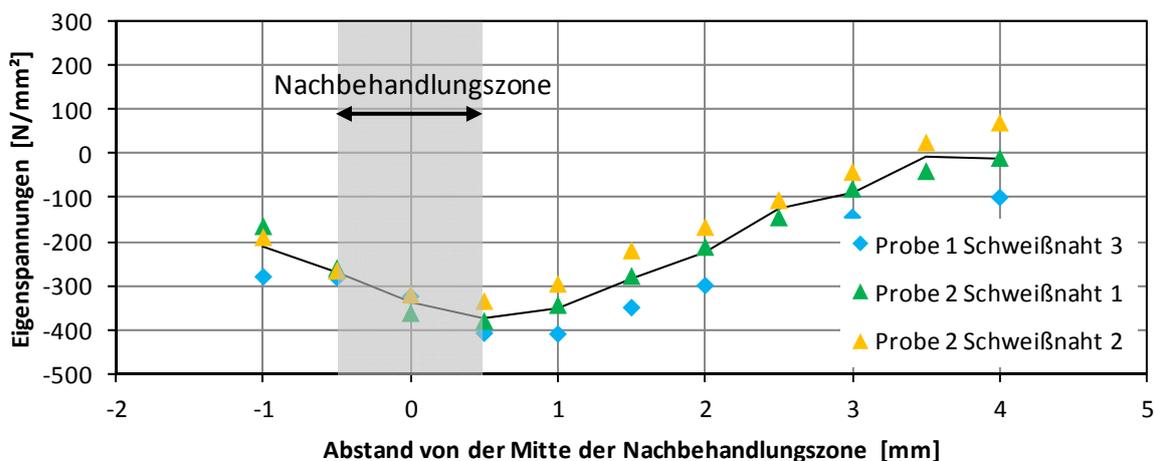


Abbildung 4.3: Eigenspannungen Längsrichtung PIT

### Vergleich der Mittelwerte Eigenspannungen Längsrichtung

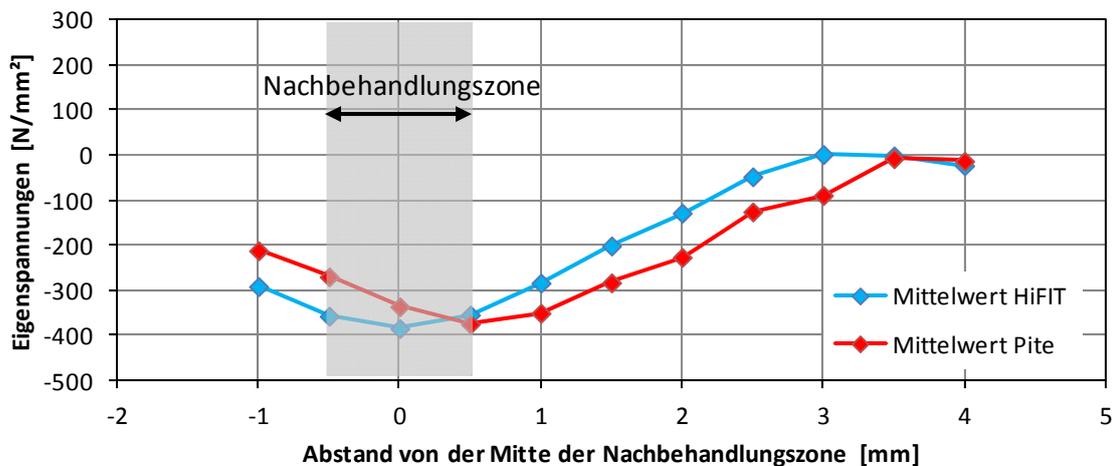


Abbildung 4.4: Vergleich der Mittelwerte der Eigenspannungen in Längsrichtung für beide Verfahren

#### 4.4.3 Quereigenspannungen

Die gemessenen Eigenspannungen in Querrichtung sind für die einzelnen Verfahren im Anhang E dargestellt. Die Mittelwerte der einzelnen Verfahren sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Hier zeigt sich auch im Vergleich der beiden Verfahren eine sehr gute Übereinstimmung der eingebrachten Eigenspannungsprofile.

### Vergleich der Mittelwerte Eigenspannungen Querrichtung

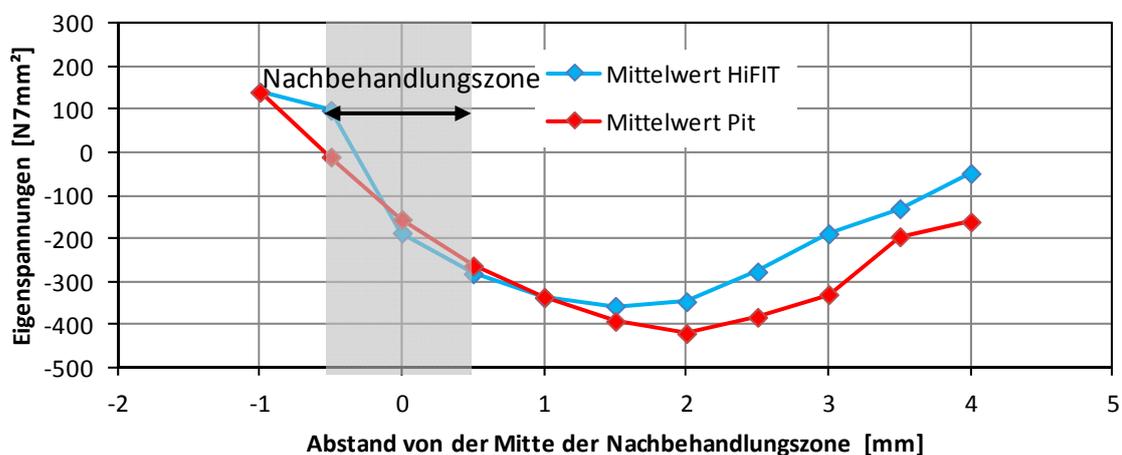


Abbildung 4.5: Vergleich der Mittelwerte der Eigenspannungen in Querrichtung für beide Verfahren

#### 4.4.4 Tiefenprofile

Nach den Oberflächenmessungen wurde bis zu einer Tiefe von 0,7 mm das Material schrittweise elektrolytisch abgetragen und die Eigenspannungen in der Tiefe der Nachbehandlungszone bestimmt. Um weitere Informationen über den Tiefenverlauf zu erhalten, wurden zusätzliche Messungen mit der Bohrlochmethode ab 0,6 mm Tiefe auf einer flächig behandelten Stelle im Grundmaterial der Probekörper bis in tiefere Bereiche durchgeführt.

Die Bohrlochmethode wurde pro Verfahren am Grundmaterial eines Probekörpers und die röntgenografischen Messungen an jeweils 2 Proben im Bereich der Schweißnaht an insgesamt 4 Schweißnähten durchgeführt. Die gemessenen Eigenspannungen sind in Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 für die Verfahren HiFIT und PIT dargestellt. In diesen Diagrammen sind auch die Ergebnisse aus den DMS-Messungen der Bohrlochmethode aufgetragen. Auch hier ist ersichtlich, dass die Messerwerte der einzelnen Messpunkte einer geringen Streuung unterliegen. Die schwarze Kurve beschreibt den Mittelwert der Messergebnisse. In Abbildung 4.8 sind die Kurven der Mittelwerte in einem Diagramm dargestellt. Auch hier ist wie bei den zuvor dargestellten Messungen eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen beider Verfahren erkennbar.

### Tiefenprofil der Eigenspannungen HiFIT

(Längs- u. Querrichtung) Abstand Nachbehandlungszone  $x=0$  mm

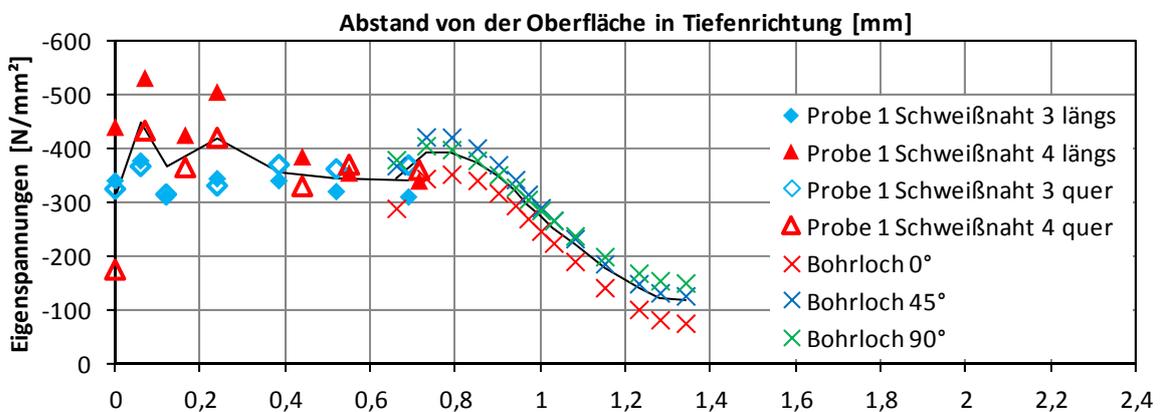


Abbildung 4.6: Tiefenprofil der Eigenspannungen HiFIT

### Tiefenprofil der Eigenspannungen PIT

(Längs- u. Querrichtung) Abstand Nachbehandlungszone  $x=0$  mm

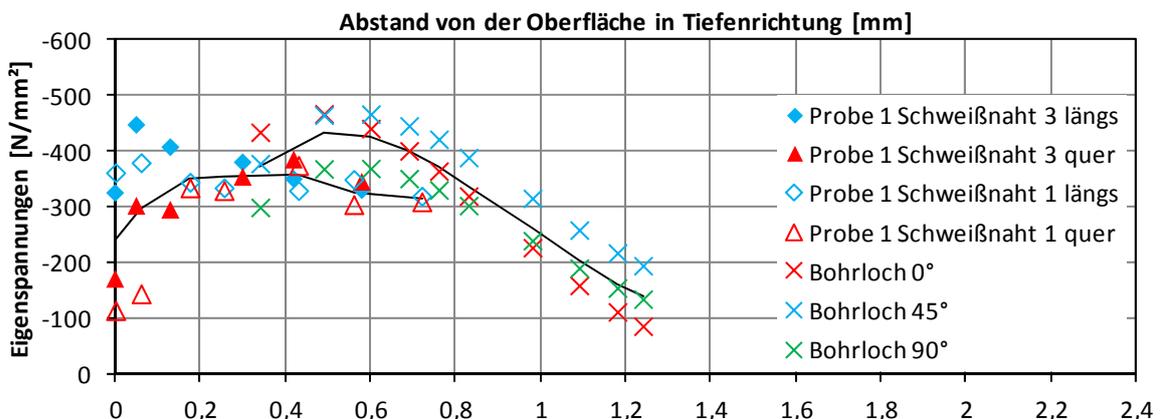


Abbildung 4.7: Tiefenprofil der Eigenspannungen PIT

### Vergleich der Mittelwerte aus den Tiefenprofilen (Längs- u. Querrichtung) Abstand Nachbehandlungszone $x = 0$ mm

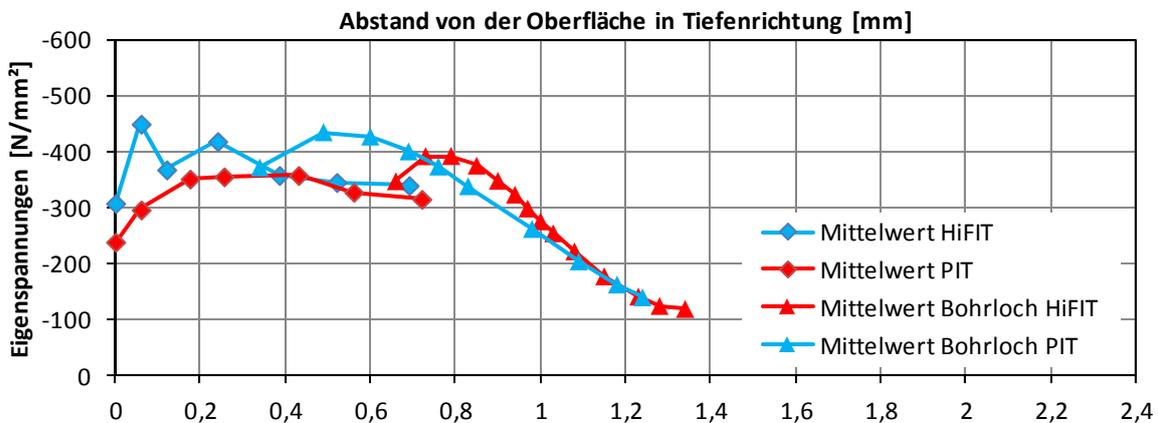
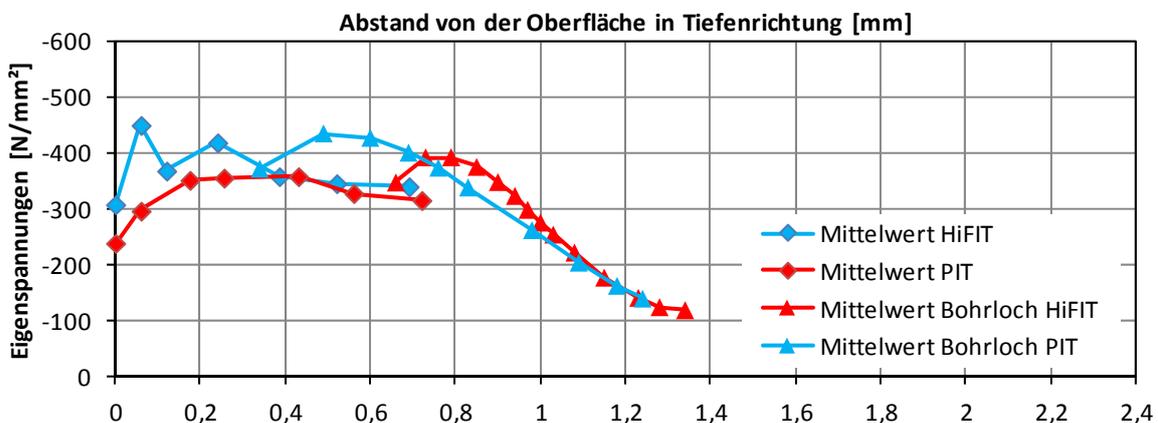


Abbildung 4.8: Vergleich der Mittelwerte der Tiefenprofile

Zur vollständigen Darstellung der Eigenspannungen in der Tiefe, wurden jeweils Tiefenprofile im Abstand von 1 mm neben dem Mittelpunkt der Nachbehandlungszone erstellt. Die einzelnen Messwerte sind in Anhang E zusammengestellt. Der Vergleich der Mittelwerte erfolgt in Abbildung 4.9. Auch hier ist eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse für beide Verfahren erkennbar.

### Vergleich der Mittelwerte aus den Tiefenprofilen (Längs- u. Querrichtung) Abstand Nachbehandlungszone $x = 0$ mm

Abbildung 4.9: Vergleich der Mittelwerte der Tiefenprofile  $x = 1$  mm

#### 4.5 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Durch die Eigenspannungsmessungen an identischen Proben, die jeweils durch eines der beiden Verfahren nachbehandelt wurden, konnte eine sehr gute Übereinstimmung der Oberflächen- und Tiefenprofile der durch die beiden Verfahren eingebrachten Eigenspannungen nachgewiesen werden. Der Vergleich der Messungen an verschiedenen Proben zeigt, dass die eingebrachten Eigenspannungen beider Verfahren reproduzierbar sind. Der Vergleich der Eigenspannungen bestätigt, dass sich durch beide Verfahren Druckeigenspannungen in Höhe der Streckgrenze des Grundmaterials und höher einbringen lassen. Desweiteren kann

te gezeigt werden, dass nach einer HFH-Behandlung Eigenspannungen mindestens bis in die in diesem Projekt gemessene Tiefe von 1,4 mm vorhanden sind.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1 Ermüdungsversuche

Ziel der Versuche war es, eine mögliche Ermüdungsfestigkeitssteigerung durch höherfrequente Hämmerverfahren (HFH) bei Bauteilen aus einem normalfesten Baustahl S235 zu untersuchen. Die Wirksamkeit der Nachbehandlung wurde am Konstruktionsdetail Quersteife untersucht. Für die Versuche wurden Versuchskörper gefertigt, die eine gleichmäßige Nahtqualität aufwiesen.

Im Rahmen der Serie 1 wurde die Ermüdungsfestigkeit für das unbehandelte Konstruktionsdetail ermittelt. Die ermittelte Ermüdungsfestigkeit liegt für  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel bei  $\Delta\sigma_c = 81,4$  N/mm<sup>2</sup> und deckt sich mit Kerbfall 80 nach DIN EN 1993-1-9.

Durch die Serie 2 wurde die Möglichkeit der Ermüdungsfestigkeitssteigerung an unbeanspruchten Kerbdetails ermittelt. Die Versuchskörper wurden vor der Belastung am Schweißnahtübergang nachbehandelt. Es zeigte sich, dass beide Verfahren, HiFIT und PIT, eine vergleichbare Ermüdungsfestigkeitssteigerung erzielen. Die ermittelte Ermüdungsfestigkeit für  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel liegt bei  $\Delta\sigma_c = 182,3$  N/mm<sup>2</sup> und somit um den Faktor 2,3 gegenüber der Serie 1 höher.

Bei den Versuchen der Serie 3 wurde untersucht, wie sich das Potenzial der Verfahren hinsichtlich einer Ermüdungsfestigkeitssteigerung bei einer Sanierung verhält. Die Nachbehandlung durch HFH soll hier zur Lebensdauererweiterung von vorbeanspruchten Konstruktionsdetails genutzt werden. Die Versuchskörper wurden bis zur rechnerischen Lebensdauererweiterung zyklisch vorbeansprucht und anschließend aus der Prüfmaschine ausgebaut. Nach dem Ausbau wurden die Prüfkörper mit dem jeweiligen Verfahren nachbehandelt und wieder in die Prüfmaschine eingebaut. Anschließend wurden die Prüfkörper bis zum Prüfkörperbruch weiter geprüft. Die ermittelte Ermüdungsfestigkeit liegt am Einhängewert für  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel bei  $\Delta\sigma_c = 105,9$  N/mm<sup>2</sup> ab dem Zeitpunkt der Sanierungsmaßnahme.

Serie 4 spiegelt die Situation bei Bauwerken wider, die bis zum ersten erkennbaren Anriss belastet und anschließend saniert wurden. Die Versuchskörper wurden bis zum sichtbaren Anriss vorbelastet. Anschließend wurden die Prüfkörper aus der Prüfmaschine ausgebaut und reparaturschweißt. Nach der erfolgreichen Reparaturschweißung wurden die Schweißnahtübergänge mit den jeweiligen Verfahren nachbehandelt. Nach der HFH-Behandlung wurden die Prüfkörper bis zum Bruch weiterbelastet.

Bei den hier durchgeführten Versuchen wurden in der Praxis ungünstige vorkommende Bedingungen mit abgedeckt. Unter Anderem konnte gezeigt werden, dass auch beim Überhämmern von mikroskopischen Anrissen eine Ermüdungsfestigkeitssteigerung erzielt werden kann. Ebenso zeigt ein Teil der Versuchsergebnisse, dass der Bruchausgang durch HFH an vorhandenen Schweißnahtunregelmäßigkeiten ins Nahtinnere verlagert wird. Die ermittelte Ermüdungsfestigkeit liegt für  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel bei  $\Delta\sigma_c = 87,6$  N/mm<sup>2</sup>, wenn lediglich die Lastwechselzahlen nach der Reparaturmaßnahme aufgetragen werden.

## 5.2 Eindrucktiefe

Durch Silikonabdrücke wurde an ausgewählten Versuchskörpern ein Negativabdruck im Bereich der Nachbehandlungszone erstellt. Diese Abdrücke wurden über die Bauteilbreite in mehrere Abschnitte geteilt und die Eindrucktiefe wurde vermessen. Es ergaben sich im Mittel eine Eindrucktiefe  $b$  von 0,3 mm für das HiFIT Verfahren und von 0,26 mm für das PIT Verfahren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Messwerte streuen. Dies lässt sich durch den Umstand begründen, dass der Nahtübergangsbereich nur nach der HFH-Behandlung vermessen wurde und kein Vergleich mit der Geometrie vom Nahtübergangsbereich vor der Nachbehandlung vorlag.

## 5.3 Eigenspannungen

Die Eigenspannungsmessungen für beide Verfahren, HiFIT und PIT, zeigen eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse untereinander. Die Messungen an mehreren Schweißnahtübergängen weisen für beide Verfahren eine relativ geringe Streuung auf. Es wurden Druckeigenspannungen in der Höhe von 400 N/mm<sup>2</sup> nachgewiesen. Da die Messergebnisse bei allen Versuchskörpern qualitativ gleichwertig sind zeigt dies, dass die Nachbehandlung reproduzierbar ist.

## 5.4 Fazit

Durch die Versuche konnte gezeigt werden, dass auch bei normalfesten Baustählen S235 eine deutliche Ermüdungsfestigkeitssteigerung durch HFH möglich ist. Die Werte der Ermüdungsfestigkeit bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln für die hier untersuchten Schweißnähte am Konstruktionsdetail Quersteife sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass beide HFH Verfahren vergleichbare Ergebnisse liefern. Dies wird auch durch die Messungen der Eigenspannungen bestätigt.

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Schwingversuchen

Versuchsserie	Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ bei $N = 2 \cdot 10^6$	Neigung $m$
1	81,4	3,0
2	182,3	11,8
3	105,9*	4,72
4	87,6*	4,27

\*nach Sanierung bzw. Reparatur

Da hier Kleinbauteilversuche an unter Laborbedingungen gefertigten Versuchskörpern durchgeführt wurden, ist zu bedenken, dass sich bei Bauteilen ein anderer Eigenspannungszustand einstellen kann. Desweiteren kann davon ausgegangen werden, dass eine geeignete Schweißnahtausführung und Schweißreihenfolge unter Umständen zu einer verringerten Ermüdungsfestigkeit führen. Bei Ermüdungsversuche an Bauteilen aus S690 und einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von  $R = 0,5$  konnte in [4] gezeigt werden, dass die Ermüdungsfestigkeit von HFH nachbehandelten Bauteilen gegenüber Kleinbauteilversuchskörpern um 12 % geringer ist. Da der Eigenspannungszustand in Bauteilen aus S690 nicht mit Bauteilen aus S235 vergleichbar ist, kann diese Erkenntnis nur annähernd auf Bauteile aus S235 übertragen werden. Desweiteren wurden die Versuche in diesem Projekt bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von  $R = 0,1$  durchgeführt. Zur Verifizierung sind an dieser Stelle weitere Untersuchungen an Bauteilen aus S235 und einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von  $R = 0,1$  notwendig.

Da die Erkenntnisse für den Stahl S235 noch nicht hinreichend abgesichert sind, schlagen die Verfasser einen Kerbfall 140 für Neubauten vor. Abbildung 5.1 zeigt den nach unten korrigierten Kerbfall mit einer Steigung von  $m = 12$  als rote Gerade. Der vorgeschlagene Kerbfall 140 deckt sich mit Untersuchungen in [15]. In diesem Dokument werden Ergebnisse unterschiedlicher HFH-behandelter Kerbdetails von zahlreichen Forschungsstellen zusammengetragen und gemeinsam ausgewertet. Basierend auf diesen Auswertungen werden Empfehlungen für die Kerbfalleinstufung nachbehandelter Schweißnähte gegeben. Für das Kerbdetail Quersteife wird in [15] für Werkstoffe im Streckgrenzenbereich  $355 \text{ N/mm}^2 < f_y \leq 550 \text{ N/mm}^2$  bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln nach einer HFH-Behandlung ein Kerbfall von  $140 \text{ N/mm}^2$  bei einer Steigung von  $m = 5$  angegeben. Für Werkstoffe im Streckgrenzenbereich  $235 \text{ N/mm}^2 < f_y \leq 355 \text{ N/mm}^2$  wird, mit dem Hinweis fehlender Versuchsergebnisse, ein Kerbfall von  $125 \text{ N/mm}^2$  angegeben. Nach Auffassung der Forschungsstellen kann, basierend auf den durchgeführten Untersuchungen, für den Werkstoff S235 ebenfalls der für einen Werkstoff S355 angegebene Kerbfall von  $140 \text{ N/mm}^2$  bei einer Steigung von  $m = 12$  angesetzt werden.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass auch bei niederfesten Stählen mit Streckgrenzen im Bereich von S235 die Anwendung der untersuchten HFH-Verfahren zu einer wesentlichen Ermüdungsfestigkeitssteigerung führen kann.

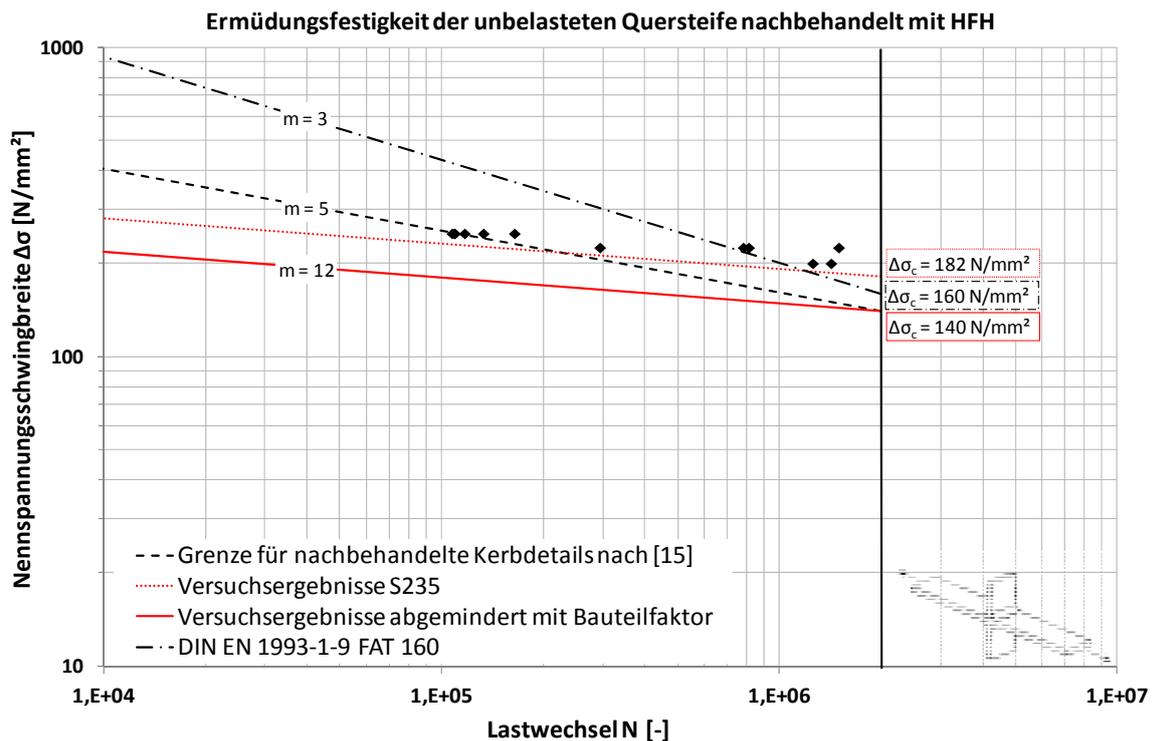


Abbildung 5.1: Ermüdungsfestigkeit reduziert durch Bauteilfaktor

### 5.5 Vergleich der Ergebnisse mit vorhandenen Untersuchungen

Zum Konstruktionsdetail unbelastete Quersteife, nachbehandelt mit HFH, wurden bereits Versuche an hochfesten Stählen durchgeführt. In Abbildung 5.2 sind die Wöhlerkurven für die Stähle S355 und S690 für PIT nachbehandelte Kerbdetails dargestellt. Im Vergleich dazu ist die Wöhlerkurve für die hier durchgeführten Versuche dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Streckgrenze die Ermüdungsfestigkeit für nachbehandelte Kerbdetails ansteigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei höheren Streckgrenzen durch die Nachbehandlung höhere Druckeigenstressungen in den Stahl eingebracht werden können.

In Abbildung 5.2 ist auch zu erkennen, dass mit zunehmender Streckgrenze die Neigung der Wöhlerkurve steiler wird. Dies deckt sich mit der Theorie, dass bei einem Stahl mit einer niedrigeren Streckgrenze die eingebrachten Druckeigenstressungen kleiner sind, als die Druckeigenstressungen die bei höherfesten Baustählen eingebracht werden können. Das resultierende Zugspannungsniveau liegt bei gleicher äußerer Beanspruchung aufgrund des geringeren Eigenstressungseintrages somit höher.

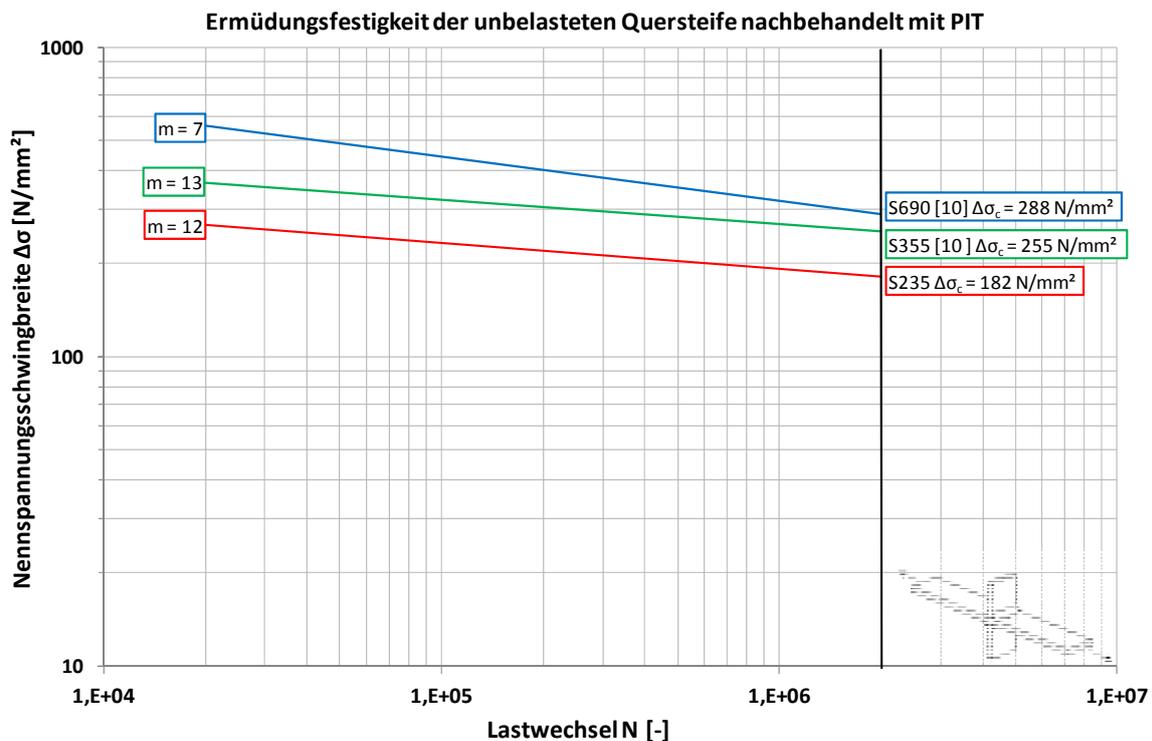


Abbildung 5.2: Vergleich der Ermüdungsfestigkeiten für unterschiedliche Stahlsorten bei  $R = 0,1$

## 5.6 Ausblick

Die hier durchgeführten Versuche zeigen das Potenzial der Verfahren HiFIT und PIT zur Ermüdungsfestigkeitssteigerung an normalfesten Baustählen auf. Bei Betrachtung der Ergebnisse ist allerdings zu beachten, dass die Ermüdungsversuche ausschließlich an Kleinbauteilproben durchgeführt wurden und die Ergebnisse um einen Bauteilfaktor reduziert werden müssen. Der Bauteilfaktor wurde hier mit 30% abgeschätzt. Es ist empfehlenswert weitere Versuche an Bauteilversuchskörpern durchzuführen, um den Bauteilfaktor zu verifizieren.

Die in diesem Abschlussbericht dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass eine Ermüdungsfestigkeitssteigerung mit den HFH an normalfesten Baustählen (S235) möglich ist. Alle Versuche wurden an Kleinbauteilproben durchgeführt. Zur Verifizierung der vorliegenden Ergebnisse ist es empfehlenswert, ergänzende Versuche an Bauteilversuchskörpern durchzuführen, da bei maßstabsgetreuen Bauteilen unter anderem andere Eigenspannungszustände vorliegen können.

Da sich bei den Ermüdungsversuchen an Quersteifen gezeigt hat, dass durch eine HFH-Nachbehandlung eine erhebliche Ermüdungsfestigkeitssteigerung möglich ist, wird empfohlen weitere Kleinteilversuche an relevanten Kerbdetails (z. B. Stumpfstoß und Längssteife) aus normalfesten Stahl durchzuführen.

Zum Aufbau eines Qualitätssicherungssystems, das auch Eingang in die Regelwerke findet, sind noch zusätzliche Untersuchungen erforderlich, die durch Anwender, Gerätehersteller und Forschungsstellen festzulegen und zu beschreiben sind.

Die positiven Ergebnisse der hier durchgeführten Versuche für vorbelastete und reparierte Details zeigen, dass die Anwendung von HFH eine vielversprechende Möglichkeit zur Lebensdauererlängerung zahlreicher zyklisch beanspruchter Stahlbauwerke ist.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-9: Ermüdung. DIN EN 1993-1-9, 2010.
- [2] Gerster P., Praktische Anwendung der PIT-Technologie, Stahlbau 78 (2009), Heft 9, S. 680-683.
- [3] Weich, I.: Ermüdungsverhalten mechanisch nachbehandelter Schweißverbindungen in Abhängigkeit des Randschichtzustands. Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2009.
- [4] Dürr, A.: Zur Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus höherfesten Baustählen bei Anwendung von UIT-Nachbehandlung. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, 2006.
- [5] Ummenhofer, T., et al.: Lebensdauererlängerung neuer und bestehender geschweißter Stahlkonstruktionen. REFRESH-Projekt, Abschlussbericht 2009.
- [6] Brozzetti, J., et al.: Background Documentation Eurocode No.3, Background information on Fatigue design rules, Statistical Evaluation. 1989.
- [7] DIN EN ISO 5817 : Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten; Deutsche Fassung EN ISO 5817: 2003.
- [8] DIN EN 10025-2: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle: Deutsche Fassung EN 10025-2: 2004.
- [9] Tied G., Gieseke F.: Sahl- und Metallbau Tabellenbuch, 1. Auflage, Westermann, 2005.
- [10] Kuhlmann, U., Günther, H-P.: Experimentelle Untersuchung zur ermüdungssteigenden Wirkung des PIT-Verfahrens, Versuchsbericht, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, 2009.
- [11] <http://www.pitec-gmbh.com/>
- [12] Puthli, R. et al.: Detaillösungen bei Ermüdungsfragen und dem Einsatz hochfester Stähle bei Offshore-Windenergieanlagen. Forschungsvereinigung Stahlanwendung (Hrsg.), Düsseldorf: Verlag- und Vertriebsgesellschaft 2008.
- [13] Gerster. P.: Vermeidung von Schadensfällen beim Schweißen. Weka Verlag, Juli 2012.
- [14] <http://www.pfeifer.de/hifit/>
- [15] Yildirim, H.C., Marquis, G. B., Fatigue strength improvement factors for high strength steel welded joints treated by high frequency mechanical impact, International Journal of Fatigue, Volume 44, November 2012, S. 168-176.

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Anwendbarkeit HFH bei unterschiedlichen Kerbdetails .....	8
Abbildung 1.2: Pitec Handgerät und Steuereinheit .....	8
Abbildung 1.3: HiFIT Handgerät [14] .....	9
Abbildung 2.1: Prüfkörperbezeichnung .....	11
Abbildung 2.2: Konstruktionsdetail Quersteife EC3 .....	12
Abbildung 2.3: Prüfkörpergeometrie .....	12
Abbildung 2.4: Schweißeinrichtung MAG .....	12
Abbildung 2.5: Versuchskörperherstellung .....	13
Abbildung 2.6: Gemessene Werte / Dokumentation .....	13
Abbildung 2.7: Prüfmaschine der MPA Stuttgart .....	14
Abbildung 2.8: Skizze der Prüfeinrichtung .....	15
Abbildung 2.9: Versuchsaufbau .....	15
Abbildung 2.10: Anriss Pk. 1.1.5 .....	16
Abbildung 2.11: Seitenansicht Anriss .....	16
Abbildung 2.12: Ansicht Pk. 1.2.5 .....	16
Abbildung 2.13: Bruchfläche Pk. 1.2.5 .....	16
Abbildung 2.14: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 1; $m = 2,96$ .....	17
Abbildung 2.15: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 1; $m = 3$ .....	18
Abbildung 2.16: Lage der nachbehandelten Schweißnahtübergänge .....	19
Abbildung 2.17: Durchführung der Nachbehandlung .....	19
Abbildung 2.18: PIT-nachbehandelter Versuchskörper mit seitlichem Grat .....	20
Abbildung 2.19: HiFIT-nachbehandelter Versuchskörper mit seitlichem Grat .....	20
Abbildung 2.20: Bruchausgang Pk. 2.1.2 .....	21
Abbildung 2.21: Seitenansicht Pk. 2.1.2 .....	21
Abbildung 2.22: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 2.1; $m = 11,88$ .....	21
Abbildung 2.23: Bruchfläche mit markiertem Bruchausgang Pk. 2.2.9 .....	22
Abbildung 2.24: Bruchfläche Pk. 2.2.9 .....	22
Abbildung 2.25: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 2.2; $m = 11,91$ .....	23
Abbildung 2.26: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 2, gemeinsame Auswertung; $m = 11,80$ .....	24
Abbildung 2.27: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 3.1 .....	26
Abbildung 2.28: Ermüdungsfestigkeitskurve Serie 3.2 .....	27
Abbildung 2.29: Ermüdungsfestigkeitskurve Belastungsstufe 2 Serie 3; $m = 4,72$ .....	28
Abbildung 2.30: An- und Auslaufwinkel .....	29
Abbildung 2.31: PT-Prüfung .....	29
Abbildung 2.32: Wurzelbindefehler .....	30
Abbildung 2.33: Wurzelbindefehler 200-fach vergrößert .....	30
Abbildung 2.34: Lage des Bruchausganges .....	31
Abbildung 2.35: Belastungsstufe 1 und Belastungsstufe 2, Versuchsserie 4.1 .....	32
Abbildung 2.36: Belastungsstufe 1 und Belastungsstufe 2, Versuchsserie 4.2 .....	33
Abbildung 2.37: Betrachtungsrichtung .....	34
Abbildung 2.38: Ansicht A-A .....	34
Abbildung 2.39: Vergrößerung Detail A .....	34
Abbildung 2.40: Übersichtsbild der Bruchfläche mit blau angelaufenem Anriss .....	34
Abbildung 2.41: Ausschnitt 1 aus Abbildung 2.40, gehämmerte Oberfläche im Bereich der Bruchkante .....	35
Abbildung 2.42: Ausschnitt 2 aus Abbildung 2.40, Übergang Ermüdungsrisss (blau angelaufen) zu weiterführenden Ermüdungsrisss II .....	35
Abbildung 2.43: Ermüdungsfestigkeitskurve Belastungsstufe 2; Serie 4; $m = 4,27$ .....	36
Abbildung 3.1: Querschnitt Silikonabdruck .....	37
Abbildung 3.2: Definition der Eindrücktiefen a und b .....	37
Abbildung 3.3: Verteilung der Messwerte der Eindrücktiefen .....	38

---

Abbildung 4.1: Definition der Richtungen der gemessenen Eigenspannungen.....	39
Abbildung 4.2: Eigenspannungen Längsrichtung HiFIT .....	40
Abbildung 4.3: Eigenspannungen Längsrichtung PIT .....	40
Abbildung 4.4: Vergleich der Mittelwerte der Eigenspannungen in Längsrichtung für beide Verfahren	41
Abbildung 4.5: Vergleich der Mittelwerte der Eigenspannungen in Querrichtung für beide Verfahren.	41
Abbildung 4.6: Tiefenprofil der Eigenspannungen HiFIT .....	42
Abbildung 4.7: Tiefenprofil der Eigenspannungen PIT.....	42
Abbildung 4.8: Vergleich der Mittelwerte der Tiefenprofile.....	43
Abbildung 4.9: Vergleich der Mittelwerte der Tiefenprofile $x = 1 \text{ mm}$ .....	43
Abbildung 5.1: Ermüdungsfestigkeit reduziert durch Bauteilfaktor.....	46
Abbildung 5.2: Vergleich der Ermüdungsfestigkeiten für unterschiedliche Stahlsorten bei $R = 0,1$ .....	47

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Einstellmöglichkeiten PIT .....	9
Tabelle 1.2: Einstellmöglichkeiten HiFIT .....	9
Tabelle 2.1: Versuchsprogramm .....	10
Tabelle 2.2: Übersicht für Werkstoffauswahl.....	11
Tabelle 2.3: Zusammenstellung der Ergebnisse aus Versuchsserie 1 .....	17
Tabelle 2.4: Behandlungsparameter .....	19
Tabelle 2.5: Übersicht Ergebnisse Versuchsreihe 2.1 .....	20
Tabelle 2.6: Übersicht Ergebnisse Versuchsreihe 2.2 .....	22
Tabelle 2.7: Übersicht der Wöhlerkurvenneigungen aus Versuchen abgeschlossener Projekte .....	24
Tabelle 2.8: Rechnerische Bruchlastwechselzahlen abhängig von der Spannungsschwingbreite .....	25
Tabelle 2.9: Belastungsstufen und erreichte Lastwechselzahl Versuchsreihe 3.1 .....	26
Tabelle 2.10: Belastungsstufen und erreichte Lastwechselzahl Versuchsreihe 3.2 .....	27
Tabelle 2.11: Belastungsstufen und erreichte Lastwechselzahlen Versuchsserie 4.1 .....	31
Tabelle 2.12: Belastungsstufen und erreichte Lastwechselzahlen Versuchsserie 4.2 .....	32
Tabelle 3.1: Eindrücktiefen .....	38
Tabelle 5.1: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Schwingversuchen.....	45

## 9 Anhang A

### 9.1 Datenblätter Serie 1.1

**Datenblatt Pk. 1.1.1**

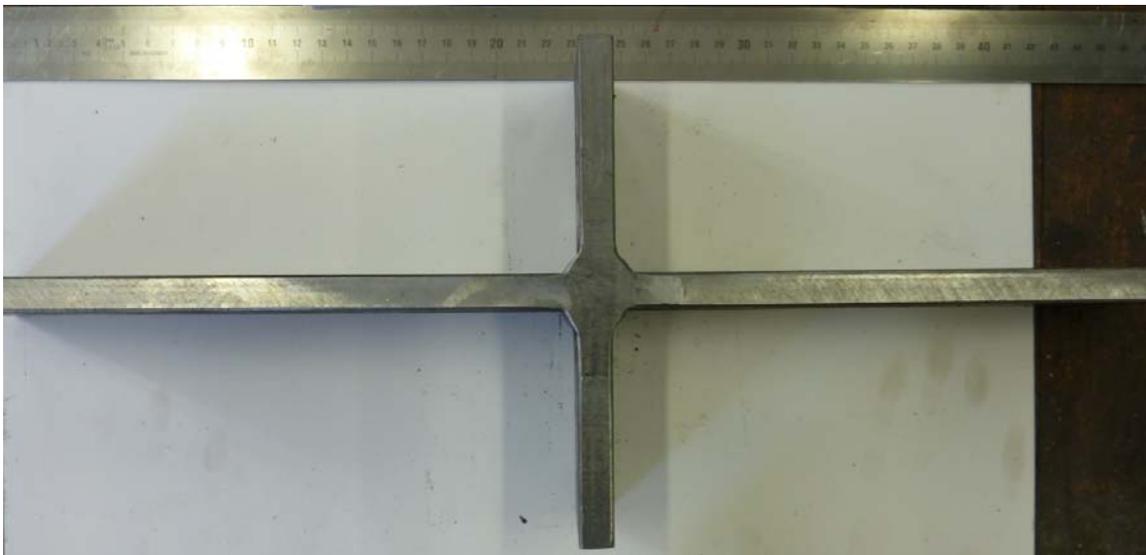
Prüfdatum:  
27.09.2010

#### 1. Geometrie Probekörper

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,14	12,32
links	60,22	12,64

a-Maß [mm]
4,9

#### Seitenansicht



#### Draufsicht



## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	115 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	92 kN
Unterlast	$F_U =$	9,2 kN
Mittellast	$F_M =$	50,6 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	82,8 kN
Amplitude	$A =$	41,4 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

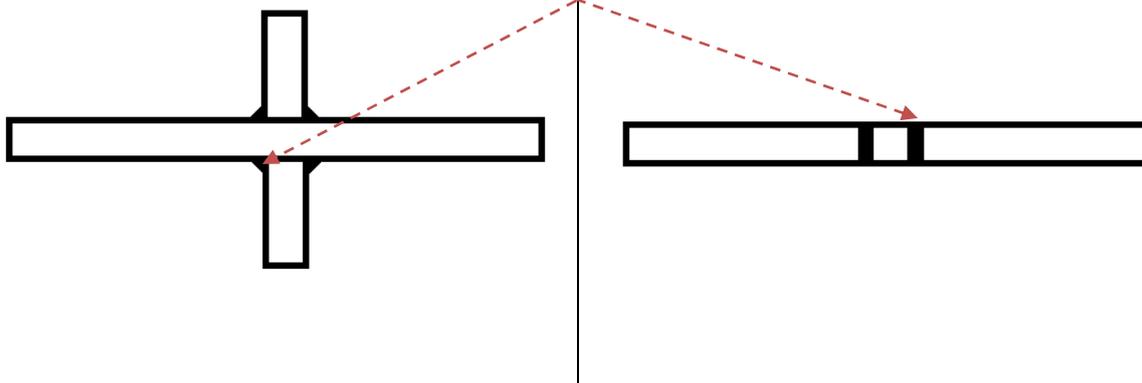
Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  1.595.326

Anriss

Seitenansicht

Draufsicht

Riss



## 4. Bemerkung

Riss:  $t = 12$  mm  
 $l = 38$  mm

### 5. Rissbild Draufsicht

---



### 6. Rissbild Seitenansicht

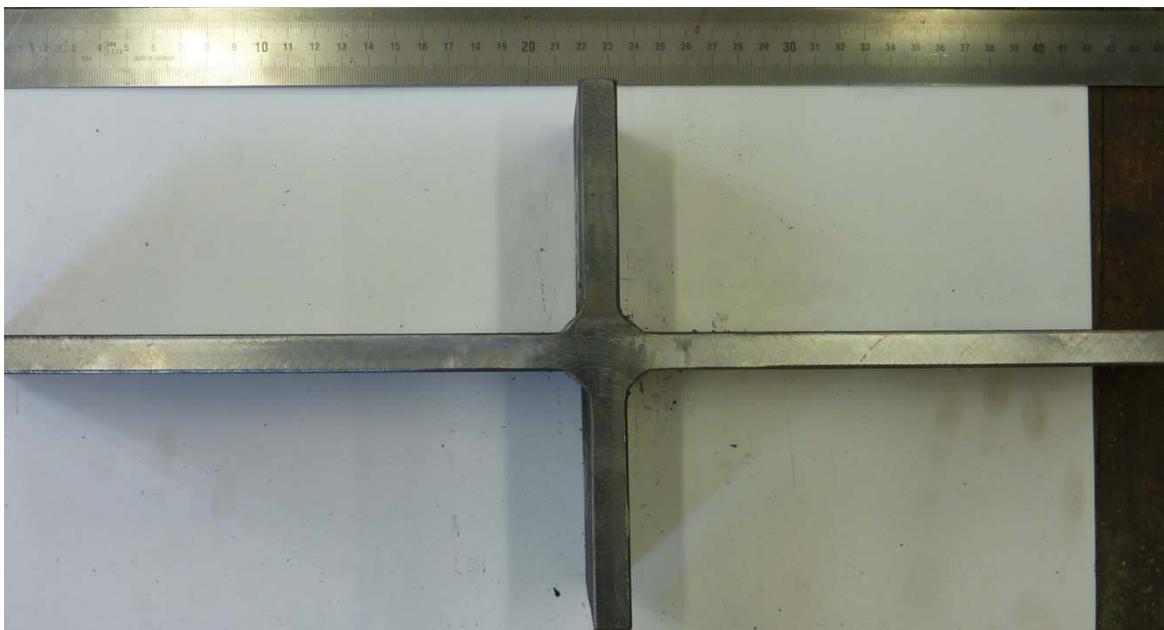
---



**Datenblatt Pk. 1.1.2**Prüfdatum:  
28.09.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,12	12,16
links	60,19	12,25

a-Maß [mm]
5,0

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

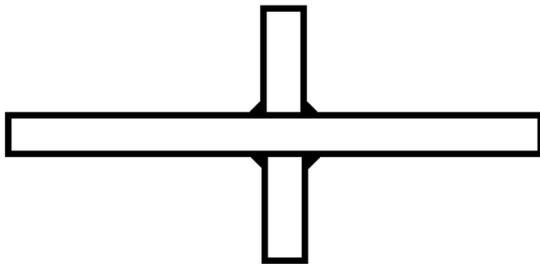
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	115 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	92 kN
Unterlast	$F_U =$	9,2 kN
Mittellast	$F_M =$	50,6 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	82,8 kN
Amplitude	$A =$	41,4 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

Abbruch bei 2.110.137 Schwingspielen ohne erkennbare Schädigung.

**Datenblatt Pk. 1.1.3**Prüfdatum:  
24.09.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,18	12,18
links	60,47	12,15

a-Maß [mm]
4,8

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	145 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	116 kN
Unterlast	$F_U =$	11,6 kN
Mittellast	$F_M =$	63,8 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	104,4 kN
Amplitude	$A =$	52,2 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

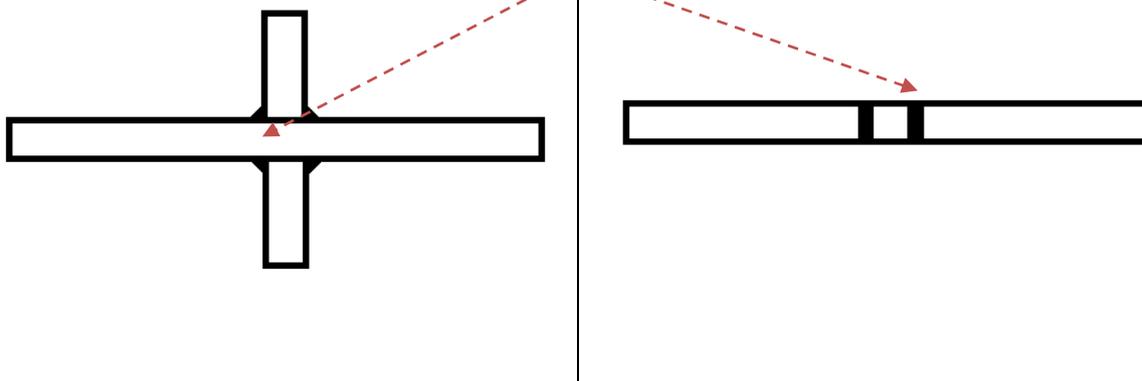
Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  729.729

Anriss

Seitenansicht

Draufsicht

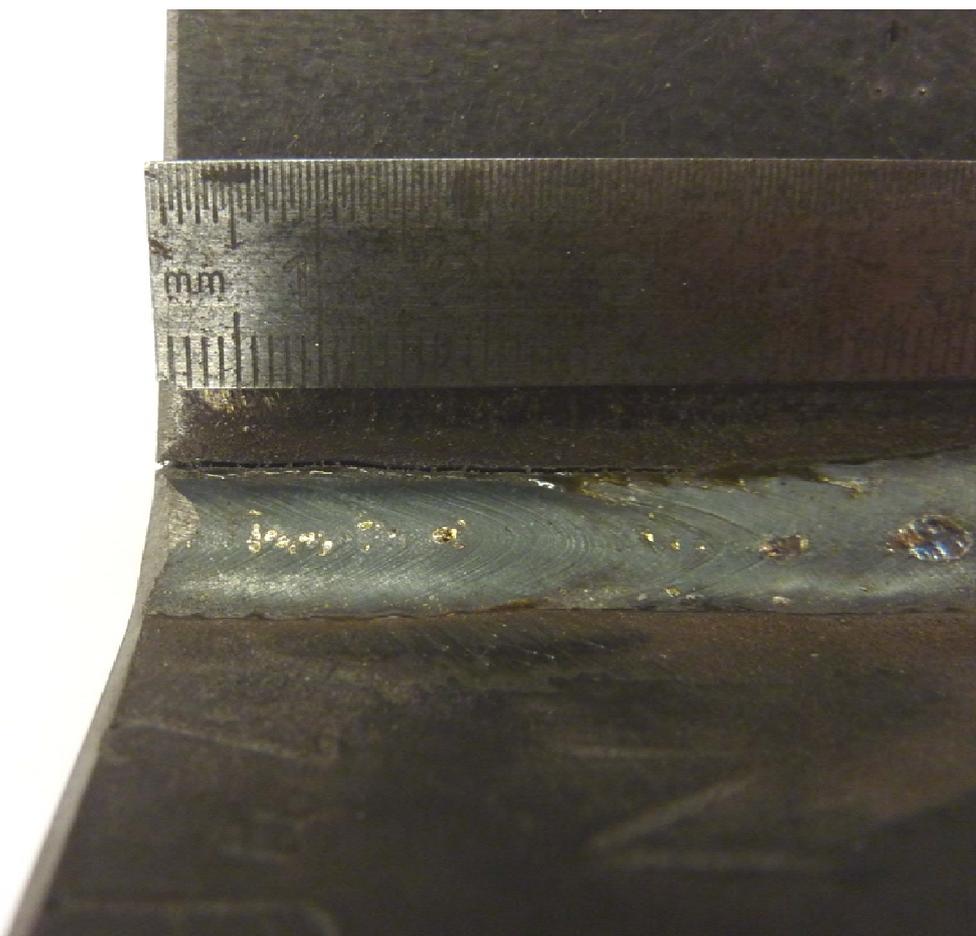
Riss



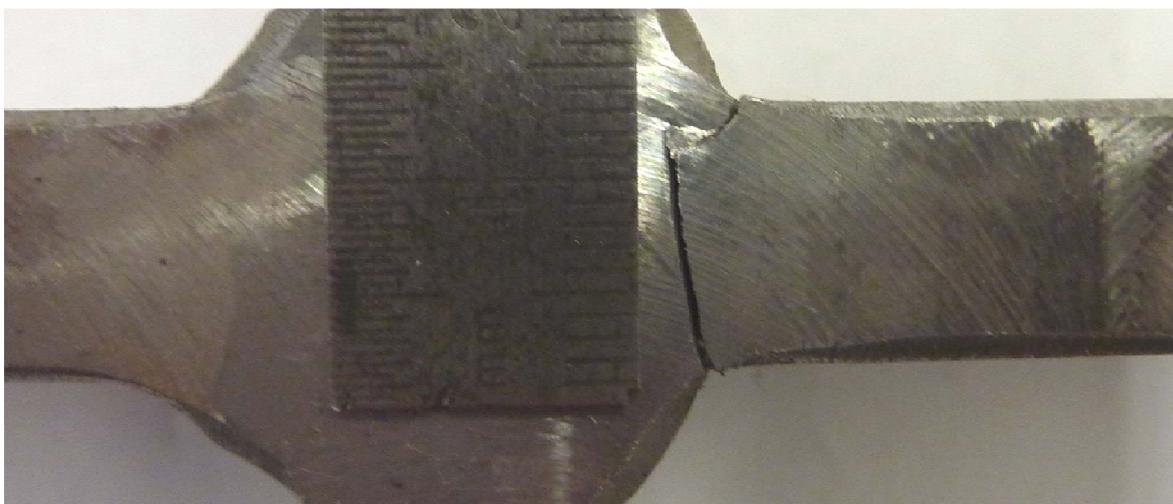
## 4. Bemerkung

Riss: t = durchgehend  
l = 33 mm.

### 5. Rissbild Draufsicht



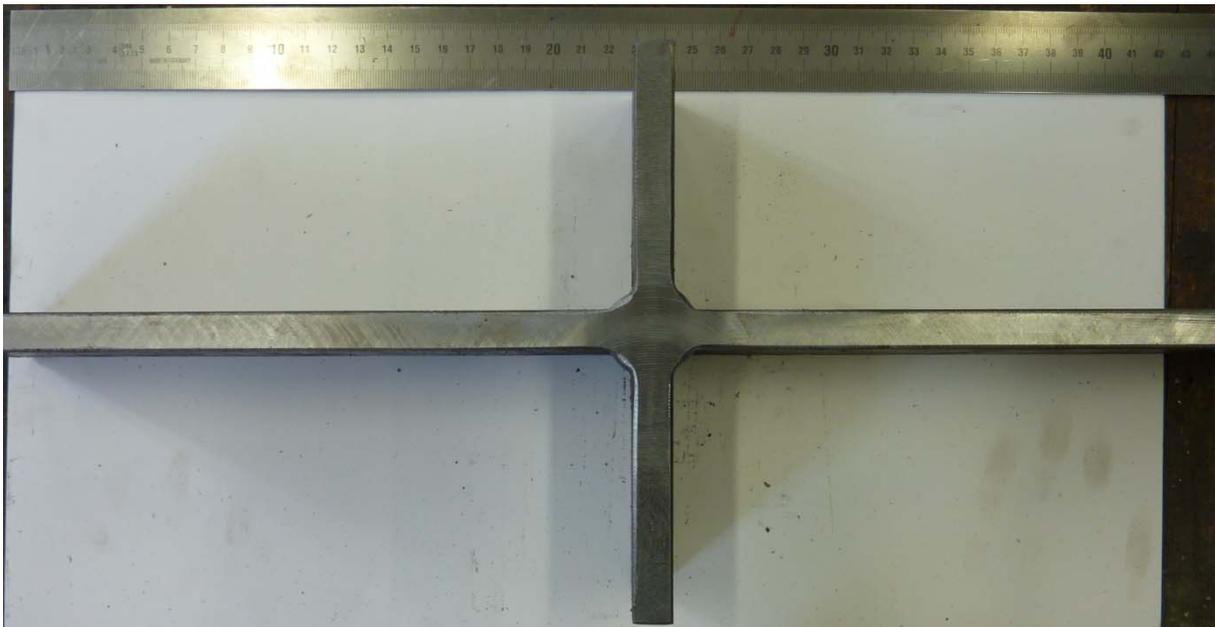
### 6. Rissbild Seitenansicht



**Datenblatt      Pk. 1.1.4**Prüfdatum:  
28.09.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,26	12,29
links	60,23	12,26

a-Maß [mm]
5,2

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	145 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	116 kN
Unterlast	$F_U =$	11,6 kN
Mittellast	$F_M =$	61,8 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	104,4 kN
Amplitude	$A =$	52,2 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

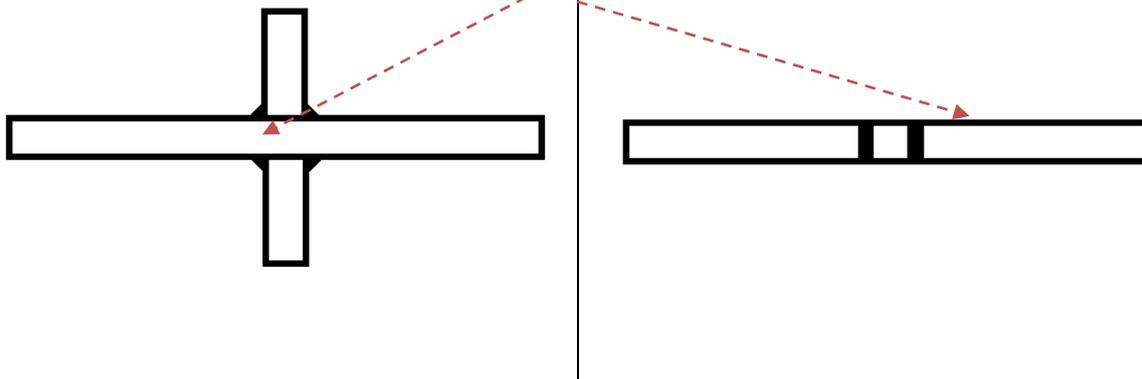
Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  742.607

Anriss

Seitenansicht

Draufsicht

Riss



## 4. Bemerkung

Riss:  $t = 10$  mm  
 $l = 26$  mm.

### 5. Rissbild Draufsicht

---



### 6. Rissbild Seitenansicht

---



**Datenblatt      Pk. 1.1.5**Prüfdatum:  
28.09.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,17	12,17
links	60,20	12,31

a-Maß [mm]
5,0

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	145 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	116 kN
Unterlast	$F_U =$	11,6 kN
Mittellast	$F_M =$	63,8 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	104,4 kN
Amplitude	$A =$	52,2 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

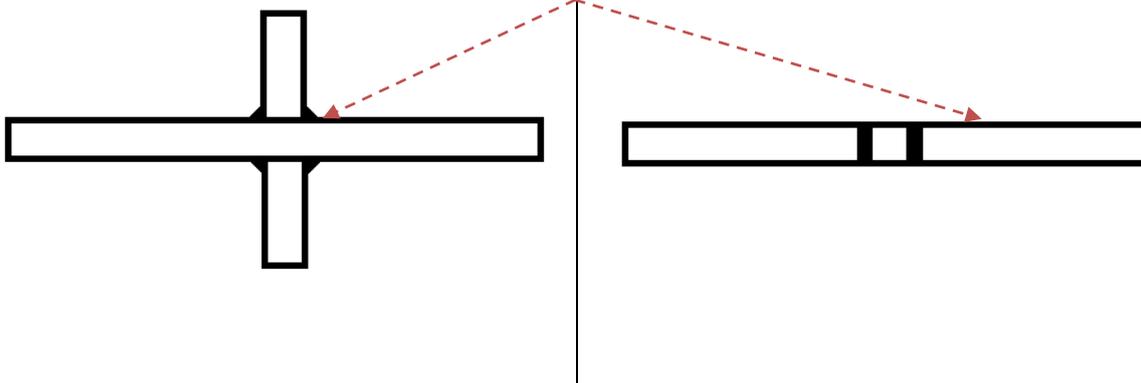
Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  656.423

Anriss

Seitenansicht

Draufsicht

Riss



## 4. Bemerkung

Riss:  $t = 10$  mm  
 | = durchgehend

### 5. Rissbild Draufsicht

---



### 6. Rissbild Seitenansicht

---



## 9 Anhang A

### 9.2 Datenblätter Serie 1.2

#### Datenblatt Pk. 1.2.1

##### 1. Geometrie Probekörper

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,09	12,30
links	60,06	12,15

##### Seitenansicht



##### Draufsicht



## 2. Schwingversuche

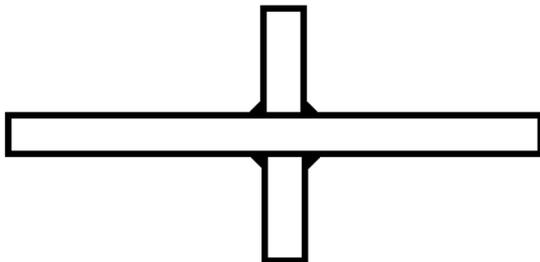
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	115 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	91,07 kN
Unterlast	$F_U =$	8,27 kN
Mittellast	$F_M =$	49,68 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	82,79 kN
Amplitude	$A =$	41,39 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

Abbruch bei 2.765.362 Schwingspielen ohne erkennbare Schädigung.

**Datenblatt Pk. 1.2.2**Prüfdatum:  
04.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,10	12,20
links	60,14	12,12

a-Maß [mm]
4,8

**Seitenansicht****Draufsicht****2. Schwingversuche**

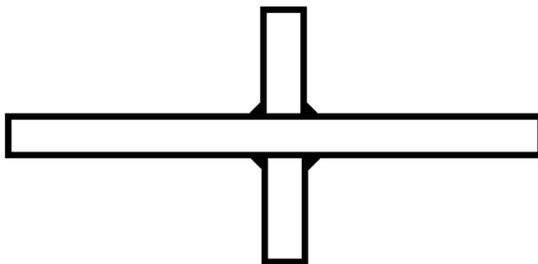
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	145 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	114,84 kN
Unterlast	$F_U =$	10,44 kN
Mittellast	$F_M =$	62,64 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	104,4 kN
Amplitude	$A =$	52,2 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

### 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  1.046.921

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



### 4. Bemerkung

Anriss links oben.

**Datenblatt Pk. 1.2.3**Prüfdatum:  
05.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,09	12,13
links	60,16	12,15

a-Maß [mm]
5,0

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

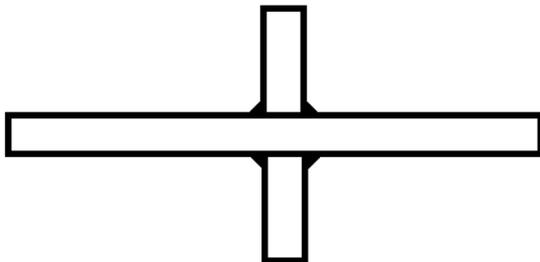
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	145 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	114,84 kN
Unterlast	$F_U =$	10,44 kN
Mittellast	$F_M =$	62,64 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	104,40 kN
Amplitude	$A =$	52,20 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  502.255

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

Riss rechts oben.

## 5. Rissbild

---

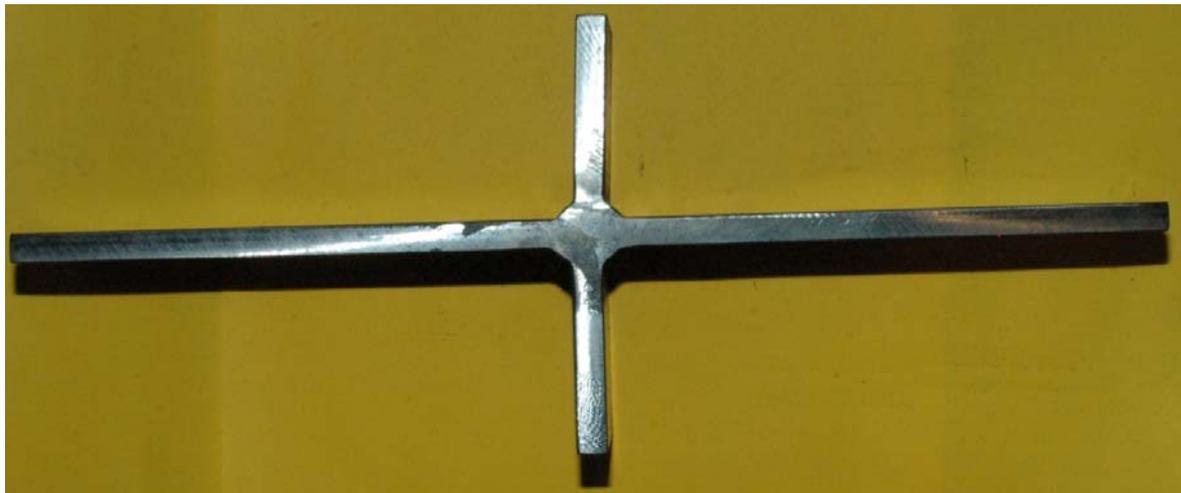


**Datenblatt Pk. 1.2.4**Prüfdatum:  
06.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

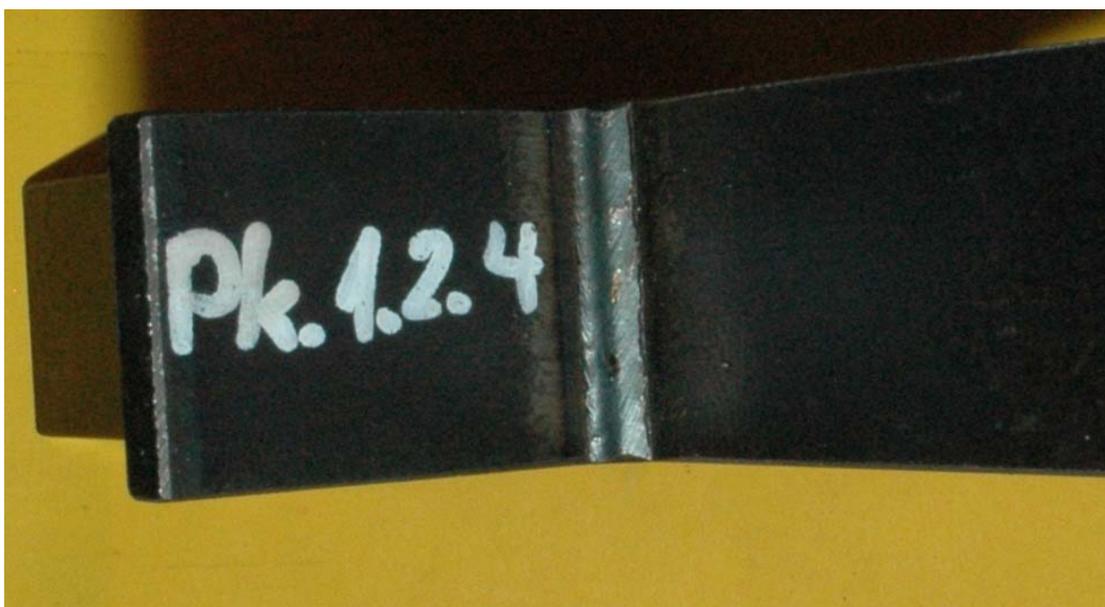
	b [mm]	t [mm]
rechts	60,16	12,08
links	60,10	12,0

a-Maß [mm]
4,9

Seitenansicht



Draufsicht



## 2. Schwingversuche

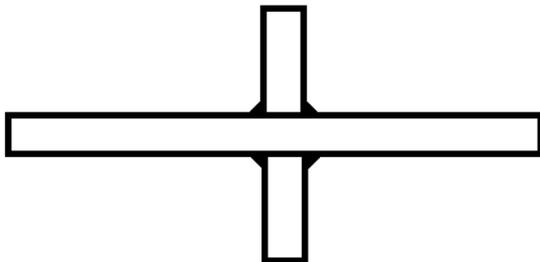
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	145 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	114,84 kN
Unterlast	$F_U =$	10,44 kN
Mittellast	$F_M =$	62,64 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	104,40 kN
Amplitude	$A =$	52,20 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  728.201

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

Riss links oben.

## 5. Rissbild

---



**Datenblatt Pk. 1.2.5**Prüfdatum:  
25.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,05	12,01
links	60,12	12,05

a-Maß [mm]
4,9

## Seitenansicht



## Draufsicht

**2. Schwingversuche**

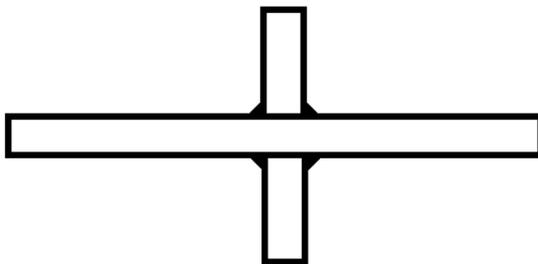
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	145 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	114,84 kN
Unterlast	$F_U =$	10,44 kN
Mittellast	$F_M =$	62,64 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	104,40 kN
Amplitude	$A =$	52,20 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

### 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  567.471

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



### 4. Bemerkung

## 5. Bruchbilder





## 9 Anhang A

### 9.3 Datenblätter Serie 2.1

#### Datenblatt Pk. 2.1.1

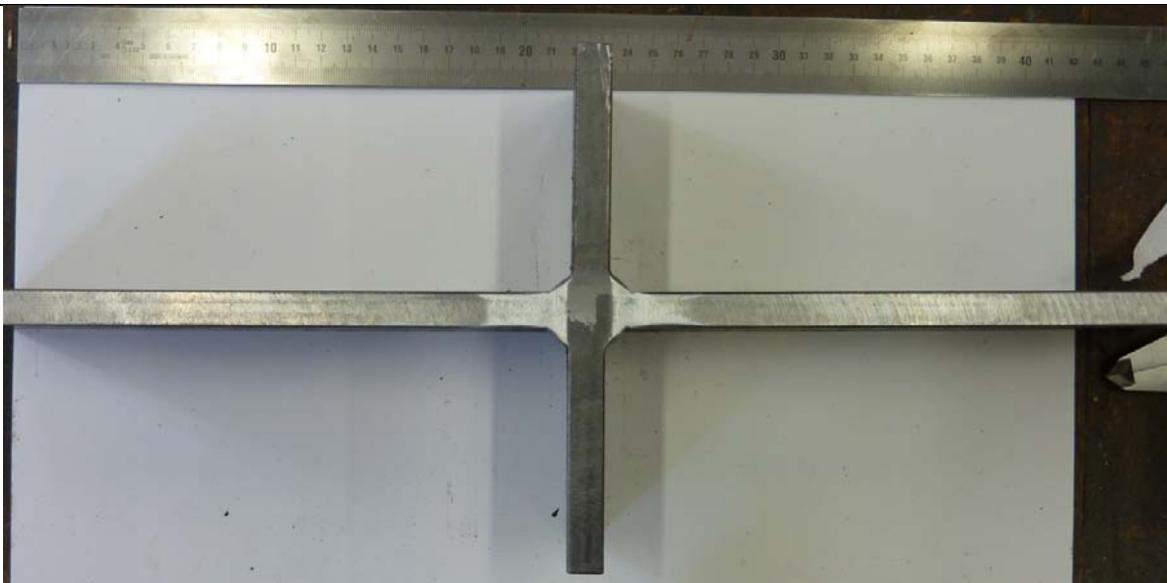
Prüfdatum:  
26.10.2010

#### 1. Geometrie Probekörper

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,24	12,27
links	60,28	12,24

a-Maß [mm]
4,9

#### Seitenansicht



#### Draufsicht



## 2. Schwingversuche

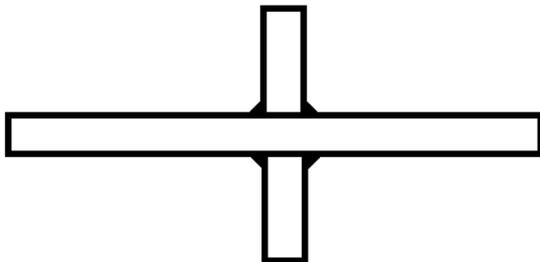
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	140 kN
Unterlast	$F_U =$	14 kN
Mittellast	$F_M =$	77 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

Abbruch bei 2.000.000 Schwingspielen ohne erkennbare Schädigung.

**Datenblatt      Pk. 2.1.2**Prüfdatum:  
02.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,04	12,31
links	60,03	12,35

a-Maß [mm]
4,9

**Seitenansicht****Draufsicht**

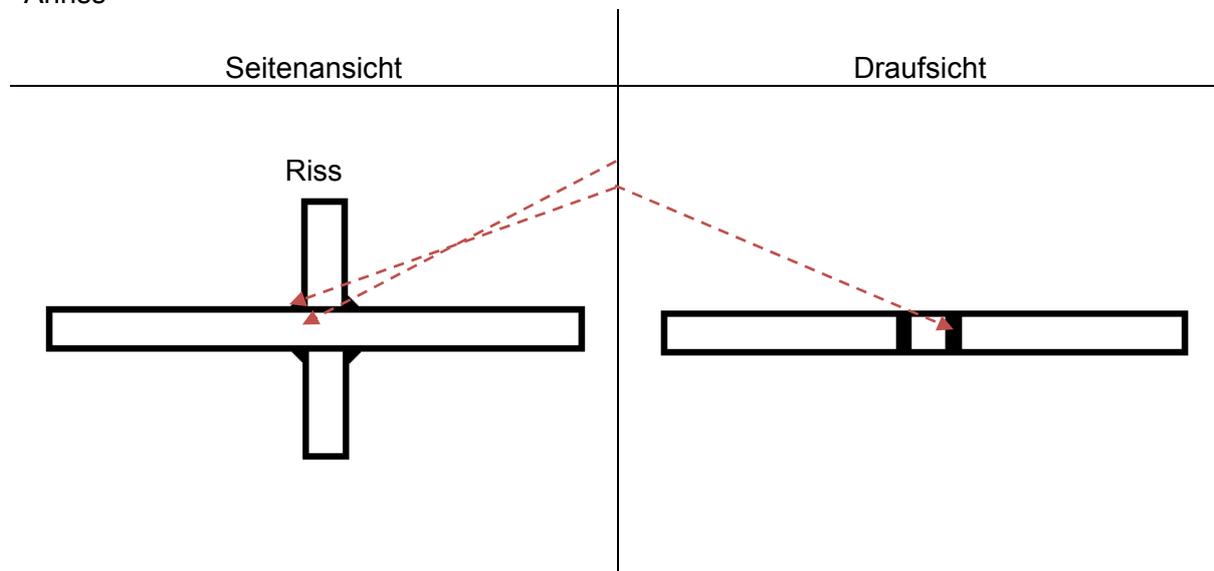
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	250 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	200 kN
Unterlast	$F_U =$	20 kN
Mittellast	$F_M =$	110 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	180 kN
Amplitude	$A =$	90 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  109.229

Anriss



## 4. Bemerkung

Riss: vorne:  $t = 4,8$  mm  
 $l = 54$  mm

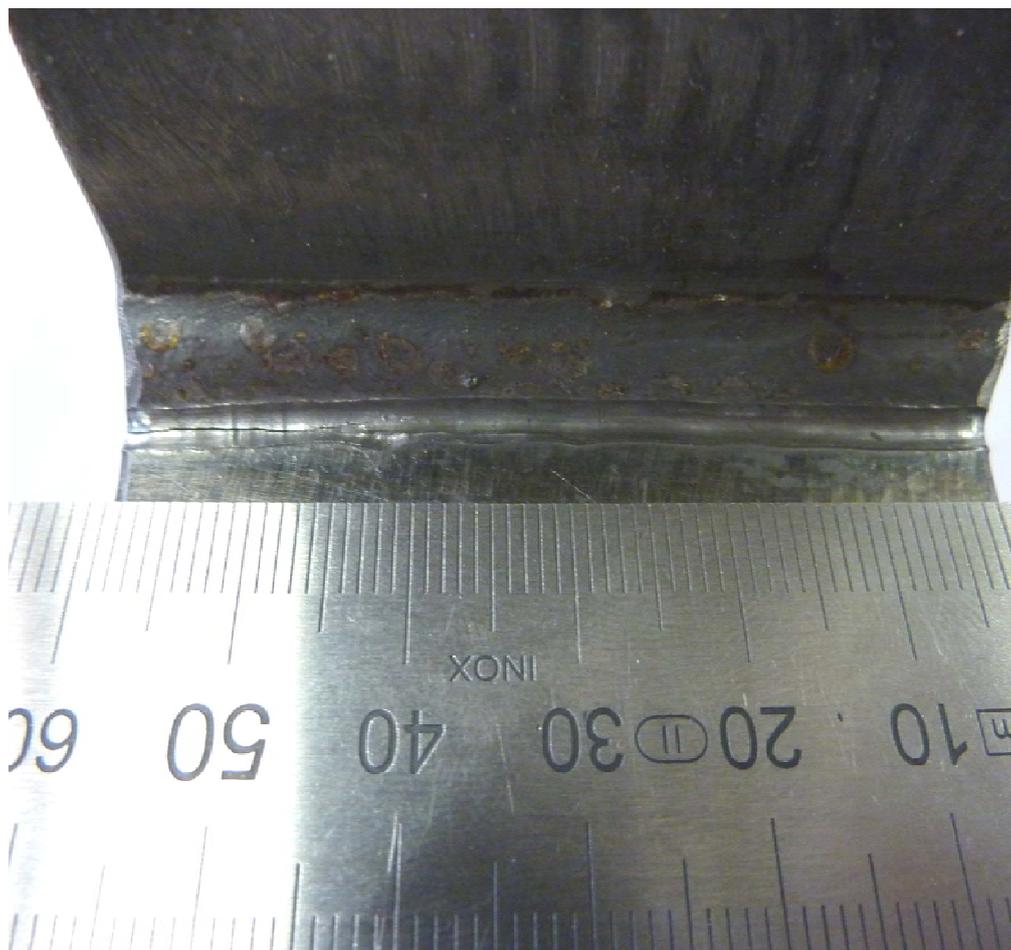
hinten:  $t = 3,2$  mm  
 $l = 14$  mm

**5. Rissbild Draufsicht (vorne)****6. Rissbild Seitenansicht**

---

**7. Rissbild Draufsicht (hinten)**

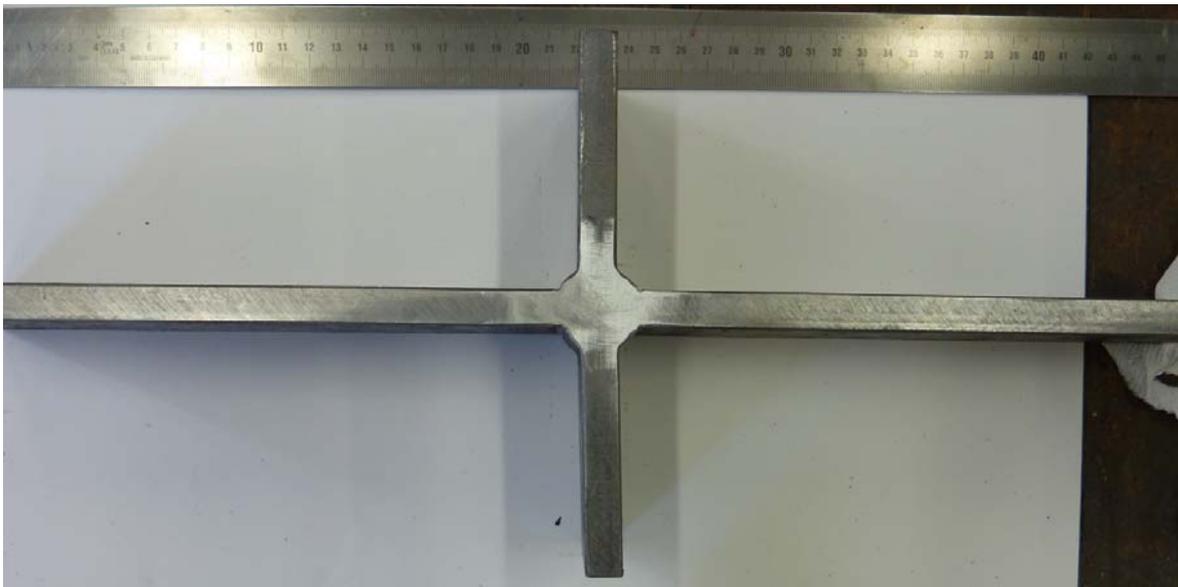
---



**Datenblatt Pk. 2.1.3**Prüfdatum:  
15.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,18	12,84
links	60,19	12,73

a-Maß [mm]
5,0

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

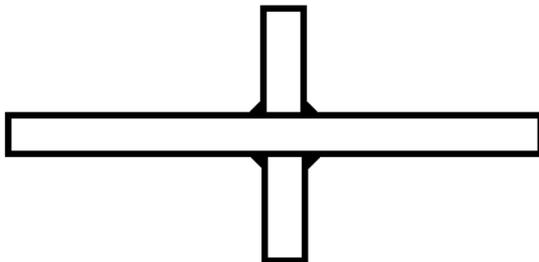
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	160 kN
Unterlast	$F_U =$	16 kN
Mittellast	$F_M =$	88 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



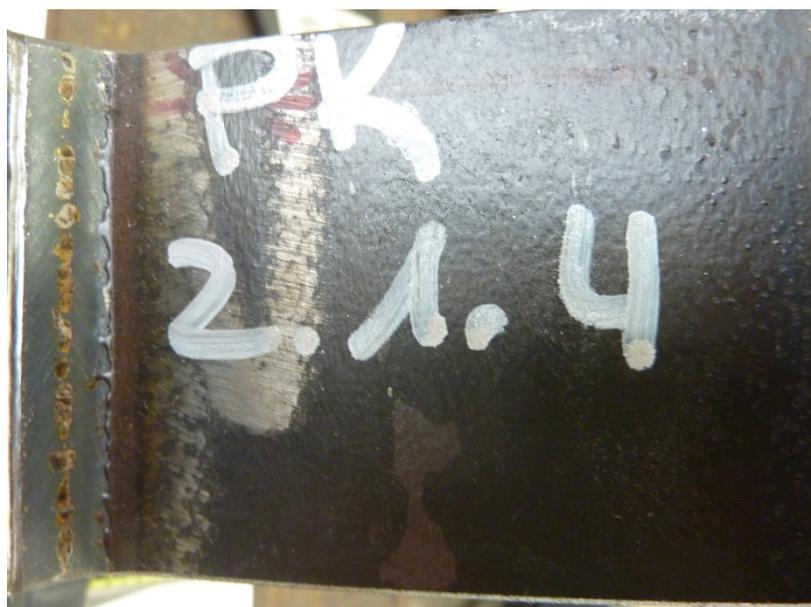
## 4. Bemerkung

Abbruch bei 2.000.001 Schwingspielen ohne erkennbare Schädigung.

**Datenblatt Pk. 2.1.4**Prüfdatum:  
15.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,20	12,11
links	60,17	12,19

a-Maß [mm]
5,1

**Seitenansicht****Draufsicht**

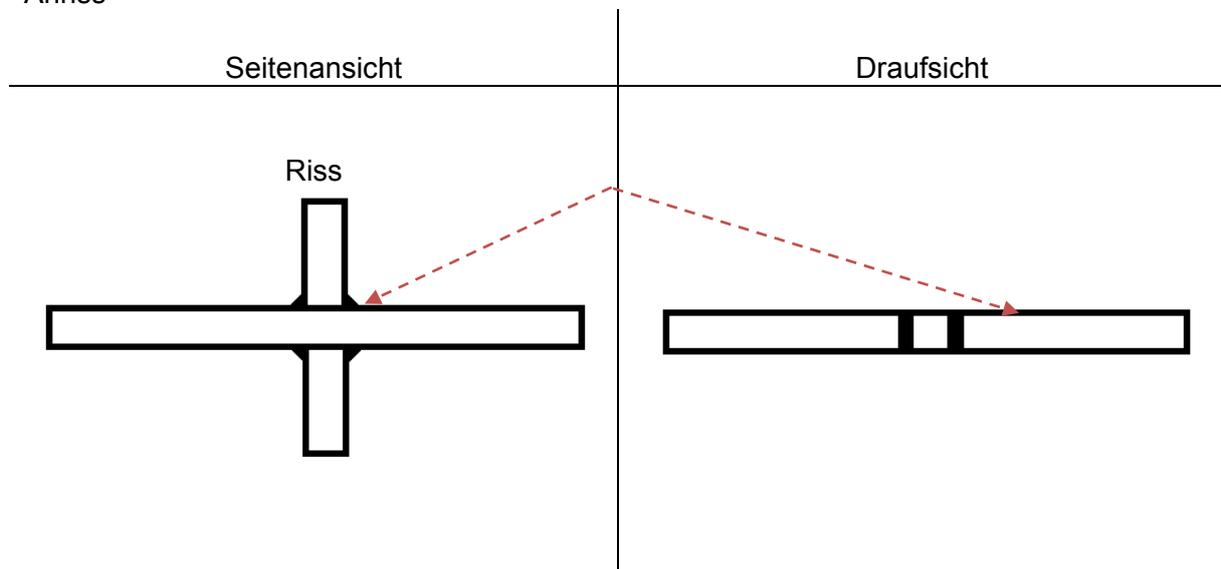
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	180 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	99 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  813.288

Anriss

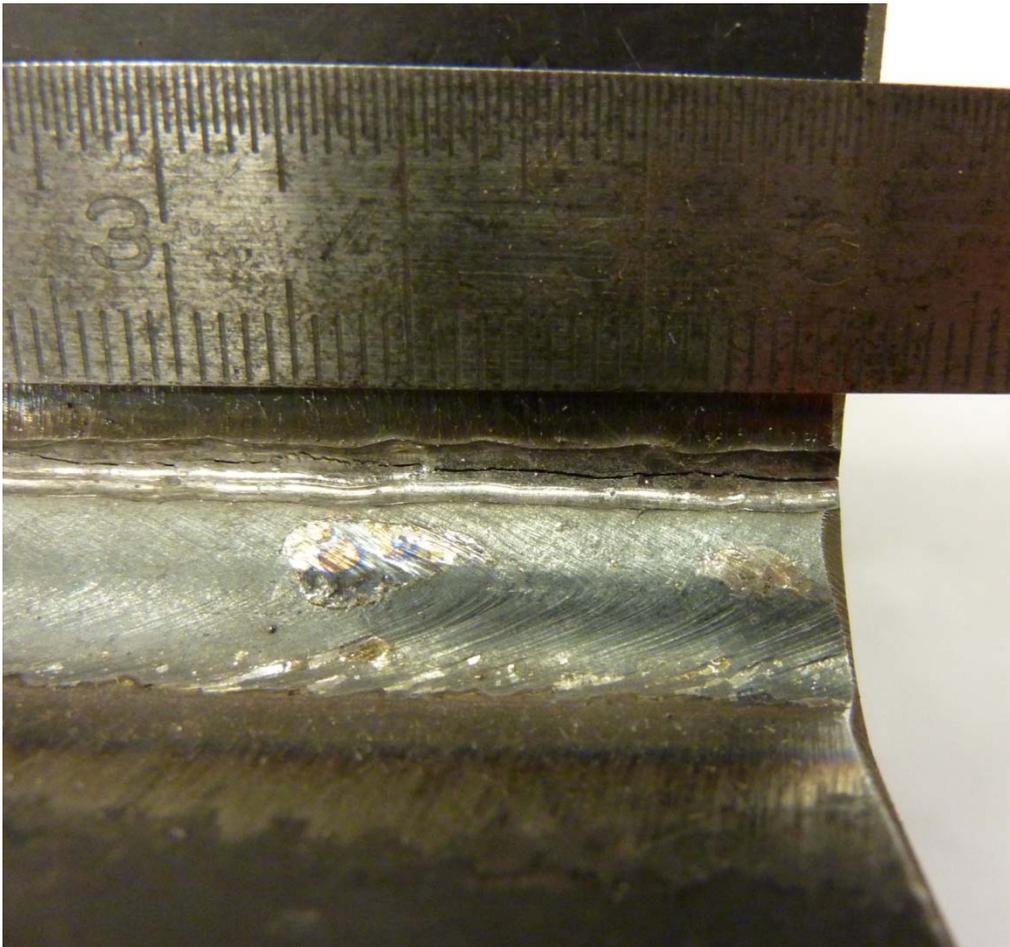


## 4. Bemerkung

Riss:  $t = 8$  mm  
 $l = 22$  mm

### 5. Rissbild Draufsicht

---



### 6. Rissbild Seitenansicht

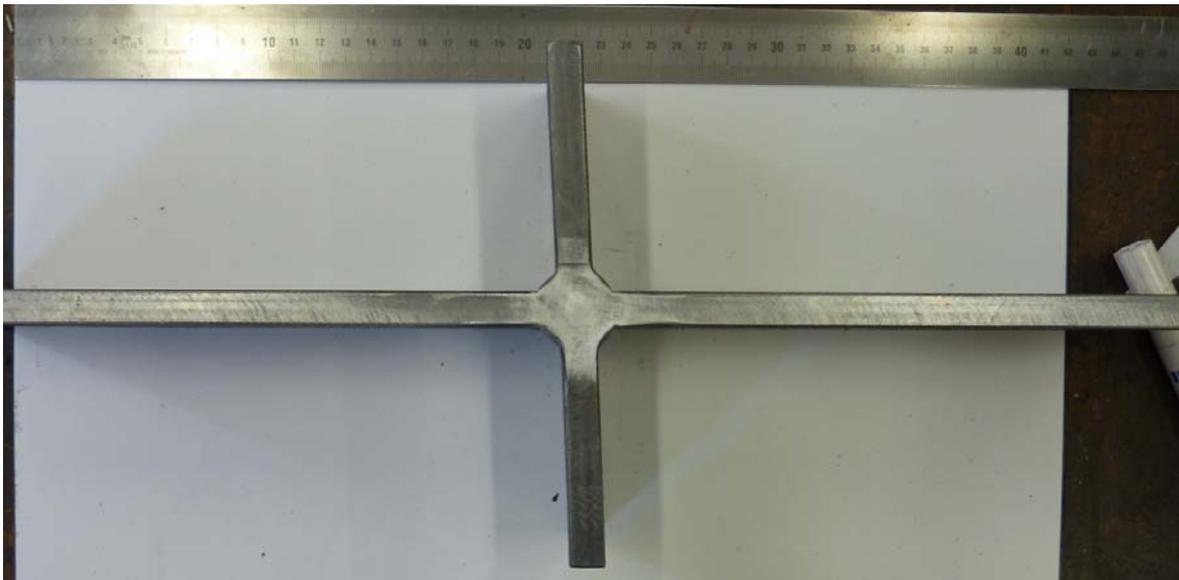
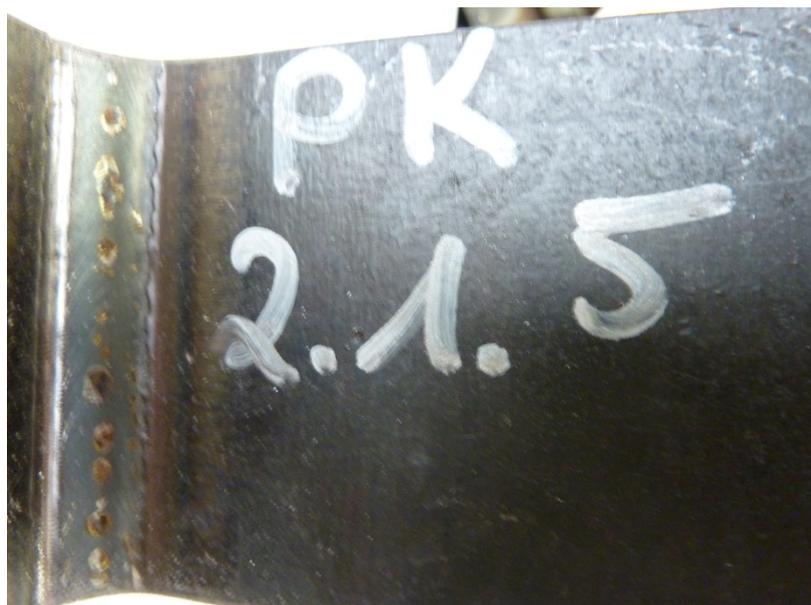
---



**Datenblatt Pk. 2.1.5**Prüfdatum:  
15.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,11	12,49
links	60,57	12,34

a-Maß [mm]
5,1

**Seitenansicht****Draufsicht**

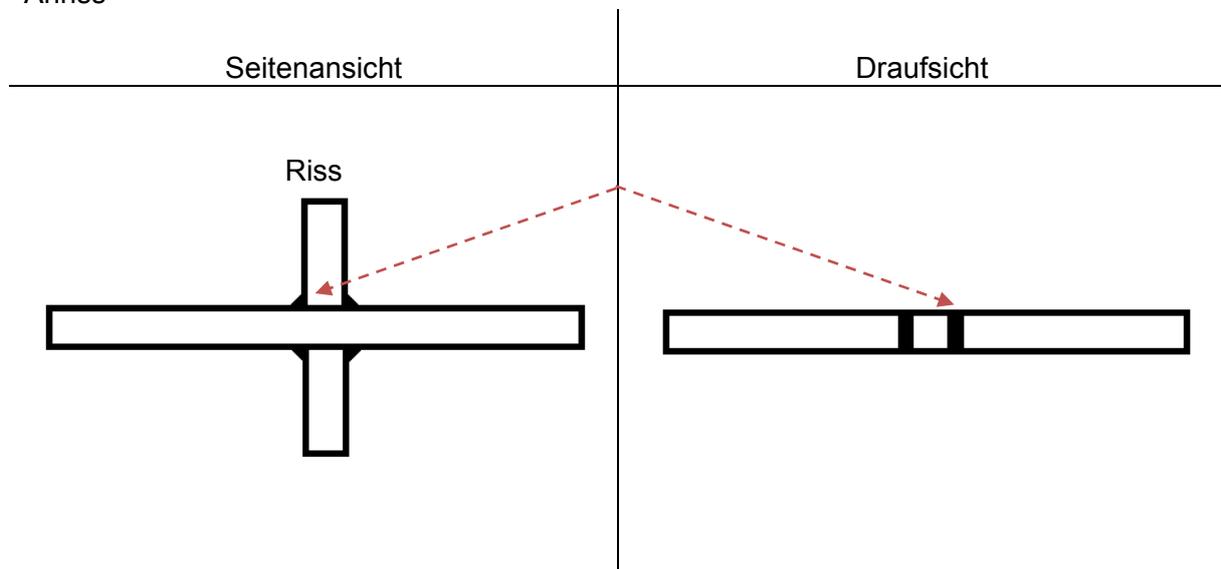
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	180 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	99 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  783.730

Anriss

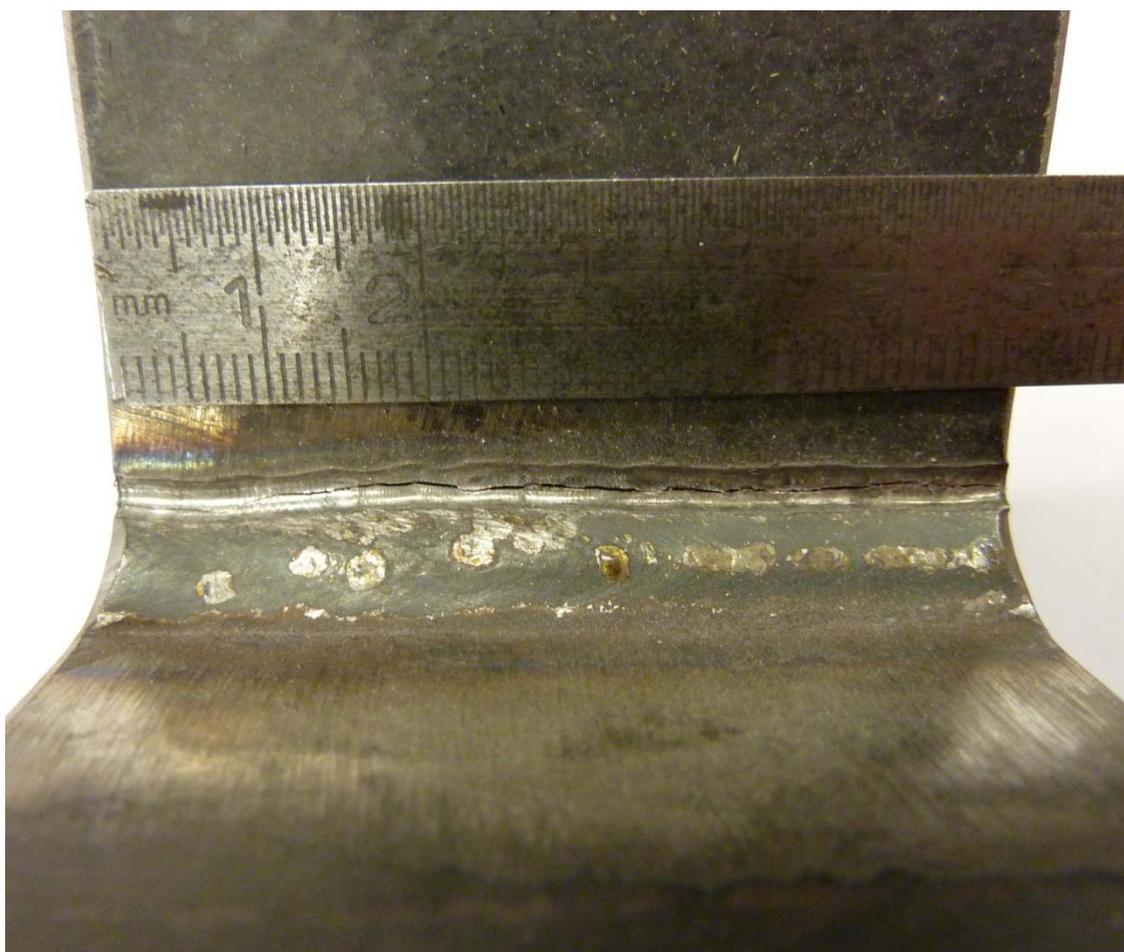


## 4. Bemerkung

Riss:  $t < 0,1$  mm  
 $l = 52$  mm

## 5. Rissbild Draufsicht

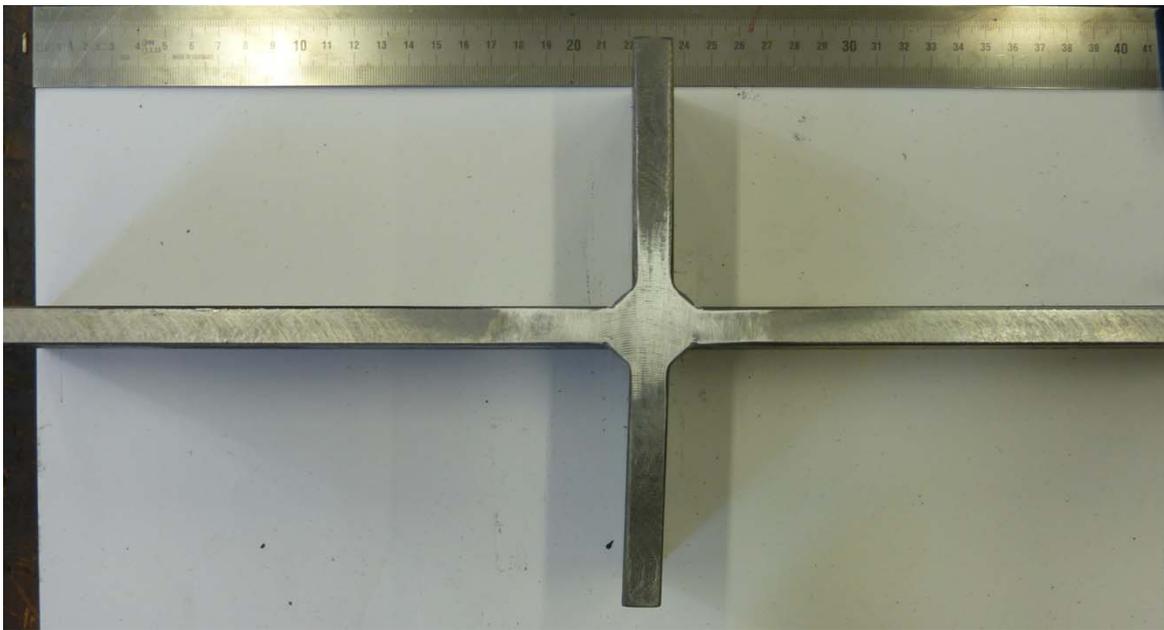
---



**Datenblatt Pk. 2.1.6**Prüfdatum:  
26.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,18	12,50
links	60,19	12,51

a-Maß [mm]
4,5

**Seitenansicht****Draufsicht**

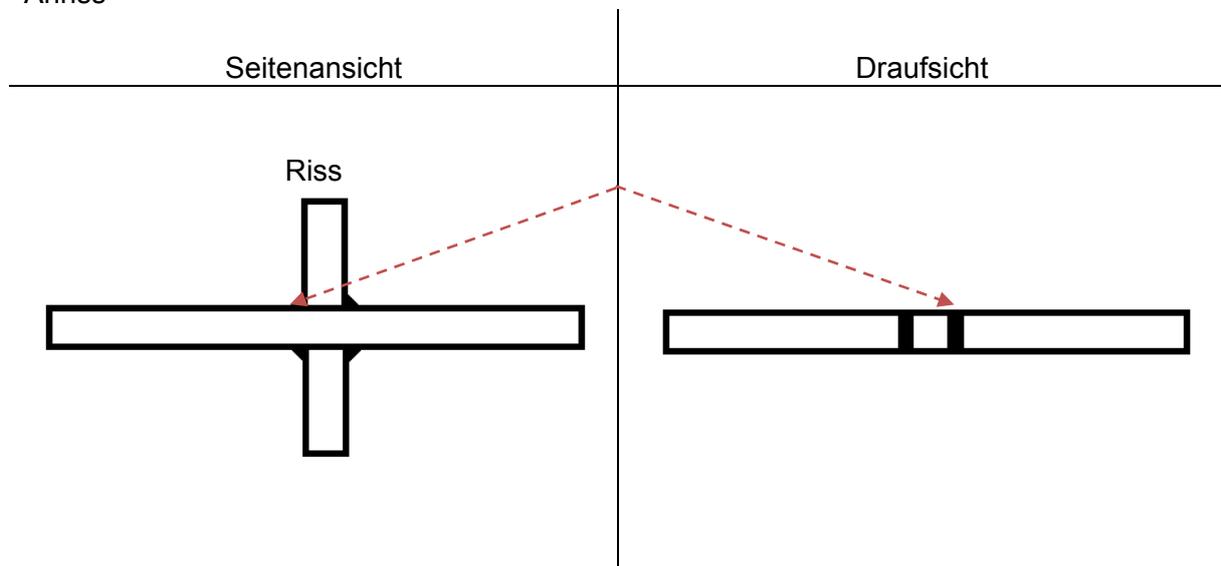
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	180 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	99 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  294.931

Anriss



## 4. Bemerkung

Riss:  $t = 3$  mm (links) / 1mm (rechts)  
 l = durchgehend

**5. Rissbild Draufsicht**

---

**6. Rissbild Seitenansicht (links)**

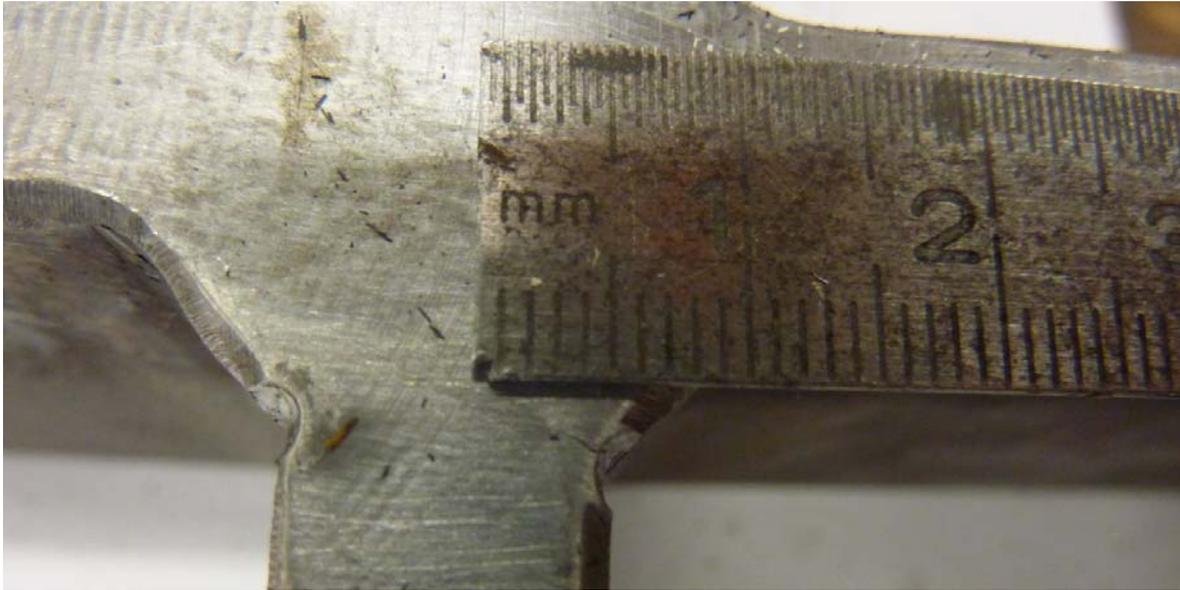
---



---

**7. Rissbild Seitenansicht (rechts)**

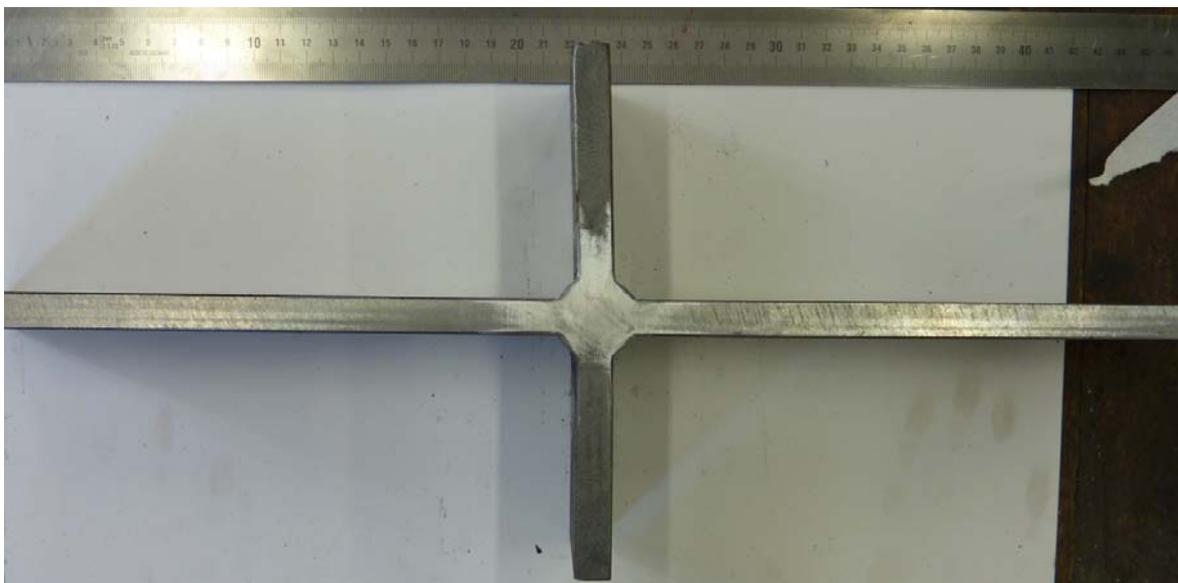
---



**Datenblatt Pk. 2.1.7**Prüfdatum:  
08.02.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,29	12,55
links	60,19	12,49

a-Maß [mm]
5,2

**Seitenansicht****Draufsicht**

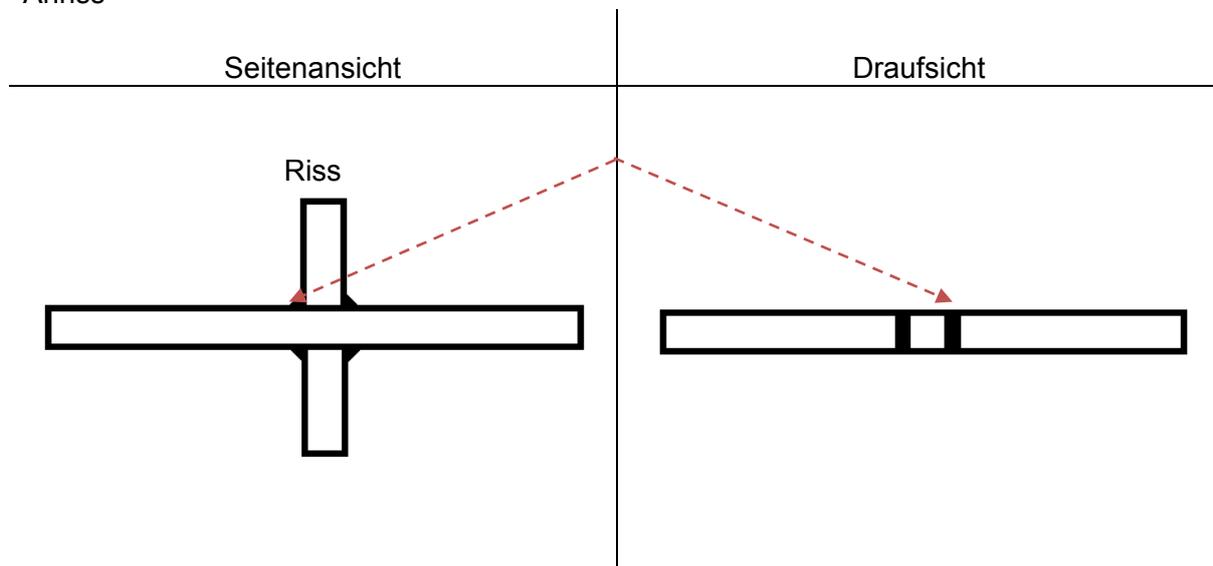
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	250 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	200 kN
Unterlast	$F_U =$	20 kN
Mittellast	$F_M =$	110 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	180 kN
Amplitude	$A =$	90 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

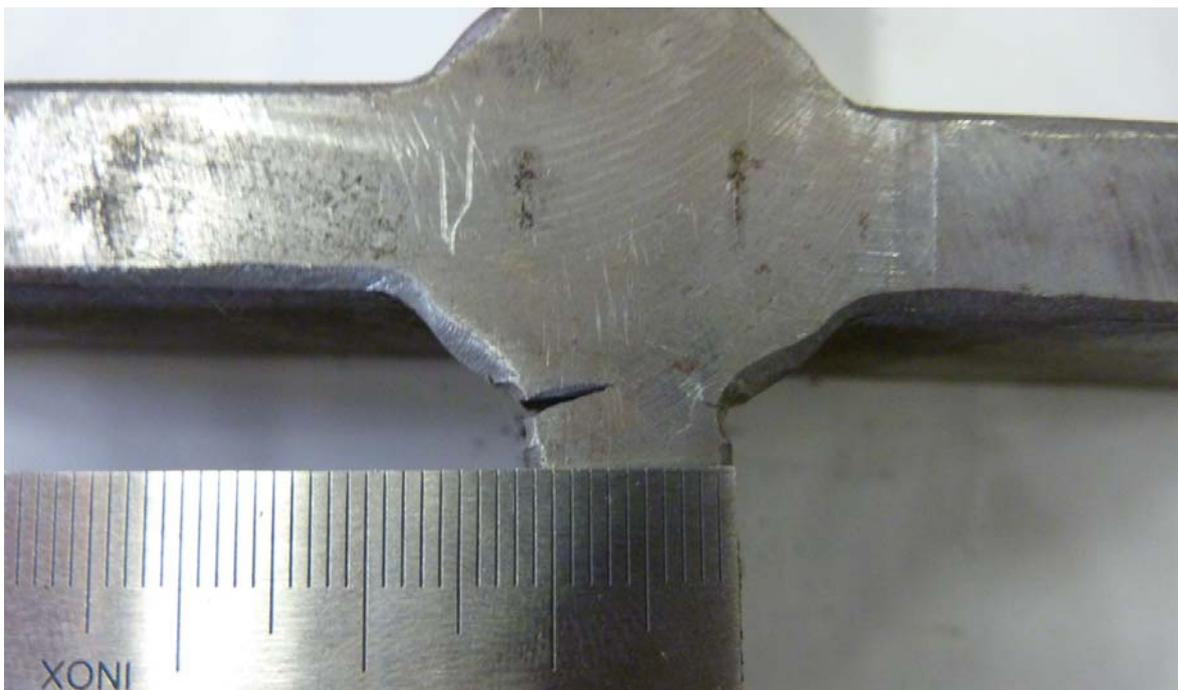
Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  107.611

Anriss



## 4. Bemerkung

Riss:  $t = 4,1$  mm (rechts) /  $7,3$  mm (links)  
 l = durchgehend

**5. Rissbild Draufsicht****6. Rissbild Seitenansicht (rechts)**

**7. Rissbild Seitenansicht (links)**

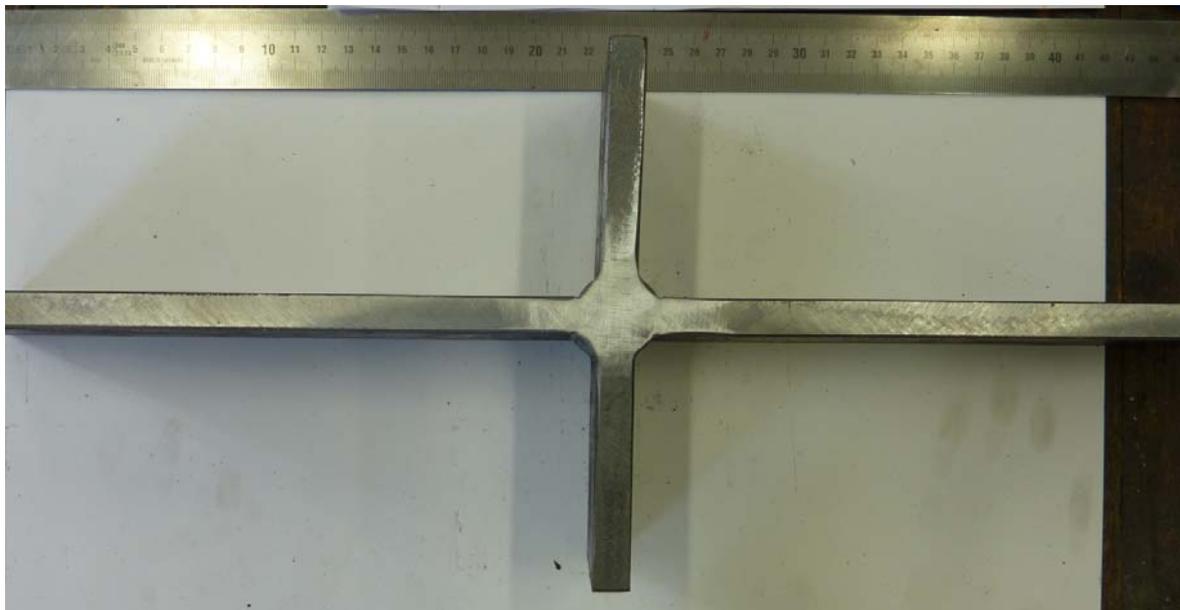
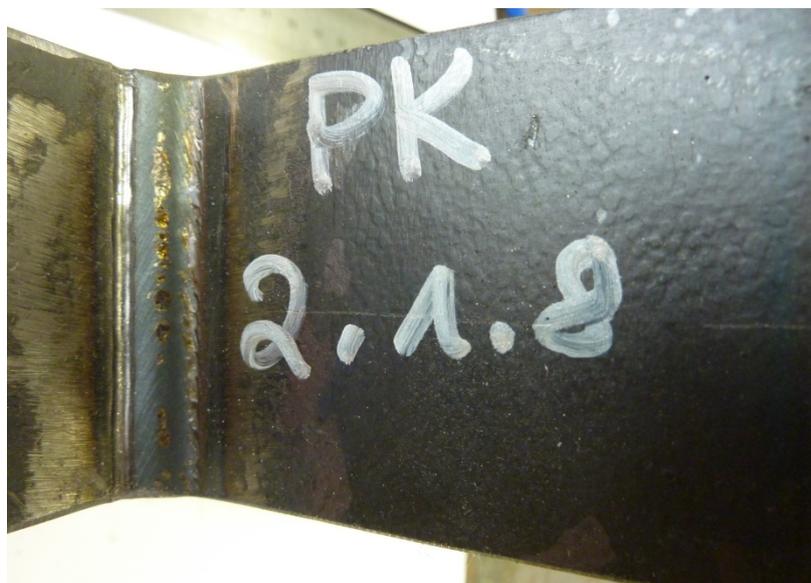
---



**Datenblatt Pk. 2.1.8**Prüfdatum:  
28.09.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,14	12,37
links	60,39	12,26

a-Maß [mm]
4,5

**Seitenansicht****Draufsicht**

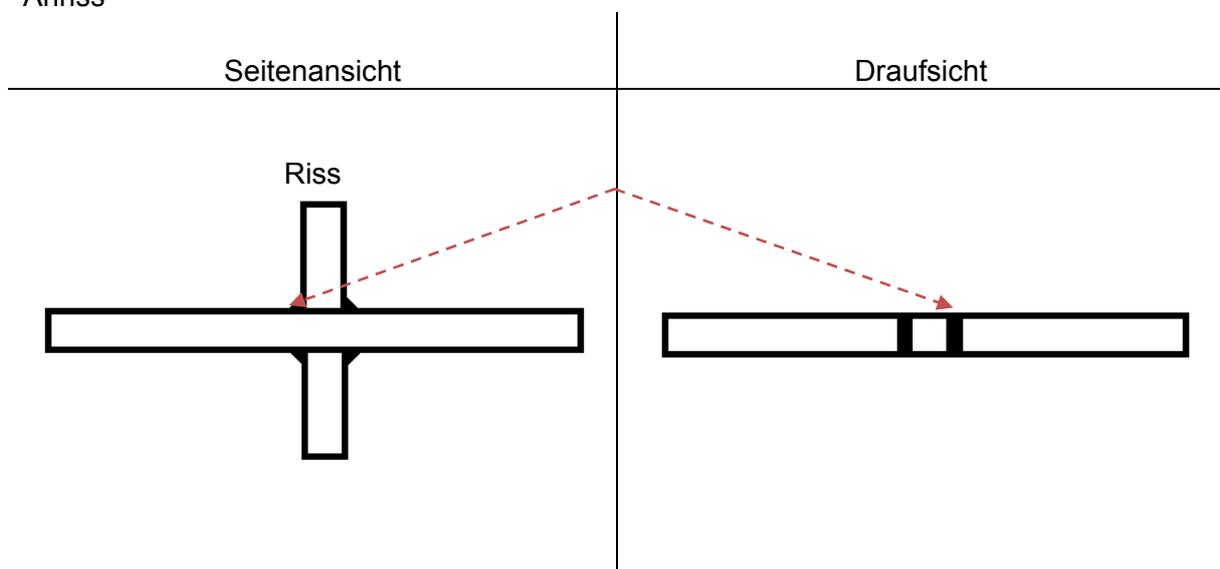
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	160 kN
Unterlast	$F_U =$	16 kN
Mittellast	$F_M =$	88 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  1.257.559

Anriss



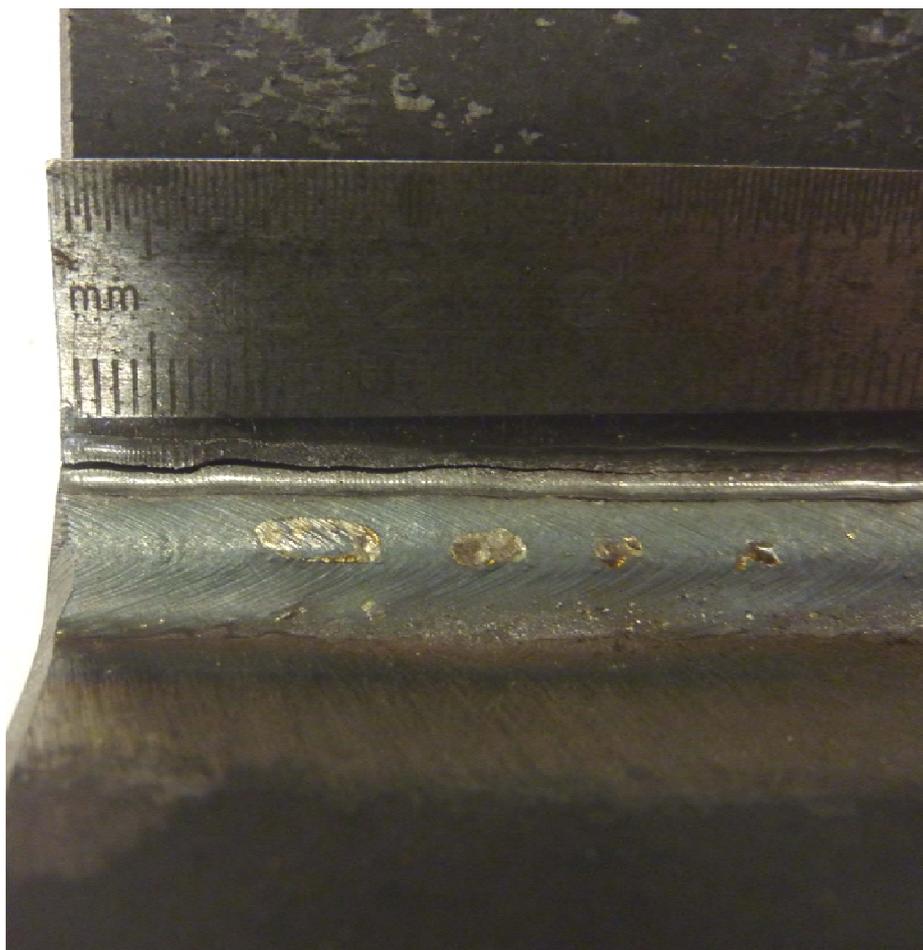
## 4. Bemerkung

Riss: t = durchgehend

l = 34 mm

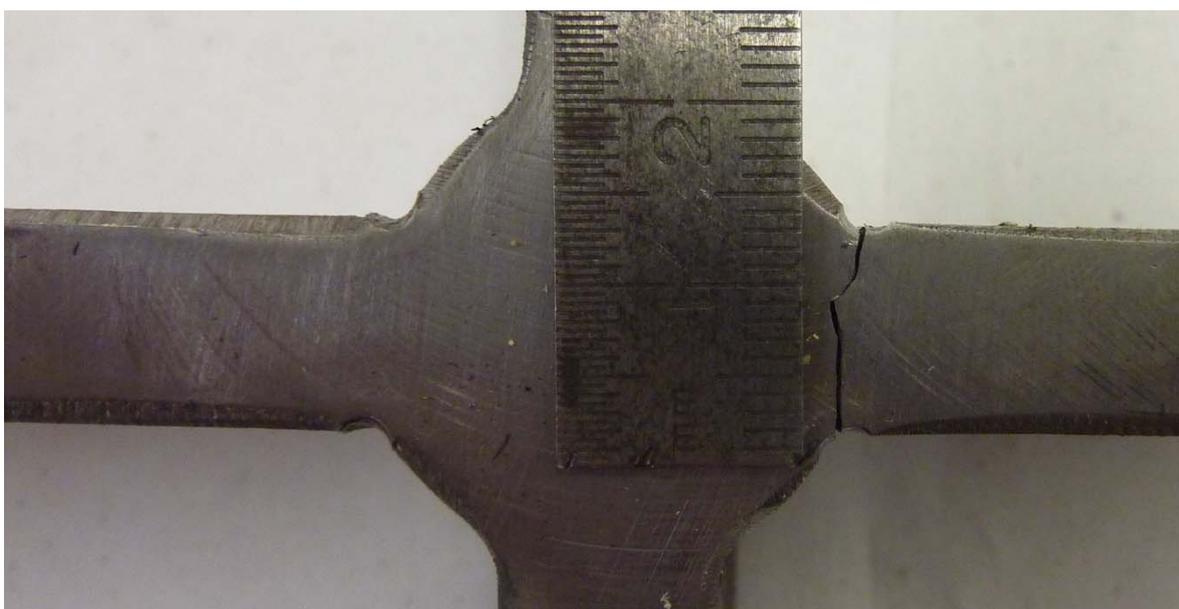
### 5. Rissbild Draufsicht

---



### 6. Rissbild Seitenansicht

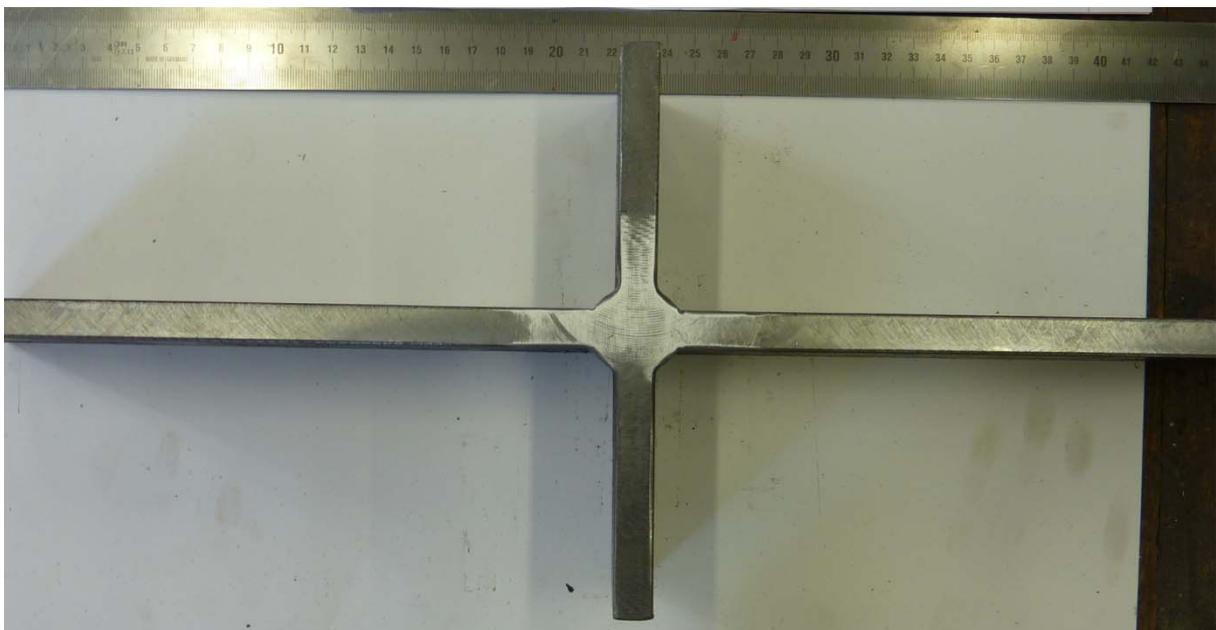
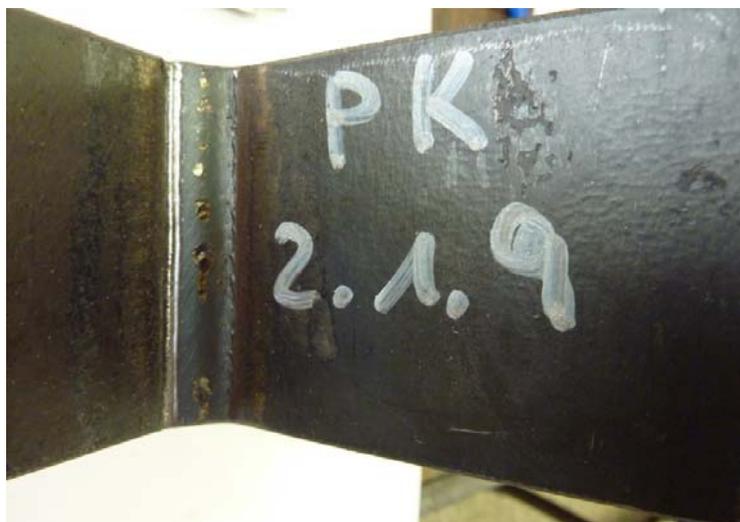
---



**Datenblatt Pk. 2.1.9**Prüfdatum:  
28.09.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,24	12,13
links	60,24	12,28

a-Maß [mm]
5,0

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

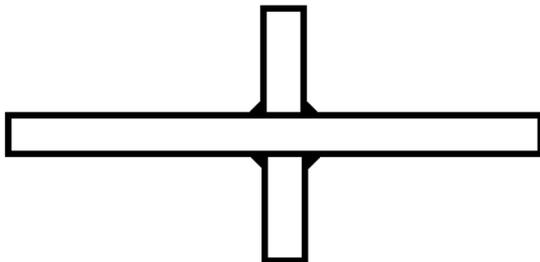
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	160 kN
Unterlast	$F_U =$	16 kN
Mittellast	$F_M =$	88 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



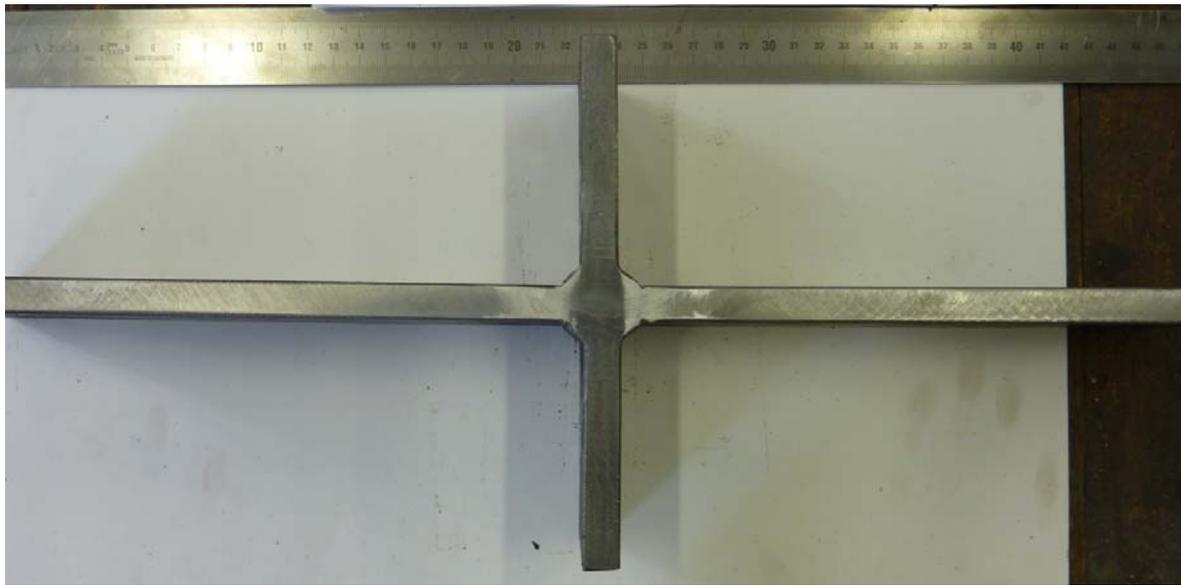
## 4. Bemerkung

Abbruch bei 2.000.000 Schwingspielen ohne erkennbare Schädigung.

**Datenblatt Pk. 2.1.10**Prüfdatum:  
10.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,28	12,22
links	60,38	12,47

a-Maß [mm]
5,0

**Seitenansicht****Draufsicht**

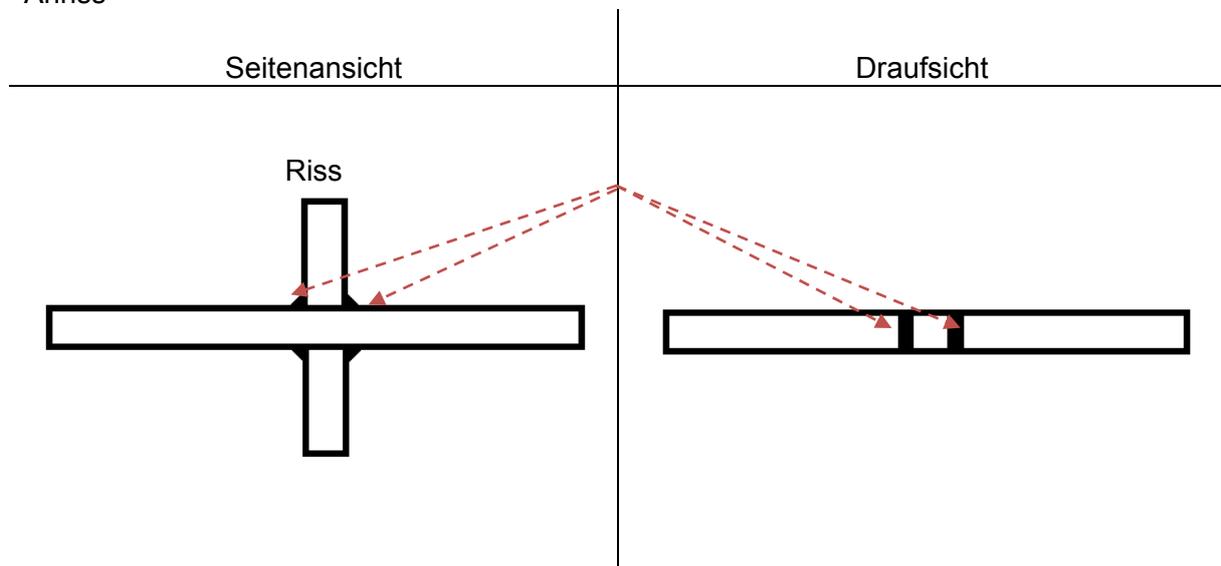
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	250 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	200 kN
Unterlast	$F_U =$	20 kN
Mittellast	$F_M =$	110 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	180 kN
Amplitude	$A =$	90 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  117.273

Anriss



## 4. Bemerkung

Riss: links:  $t = 4$  mm  
 $l = 13$  mm

rechts:  $t = 2$  mm  
 $l =$  durchgehend

### 5. Rissbild Draufsicht (links)

---



### 6. Rissbild Seitenansicht (links)

---



---

**7. Rissbild Draufsicht (rechts)**

---



---

**8. Rissbild Seitenansicht (rechts)**

---





## 9 Anhang A

### 9.4 Datenblätter Serie 2.2

**Datenblatt Pk. 2.2.1**

Prüfdatum:  
26.10.2010

#### 1. Geometrie Probekörper

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,30	12,18
links	60,21	12,22

a-Maß [mm]
4,8

#### Seitenansicht



#### Draufsicht



## 2. Schwingversuche

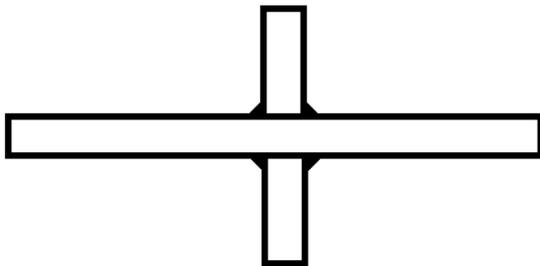
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	158,40 kN
Unterlast	$F_U =$	14,39 kN
Mittellast	$F_M =$	86,40 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

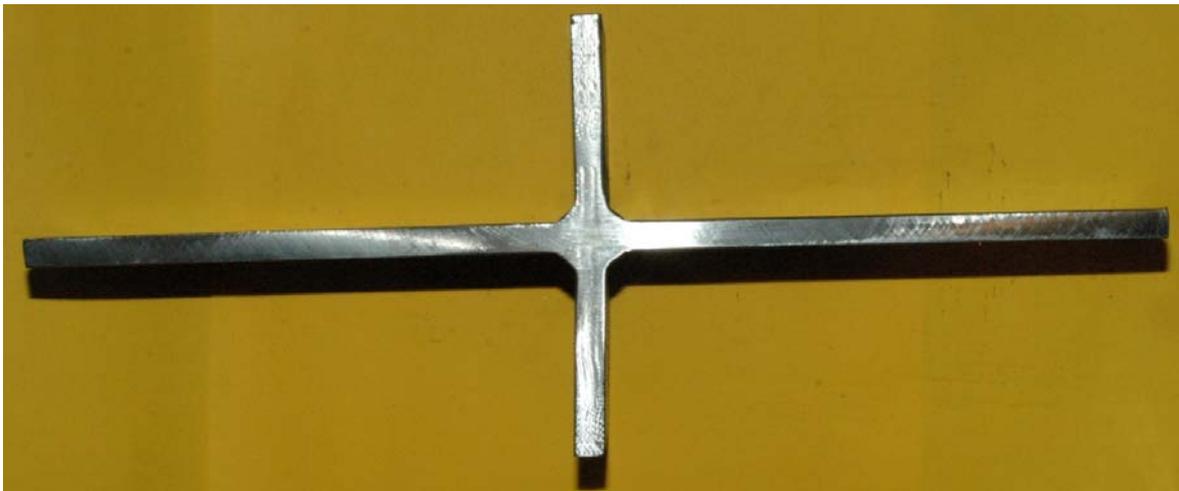
Abbruch bei 2.050.000 Schwingspielen ohne erkennbare Schädigung.

**Datenblatt Pk. 2.2.2**Prüfdatum:  
02.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,09	12,10
links	60,30	12,24

a-Maß [mm]
4,8

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

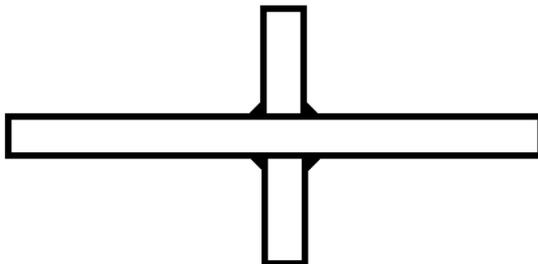
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	158,40 kN
Unterlast	$F_U =$	14,39 kN
Mittellast	$F_M =$	86,40 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

Abbruch bei 2.050.000 Schwingspielen ohne erkennbare Schädigung.

**Datenblatt Pk. 2.2.3**

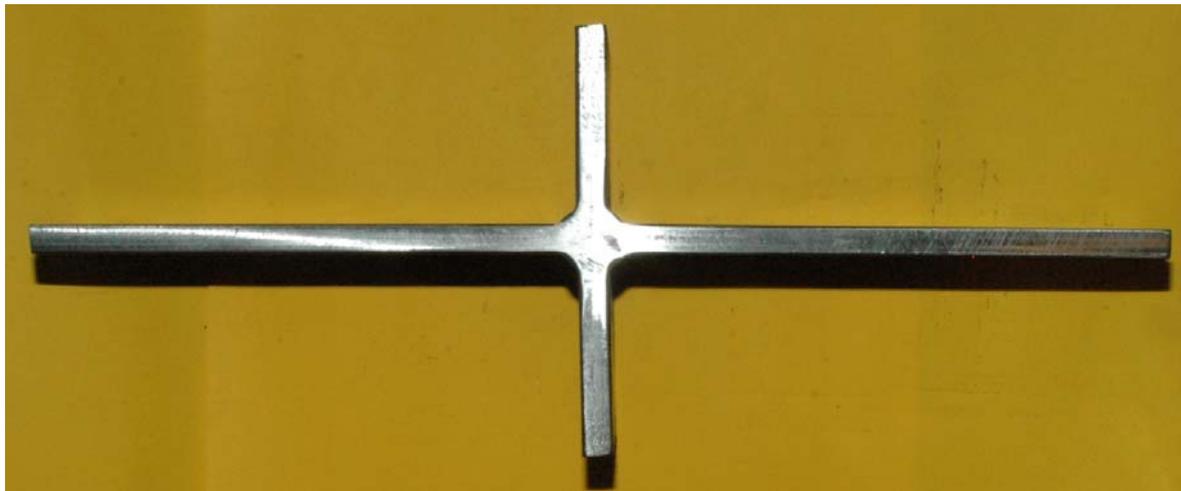
Prüfdatum:

**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,11	12,06
links	60,06	11,96

a-Maß [mm]
4,8

Seitenansicht



Draufsicht



## 2. Schwingversuche

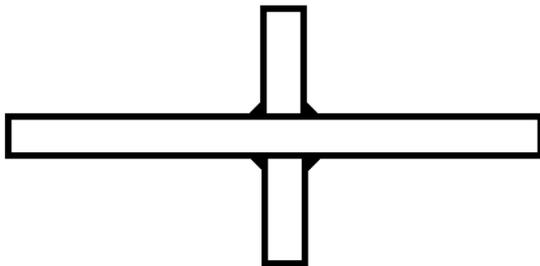
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	178,19 kN
Unterlast	$F_U =$	16,20 kN
Mittellast	$F_M =$	97,20 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  1.501.728

Anriss

Seitenansicht

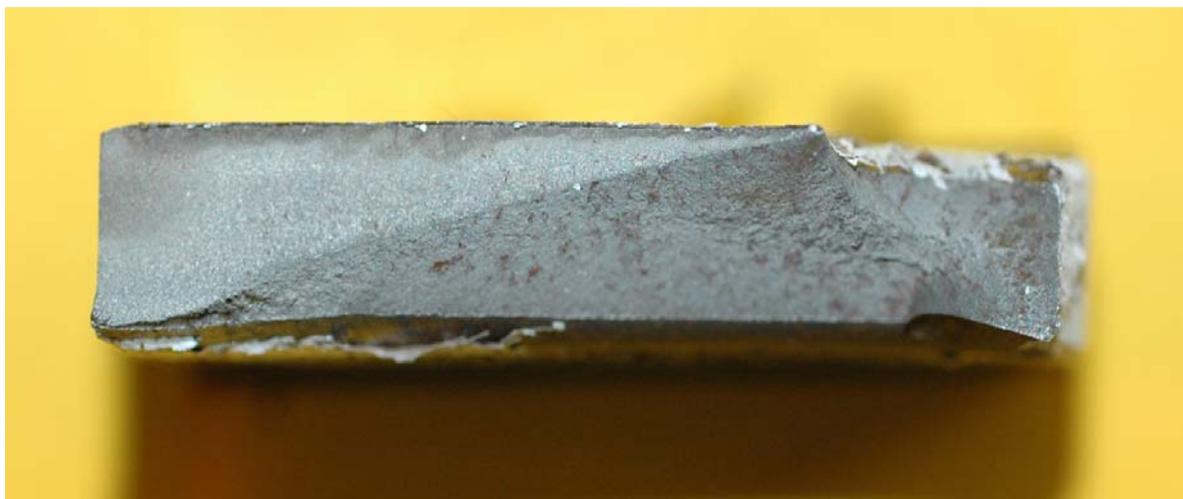


Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

## 5. Bruchbilder



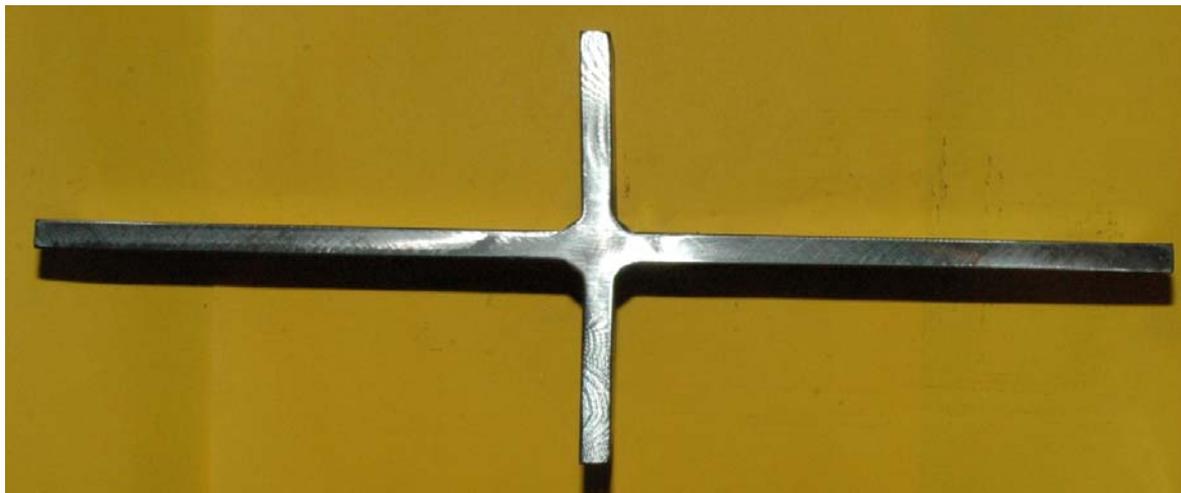
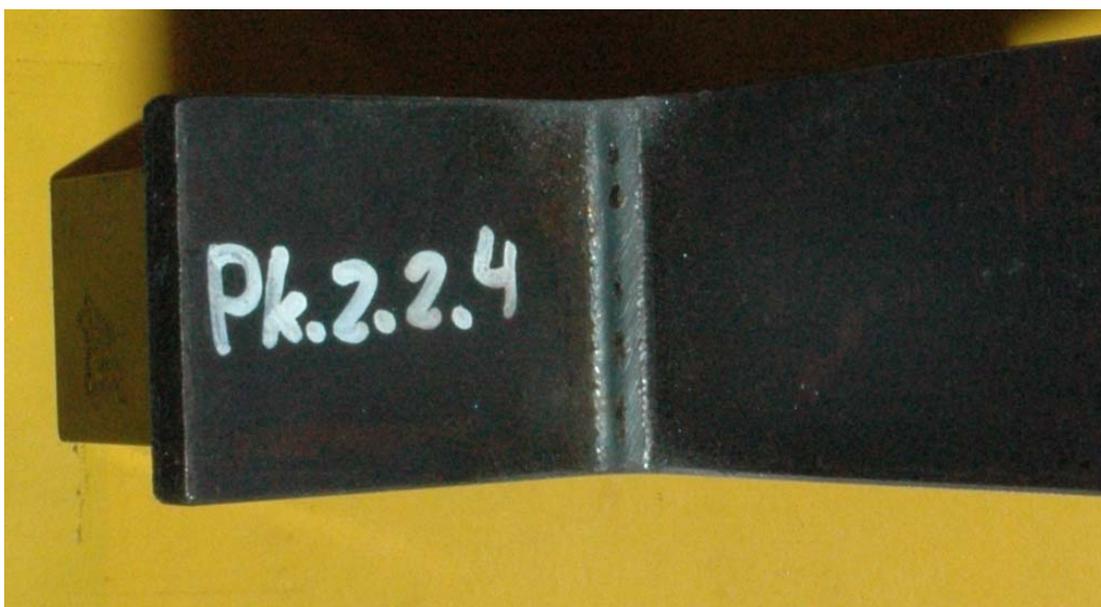
**Datenblatt Pk. 2.2.4**

Prüfdatum:  
05.11.2010 09:00 – 05.11.2010  
14:43

**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,13	12,41
links	59,46	12,17

a-Maß [mm]
4,0

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

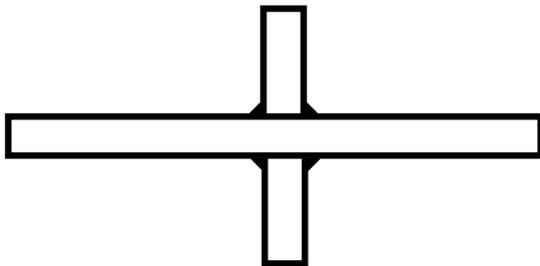
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	250 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	198 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	108 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	180 kN
Amplitude	$A =$	90 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  164.734

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

## 5. Bruchbilder

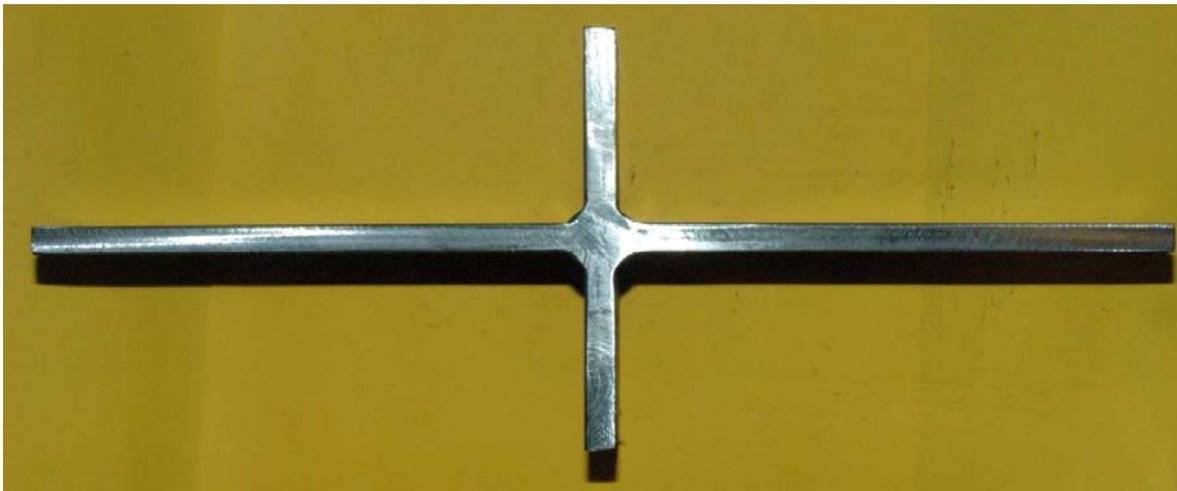


**Datenblatt Pk. 2.2.5**Prüfdatum:  
07.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,16	12,08
links	60,09	12,29

a-Maß [mm]
4,8

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

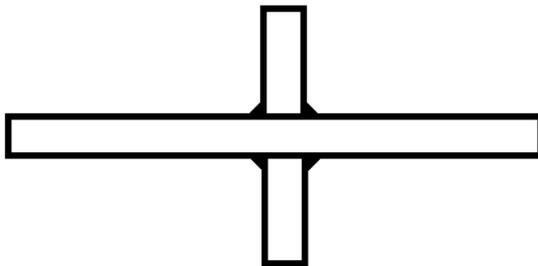
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	138,59 kN
Unterlast	$F_U =$	12,6 kN
Mittellast	$F_M =$	75,59 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

Abbruch bei 2.545.711 Schwingspielen ohne erkennbare Schädigung.

**Datenblatt Pk. 2.2.6**Prüfdatum:  
18.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	59,96	12,11
links	60,08	12,15

a-Maß [mm]
4,9

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

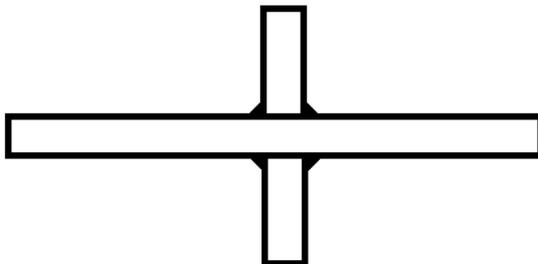
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	178,19 kN
Unterlast	$F_U =$	16,20 kN
Mittellast	$F_M =$	97,20 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  2.007.320

Anriss

Seitenansicht

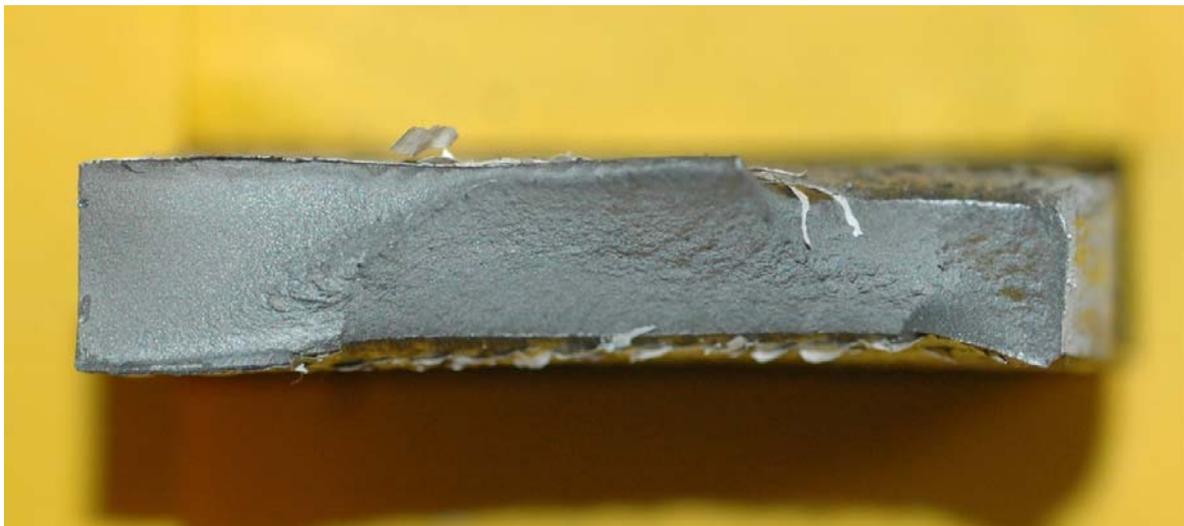


Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

## 5. Bruchbilder

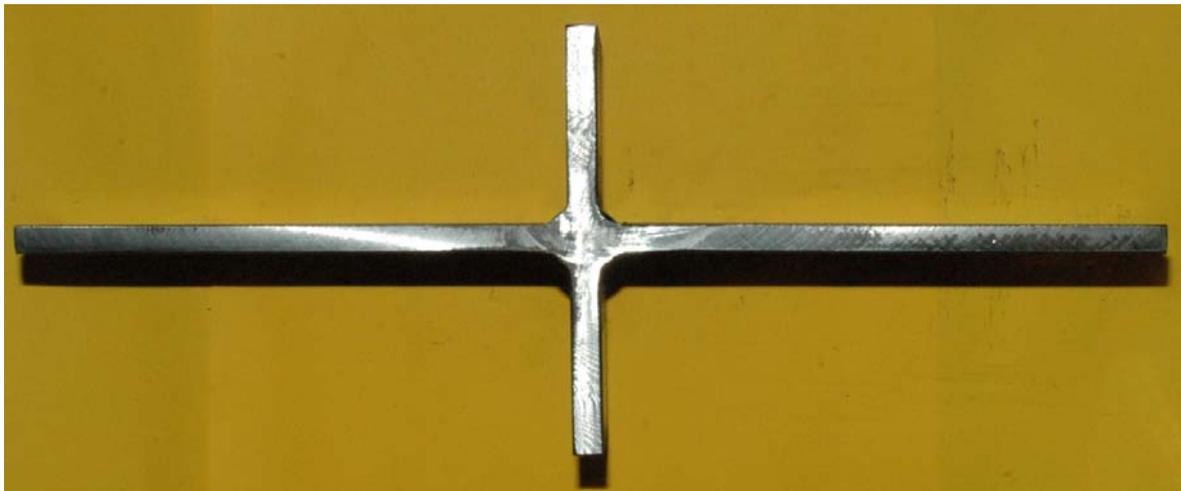


**Datenblatt Pk. 2.2.7**Prüfdatum:  
14.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

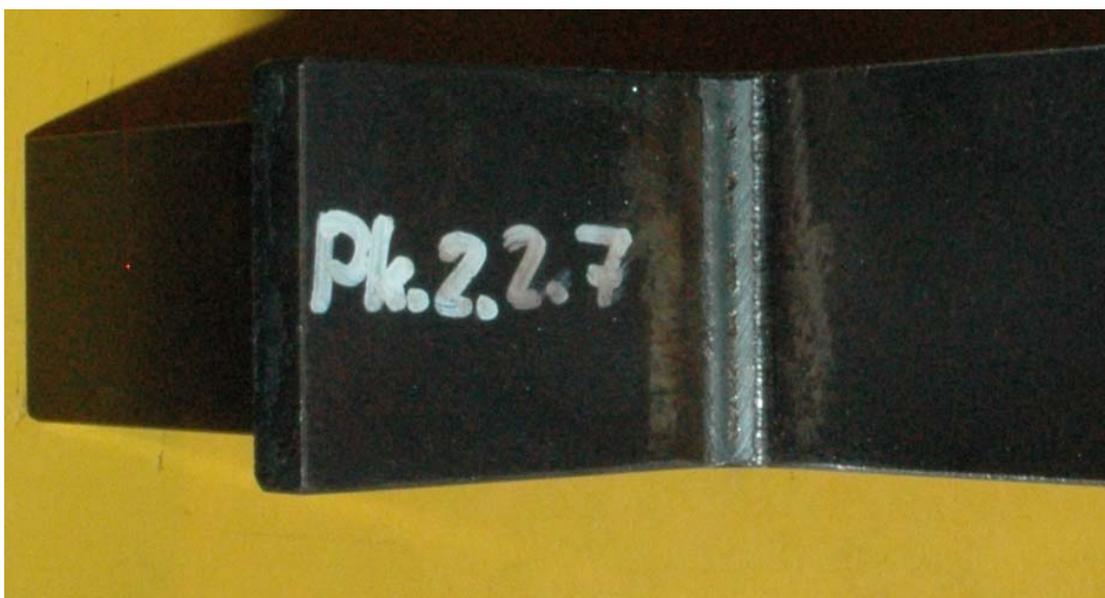
	b [mm]	t [mm]
rechts	60,12	12,09
links	60,16	12,02

a-Maß [mm]
4,9

Seitenansicht



Draufsicht



## 2. Schwingversuche

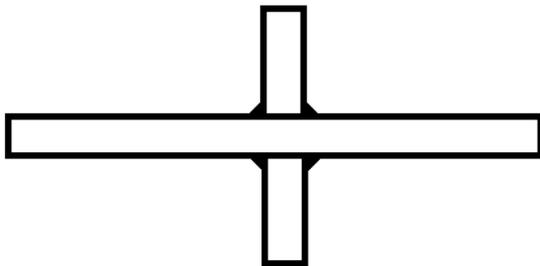
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	178,19 kN
Unterlast	$F_U =$	16,20 kN
Mittellast	$F_M =$	97,20 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

Abbruch bei 2.781.478 Schwingspielen ohne erkennbare Schädigung.

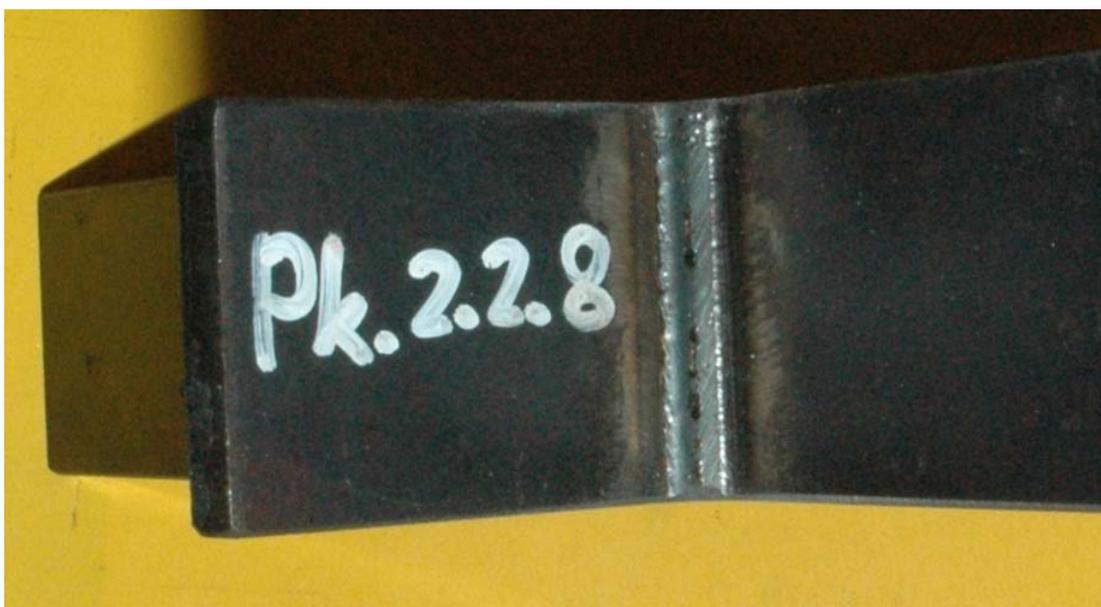
**Datenblatt Pk. 2.2.8**

Prüfdatum:  
13.10.2010 21:30 – 14.10.2010  
07:30

**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	59,13	11,88
links	59,19	11,96

a-Maß [mm]
5,0

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

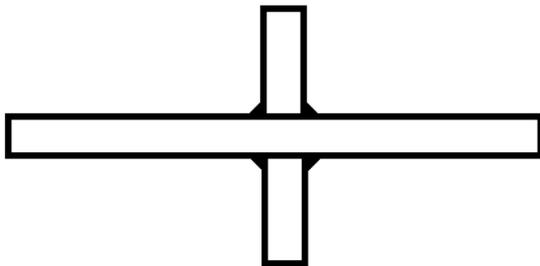
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	250 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	198 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	108 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	180 kN
Amplitude	$A =$	90 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  109.652

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

## 5. Bruchbilder



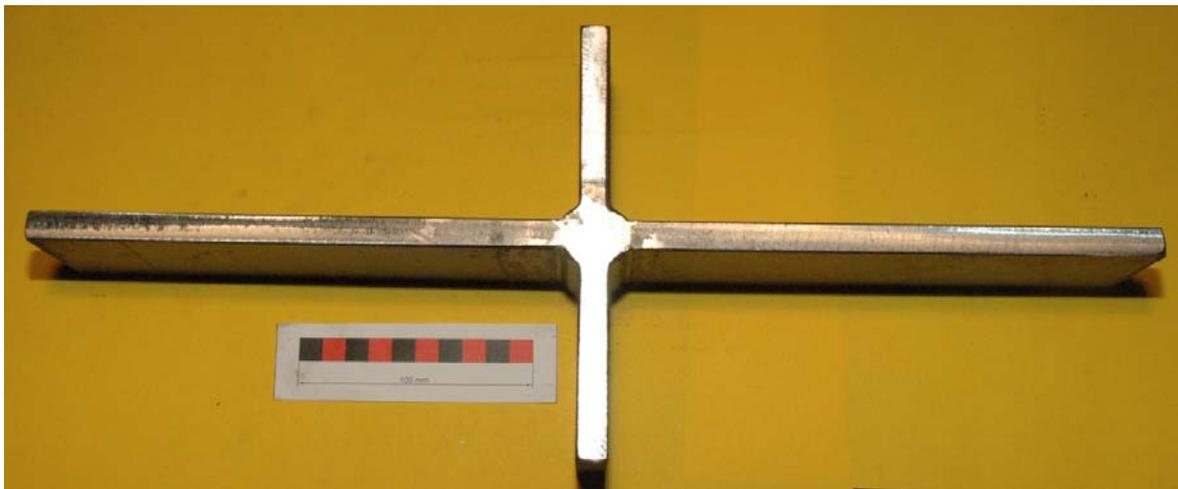
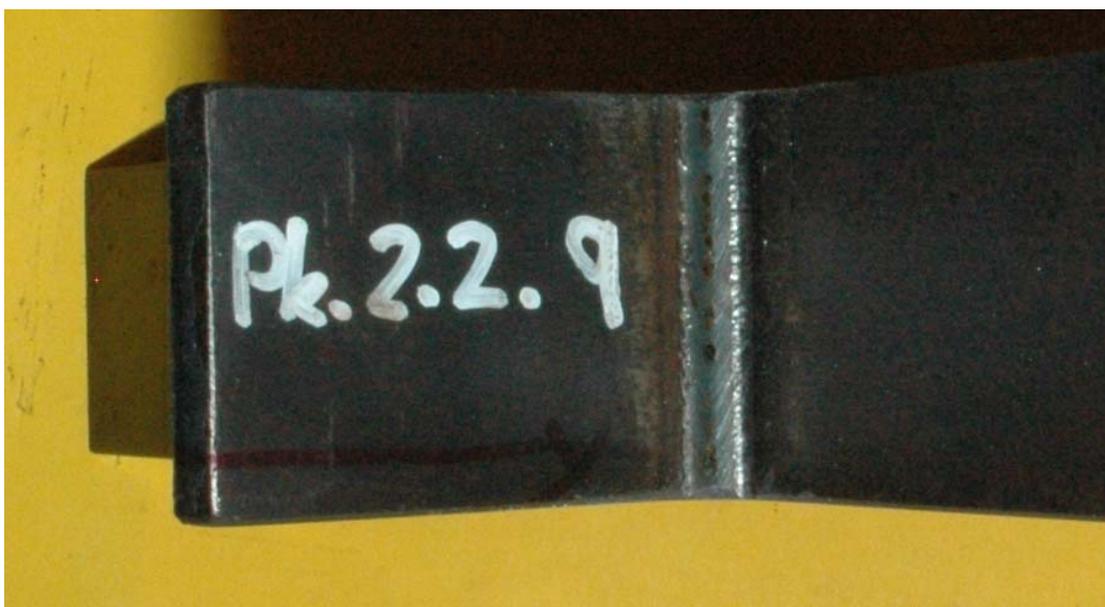
**Datenblatt Pk. 2.2.9**

Prüfdatum:  
11.10.2010 19:40 – 13.10.2010  
21:10

**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,10	12,14
links	60,00	12,10

a-Maß [mm]
4,8

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

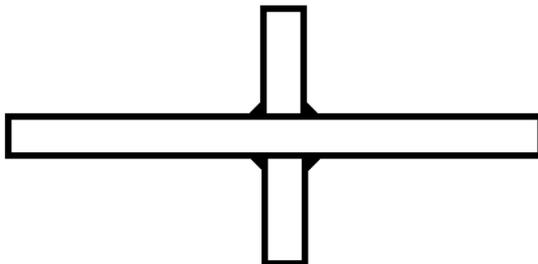
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	158,40 kN
Unterlast	$F_U =$	14,39 kN
Mittellast	$F_M =$	86,40 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  1.425.410

Anriss

Seitenansicht



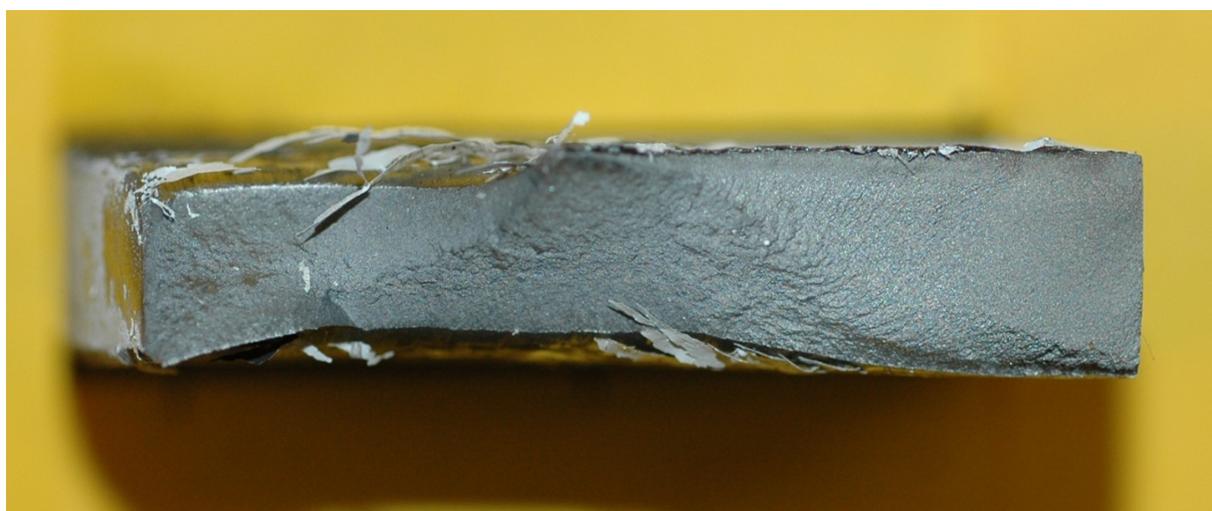
Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

Bei 1.291.506 Schwingspielen neu gespannt.

## 5. Bruchbilder

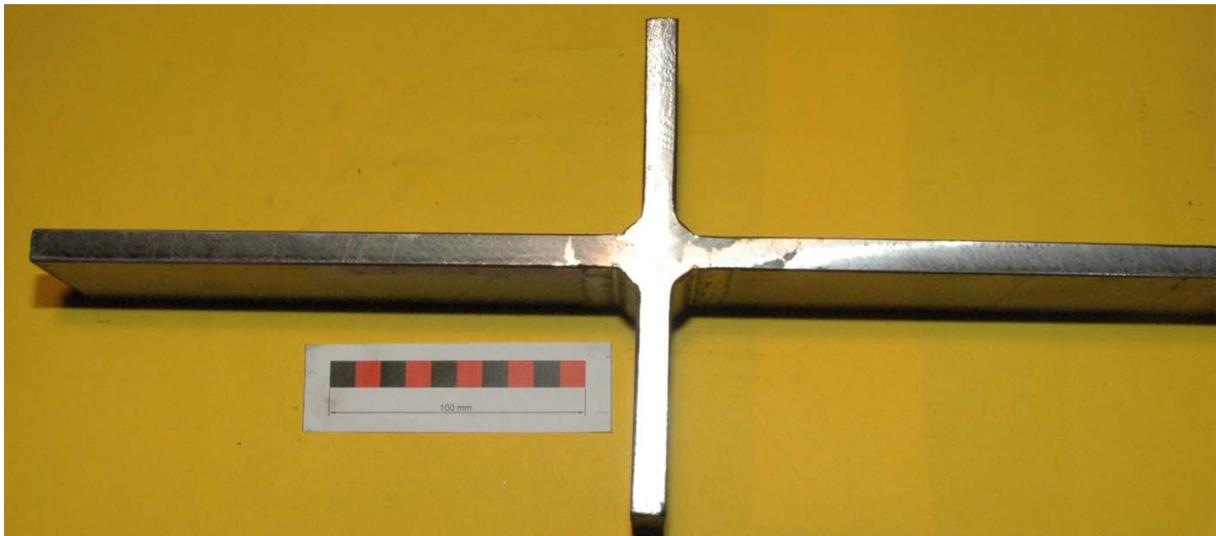


**Datenblatt Pk. 2.2.10**Prüfdatum:  
13.10.2010**1. Geometrie Probekörper**

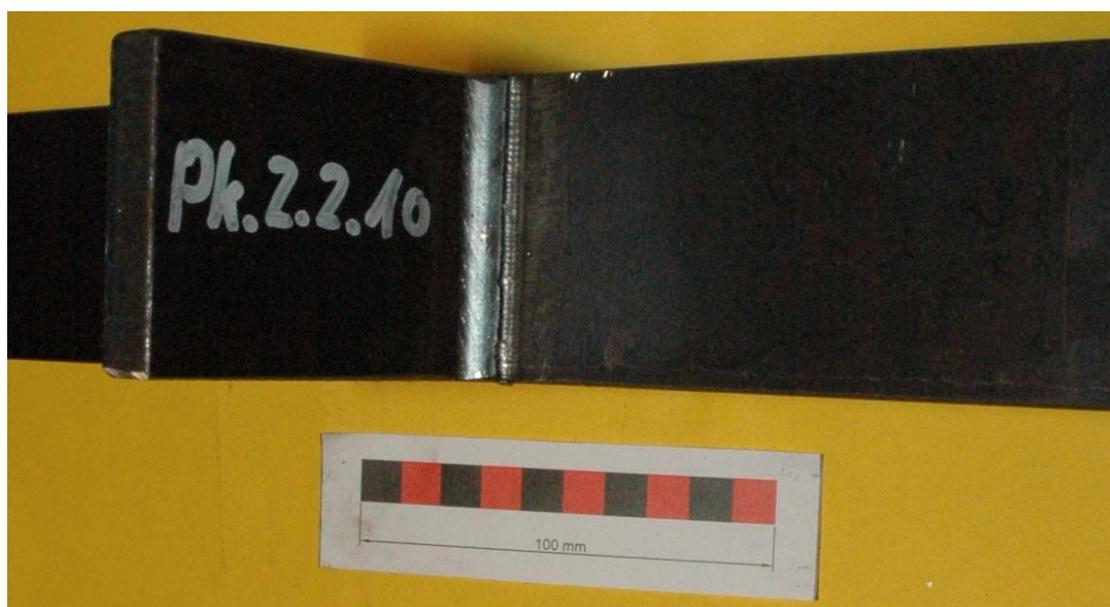
	b [mm]	t [mm]
rechts	59,97	11,96
links	60,06	12,01

a-Maß [mm]
4,9

Seitenansicht



Draufsicht



## 2. Schwingversuche

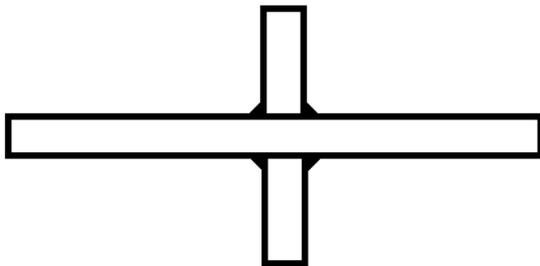
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	250 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	198 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	108 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	180 kN
Amplitude	$A =$	90 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  133.288

Anriss

Seitenansicht



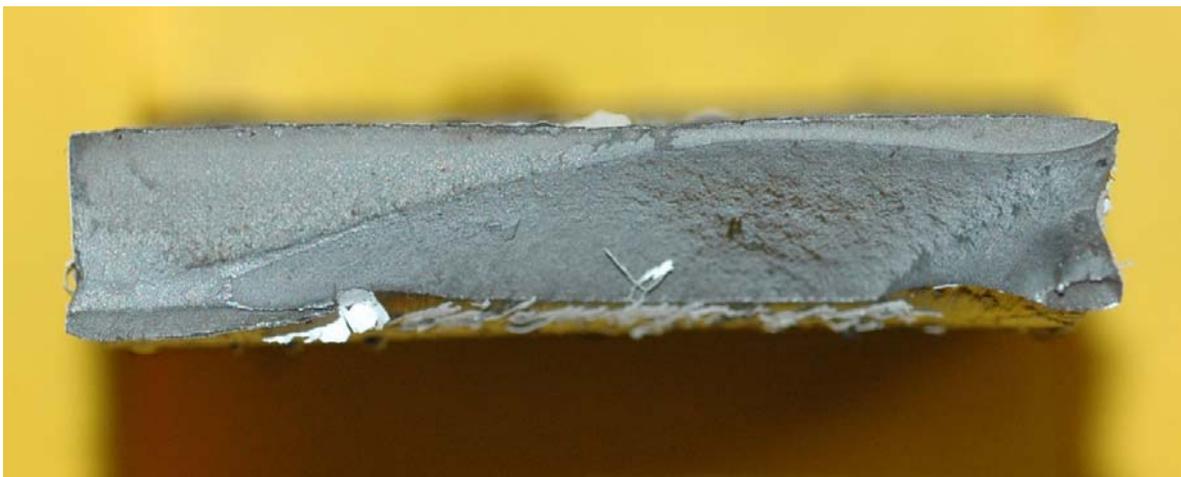
Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

## 5. Bruchbilder

---



## 9 Anhang A

### 9.5 Datenblätter Serie 3.1

#### Datenblatt Pk. 3.1.1

Prüfdatum:  
17.01.2011

#### 1. Geometrie Probekörper

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,38	12,47
links	60,28	12,22

a-Maß [mm]
5,0

#### Seitenansicht



#### Draufsicht



## 2. Schwingversuche

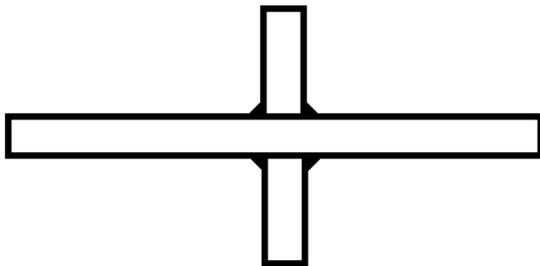
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	145 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	116 kN
Unterlast	$F_U =$	11,6 kN
Mittellast	$F_M =$	63,8 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	104,4 kN
Amplitude	$A =$	52,2 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht

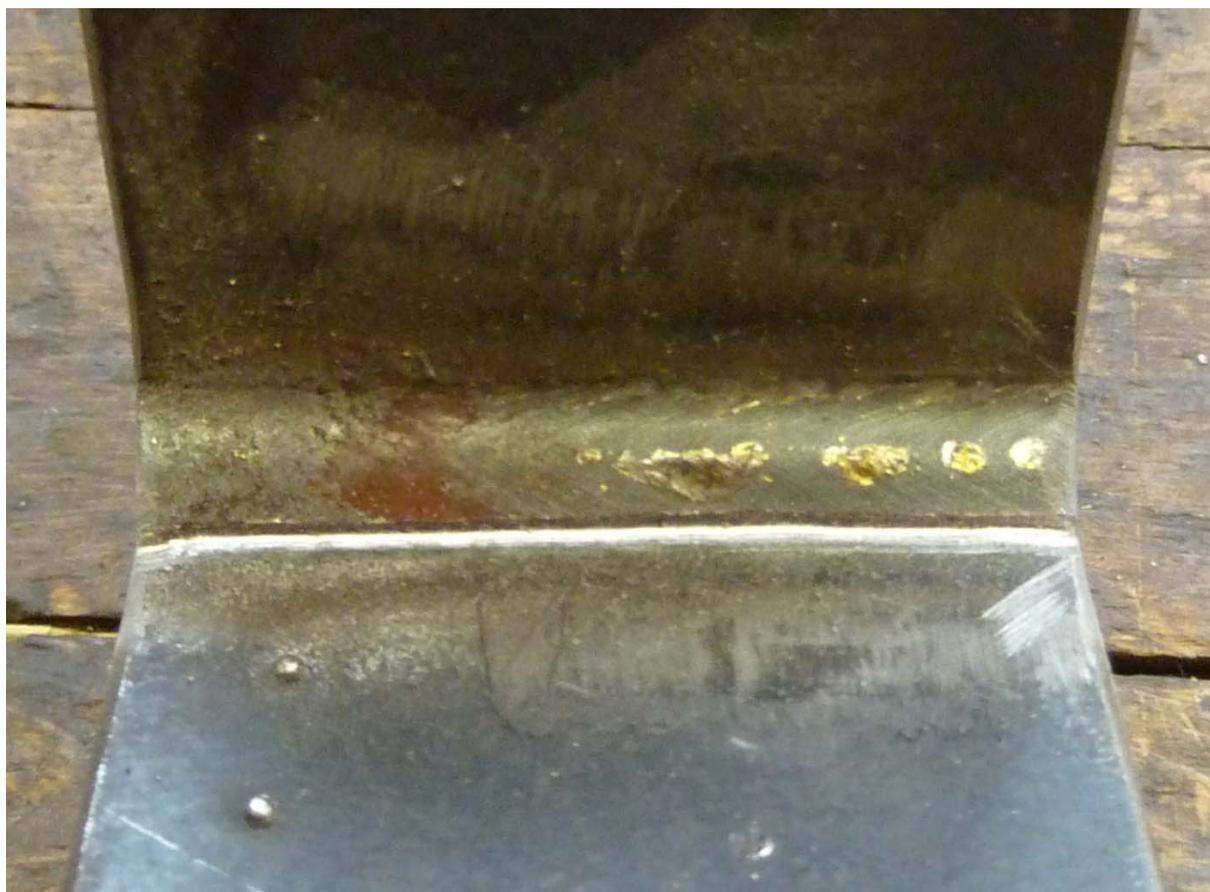


## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 364.535 Schwingspiele
2. HiFIT-behandelt
3. Abbruch bei 2.000.000 Schwingspielen ohne Bruch

## 5. Nachbehandlung

---



**Datenblatt Pk. 3.1.2**Prüfdatum:  
01.07.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,24	12,24
links	60,24	12,16

a-Maß [mm]
4,9

Seitenansicht



Draufsicht



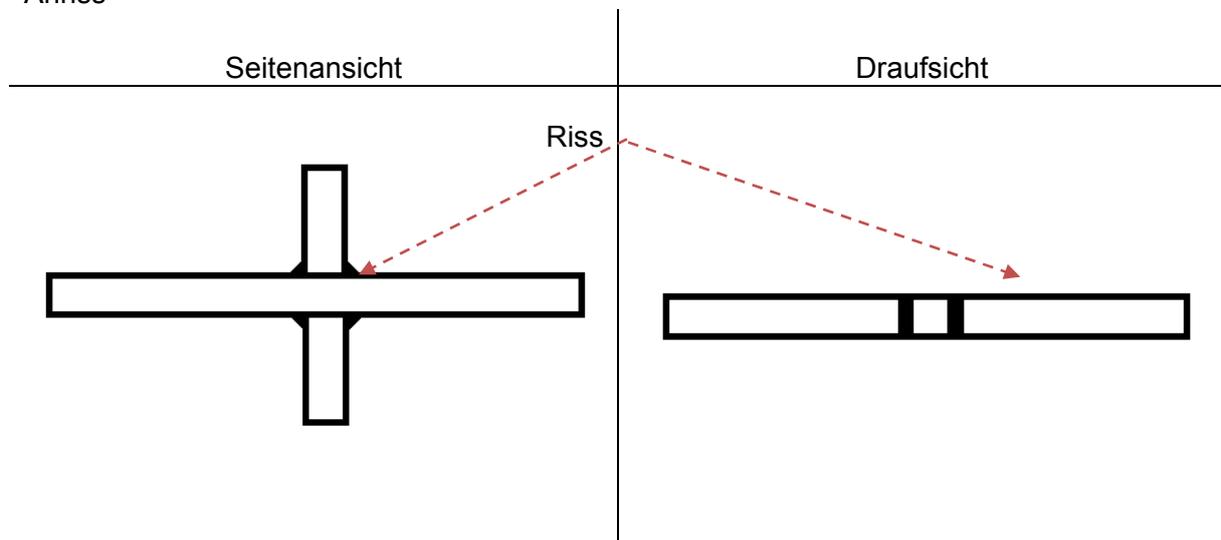
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	180 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	99 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  326.270

Anriss



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 364.535 Schwingspiele
2. HiFIT-behandelt
3. Schwingen bis Bruch

## 5. Nachbehandlung

---

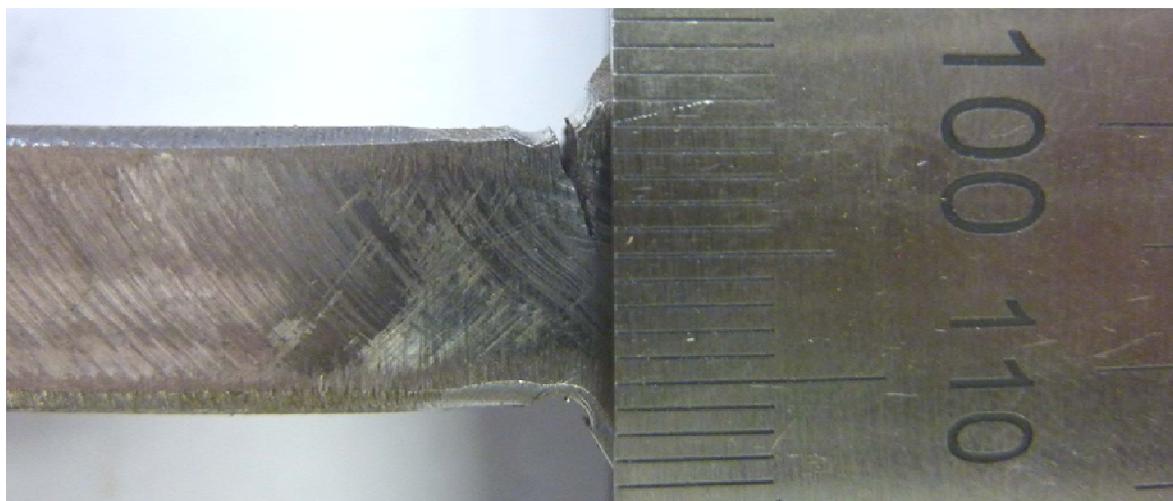


## 6. Rissbild Draufsicht

---



## 7. Rissbild Seitenansicht



**Datenblatt Pk. 3.1.3**Prüfdatum:  
02.07.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,39	12,37
links	60,14	12,26

a-Maß [mm]
5,2

**Seitenansicht****Draufsicht**

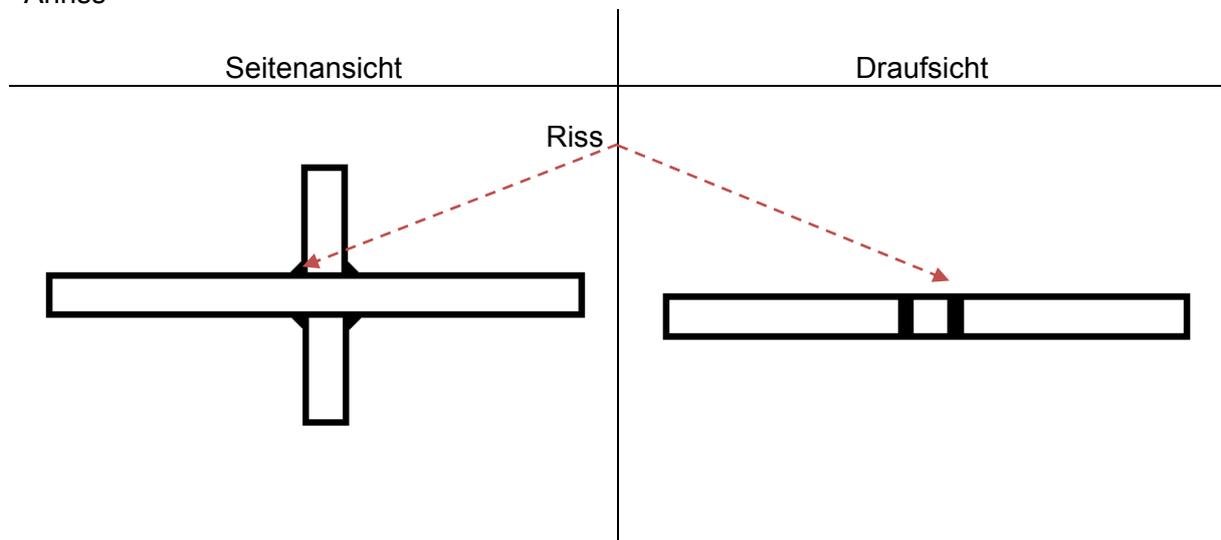
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	180 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	99 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  139.228

Anriss



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 364.535 Schwingspiele
2. HiFIT-behandelt
3. Schwingen bis Bruch

## 5. Nachbehandlung

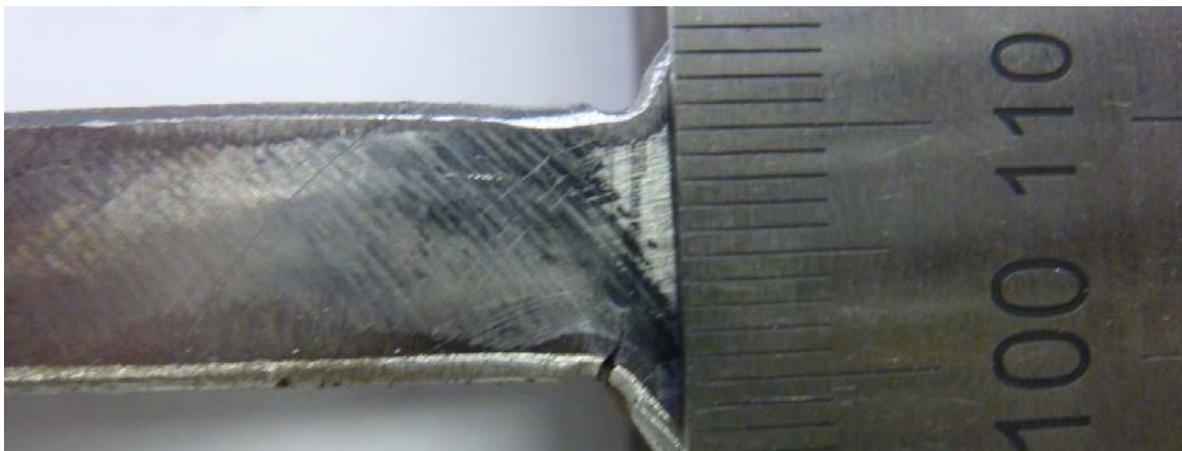
---



## 6. Rissbild Draufsicht

---



**7. Rissbild Seitenansicht**

**Datenblatt Pk. 3.1.4**Prüfdatum:  
17.01.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,29	12,55
links	60,19	12,49

a-Maß [mm]
5,0

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

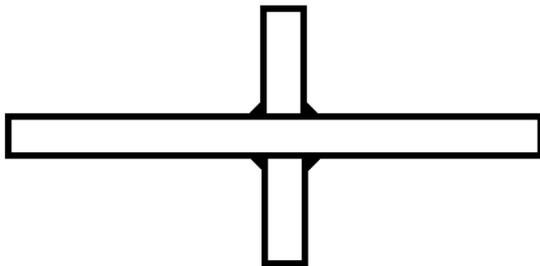
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	140 kN
Unterlast	$F_U =$	14 kN
Mittellast	$F_M =$	77 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 208.143 Schwingspiele
2. HiFIT-behandelt
3. Abbruch bei 2.170.338 Schwingspielen ohne Bruch

## 5. Nachbehandlung

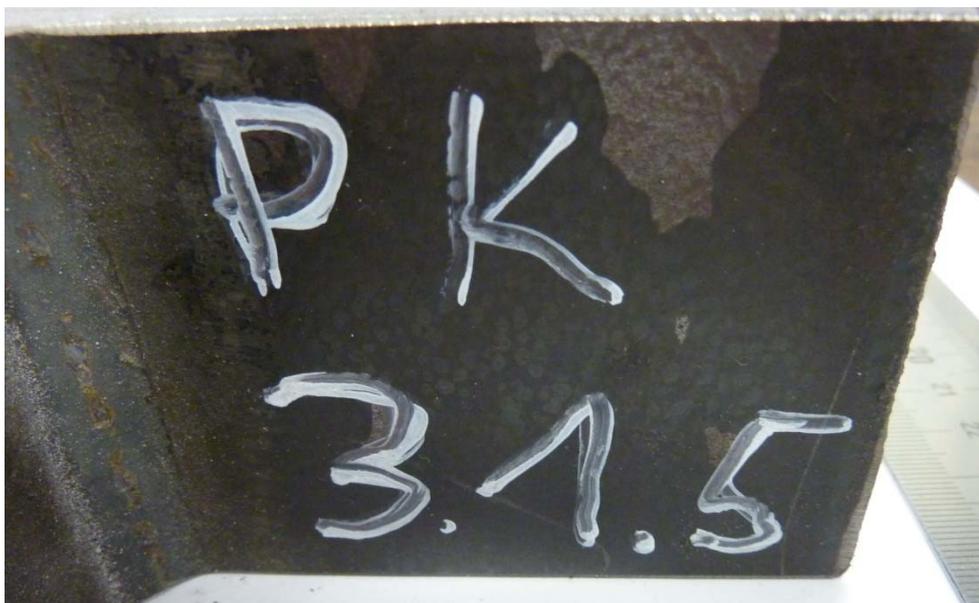
---



**Datenblatt Pk. 3.1.5**Prüfdatum:  
17.01.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,18	12,50
links	60,19	12,51

a-Maß [mm]
5,1

**Seitenansicht****Draufsicht**

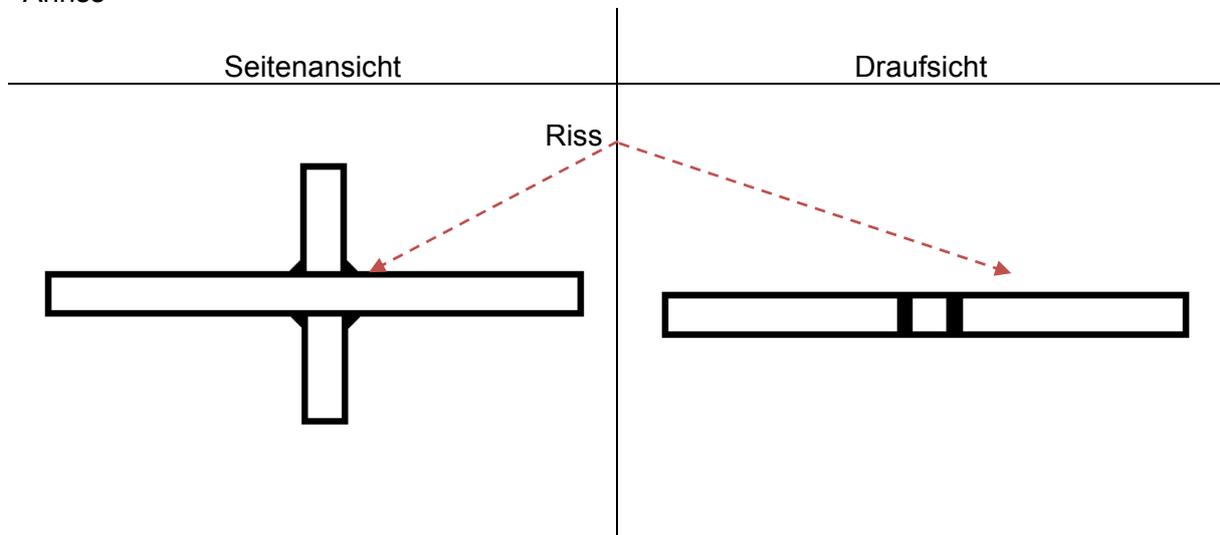
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	140 kN
Unterlast	$F_U =$	14 kN
Mittellast	$F_M =$	77 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  866.561

Anriss



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 208.143 Schwingspiele
2. HiFIT-behandlung
3. Schwingen bis Bruch

### 5. Nachbehandlung

---



### 6. Rissbild Draufsicht

---



**Datenblatt Pk. 3.1.6**Prüfdatum:  
31.03.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,57	12,42
links	60,11	12,45

a-Maß [mm]
5,2

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

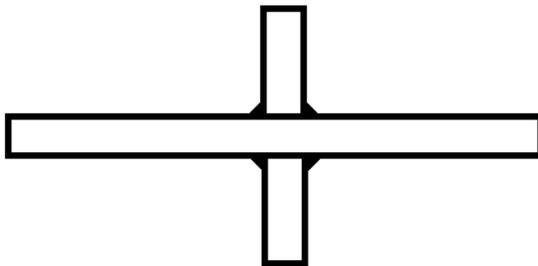
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	140 kN
Unterlast	$F_U =$	14 kN
Mittellast	$F_M =$	77 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 208.143 Schwingspiele
2. HiFIT-behandelt
3. Abbruch bei 2.000.000 Schwingspiele ohne Bruch

## 5. Nachbehandlung

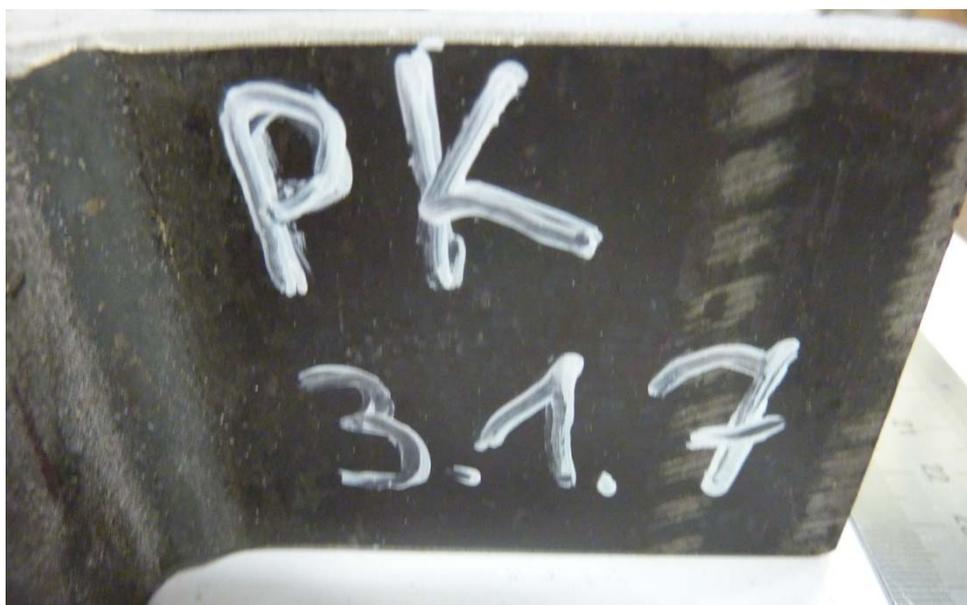
---



**Datenblatt Pk. 3.1.7**Prüfdatum:  
03.05.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,17	12,19
links	60,20	12,11

a-Maß [mm]
5,1

**Seitenansicht****Draufsicht**

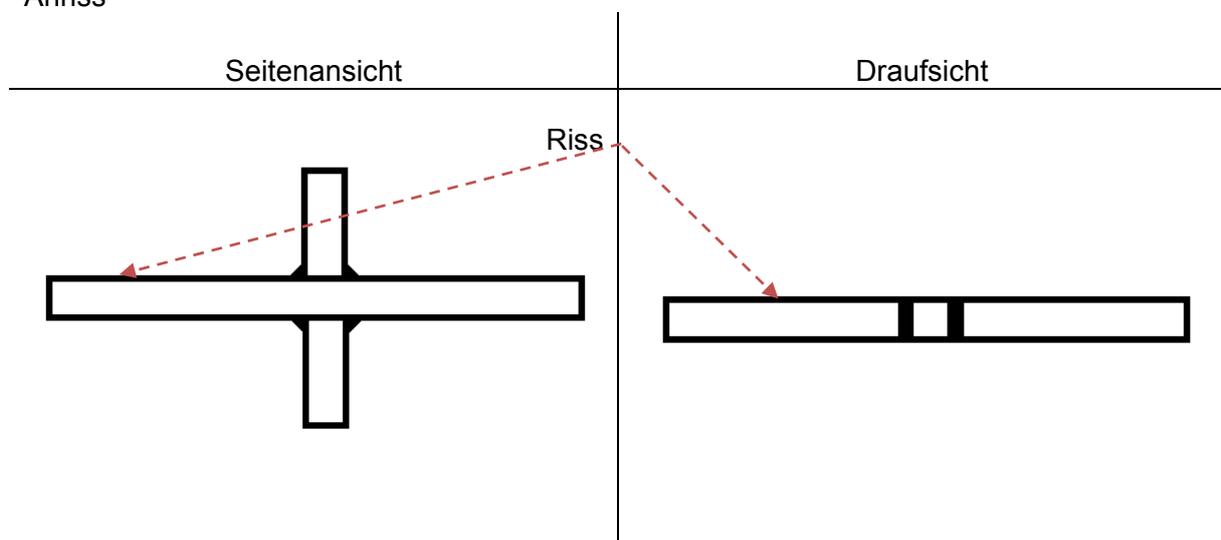
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	180 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	99 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  585.308

Anriss



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 208.143 Schwingspiele
2. HiFIT-behandlung
3. Versagen im Grundwerkstoff

## 5. Nachbehandlung



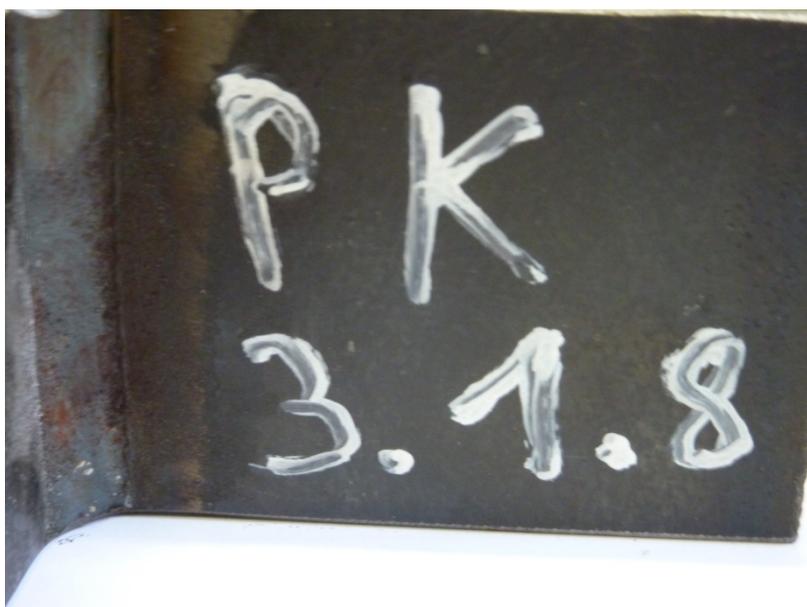
## 6. Rissbild Grundwerkstoff



**Datenblatt Pk. 3.1.8**Prüfdatum:  
17.01.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,18	12,84
links	60,19	12,79

a-Maß [mm]
5,2

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

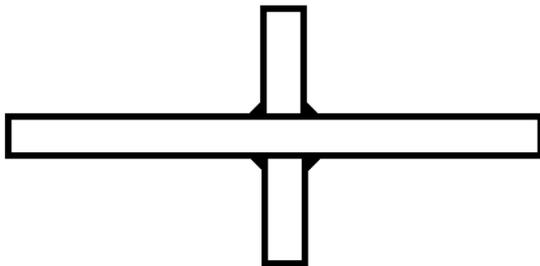
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	160 kN
Unterlast	$F_U =$	16 kN
Mittellast	$F_M =$	88 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 139.813 Schwingspiele
2. HiFIT-behandlung
3. Abbruch bei 2.000.000 Schwingspielen ohne Bruch

## 5. Nachbehandlung

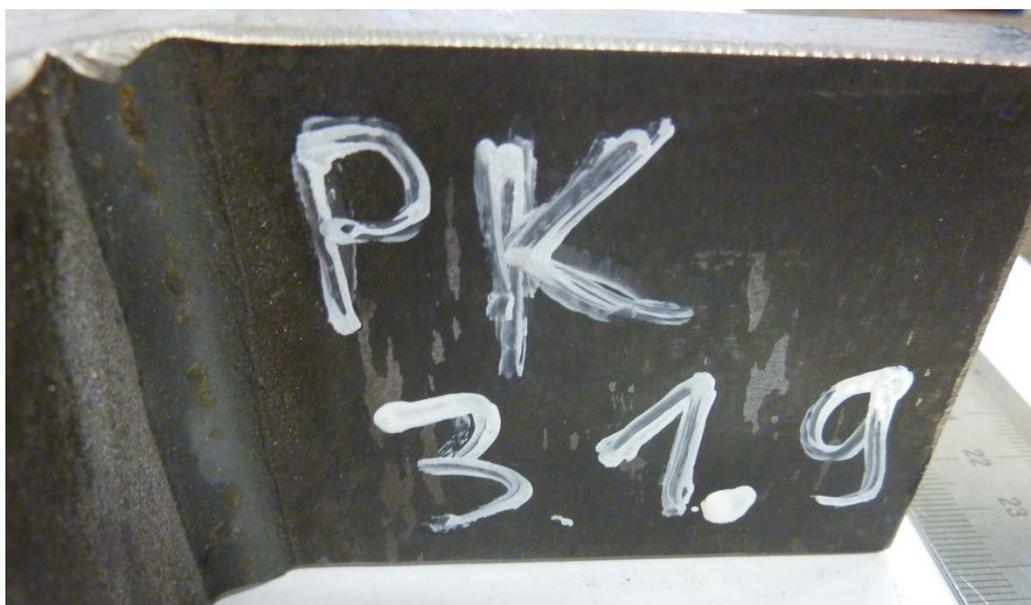
---



**Datenblatt Pk. 3.1.9**Prüfdatum:  
07.03.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,06	12,35
links	60,09	12,29

a-Maß [mm]
5,0

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

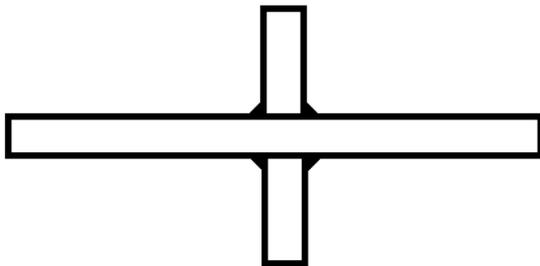
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	160 kN
Unterlast	$F_U =$	16 kN
Mittellast	$F_M =$	88 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 139.813 Schwingspiele
2. HiFIT-behandlung
3. Abbruch bei 2.000.000 Schwingspielen ohne Bruch

## 5. Nachbehandlung

---



**Datenblatt Pk. 3.1.10**Prüfdatum:  
08.03.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,28	12,24
links	60,24	12,29

a-Maß [mm]
5,1

**Seitenansicht****Draufsicht**

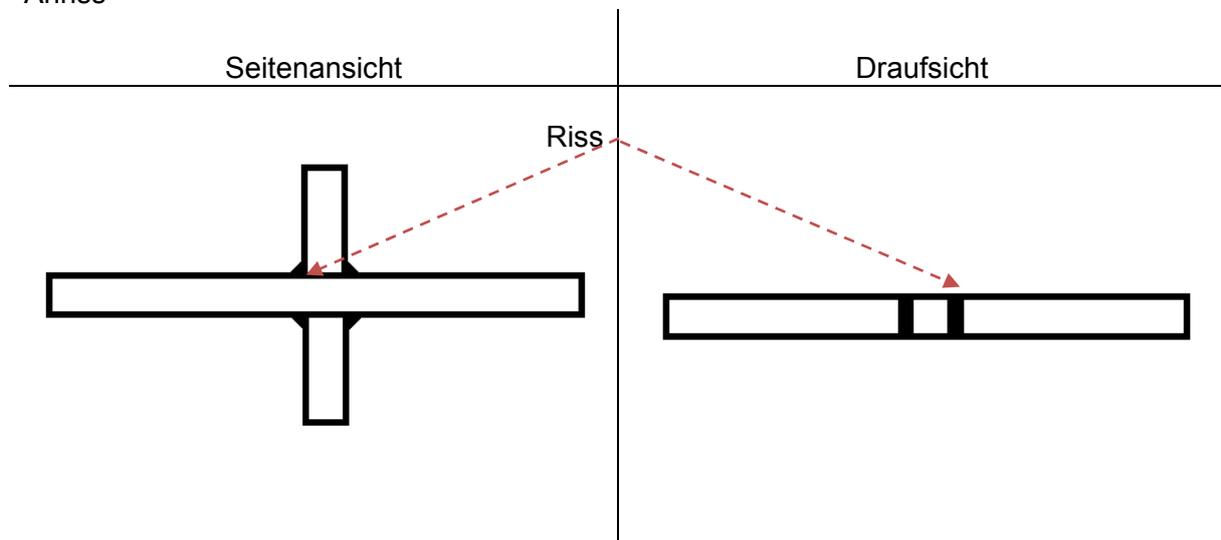
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	160 kN
Unterlast	$F_U =$	16 kN
Mittellast	$F_M =$	88 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  1.773.533

Anriss

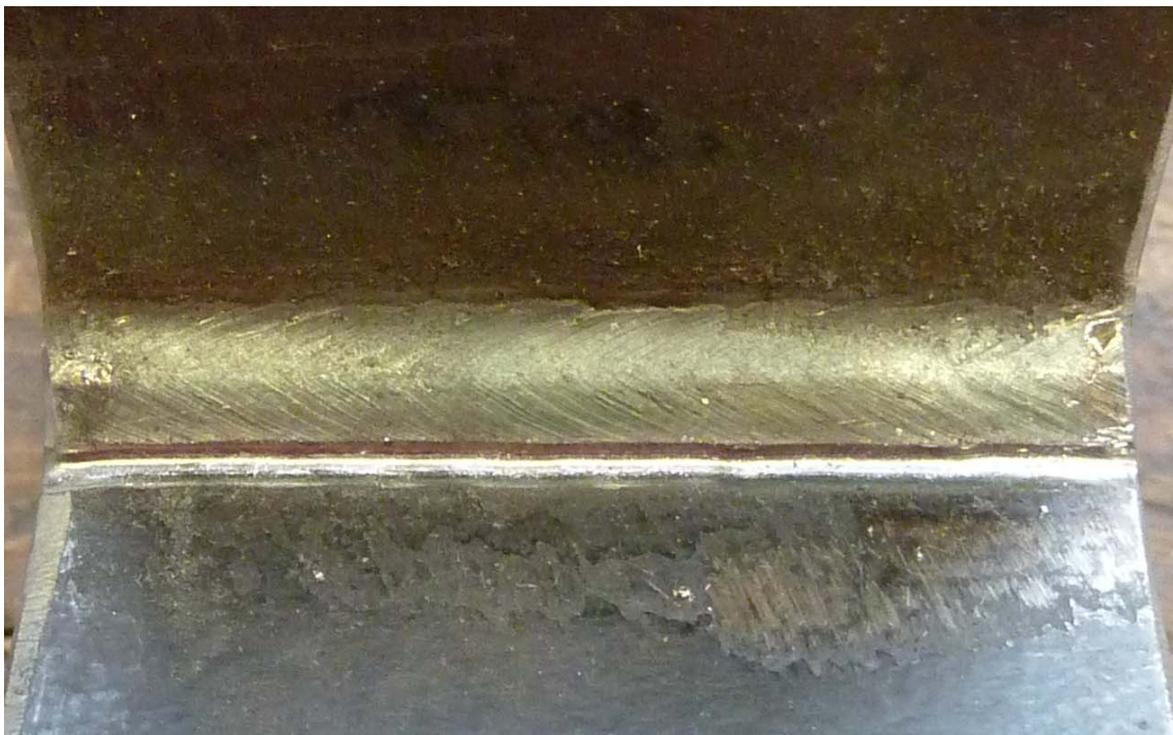


## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 139.813 Schwingspiele
2. HiFIT-behandlung
3. Schwingen bis Bruch

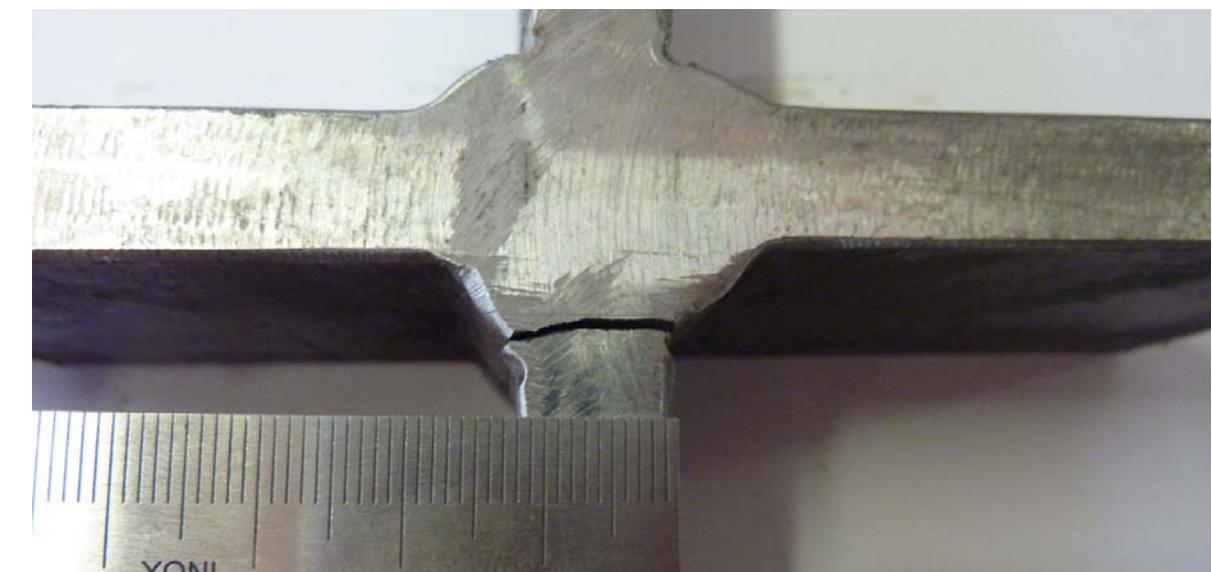
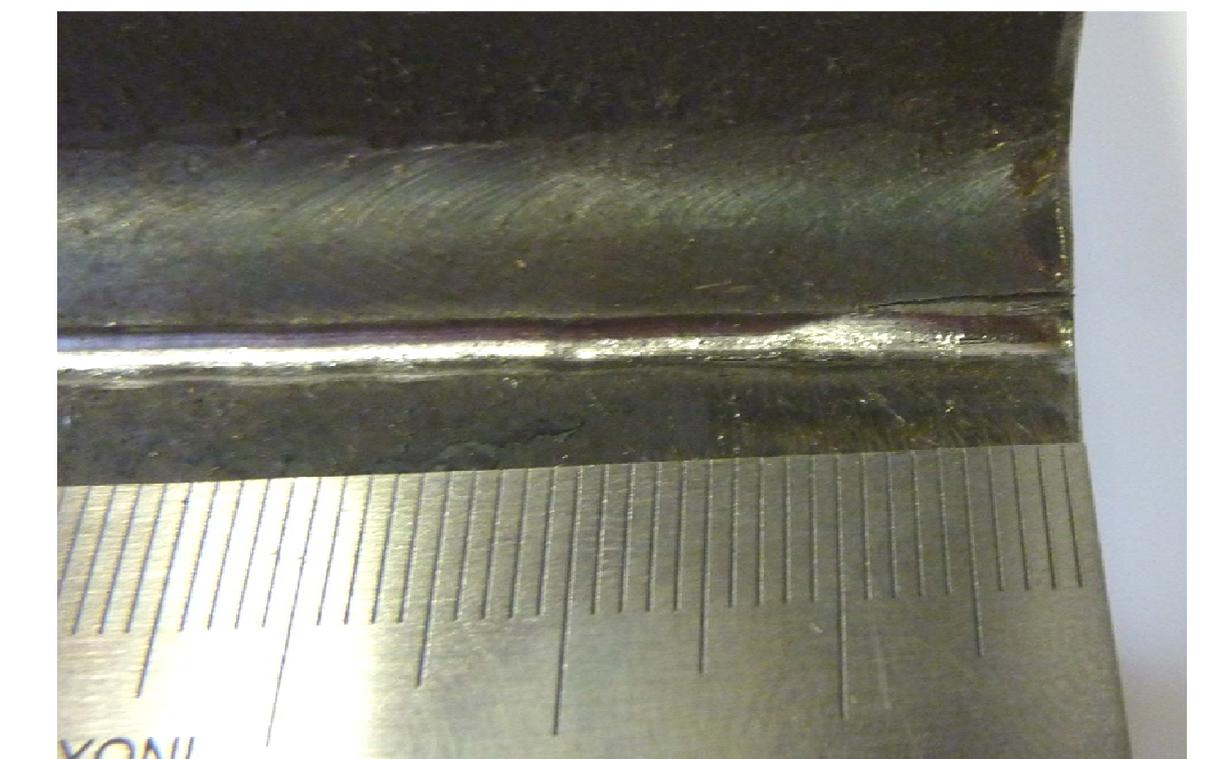
## 5. Nachbehandlung

---



## 6. Rissbild Draufsicht (vorne)



**7. Rissbild Seitenansicht****8. Rissbild Draufsicht (hinten)**



## 9 Anhang A

### 9.6 Datenblätter Serie 3.2

#### Datenblatt Pk. 3.2.1

Prüfdatum:  
22.10.2010

#### 1. Geometrie Probekörper

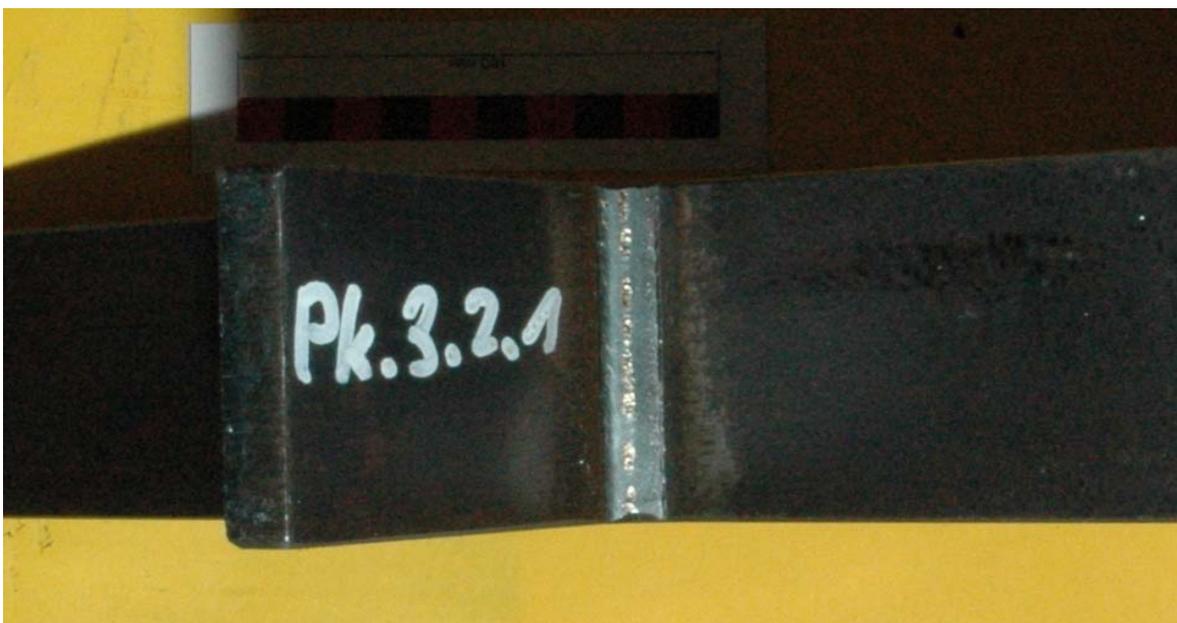
	b [mm]	t [mm]
rechts	60,20	12,25
links	60,29	12,19

a-Maß [mm]
4,6

#### Seitenansicht



#### Draufsicht



## 2. Schwingversuche

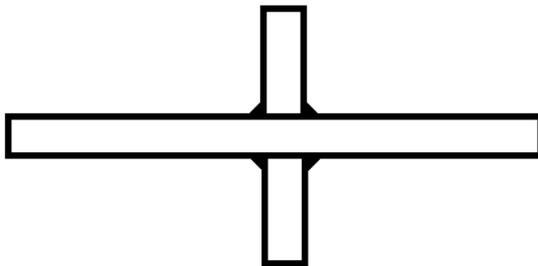
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	145 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	114,84 kN
Unterlast	$F_U =$	10,44 kN
Mittellast	$F_M =$	62,64 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	104,40 kN
Amplitude	$A =$	52,20 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 364.535 Schwingspiele
2. Nachbehandlung
3. Abbruch bei 2.000.000 Schwingspiele ohne Bruch

## 5. Nachbehandlung

---



**Datenblatt Pk. 3.2.2**Prüfdatum:  
23.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,12	12,25
links	60,22	12,49

a-Maß [mm]
4,6

Seitenansicht



Draufsicht



## 2. Schwingversuche

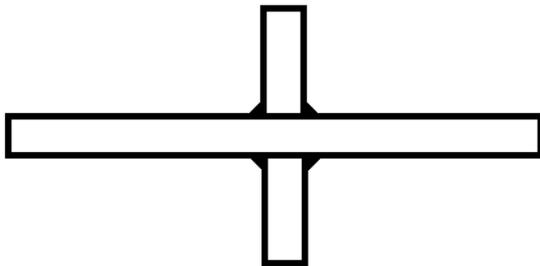
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	145 N/mm <sup>2</sup>	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	114,84 kN	114,84 kN
Unterlast	$F_U =$	10,44 kN	10,44 kN
Mittellast	$F_M =$	62,64 kN	62,64 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	104,40 kN	104,40 kN
Amplitude	$A =$	52,20 kN	52,20 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  827.159

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

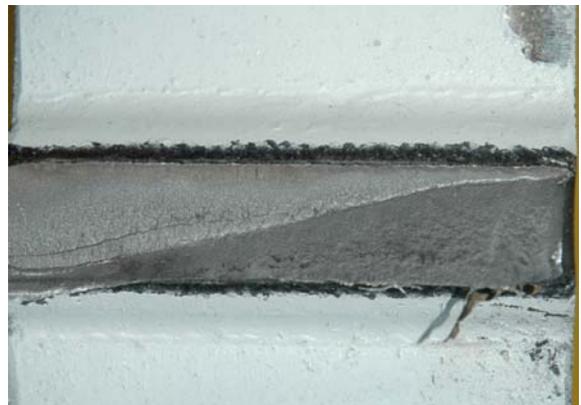
1. Angeschwungen bis 364.535 Schwingspiele
2. Nachbehandlung
3. Schwingen bis Bruch

## 5. Nachbehandlung

---



## 6. Bruchbilder

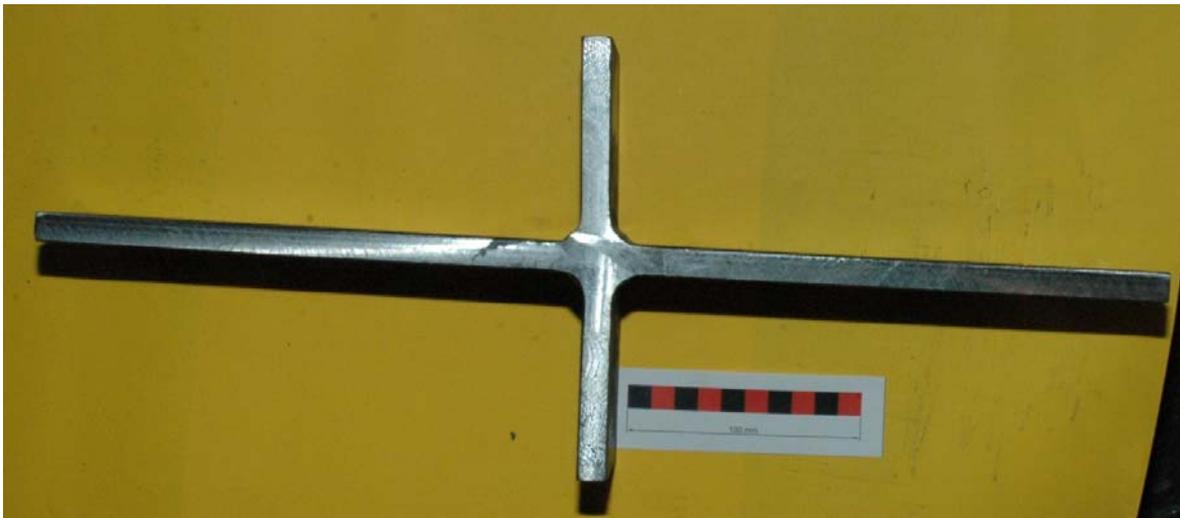


**Datenblatt Pk. 3.2.3**Prüfdatum:  
24.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

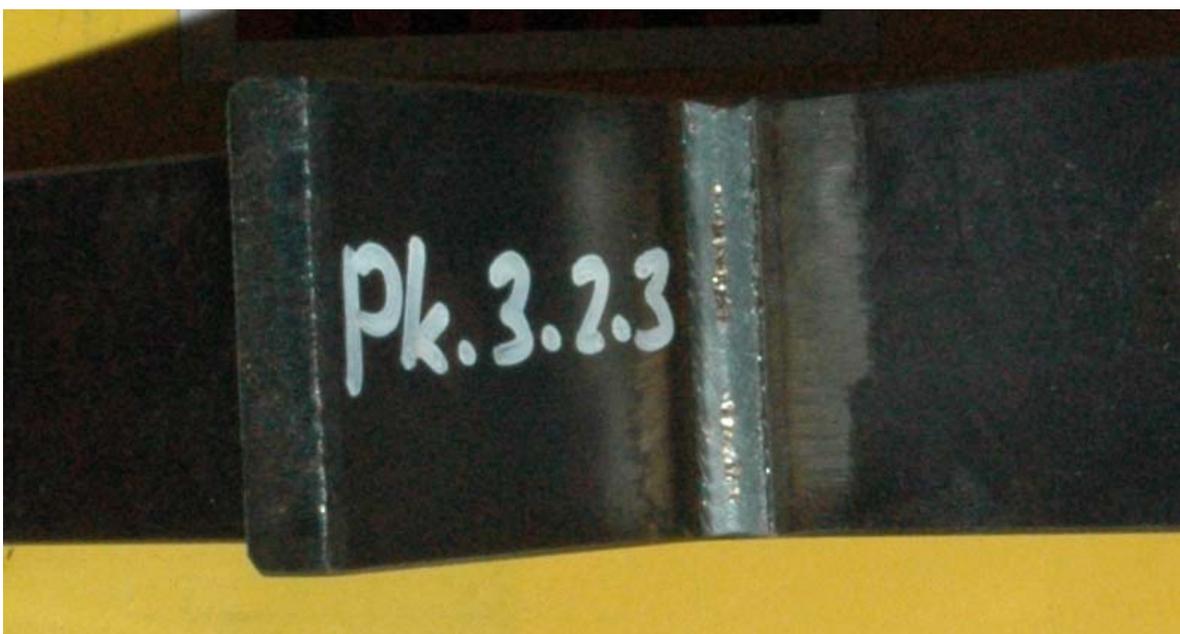
	b [mm]	t [mm]
rechts	60,15	12,25
links	60,21	12,35

a-Maß [mm]
4,7

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

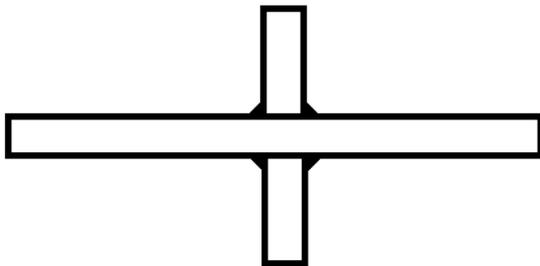
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	145 N/mm <sup>2</sup>	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	114,84 kN	114,84 kN
Unterlast	$F_U =$	10,44 kN	10,44 kN
Mittellast	$F_M =$	62,64 kN	62,64 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	104,40 kN	104,40 kN
Amplitude	$A =$	52,20 kN	52,20 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  1.263.781

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 364.535 Schwingspiele
2. Nachbehandlung
3. Schwingen bis Bruch

## 5. Nachbehandlung

---



## 6. Bruchbilder



**Datenblatt Pk. 3.2.4**Prüfdatum:  
24.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,35	12,37
links	60,39	12,45

a-Maß [mm]
4,7

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

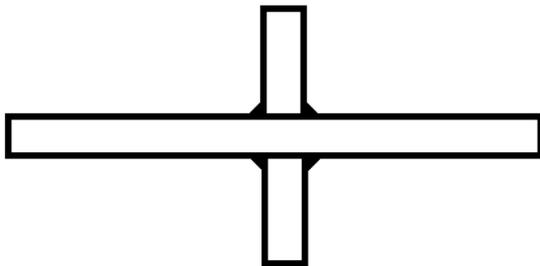
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	138,59 kN
Unterlast	$F_U =$	12,6 kN
Mittellast	$F_M =$	75,59 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 208.143 Schwingspiele
2. Nachbehandlung
3. Abbruch bei 2.000.000 Schwingspiele ohne Bruch

## 5. Nachbehandlung

---



**Datenblatt Pk. 3.2.5**Prüfdatum:  
25.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

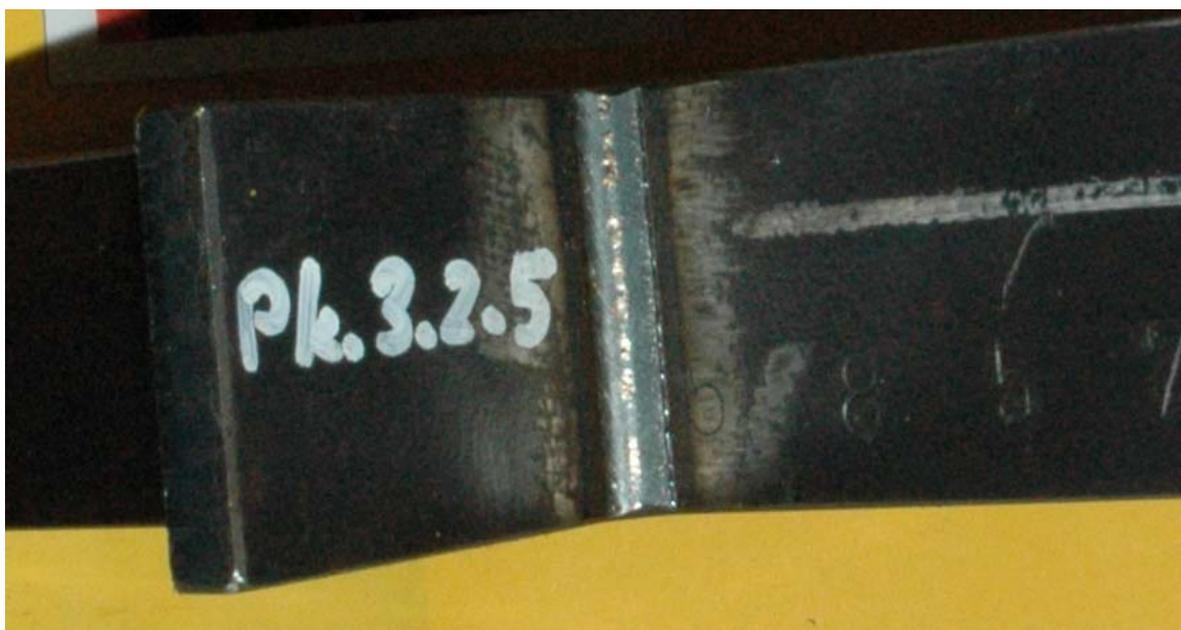
	b [mm]	t [mm]
rechts	60,29	12,34
links	60,32	12,24

a-Maß [mm]
4,8

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

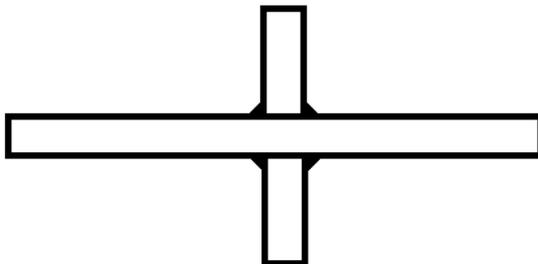
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	138,59 kN
Unterlast	$F_U =$	12,6 kN
Mittellast	$F_M =$	75,59 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 208.143 Schwingspiele
2. Nachbehandlung
3. Abbruch bei 2.000.000 Schwingspiele ohne Bruch

## 5. Nachbehandlung

---



**Datenblatt Pk. 3.2.6**Prüfdatum:  
25.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,06	12,17
links	60,21	12,42

a-Maß [mm]
4,3

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

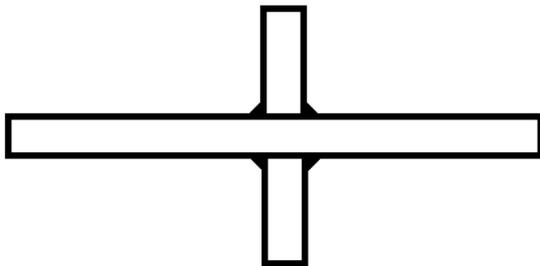
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	138,59 kN
Unterlast	$F_U =$	12,6 kN
Mittellast	$F_M =$	75,59 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 208.143 Schwingspiele
2. Nachbehandlung
3. Abbruch bei 2.000.000 Schwingspiele ohne Bruch

## 5. Nachbehandlung

---

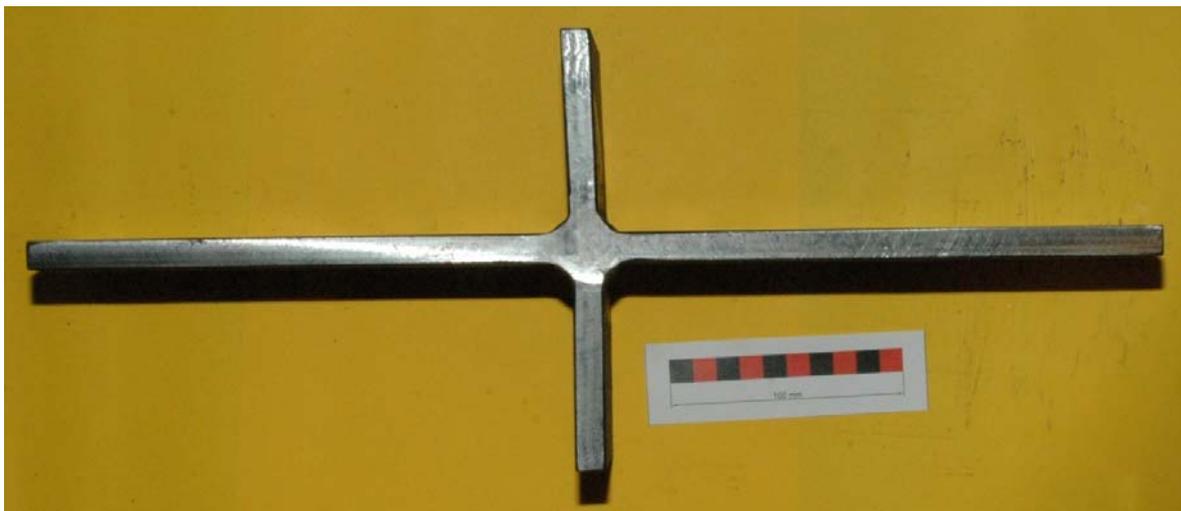


**Datenblatt Pk. 3.2.7**Prüfdatum:  
29.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,33	12,30
links	60,29	12,22

a-Maß [mm]
4,5

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

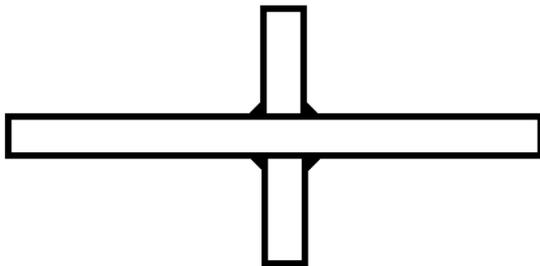
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	158,40 kN	158,40 kN
Unterlast	$F_U =$	14,39 kN	14,39 kN
Mittellast	$F_M =$	86,40 kN	86,40 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  281.150

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 139.813 Schwingspiele
2. Nachbehandlung
3. Schwingen bis Bruch

## 5. Nachbehandlung

---



## 6. Bruchbilder



**Datenblatt Pk. 3.2.8**Prüfdatum:  
29.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,50	12,22
links	60,29	12,18

a-Maß [mm]
5,1

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

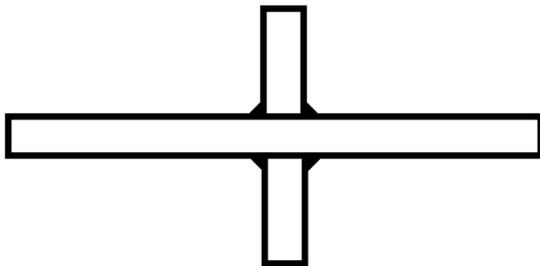
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	158,40 kN	158,40 kN
Unterlast	$F_U =$	14,39 kN	14,39 kN
Mittellast	$F_M =$	86,40 kN	86,40 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  1.707.853

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 139.813 Schwingspiele
2. Nachbehandlung
3. Schwingen bis Bruch

## 5. Nachbehandlung

---



## 6. Bruchbilder

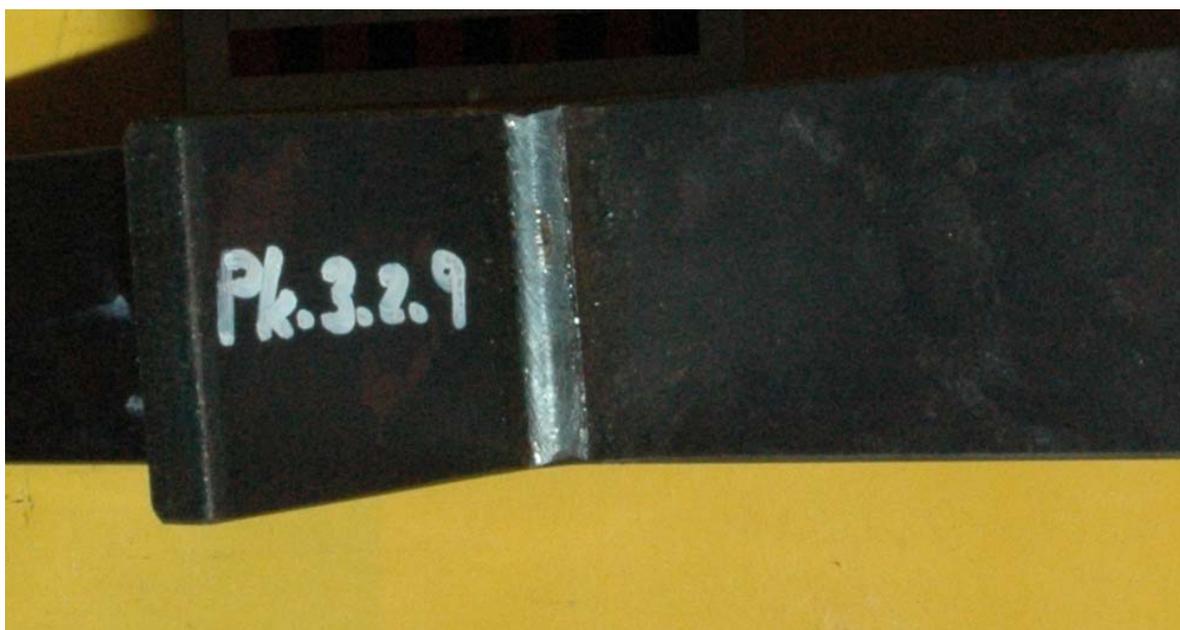
---



**Datenblatt Pk. 3.2.9**Prüfdatum:  
29.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	59,93	12,41
links	60,50	12,20

a-Maß [mm]
4,7

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

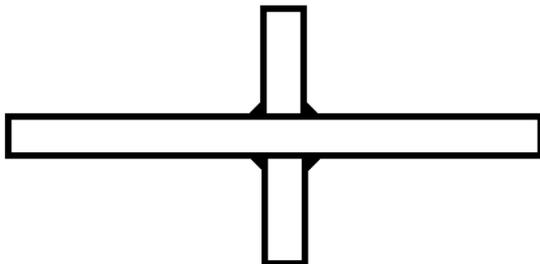
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	158,40 kN
Unterlast	$F_U =$	14,39 kN
Mittellast	$F_M =$	86,40 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 139.813 Schwingspiele
2. Nachbehandlung
3. Abbruch bei 2.000.000 Schwingspiele ohne Bruch

## 5. Nachbehandlung

---



**Datenblatt Pk. 3.2.10**Prüfdatum:  
30.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

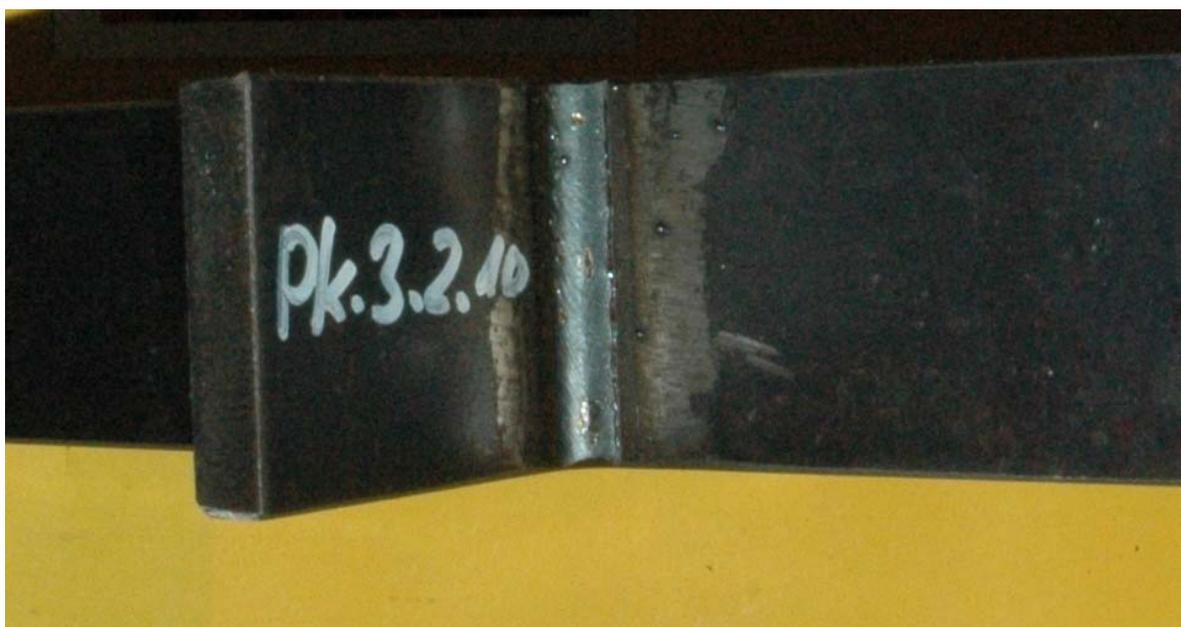
	b [mm]	t [mm]
rechts	60,11	12,21
links	60,24	12,27

a-Maß [mm]
4,4

Seitenansicht



Draufsicht



## 2. Schwingversuche

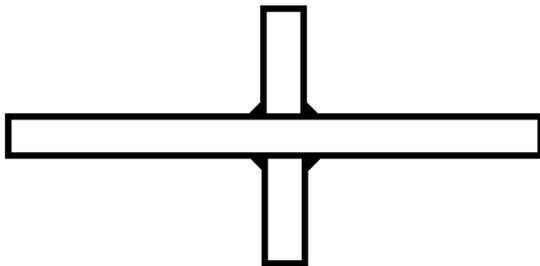
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	158,40 kN
Unterlast	$F_U =$	14,39 kN
Mittellast	$F_M =$	86,40 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Angeschwungen bis 139.813 Schwingspiele
2. Nachbehandlung
3. Abbruch bei 2.000.000 Schwingspiele ohne Bruch

## 5. Nachbehandlung

---



## 9 Anhang A

### 9.7 Datenblätter Serie 4.1

**Datenblatt Pk. 4.1.2**Prüfdatum:  
04.10.2011

#### 1. Geometrie Probekörper

	b [mm]	t [mm]
rechts	59,58	12,21
links	59,90	12,29

a-Maß [mm]
5,2

#### Seitenansicht



#### Draufsicht



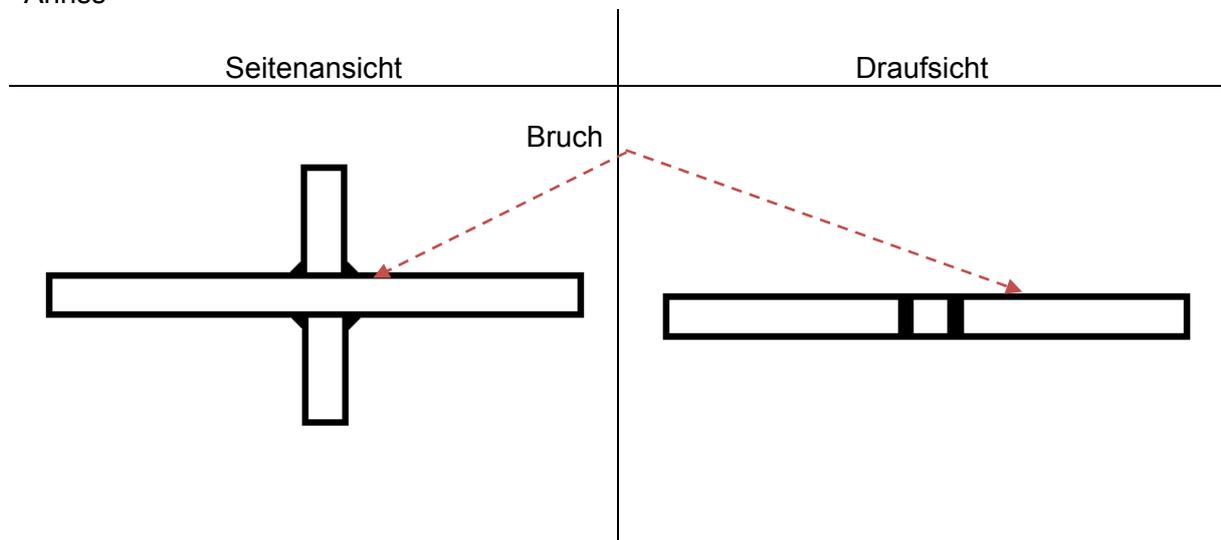
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	140 kN
Unterlast	$F_U =$	14 kN
Mittellast	$F_M =$	77 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B, \Sigma} =$  771.678

Anriss

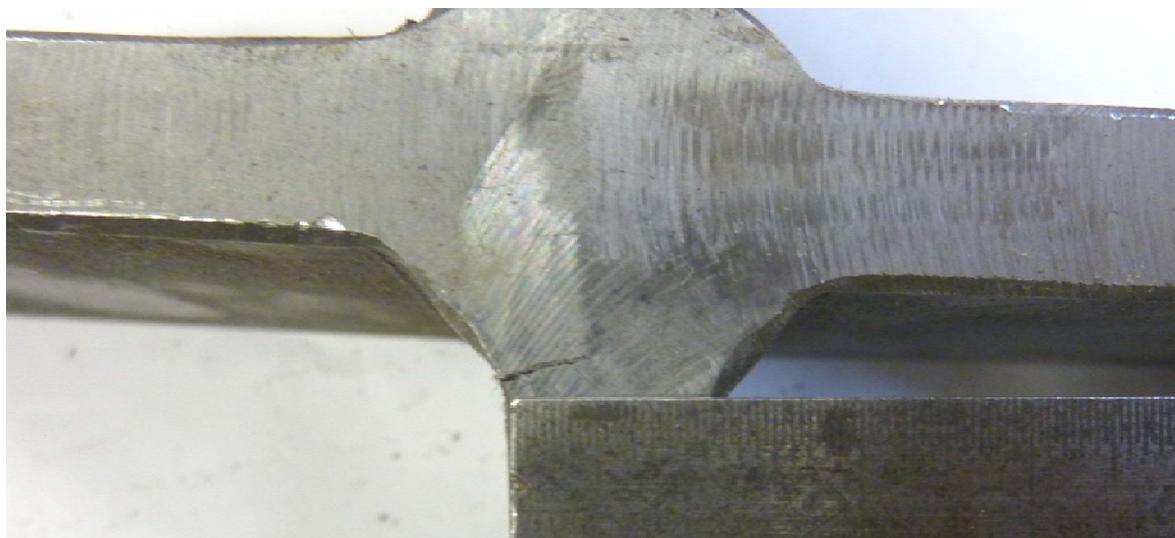


## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 287.334$
2. Reparaturgeschweißt
3. HiFIT-behandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 484.344$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht rechts



Draufsicht



## 6. Bruchbild

### Bruchfläche

---



### Draufsicht

---

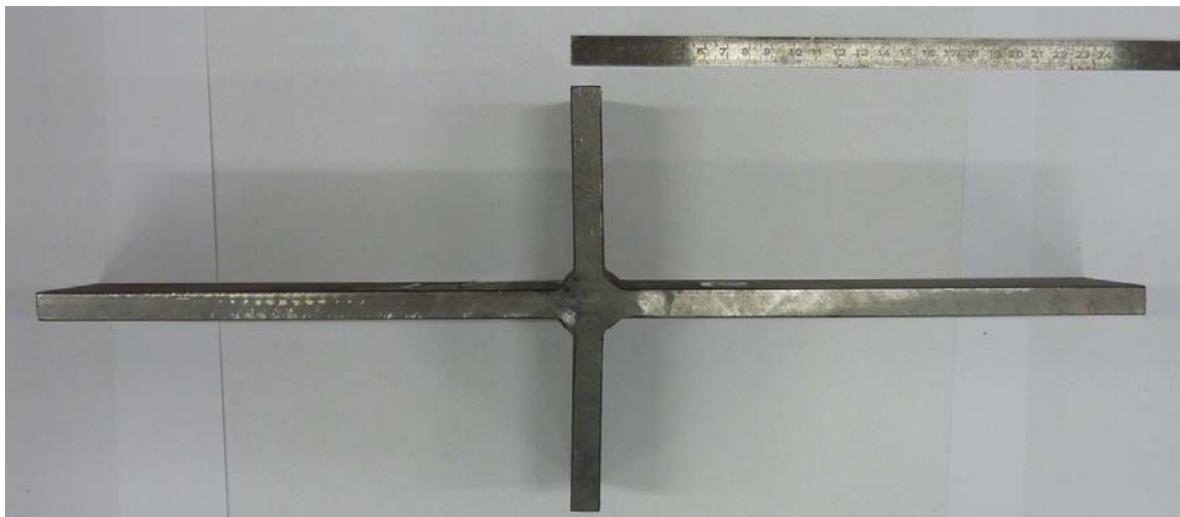


Bruch ausgehend vom Wurzelbereich der reparaturgeschweißten Naht

**Datenblatt      Pk. 4.1.3**Prüfdatum:  
26.09.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	59,92	12,19
links	59,65	11,92

a-Maß [mm]
5,1

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	140 kN
Unterlast	$F_U =$	14 kN
Mittellast	$F_M =$	77 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

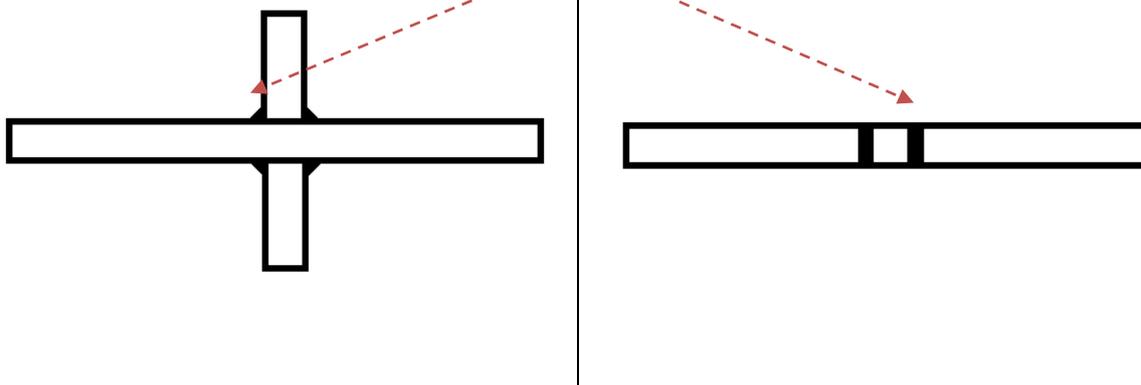
Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B, \Sigma} =$  914.735

Anriss

Seitenansicht

Draufsicht

Bruch

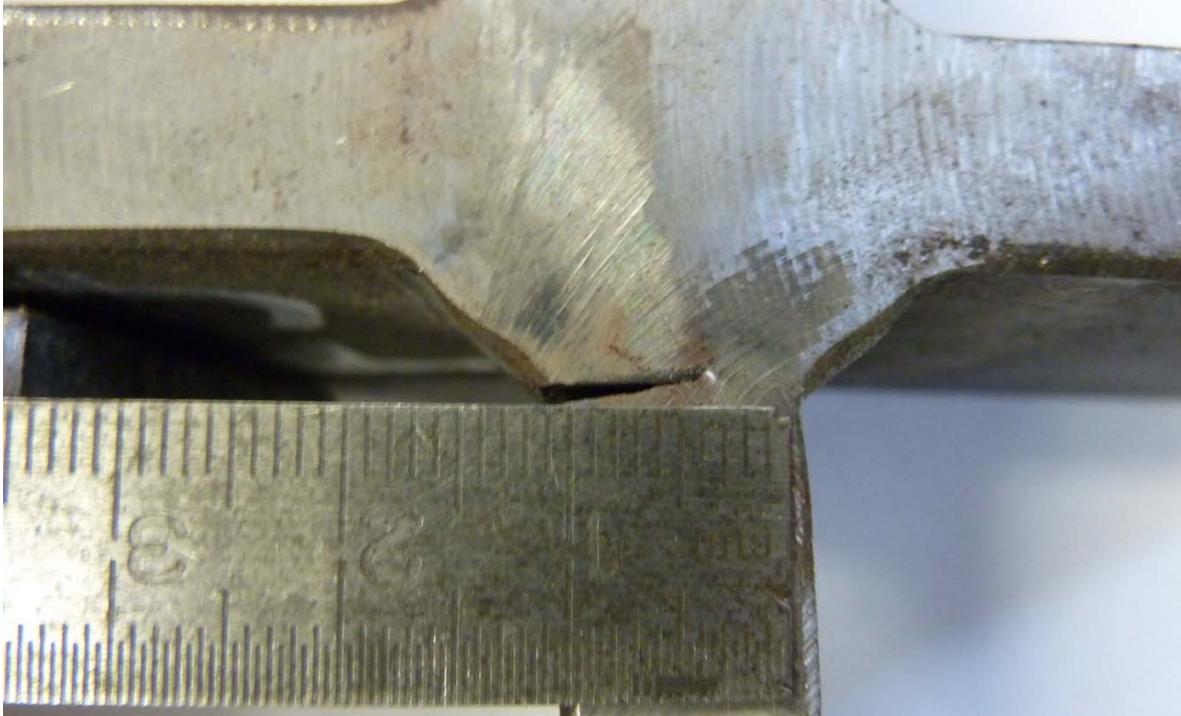


## 4. Bemerkung

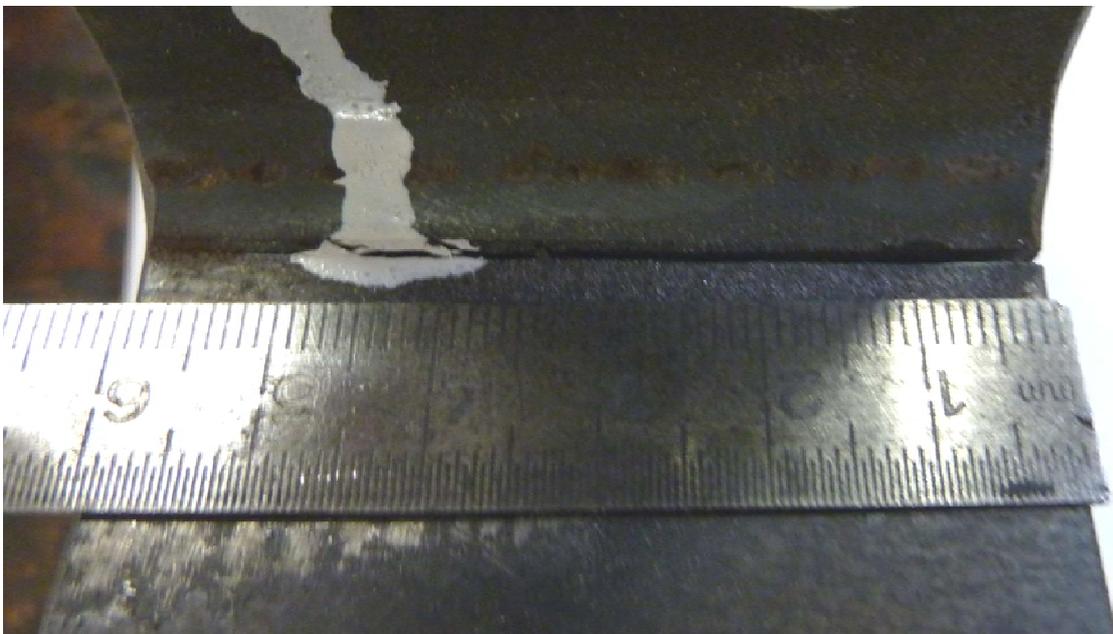
1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 287.334$
2. Reparaturgeschweißt
3. HiFIT-behandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 627.401$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht rechts



Draufsicht



## 6. Bruchbild

### Bruchfläche

---



### Draufsicht

---

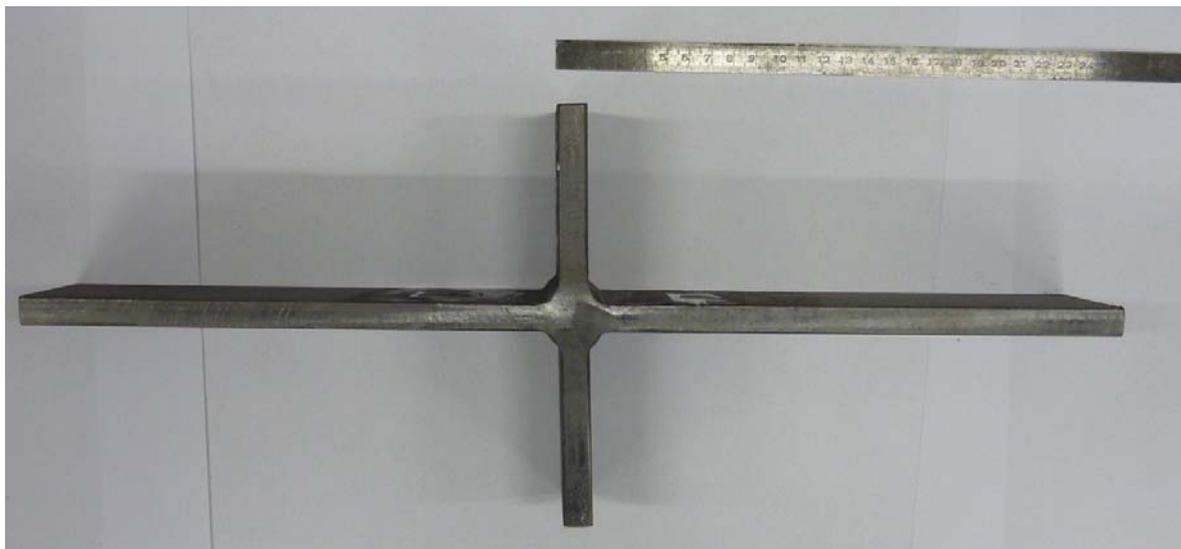


Bruch ausgehend vom Wurzelbereich der reparaturschweißten Naht

**Datenblatt Pk. 4.1.4**Prüfdatum:  
26.09.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	59,81	12,04
links	60,05	12,22

a-Maß [mm]
4,9

**Seitenansicht****Draufsicht**

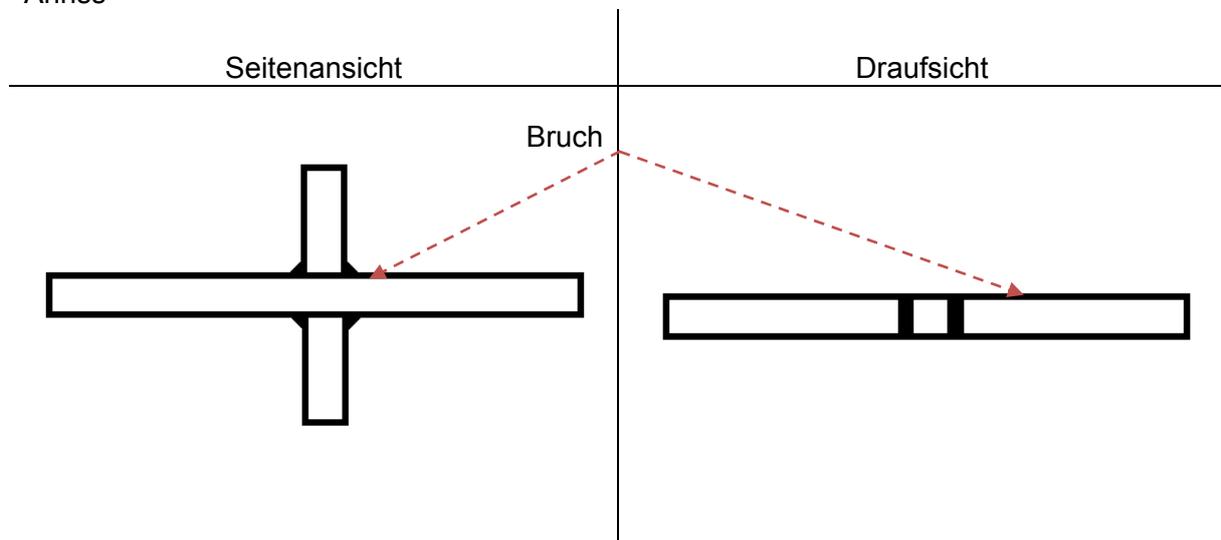
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	160 kN
Unterlast	$F_U =$	16 kN
Mittellast	$F_M =$	88 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B, \Sigma} =$  552.687

Anriss



## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 191.277$
2. Reparaturgeschweißt
3. HiFIT-behandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 361.410$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht rechts

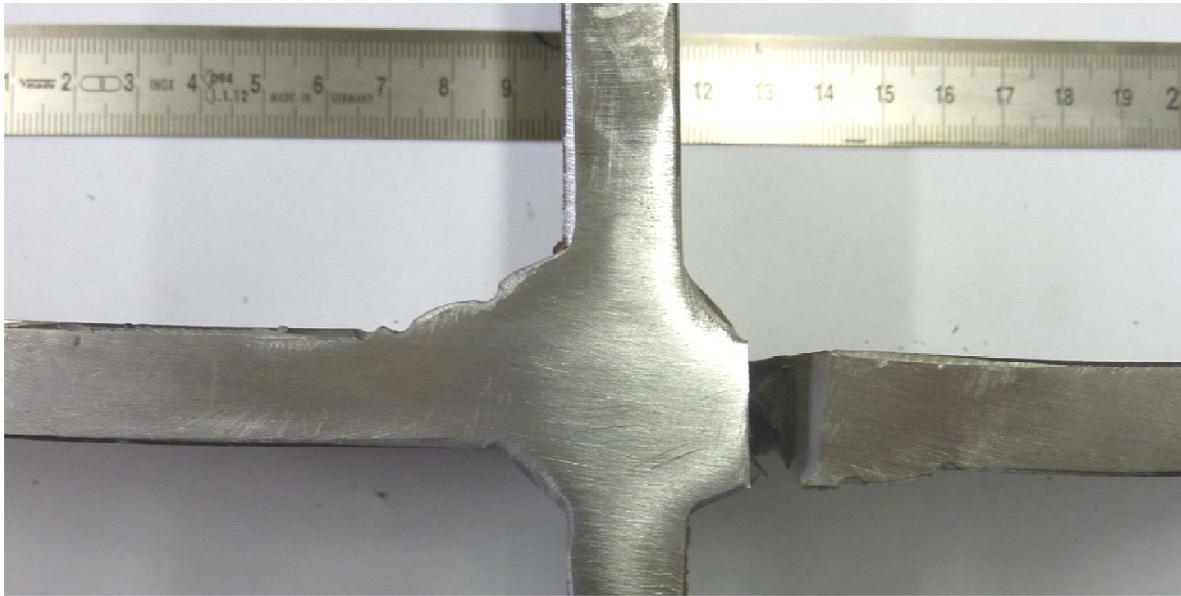


Draufsicht



## 6. Bruchbild

### Bruchfläche



### Draufsicht

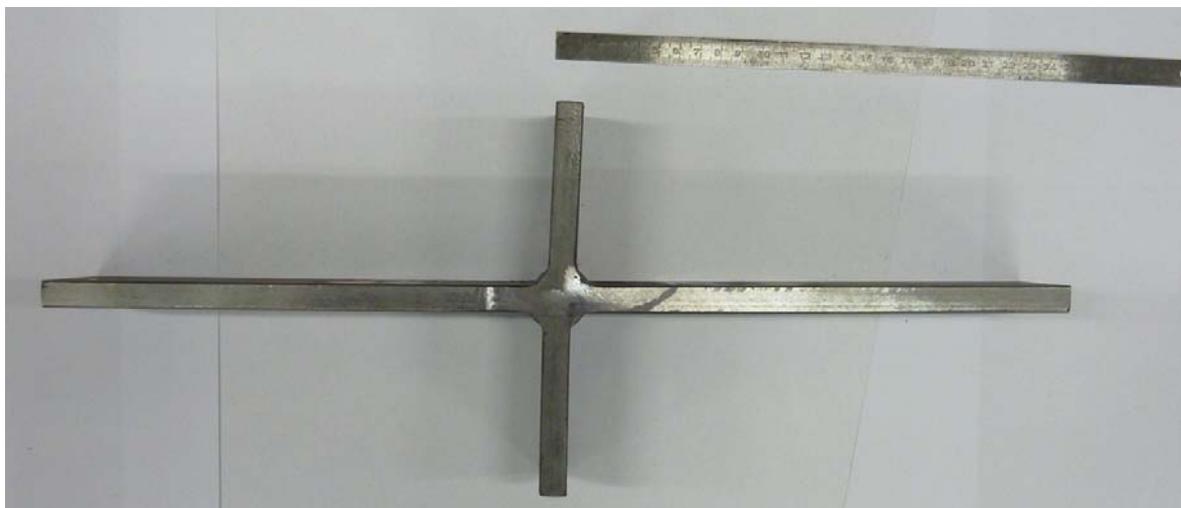
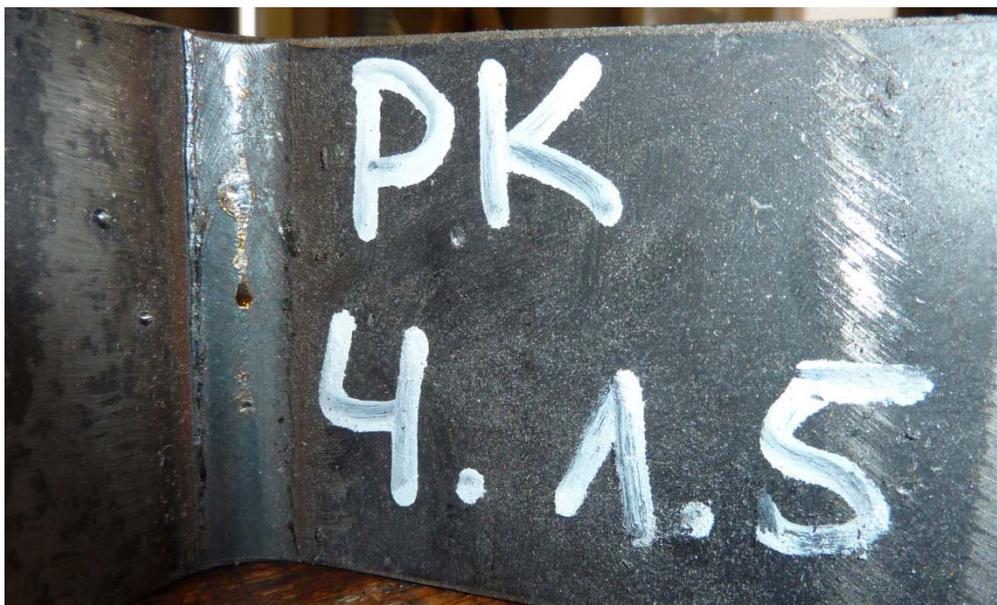


Bruch ausgehend von bereits vorhandenem Riss gegenüberliegend der reparaturgeschweißten Naht

**Datenblatt Pk. 4.1.5**Prüfdatum:  
27.09.2011**5. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	59,95	12,16
links	59,22	12,73

a-Maß [mm]
4,8

**Seitenansicht****Draufsicht**

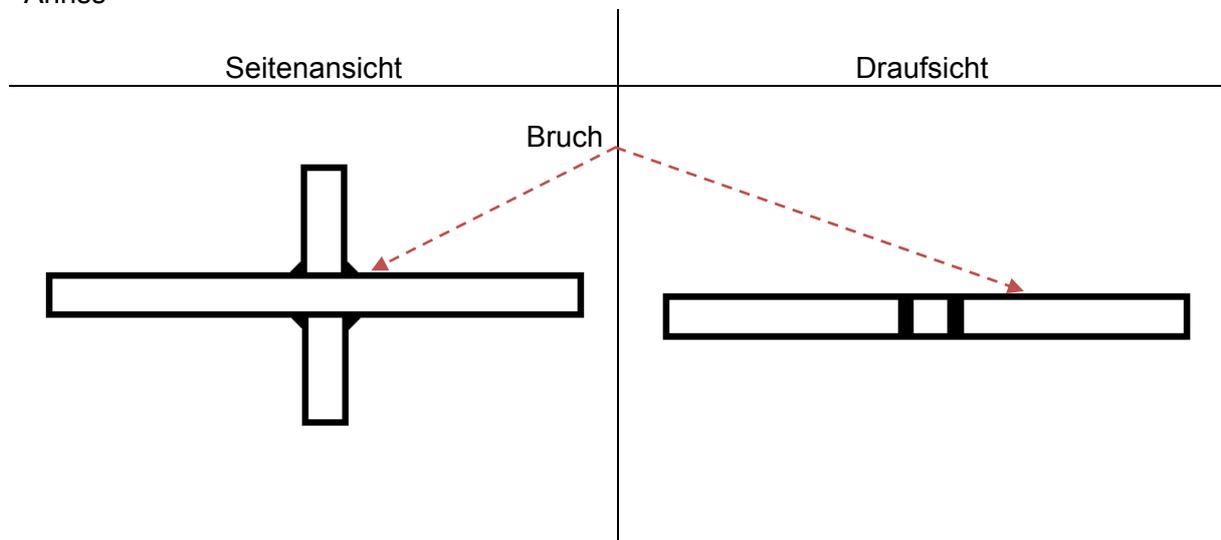
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	160 kN
Unterlast	$F_U =$	16 kN
Mittellast	$F_M =$	88 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  805.635

Anriss



## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 287.334$
2. Reparaturgeschweißt
3. HiFIT-behandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 518.301$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht rechts



Draufsicht



## 6. Bruchbild

### Bruchfläche

---



### Draufsicht

---



Bruch ausgehend von reparaturgeschweißter Naht

**Datenblatt Pk. 4.1.6**Prüfdatum:  
28.09.2011**1. Geometrie Probekörper**

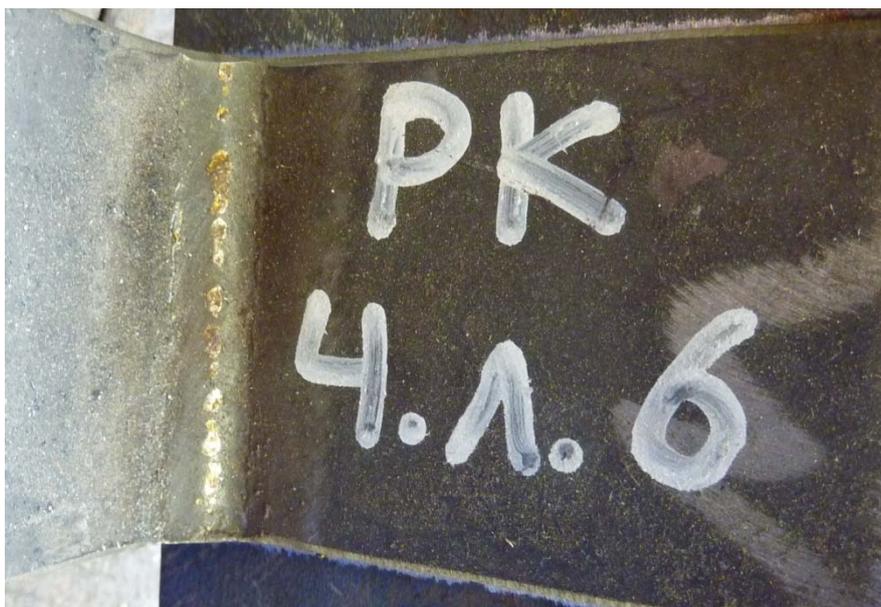
	b [mm]	t [mm]
rechts	60,00	12,24
links	59,72	12,18

a-Maß [mm]
5,0

## Seitenansicht



## Draufsicht



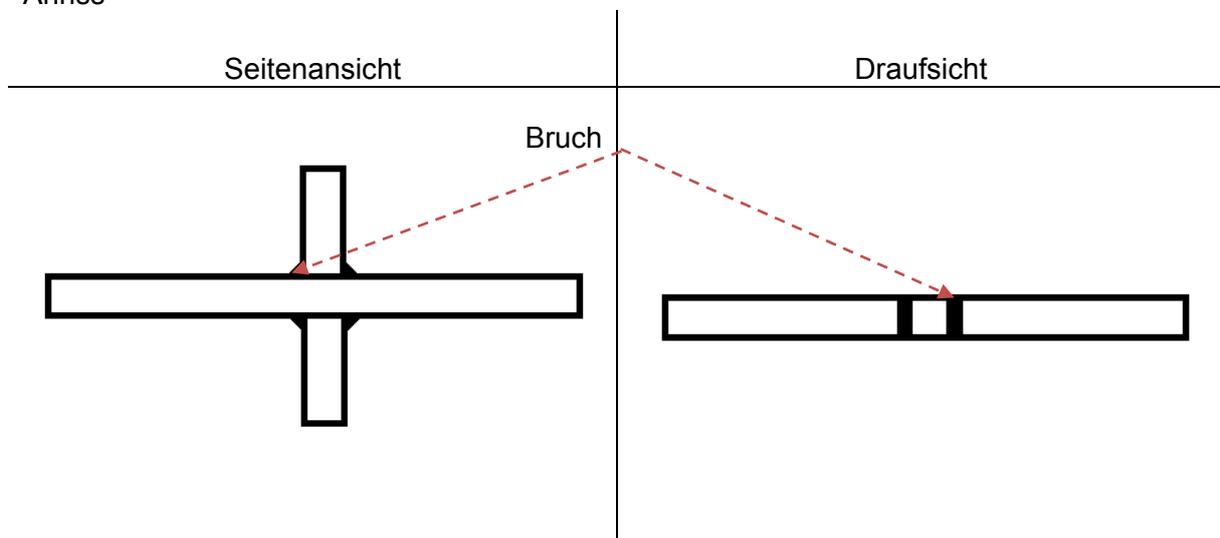
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite e	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	160 kN
Unterlast	$F_U =$	16 kN
Mittellast	$F_M =$	88 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B,\Sigma} =$  1.008.111

Anriss

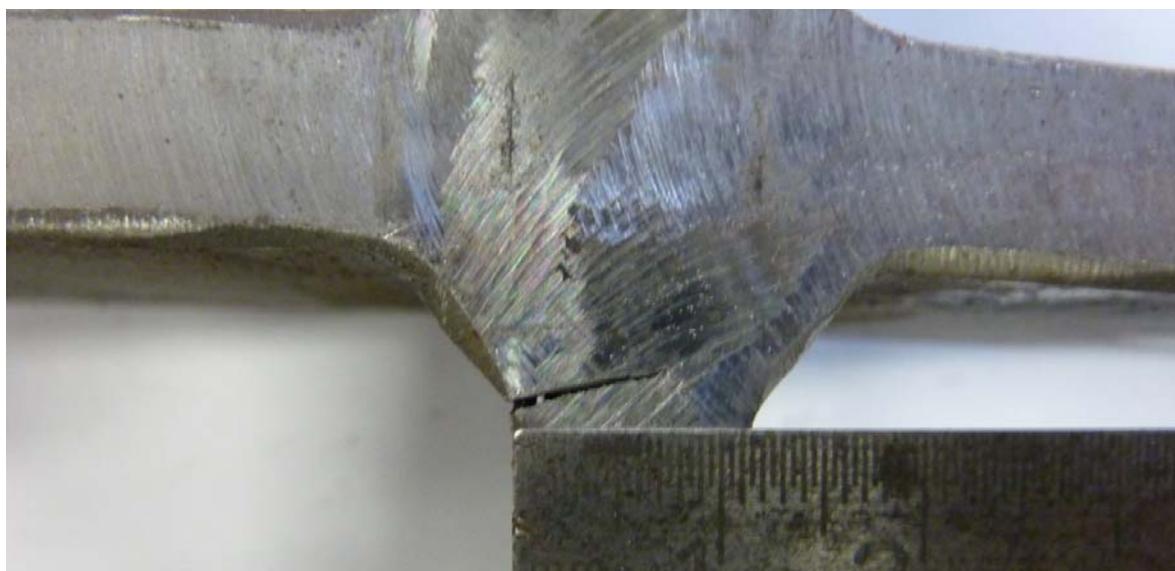


## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 287.334$
2. Reparaturgeschweißt
3. HiFIT-behandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 720.777$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht rechts



Draufsicht



## 6. Bruchbild

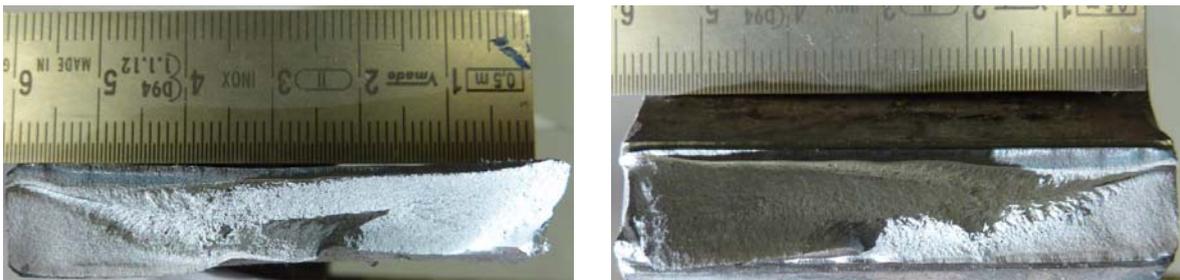
### Bruchfläche

---



### Draufsicht

---



Bruch ausgehend von bereits vorhandenem Riss diagonal gegenüberliegend der reparaturgeschweißten Naht

**Datenblatt Pk. 4.1.7**Prüfdatum:  
23.09.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	59,60	12,08
links	60,03	12,30

a-Maß [mm]
4,7

## Seitenansicht



## Draufsicht



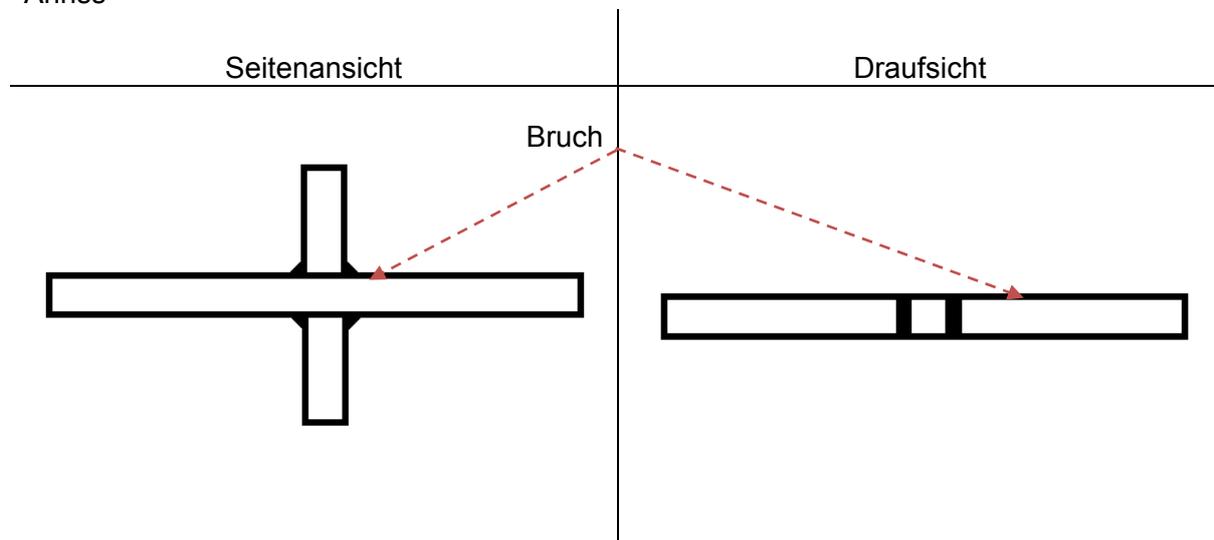
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	160 kN
Unterlast	$F_U =$	16 kN
Mittellast	$F_M =$	88 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B, \Sigma} =$  842.982

Anriss



## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 287.334$
2. Reparaturgeschweißt
3. HiFIT-behandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 555.648$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht rechts

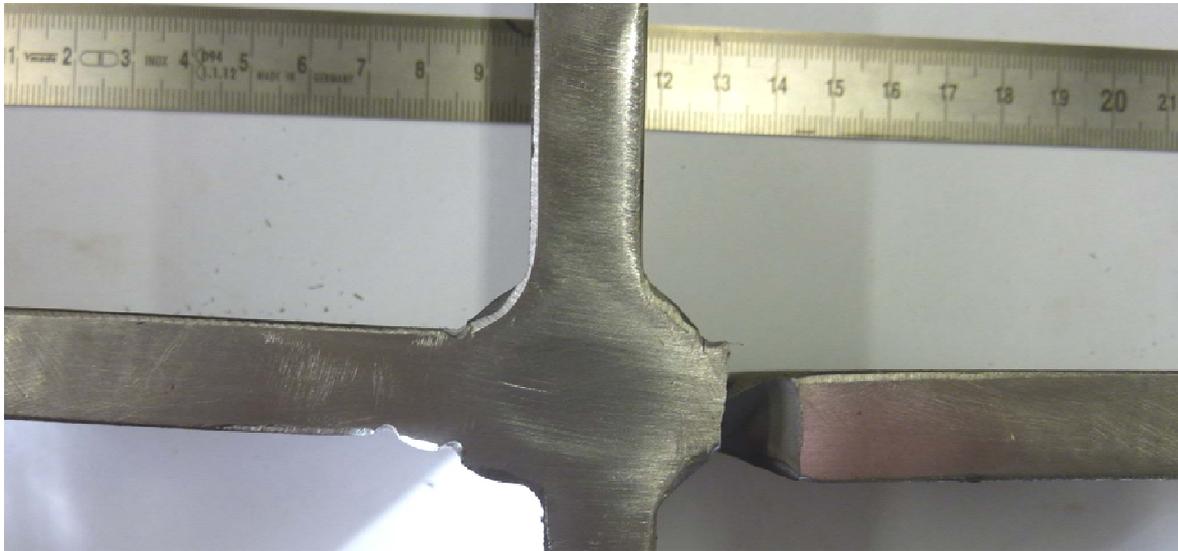


Draufsicht

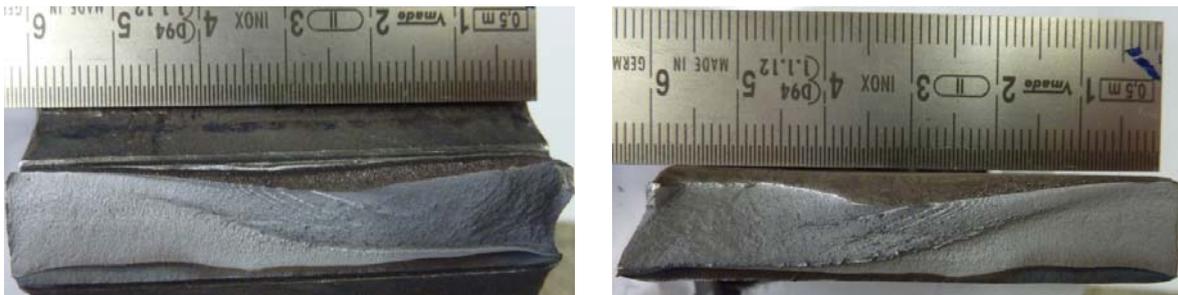


## 6. Bruchbild

### Bruchfläche



### Draufsicht

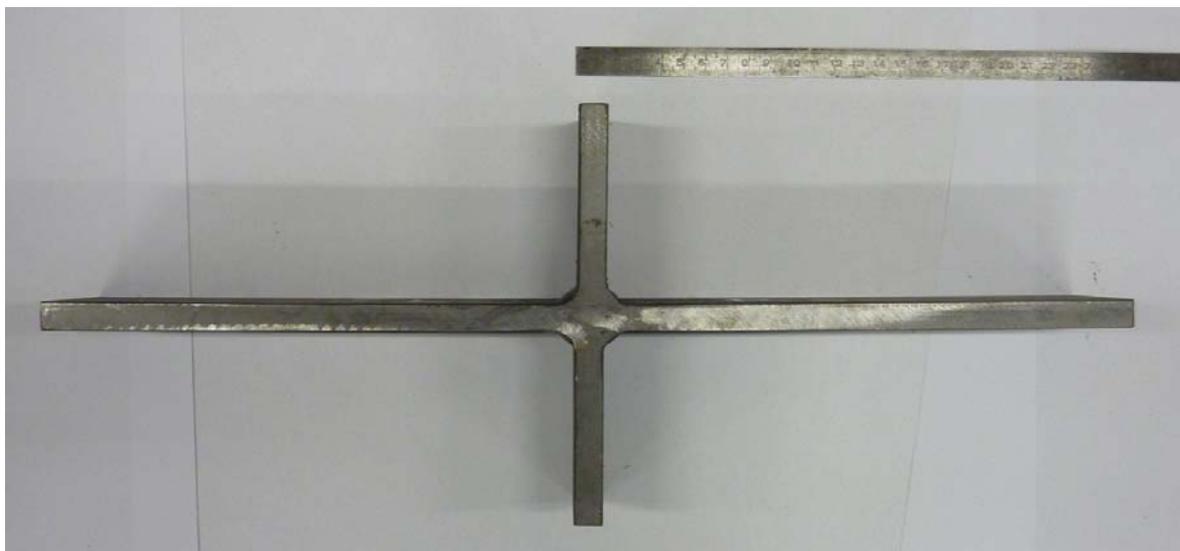
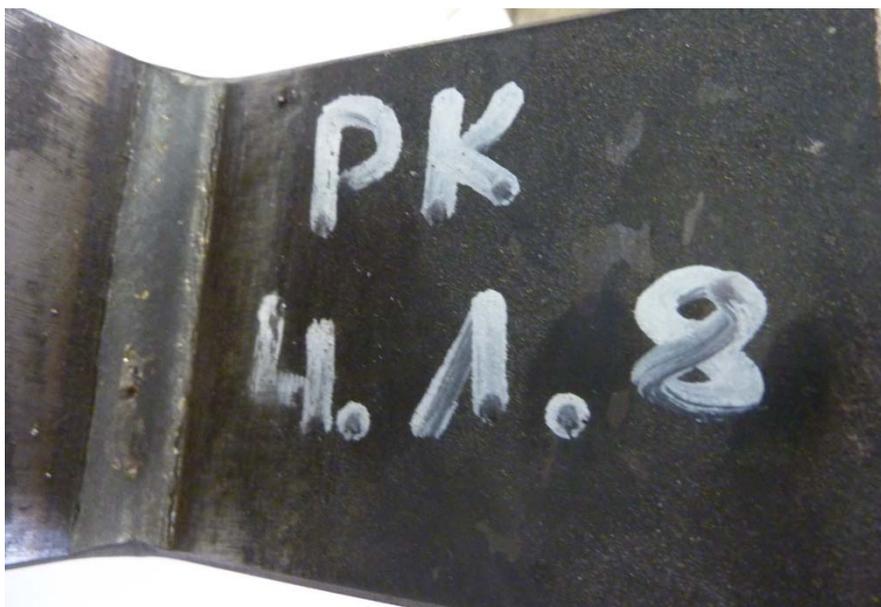


Bruch ausgehend von bereits vorhandenem Riss gegenüberliegend der reparaturgeschweißten Naht

**Datenblatt Pk. 4.1.8**Prüfdatum:  
22.09.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,12	12,17
links	60,6	12,08

a-Maß [mm]
5,0

**Seitenansicht****Draufsicht**

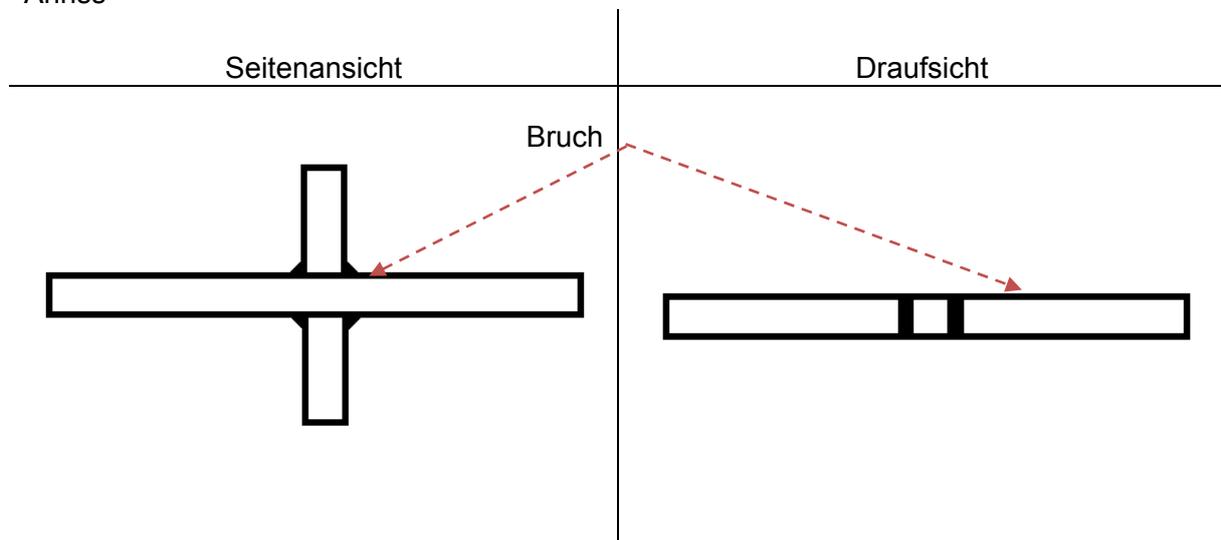
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	180 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	99 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B, \Sigma} =$  571.926

Anriss



## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 287.334$
2. Reparaturgeschweißt
3. HiFIT-behandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 284.592$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht rechts



Draufsicht



## 6. Bruchbild

### Draufsicht



Bruch ausgehend von reparaturgeschweißter Naht

**Datenblatt Pk. 4.1.9**Prüfdatum:  
23.09.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	59,99	12,50
links	59,75	12,37

a-Maß [mm]
5,1

**Seitenansicht****Draufsicht**

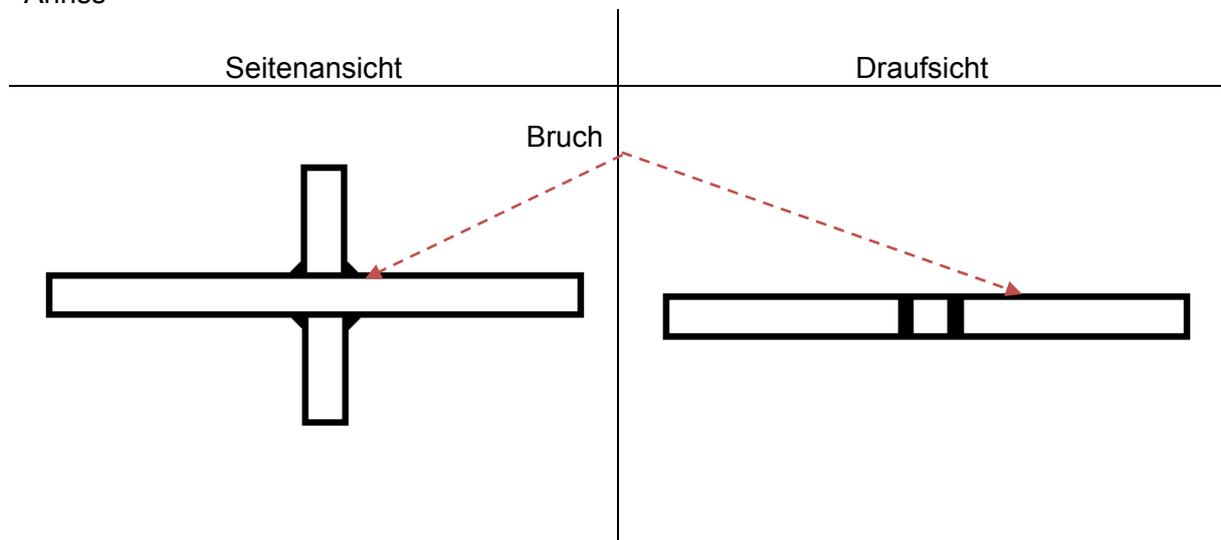
## 2. Schwingversuche

Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	180 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	99 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B,\Sigma} =$  388.207

Anriss



## 4. Bemerkung

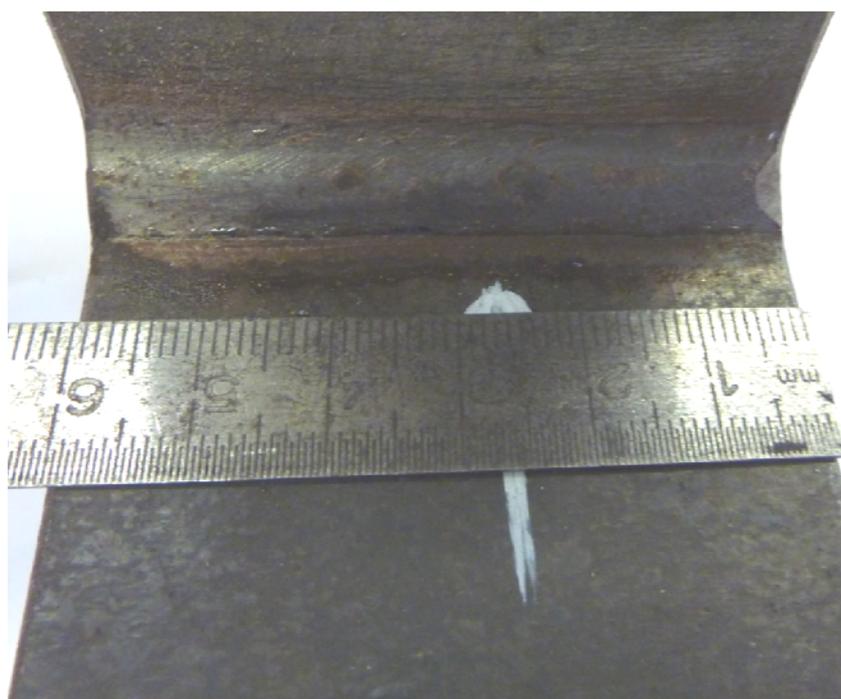
1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 287.334$
2. Reparaturgeschweißt
3. HiFIT-behandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 100.873$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht rechts



Draufsicht



## 6. Bruchbild

Bruchfläche



Draufsicht

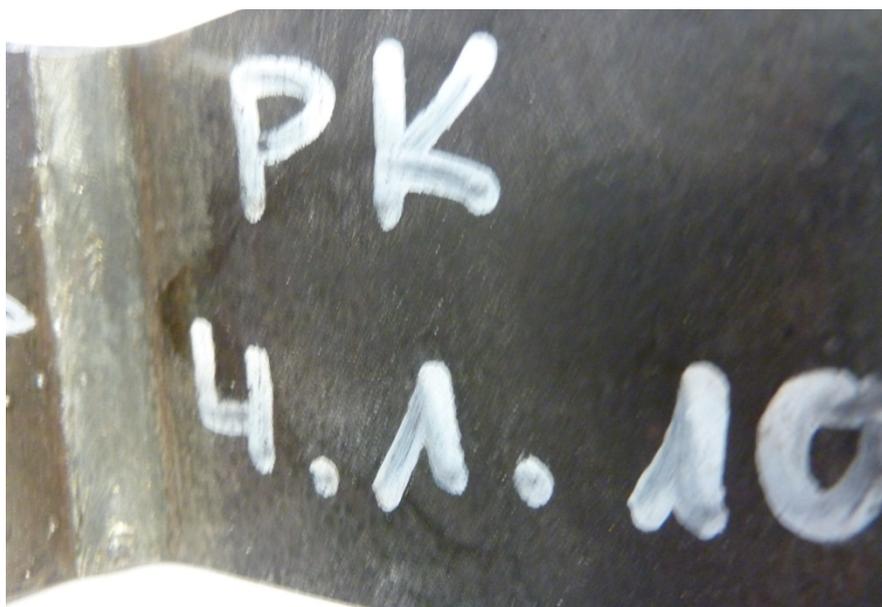


Bruch ausgehend von reparaturgeschweißter Naht

**Datenblatt Pk. 4.1.10**Prüfdatum:  
21.09.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	59,54	12,20
links	59,70	12,25

a-Maß [mm]
5,1

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

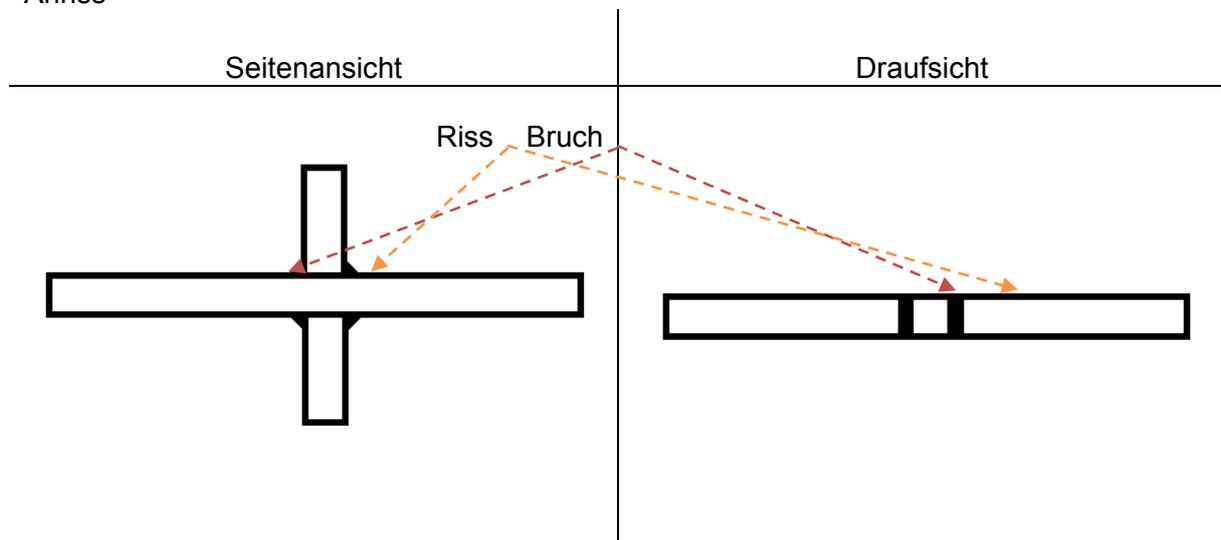
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	180 kN
Unterlast	$F_U =$	18 kN
Mittellast	$F_M =$	99 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B = \Sigma$

547.776

Anriss

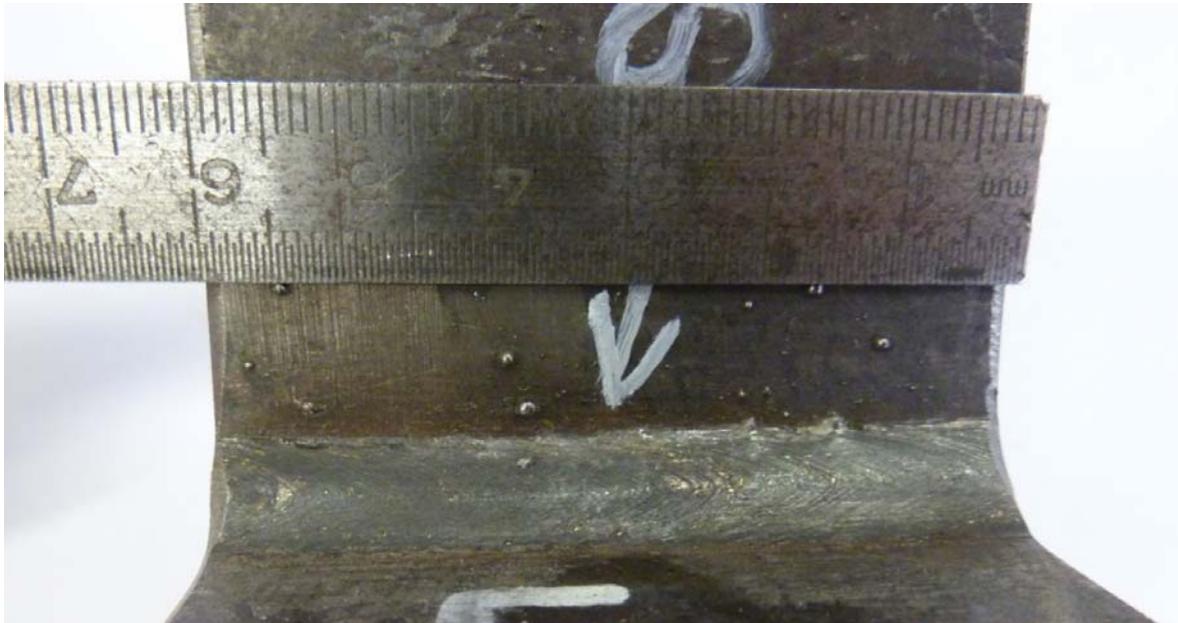


## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 287.334$
2. Reparaturgeschweißt
3. HiFIT-behandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 260.442$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht rechts



## 5. Bruchbild

Bruchfläche



---

### Draufsicht

---

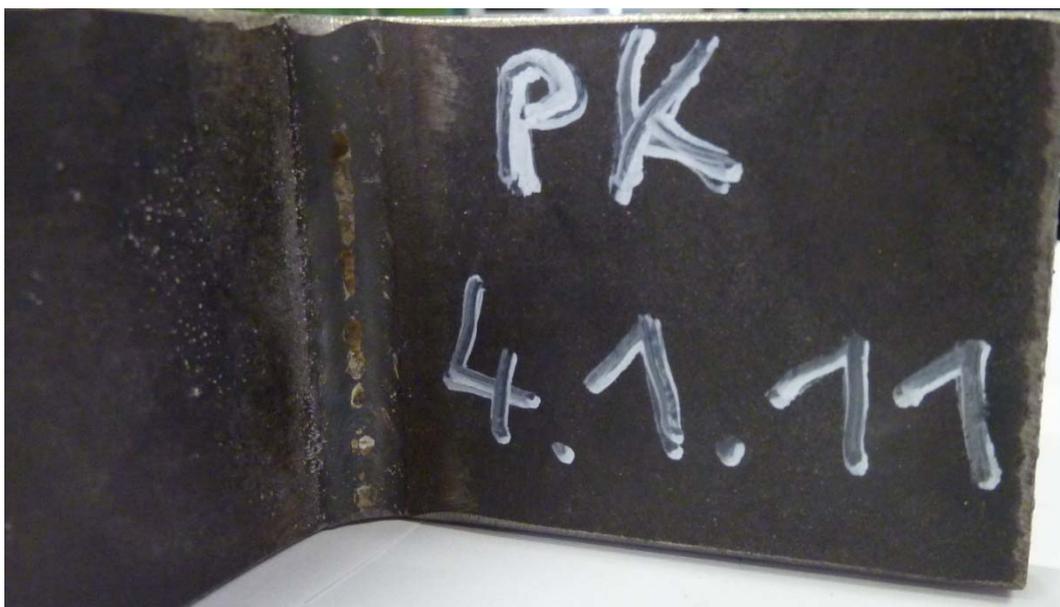


Bruch ausgehend von reparaturgeschweißter Naht

**Datenblatt Pk. 4.1.11**Prüfdatum:  
21.09.2011**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,06	12,24
links	60,66	12,56

a-Maß [mm]
5,2

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

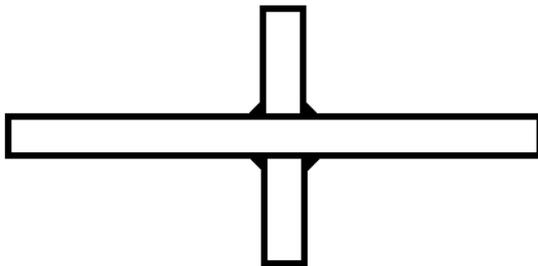
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	140 kN
Unterlast	$F_U =$	14 kN
Mittellast	$F_M =$	77 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_B =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view) of the T-shaped steel beam.



## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 287.334$
2. Reparaturgeschweißt
3. HiFIT-behandelt
4. Belastungsstufe 2, Abbruch bei 2.000.000 Schwingspiele ohne Bruch

## 6. Anrissbild

Seitenansicht rechts



Draufsicht



## 5. Bruchbild

---

### Bruchfläche

---



## 9 Anhang A

### 9.8 Datenblätter Serie 4.2

**Datenblatt Pk. 4.2.1**

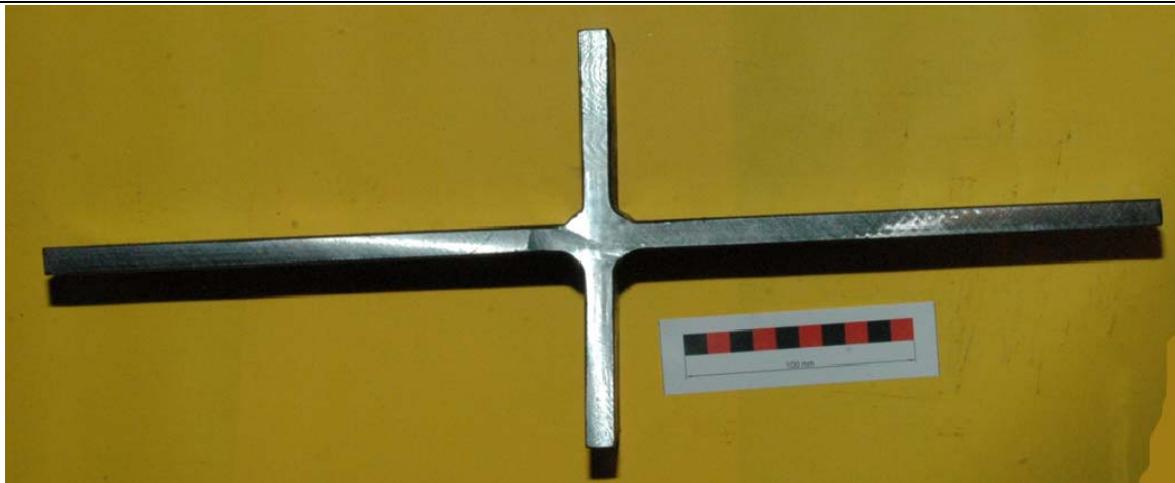
Prüfdatum:  
06.12.2010

#### 1. Geometrie Probekörper

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,07	12,16
links	60,12	12,25

a-Maß [mm]
5,1

#### Seitenansicht



#### Draufsicht



## 2. Schwingversuche

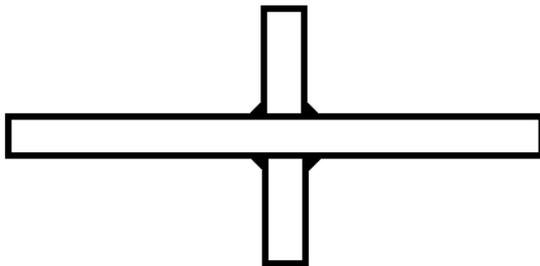
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	138,59 kN
Unterlast	$F_U =$	12,6 kN
Mittellast	$F_M =$	75,59 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B, \Sigma} =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

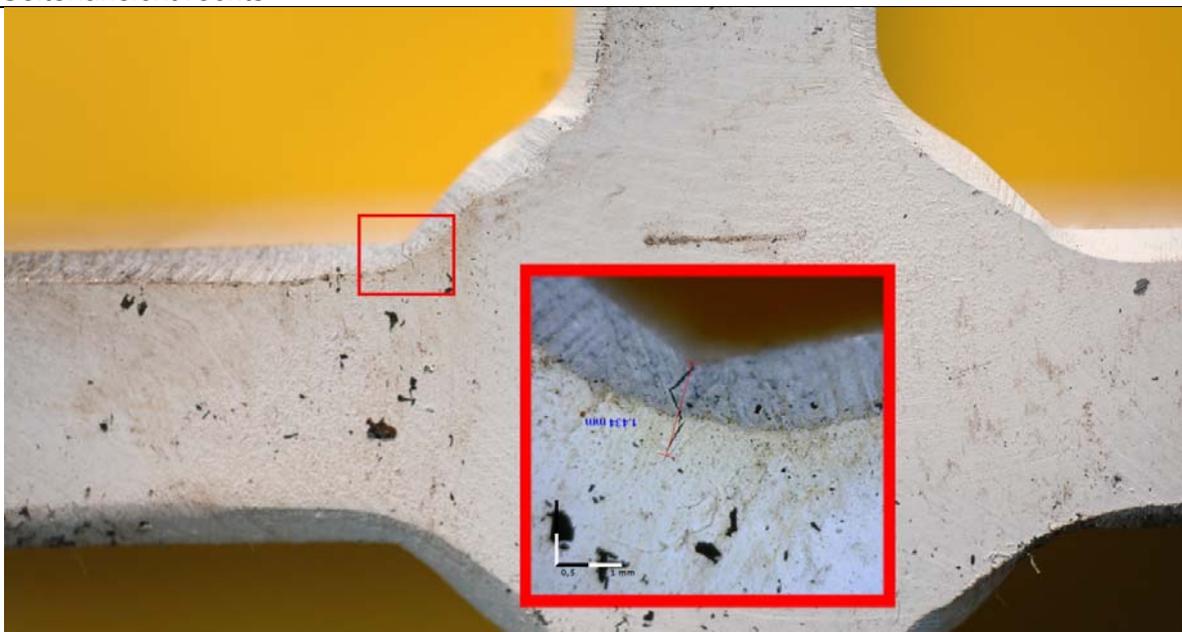
1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 287.334$
2. Reparaturgeschweißt
3. Nachbehandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Abbruch  $N_{B2} = 2.000.000$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht links



Seitenansicht rechts



Draufsicht

**6. Versuchskörper nach Versuchsabbruch**

Bruchbilder



**Datenblatt Pk. 4.2.2**Prüfdatum:  
06.12.2010**1. Geometrie Probekörper**

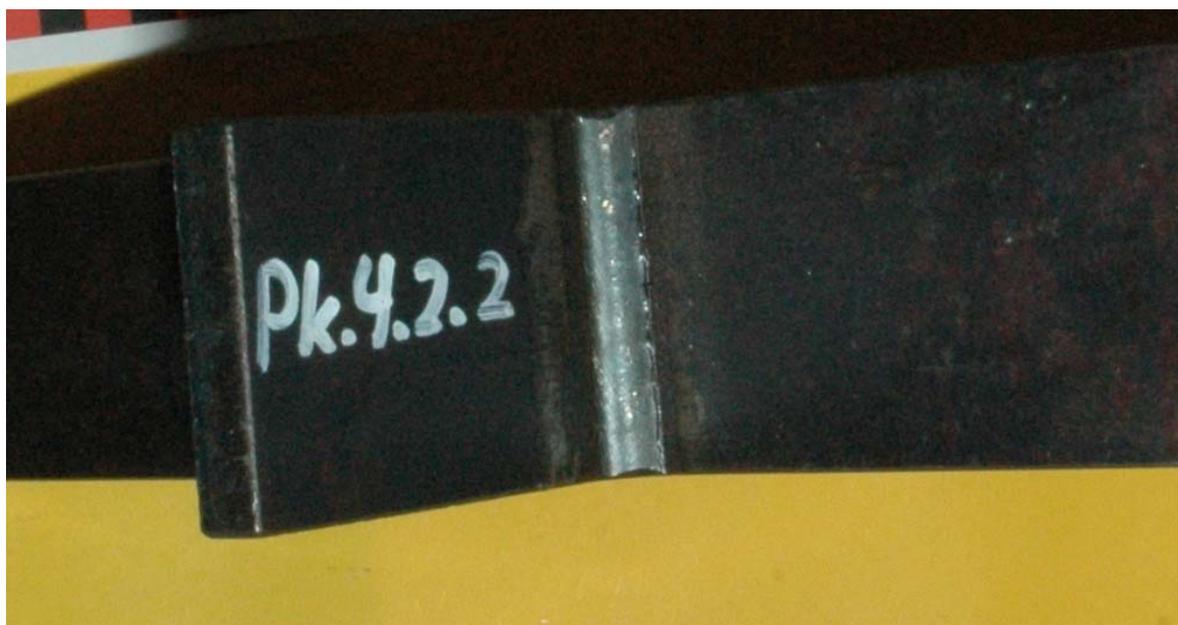
	b [mm]	t [mm]
rechts	59,95	12,13
links	60,04	12,08

a-Maß [mm]
4,7

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

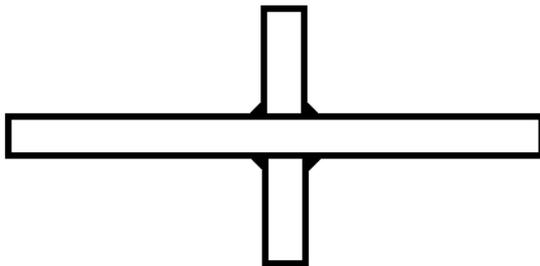
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	138,59 kN
Unterlast	$F_U =$	12,6 kN
Mittellast	$F_M =$	75,59 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B, \Sigma} =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

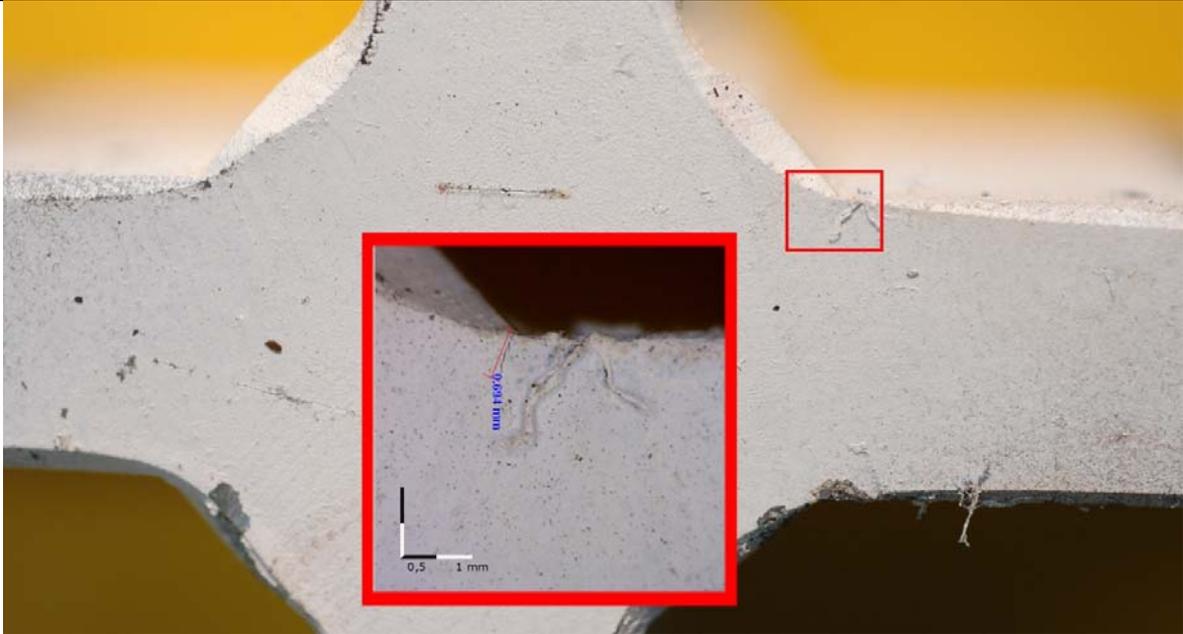
1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 297.790$
2. Reparaturgeschweißt
3. Nachbehandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Abbruch  $N_{B2} = 2.000.000$

5. Anrissbild

Seitenansicht links



Seitenansicht rechts

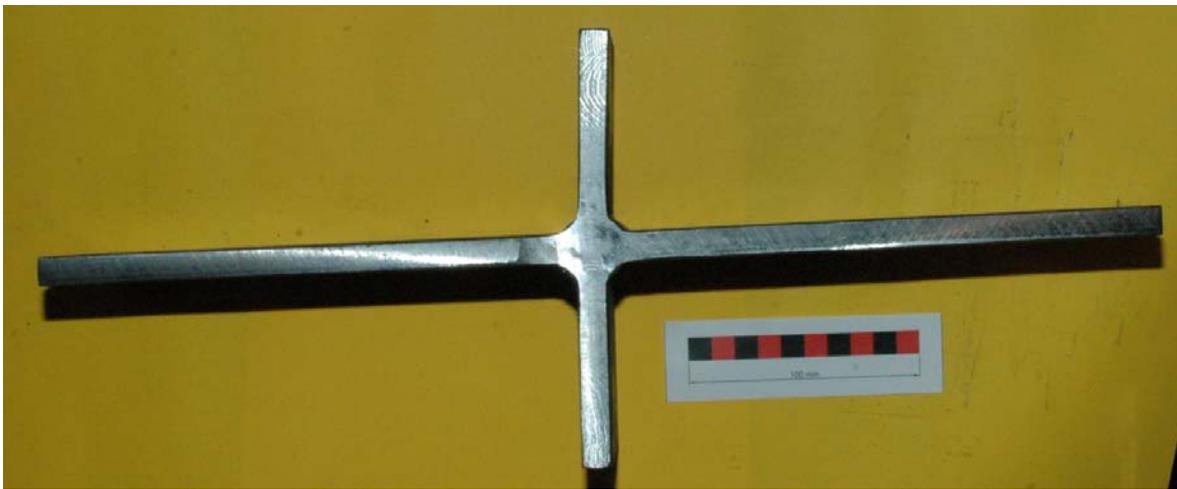


**Datenblatt Pk. 4.2.3**Prüfdatum:  
07.12.2010**1. Geometrie Probekörper**

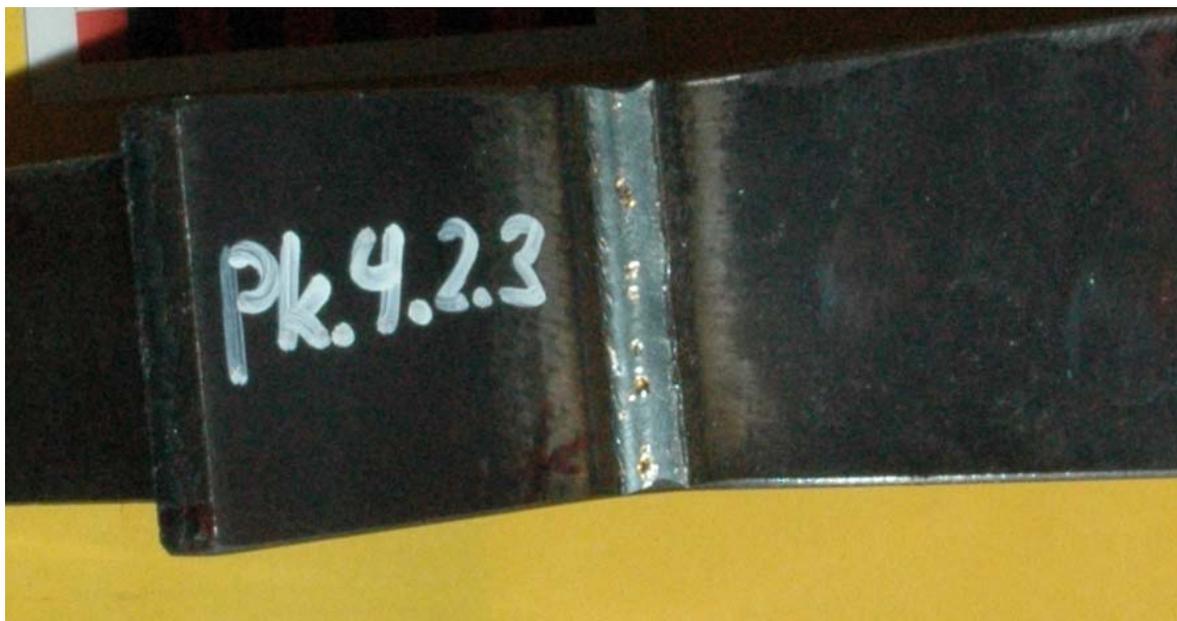
	b [mm]	t [mm]
rechts	58,81	11,94
links	59,73	12,18

a-Maß [mm]
4,6

Seitenansicht



Draufsicht



## 2. Schwingversuche

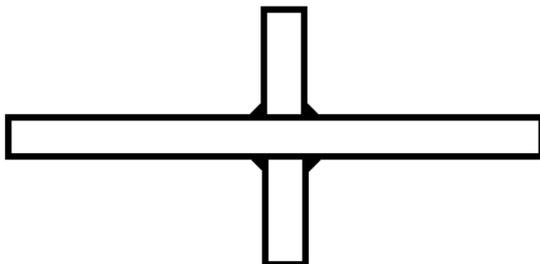
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	175 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	138,59 kN
Unterlast	$F_U =$	12,6 kN
Mittellast	$F_M =$	75,59 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	126 kN
Amplitude	$A =$	63 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B,\Sigma} =$  \_\_\_\_\_ /

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

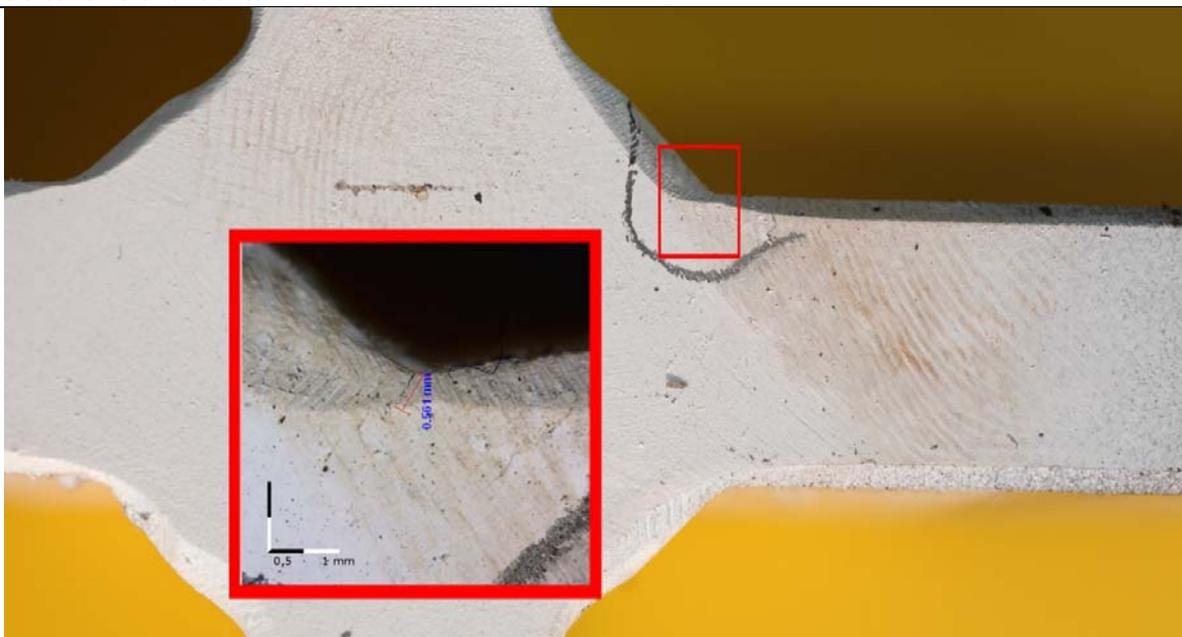
1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 328.775$
2. Reparaturgeschweißt
3. Nachbehandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Abbruch  $N_{B2} = 2.000.000$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht links



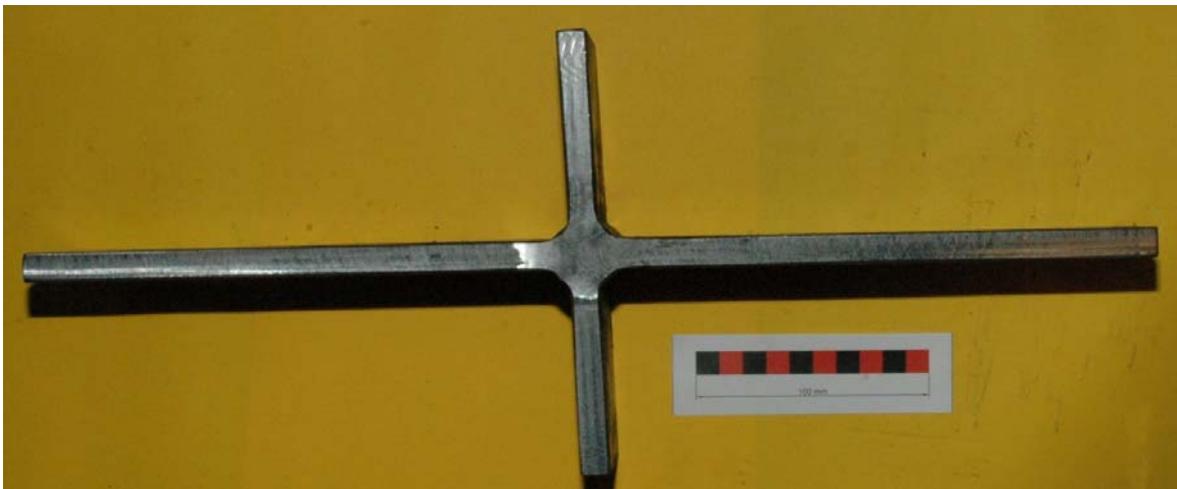
Seitenansicht rechts



**Datenblatt Pk. 4.2.4**Prüfdatum:  
07.12.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,58	12,28
links	60,50	12,41

a-Maß [mm]
4,8

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

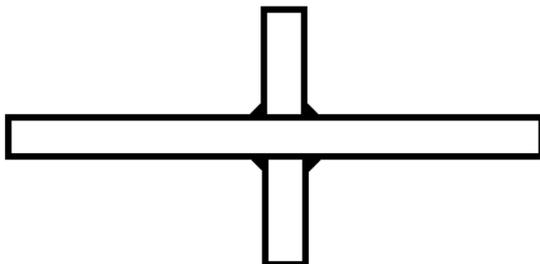
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	158,40 kN
Unterlast	$F_U =$	14,39 kN
Mittellast	$F_M =$	86,40 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B,\Sigma} =$  323.133

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 195.118$
2. Reparaturgeschweißt
3. Nachbehandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 128.015$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht links



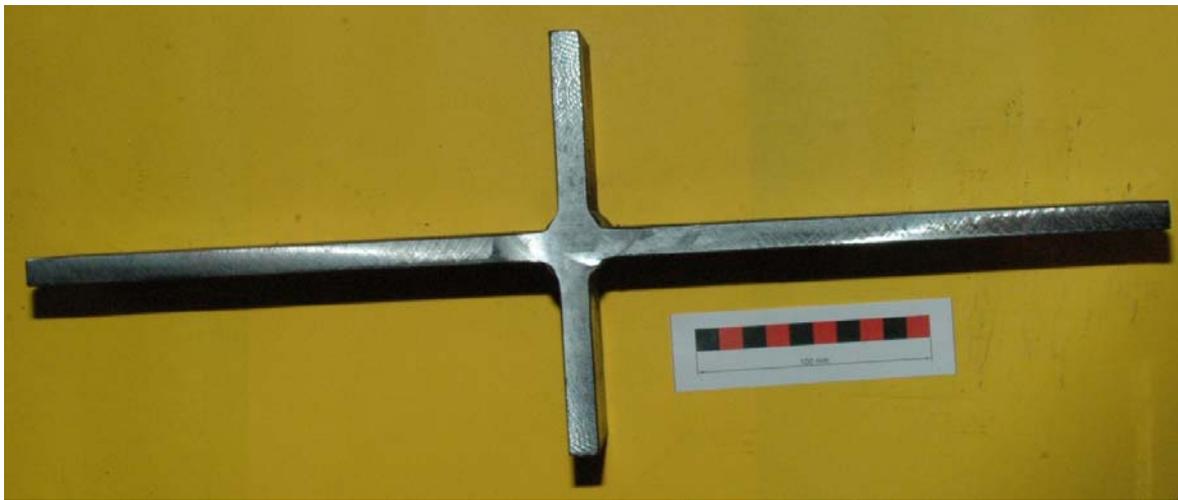
Seitenansicht rechts



**Datenblatt Pk. 4.2.5**Prüfdatum:  
08.12.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,18	12,30
links	60,36	12,28

a-Maß [mm]
5,1

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

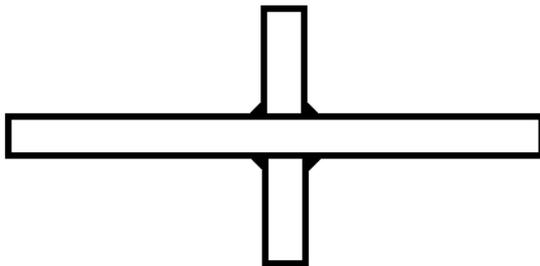
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	158,40 kN
Unterlast	$F_U =$	14,39 kN
Mittellast	$F_M =$	86,40 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B,\Sigma} =$  2.114.984

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)

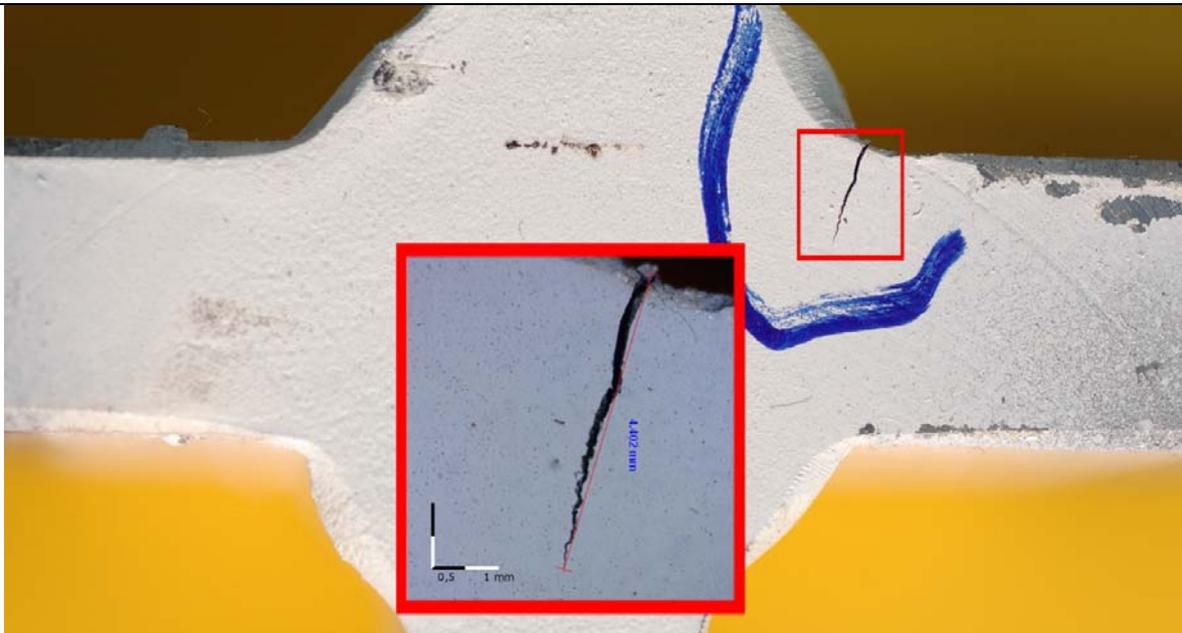


## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 168.070$
2. Reparaturgeschweißt
3. Nachbehandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 1.946.914$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht links



Seitenansicht rechts



**Datenblatt Pk. 4.2.6**Prüfdatum:  
08.12.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,60	12,27
links	60,48	12,48

a-Maß [mm]
4,7

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

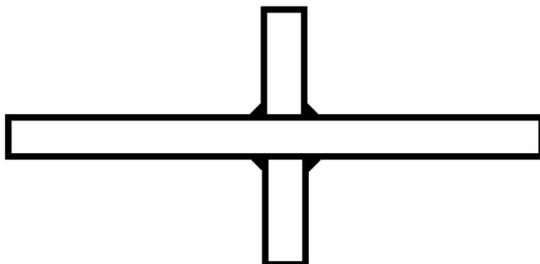
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	200 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	158,40 kN
Unterlast	$F_U =$	14,39 kN
Mittellast	$F_M =$	86,40 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	144 kN
Amplitude	$A =$	72 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B,\Sigma} =$  606.082

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)

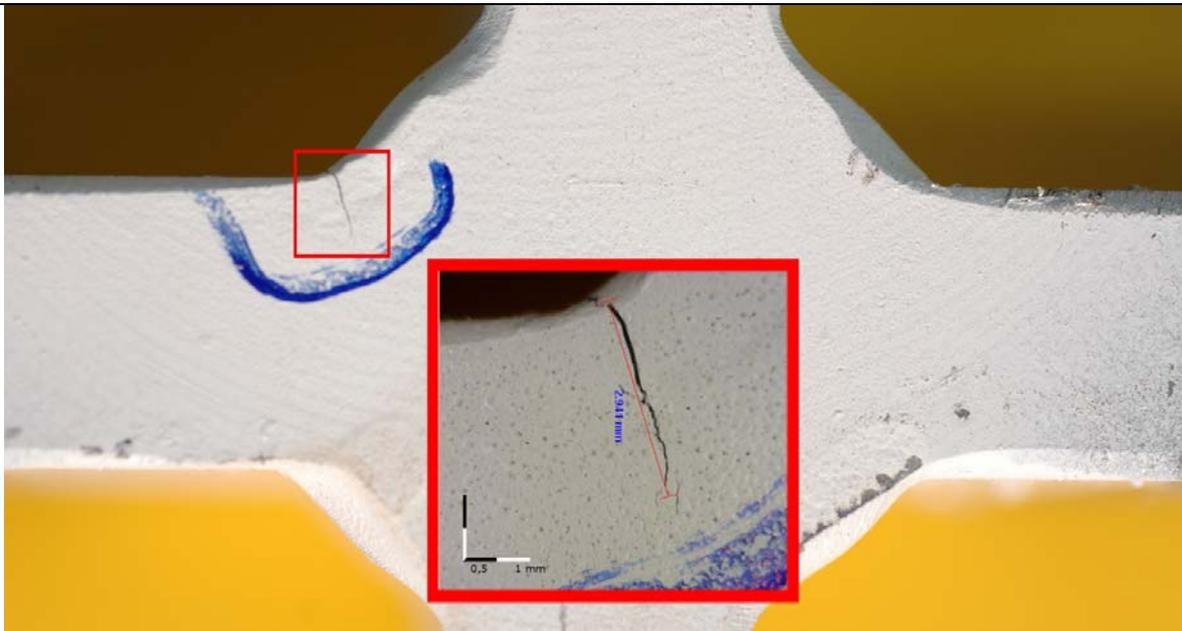


## 4. Bemerkung

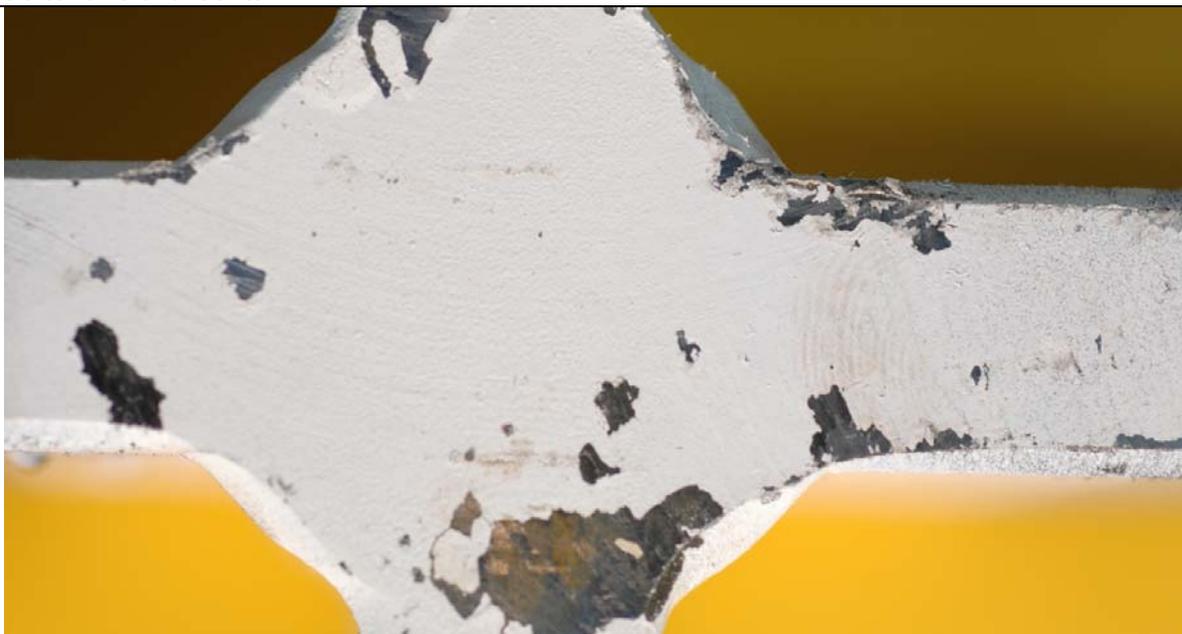
1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 182.242$
2. Reparaturgeschweißt
3. Nachbehandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 423.840$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht links



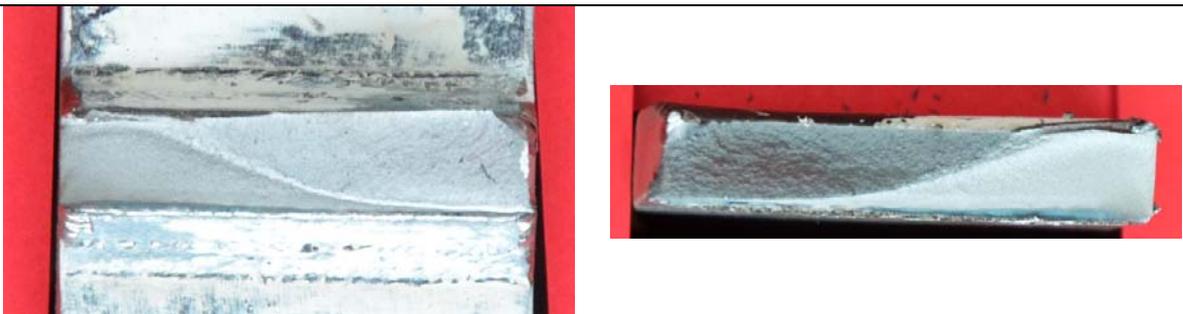
Seitenansicht rechts



Draufsicht

**6. Versuchskörper nach Versuchsabbruch**

Bruchbilder



**Datenblatt Pk. 4.2.7**Prüfdatum:  
08.12.2010**1. Geometrie Probekörper**

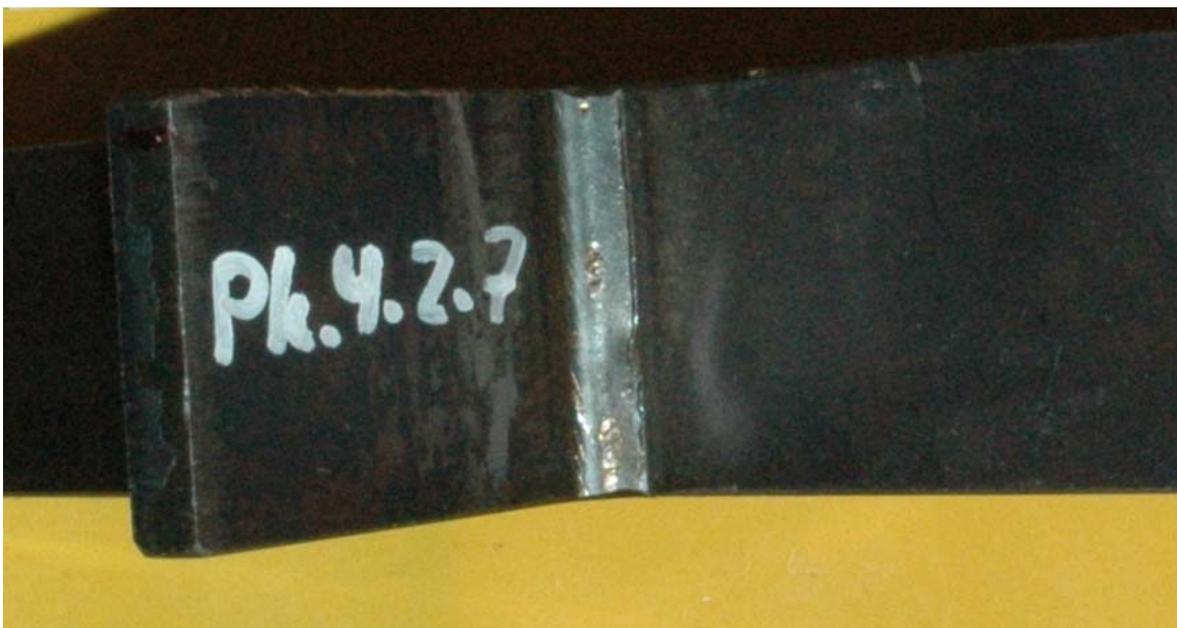
	b [mm]	t [mm]
rechts	60,29	12,32
links	60,50	12,50

a-Maß [mm]
4,6

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

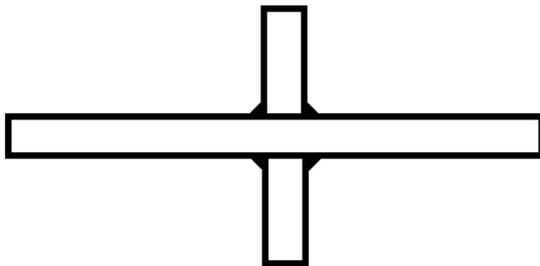
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	178,19 kN
Unterlast	$F_U =$	16,20 kN
Mittellast	$F_M =$	97,20 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B,\Sigma} =$  325.000

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)

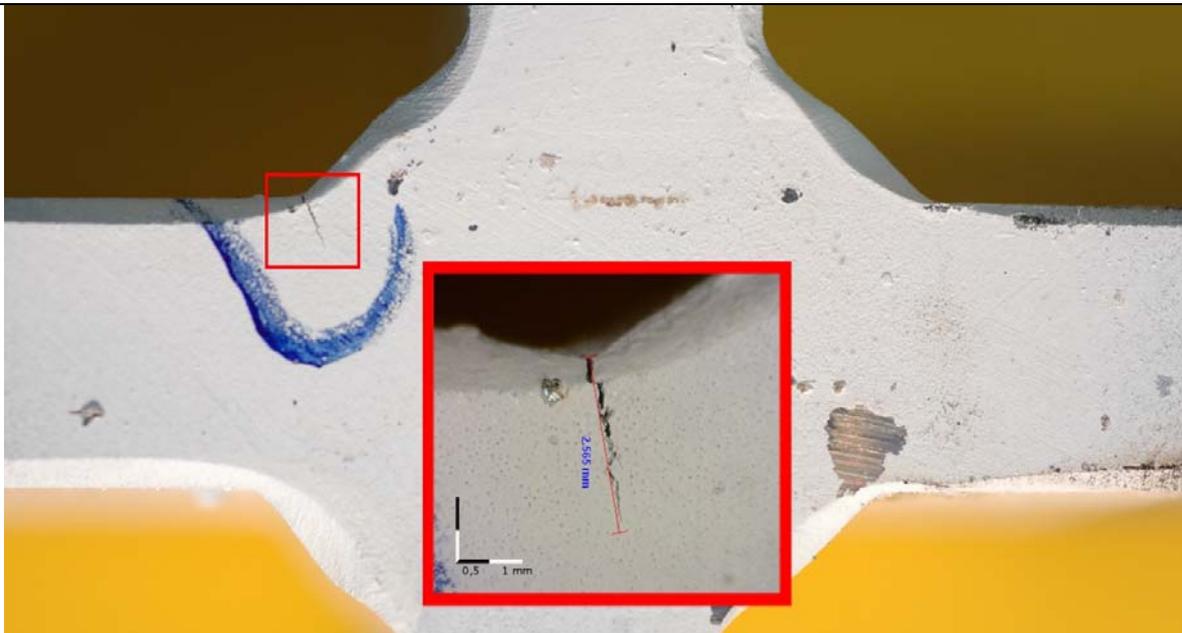


## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 111.808$
2. Reparaturgeschweißt
3. Nachbehandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 213.192$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht links



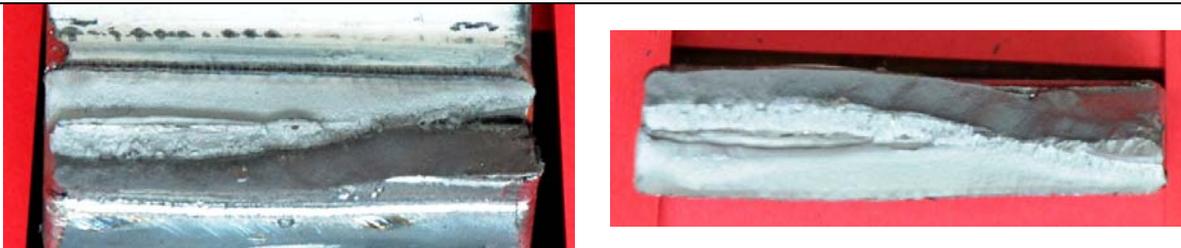
Seitenansicht rechts



Draufsicht

**6. Versuchskörper nach Versuchsabbruch**

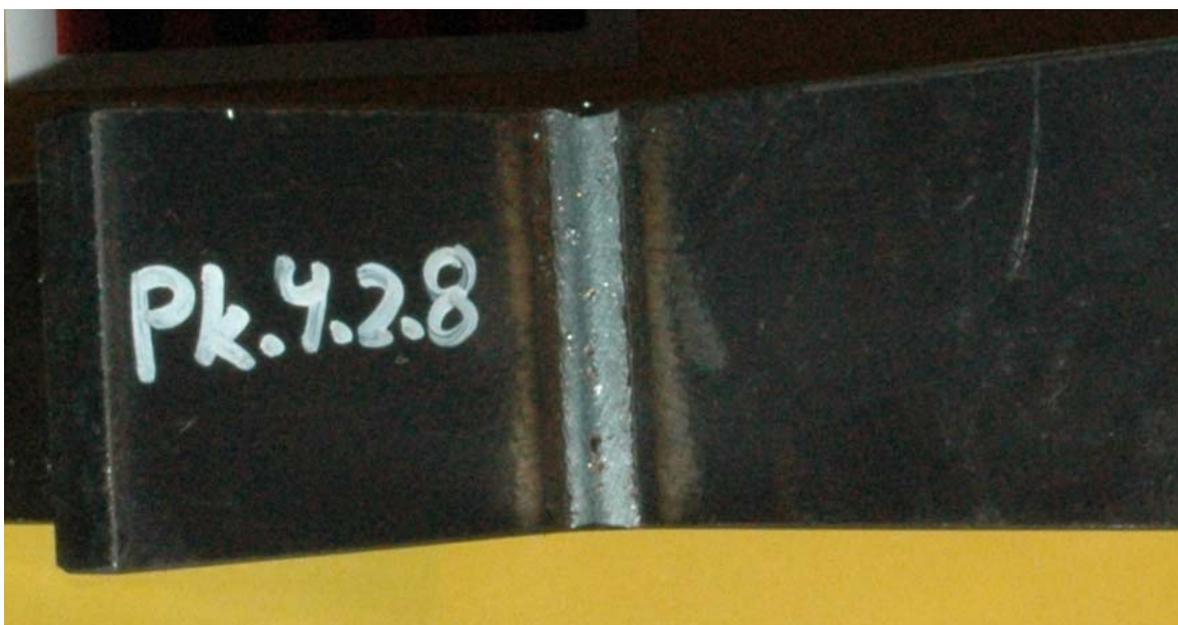
Bruchbilder



**Datenblatt Pk. 4.2.8**Prüfdatum:  
09.12.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,13	12,27
links	60,30	12,21

a-Maß [mm]
4,8

**Seitenansicht****Draufsicht**

## 2. Schwingversuche

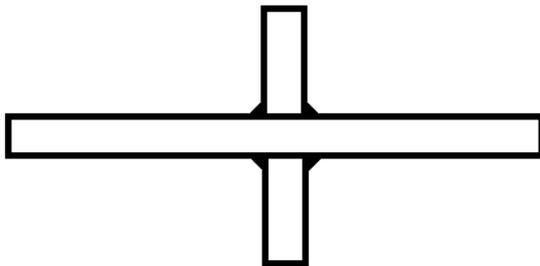
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	178,19 kN
Unterlast	$F_U =$	16,20 kN
Mittellast	$F_M =$	97,20 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B,\Sigma} =$  323.982

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)



## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 131.058$
2. Reparaturgeschweißt
3. Nachbehandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 192.924$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht links



Seitenansicht rechts



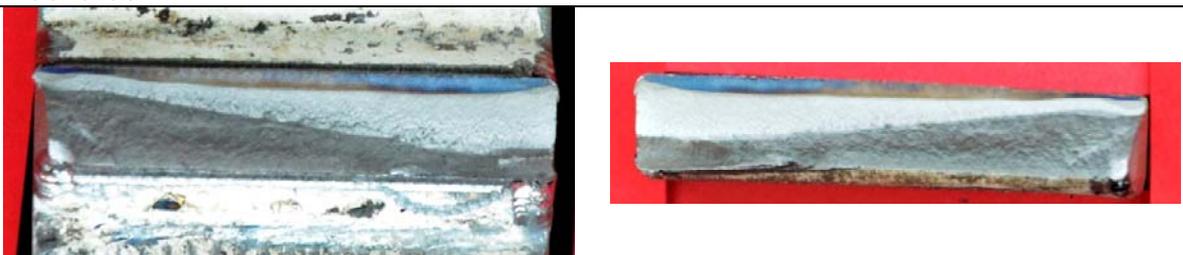
Draufsicht



6. Versuchskörper nach Versuchsabbruch



Bruchbilder



**Datenblatt Pk. 4.2.9**Prüfdatum:  
01.12.2010**1. Geometrie Probekörper**

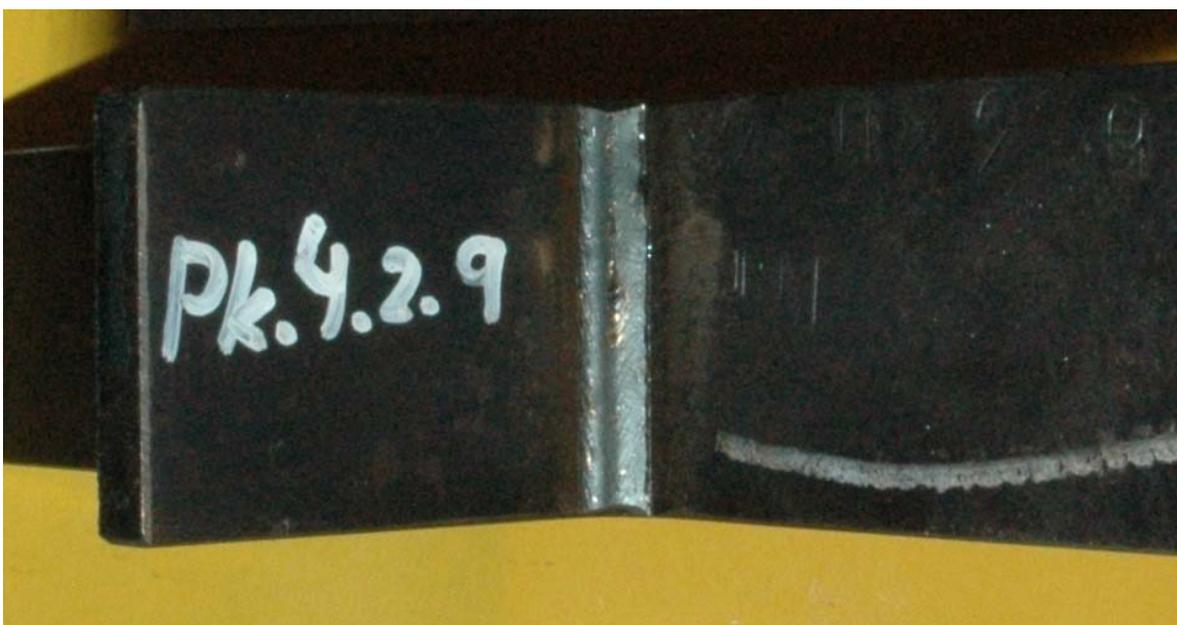
	b [mm]	t [mm]
rechts	60,19	12,26
links	60,28	12,35

a-Maß [mm]
4,3

## Seitenansicht



## Draufsicht



## 2. Schwingversuche

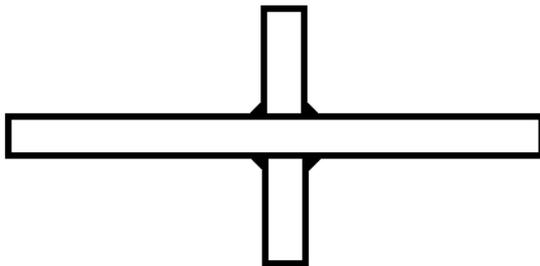
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	178,19 kN
Unterlast	$F_U =$	16,20 kN
Mittellast	$F_M =$	97,20 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B,\Sigma} =$  302.439

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)

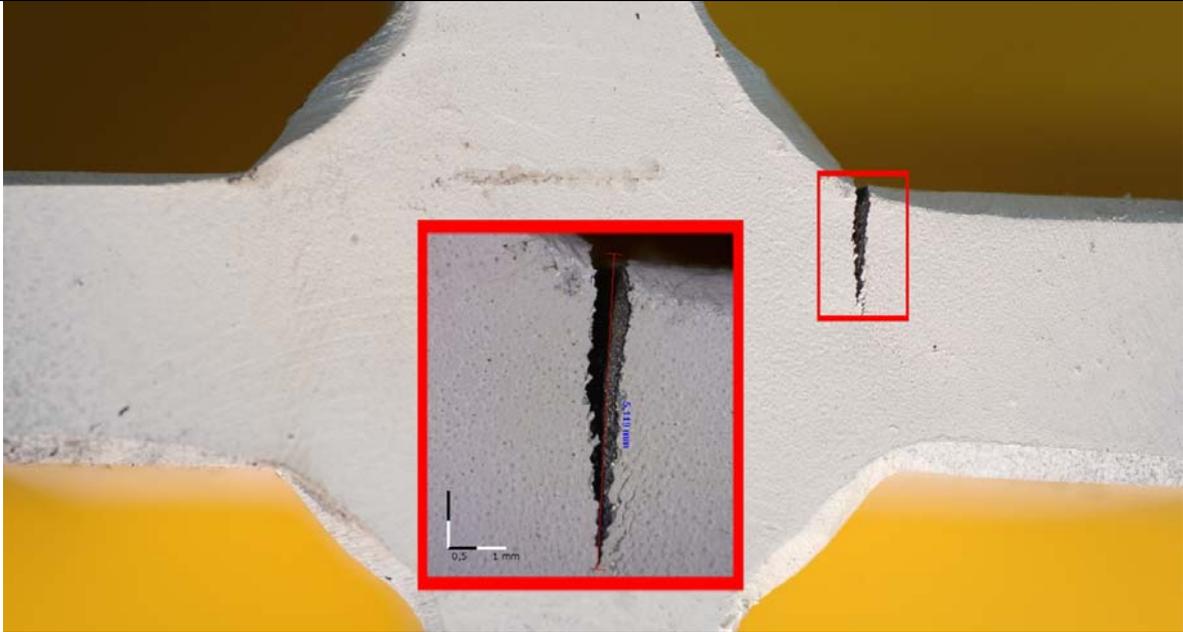


## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 127.313$
2. Reparaturgeschweißt
3. Nachbehandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 175.126$

**5. Anrissbild**

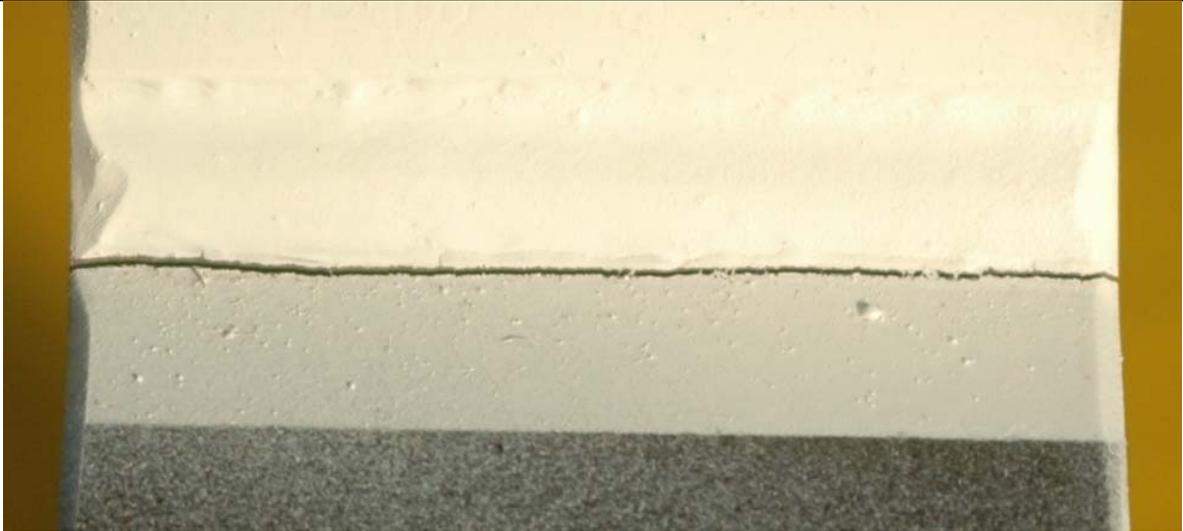
Seitenansicht links



Seitenansicht rechts



Draufsicht

**6. Versuchskörper nach Versuchsabbruch**

Bruchbilder



**Datenblatt Pk. 4.2.10**Prüfdatum:  
30.11.2010**1. Geometrie Probekörper**

	b [mm]	t [mm]
rechts	60,45	12,26
links	60,57	12,16

a-Maß [mm]
4,5

Seitenansicht



Draufsicht



## 2. Schwingversuche

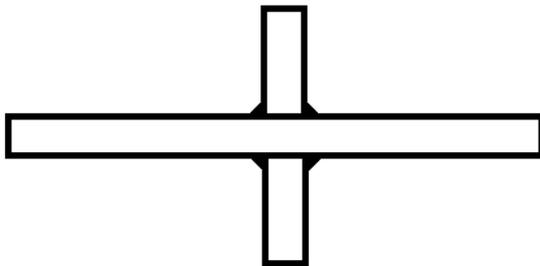
Spannungsschwingbreite	$\Delta\sigma =$	225 N/mm <sup>2</sup>
Oberlast	$F_O =$	178,19 kN
Unterlast	$F_U =$	16,20 kN
Mittellast	$F_M =$	97,20 kN
Schwingbreite	$\Delta F =$	162 kN
Amplitude	$A =$	81 kN
Spannungsverhältnis	$R =$	0,1
Prüffrequenz	$f =$	8 Hz

## 3. Versagen

Schwingspiele bis zum Bruch  $N_{B,\Sigma} =$  161.671

Anriss

Seitenansicht



Draufsicht (Top view)

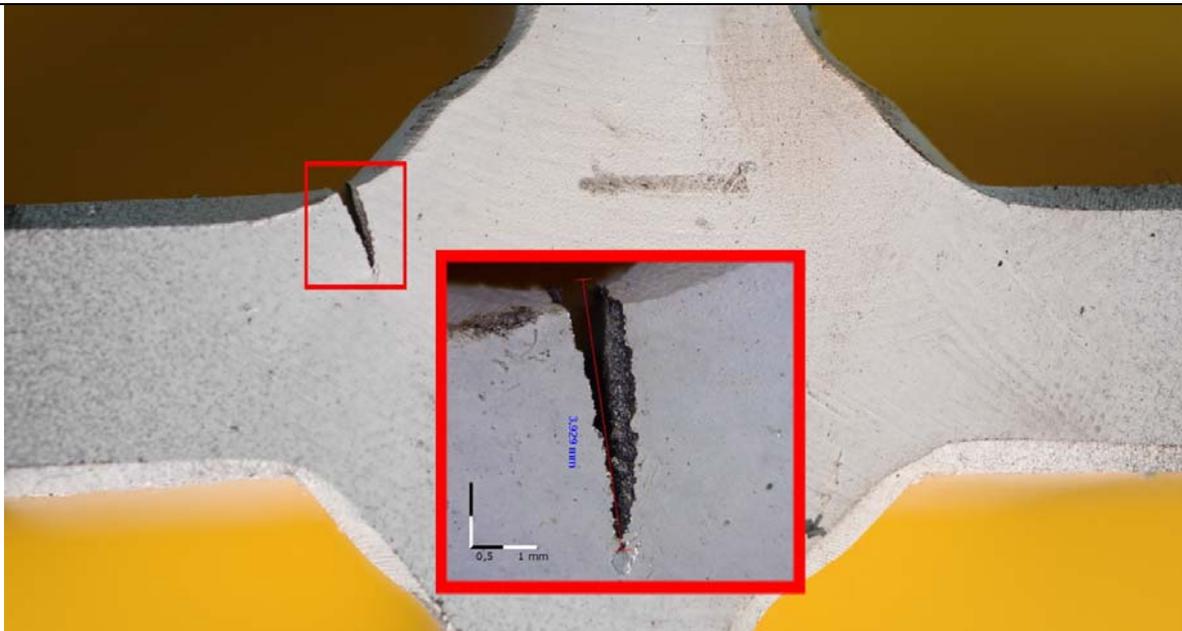


## 4. Bemerkung

1. Belastungsstufe 1, Angeschwungen bis Anriss  $N_{A1} = 145.676$
2. Reparaturgeschweißt
3. Nachbehandelt
4. Belastungsstufe 2, Schwingen bis Bruch  $N_{B2} = 15.995$

## 5. Anrissbild

Seitenansicht links



Seitenansicht rechts



Draufsicht

**6. Versuchskörper nach Versuchsabbruch**

Bruchbilder



## 10 Anhang B

### 10.1 Behandlungsbericht HiFIT

#### Behandlungseinstellungen Serie 2.1

Versorgungsluftdruck [bar]	6
Intensitätseinstellung	120°
Pin-Durchmesser [mm]	3
Bolzenform [mm]	Kegel mit Kugel; D =3

#### Behandlungseinstellungen Serie 3.1 und 4.1

Versorgungsluftdruck [bar]	5 und 7
Intensitätseinstellung	160°
Pin-Durchmesser [mm]	3
Bolzenform [mm]	Kegel mit Kugel; D =3

## 10.2 Behandlungsbericht PIT Serie 2 und Serie 3

<b>PIT Behandlungsbericht</b>				
<b>Kunde:</b>		Universität Stuttgart IKE-BAW Karlsruhe		
<b>Bestellnummer.:</b>		Nach Absprache mit Herrn Kudla		
<b>Projekt Nr:</b>	10.49.0.10-003	<b>Projekt Beschreibung</b>		
<b>Bezeichnung:</b>	BAW-Kreuzstoß	Im Rahmen eines Sanierungsprojektes hat das BAW Karlsruhe das IKE der Uni Stuttgart und das KIT der Uni Karlsruhe beauftragt, Schwingungs- und Eigenspannungsuntersuchungen an Kreuzstößen aus dem Werkstoff S235 durchzuführen. Es werden unbehandelte, PIT behandelte und HiFIT behandelte Proben gegenübergestellt		
<b>Material Bez.:</b>	S235 nach DIN EN 10025-2			
<b>Ziel der Behandlung:</b>		Lebensdauererhöhung durch Nachbehandlung		
<b>Behandlungsparameter</b>				
<b>Anwender:</b>	<b>Geräte Identifikation</b>		<b>Einstellungen</b>	
	<b>Modell:</b>	<b>Gerätenummer:</b>	<b>Stufe:</b>	<b>Druck:</b>
Peter Gerster	PIT Weld Line 10-1	01/00007	2 (90Hz)	5,0-6,0 bar
<b>Bolzenhalter und Bolzen</b>				
<b>Form des Bolzenhalters</b>	<b>Bolzen</b>	<b>Durchmesser</b>	<b>Länge der/s Bolzen/s</b>	<b>Bolzenform</b>
Bolzenhalter Standard BH8-S10-01-A	SB8-S20-01-A	8	80	R = 2,0mm
<b>Behandlung gemäß Anweisung Nr.:</b> (wenn nicht vor Ort festgelegt)		Wurde vor Ort festgelegt		
<b>Anwesend während der Behandlung:</b>				
<b>Organisation:</b>	<b>Name:</b>	<b>Funktion:</b>		
Universität Stuttgart IKE	Konrad Kudla	Projektleiter IKE Uni Stuttgart		
Universität Karlsruhe KIT	Philipp Weidner	Projektleiter KIT Uni Karlsruhe		
Dynatec	Marco Volgmann			
PITEC GmbH	Erwin Schmucker	Konstruktion		
PITEC GmbH	Peter Gerster	Senior Consulting		
<b>Anmerkungen:</b> Die Behandlung der Proben fand am 15.09.2010 an der SL Ulm statt. Es wurden 12 Probekörper PIT und 12 Probekörper HiFIT behandelt. Die PIT Behandlung wurde in den Bildern 1-8 dokumentiert.				



### Fotodokumentation der PIT Behandlung am 15.09.2010



Bild 1: PIT Behandlung der einzelnen Proben



Bild 2: PIT Behandlung der einzelnen Proben

Seite 2 zum Behandlungsbericht 10.49.0.10-003 v. 15.09.2010



**Bild 3:** Daten der PIT Behandlung Frequenzschalter Stufe 2 = 90 Hz und 5-6 bar in Betrieb



**Bild 4:** PIT behandelte Proben – an 3 Proben wurden kleine Felder behandelt für eventuell zusätzliche Messungen

Seite 3 zum Behandlungsbericht 10.49.0.10-003 v. 15.09.2010

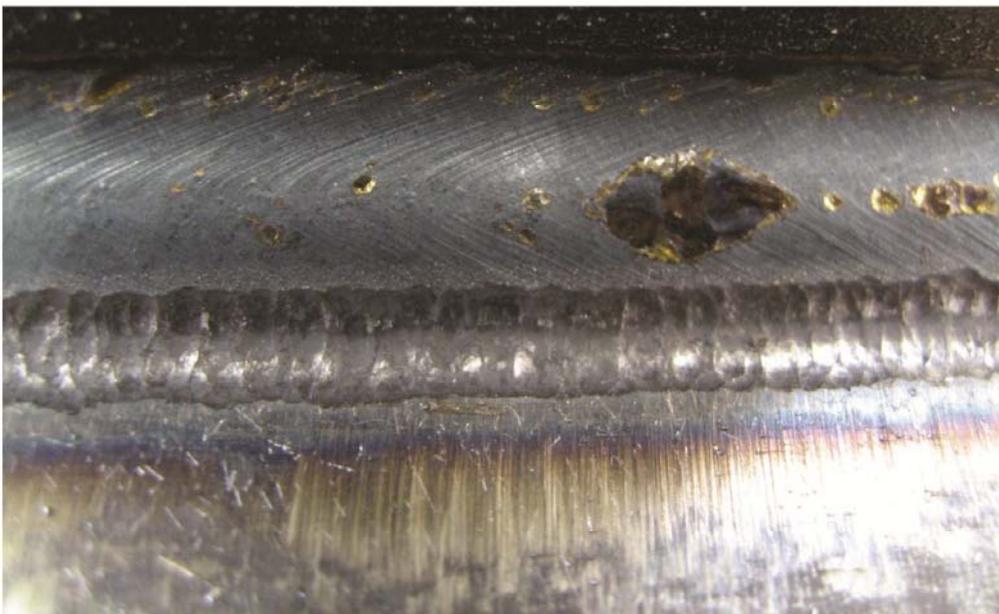


**Bild 5:** PIT behandelte Proben mit Steuergerät



**Bild 6:** alle 4 Nahtübergänge am durchgehenden Blech wurden PIT behandelt (siehe Pfeile)

Seite 4 zum Behandlungsbericht 10.49.0.10-003 v. 15.09.2010

**+PITEC****Bild 7:** PIT Behandlungsspur am Übergang**Bild 8:** Vergrößerung der Behandlungsspur

<b>Unterschrift:</b>		<b>Behandlungsdatum:</b>	15.09.2010
----------------------	---	--------------------------	------------

## 10.3 Behandlungsbericht PIT Serie 4

PIT Behandlungsbericht				
<b>Kunde:</b>		Universität Stuttgart		
<b>Bestellnummer.:</b>		Bestellung mündlich durch Herr Kudla		
<b>Projekt Nr:</b>	10.49.0.10-004	<b>Projekt Beschreibung</b>		
<b>Bezeichnung:</b>	BAW-Kreuzproben	Aufgrund einer Versuchsreihe wurden Probestücke geschweißt und geschwungen bis zum Anriss. Dann wurden sie nachgeschweißt (reparaturgeschweißt) und mit der PIT- Technologie an den Nahtübergänge und auslaufenden Kanten nachbehandelt.		
<b>Material Bez.:</b>	S 235			
<b>Ziel der Behandlung:</b>		Lebensdauererhöhung durch Einbringung von Druckeigen- spannungen in dem gefährdeten Bereich.		
Behandlungsparameter				
Anwender:	Geräte Identifikation		Einstellungen	
	Modell:	Gerätenummer:	Stufe:	Druck:
Stephan Schilling	PIT Weld Line 10-3	01/00020	2 (90Hz)	6 bar
Bolzenhalter und Bolzen				
Form des Bolzenhalters	Bolzen	Durchmesser	Länge der/s Bolzen/s	Bolzenform
Bolzenhalter Standard BH8-S10-01-A	SB8-S20-01-B	8	80	R = 2,0mm
<b>Behandlung gemäß Anweisung Nr.:</b> (wenn nicht vor Ort festgelegt)		Der Behandlungsbereich wurde laut Herr Kudla mündlich festgelegt.		
Anwesend während der Behandlung:				
Organisation:	Name:	Funktion:		
PITEC	Stephan Schilling	Spezialanwender		
<b>Anmerkungen:</b> Die Kreuzprobenstücke wurden an den Schweißnahtübergängen und Kantenausläufen mit PIT behandelt. Es waren 10 Proben die alle gleich behandelt wurden, an den gleichen Stellen und auch mit den gleichen Einstellungs-Parametern.				

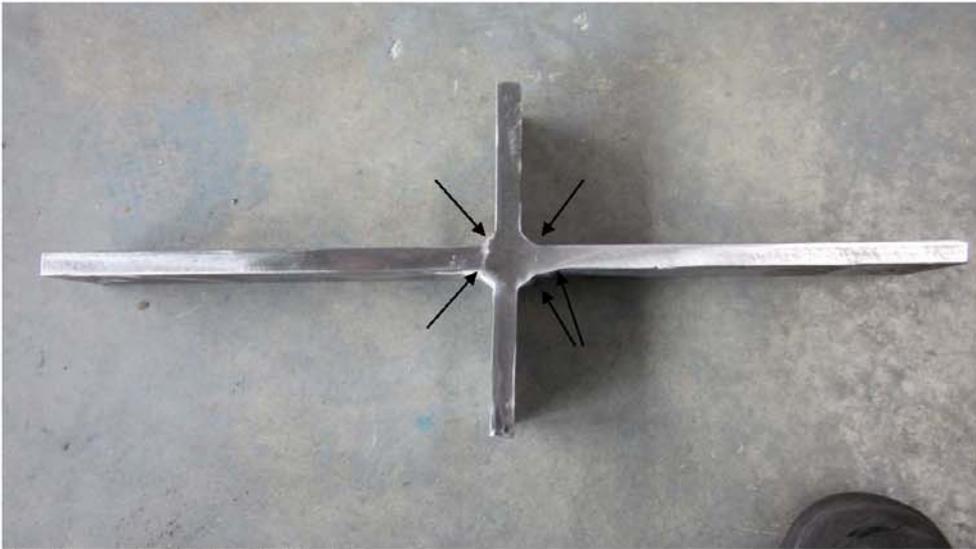


Bild 1: Kreuzprobe zu Behandelnde Bereiche



Bild 2: Kreuzprobe auch an den Kanten zu behandelnde Bereiche



Bild 3: Bearbeitet im Schraubstock



Bild 4: Behandlung mit PIT Gerät

Seite 3 zum Behandlungsbericht 11.49.7.09-002 vom 07.07.2011



Bild 5: Unbehandelnde Schweißnaht



Bild 6: An den Schweißnahtübergängen behandelt

Seite 4 zum Behandlungsbericht 11.49.7.09-002 vom 07.07.2011

**+ PITec**

Bild 7: Schweißnahtübergang behandelt

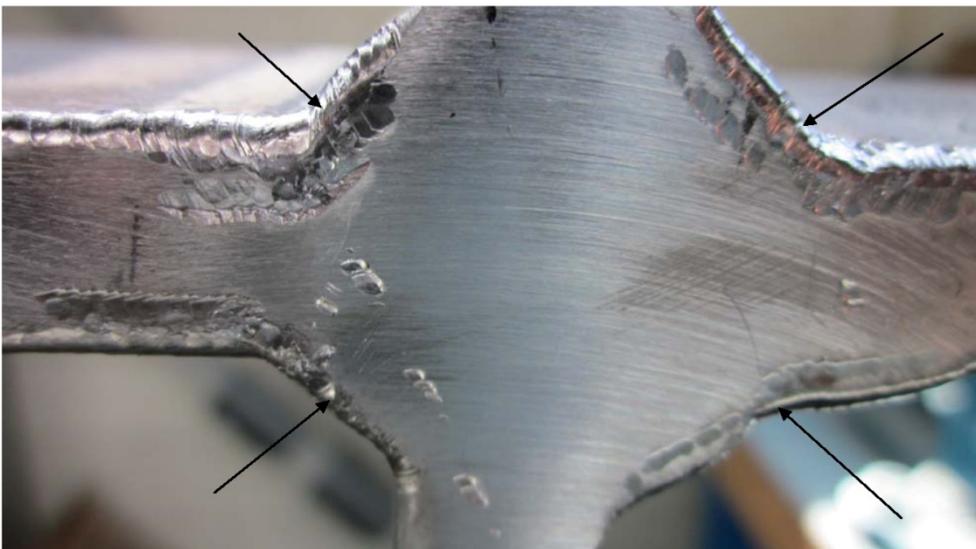


Bild 8: auslaufende Kanten behandelt

Seite 5 zum Behandlungsbericht 11.49.7.09-002 vom 07.07.2011

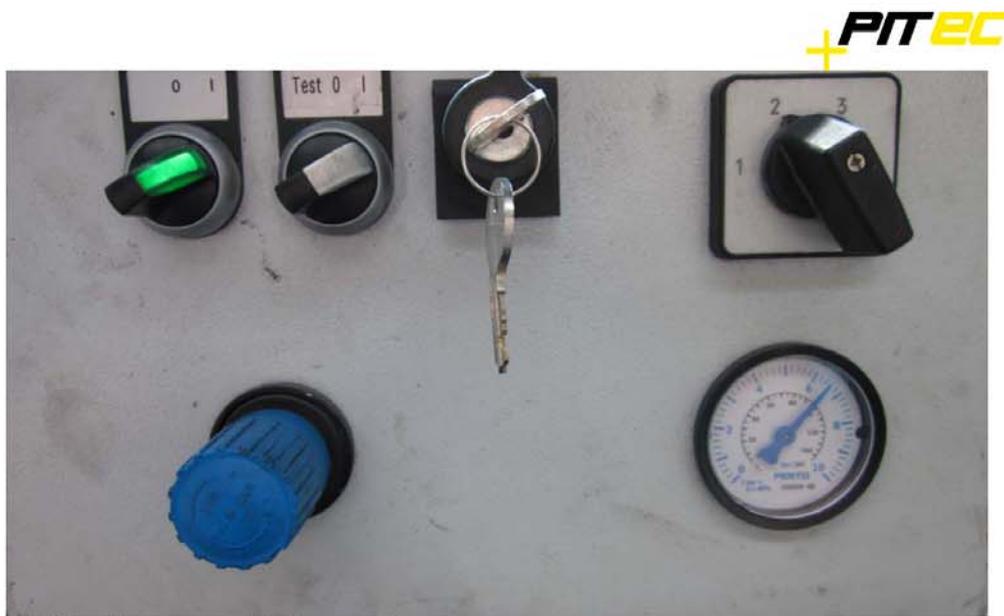


Bild 9: Einstellungsparameter der Manuellen Steuerung



Bild 10: fertig behandelndes Probestück

Unterschrift Projekt- leiter:	<i>S. Schilling</i>	Datum:	4.08.2011
----------------------------------	---------------------	--------	-----------

## 11 Anhang C

### 11.1 Dokumentation der REM Untersuchung

**Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart**

Auftrags-Nr.: Kinder/Schließbus

Beilage 1

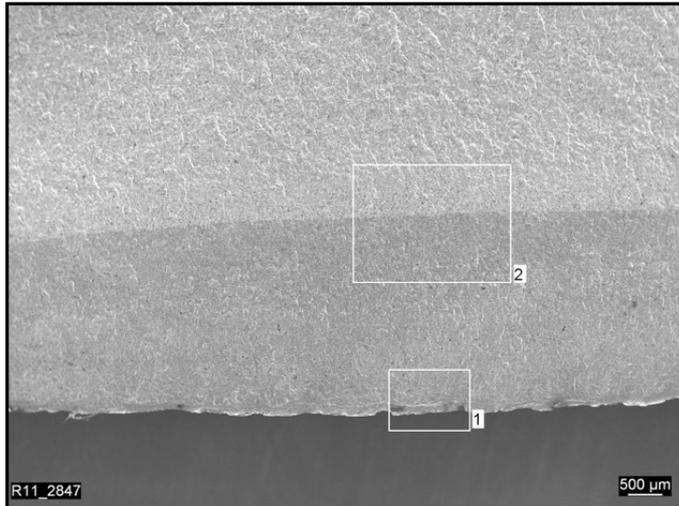


Bild 1:

Übersichtsabbildung der Bruchfläche mit blau angelaufenem Anriss

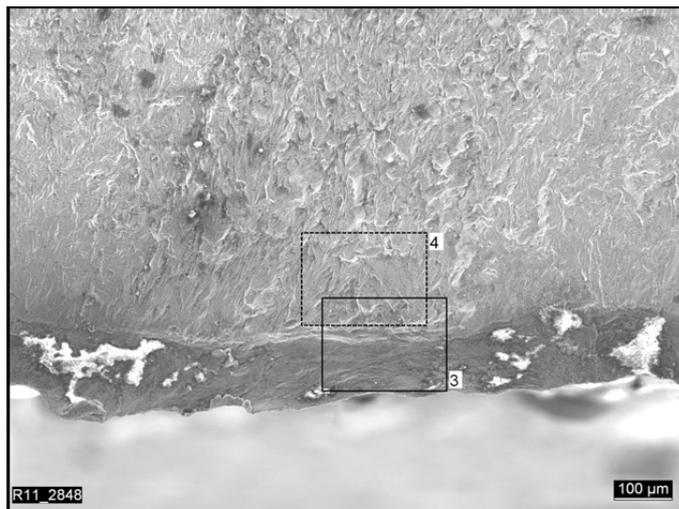


Bild 2:

Ausschnitt 1 aus Bild 1:

gehämmerte Oberfläche im Bereich der Bruchkante

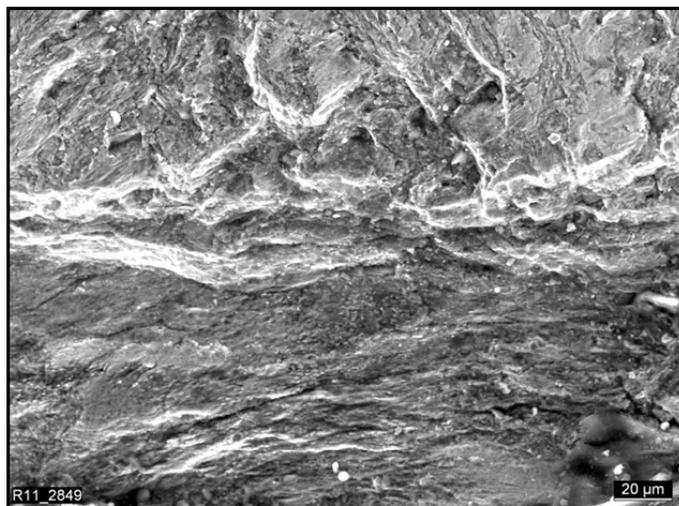


Bild 3:

Ausschnitt 3 aus Bild 2:

stark deformierte Oberfläche an der Bruchkante

**Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart**

Auftrags-Nr.: Kinder/Schließus

Beilage 2

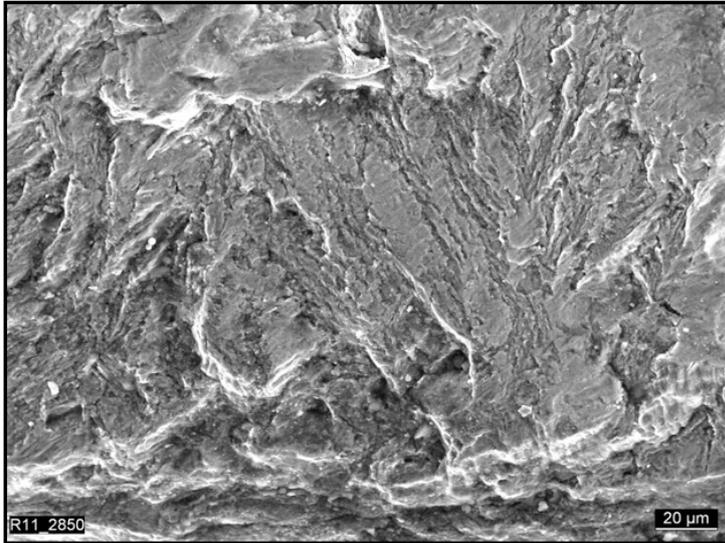


Bild 4:

Ausschnitt 4 aus Bild 2:

Bruchfläche im Verformungsbe-  
reich

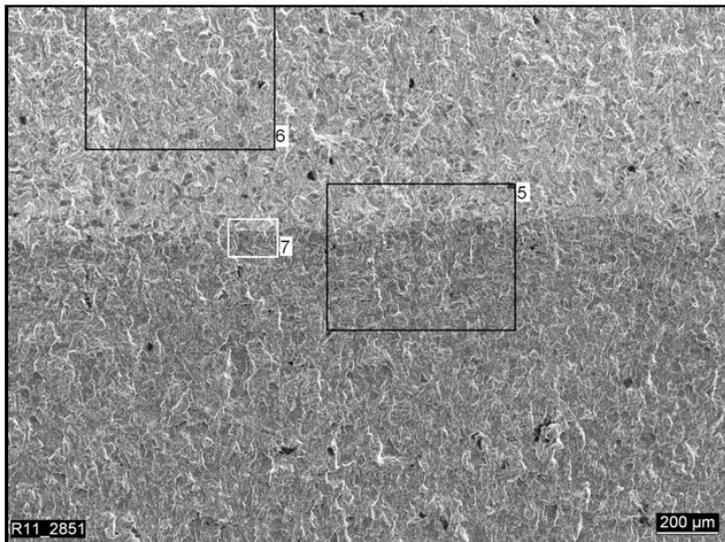


Bild 5:

Ausschnitt 2 aus Bild 1:

Übergang Anriss (Spitze) zu wei-  
terem Schwingriss (= Rastlinie)

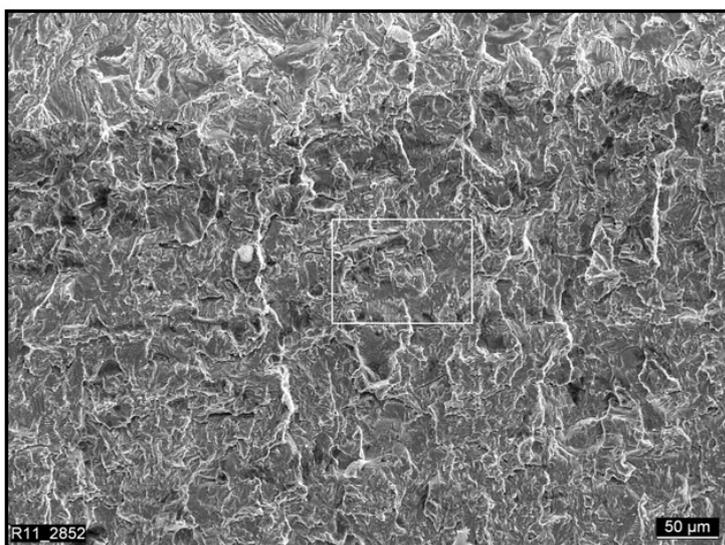


Bild 6:

Ausschnitt 5 aus Bild 5:

Risspitze

**Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart**

Auftrags-Nr.: Kinder/Schließus

Beilage 3

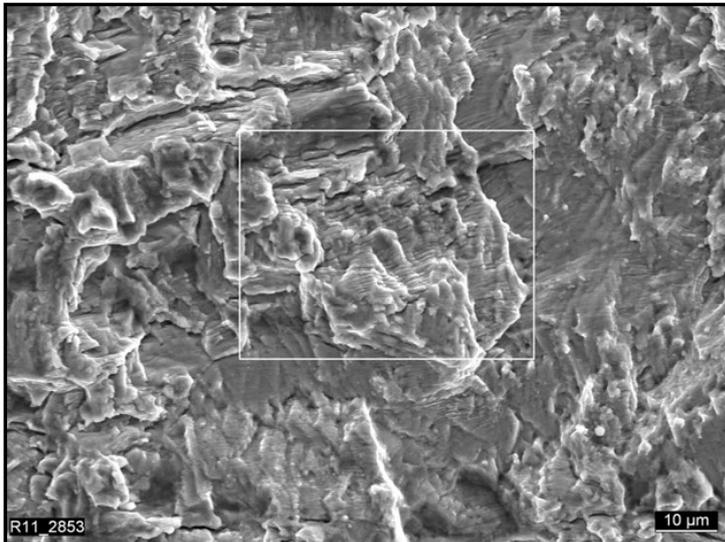


Bild 7:

Ausschnitt aus Bild 6:

dynamisches Risswachstum

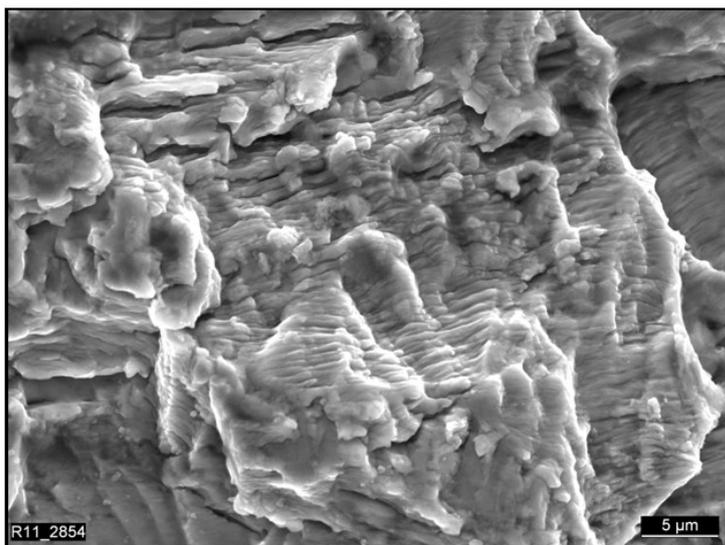


Bild 8:

Ausschnitt aus Bild 7:

Schwingstreifen

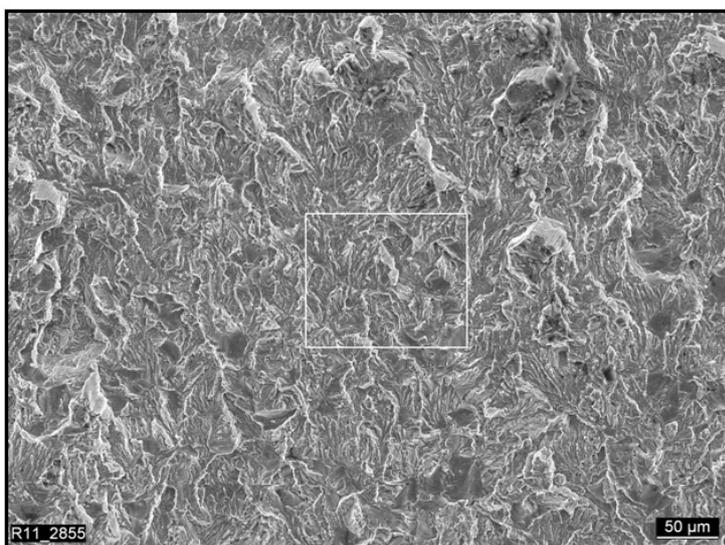


Bild 9:

Ausschnitt 6 aus Bild 5:

weiterer Schwingriss

**Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart**

Auftrags-Nr.: Kinder/Schließus

Beilage 4

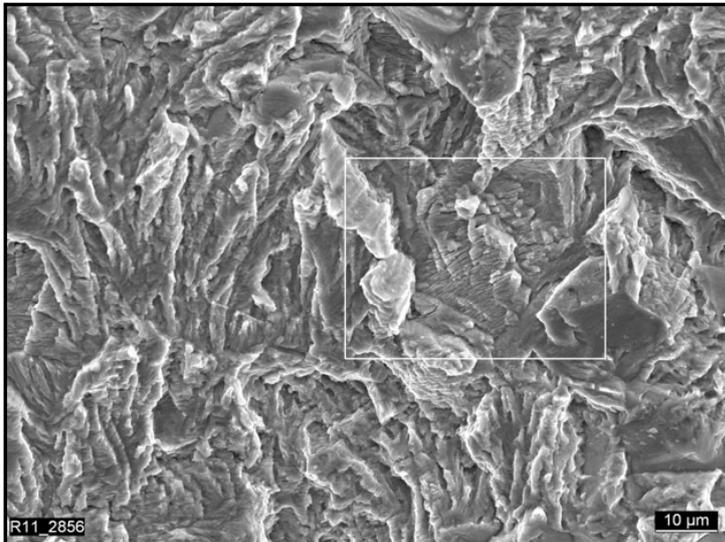


Bild 10:

Ausschnitt aus Bild 9

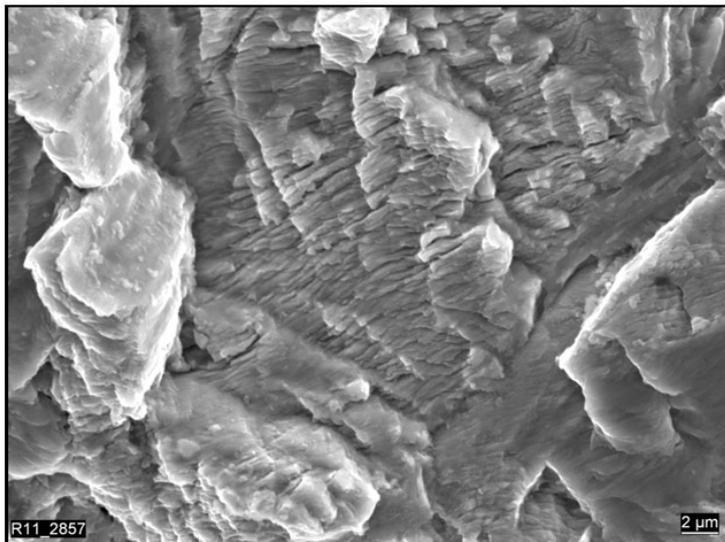


Bild 11:

Ausschnitt aus Bild 10:

Schwingstreifen

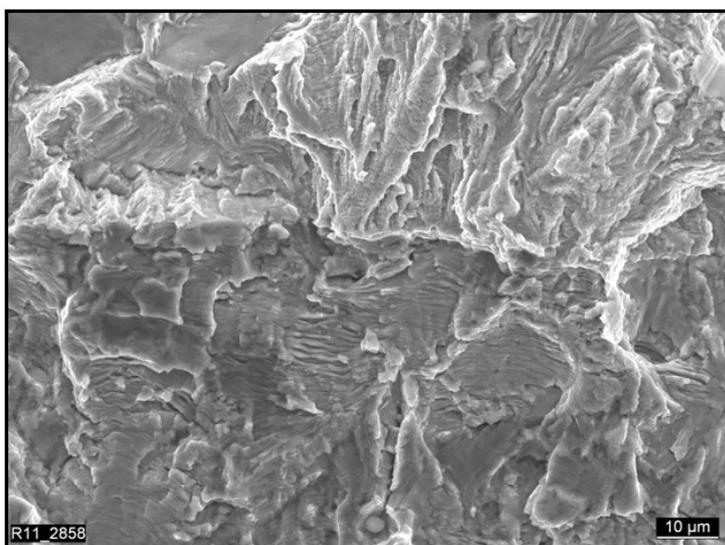


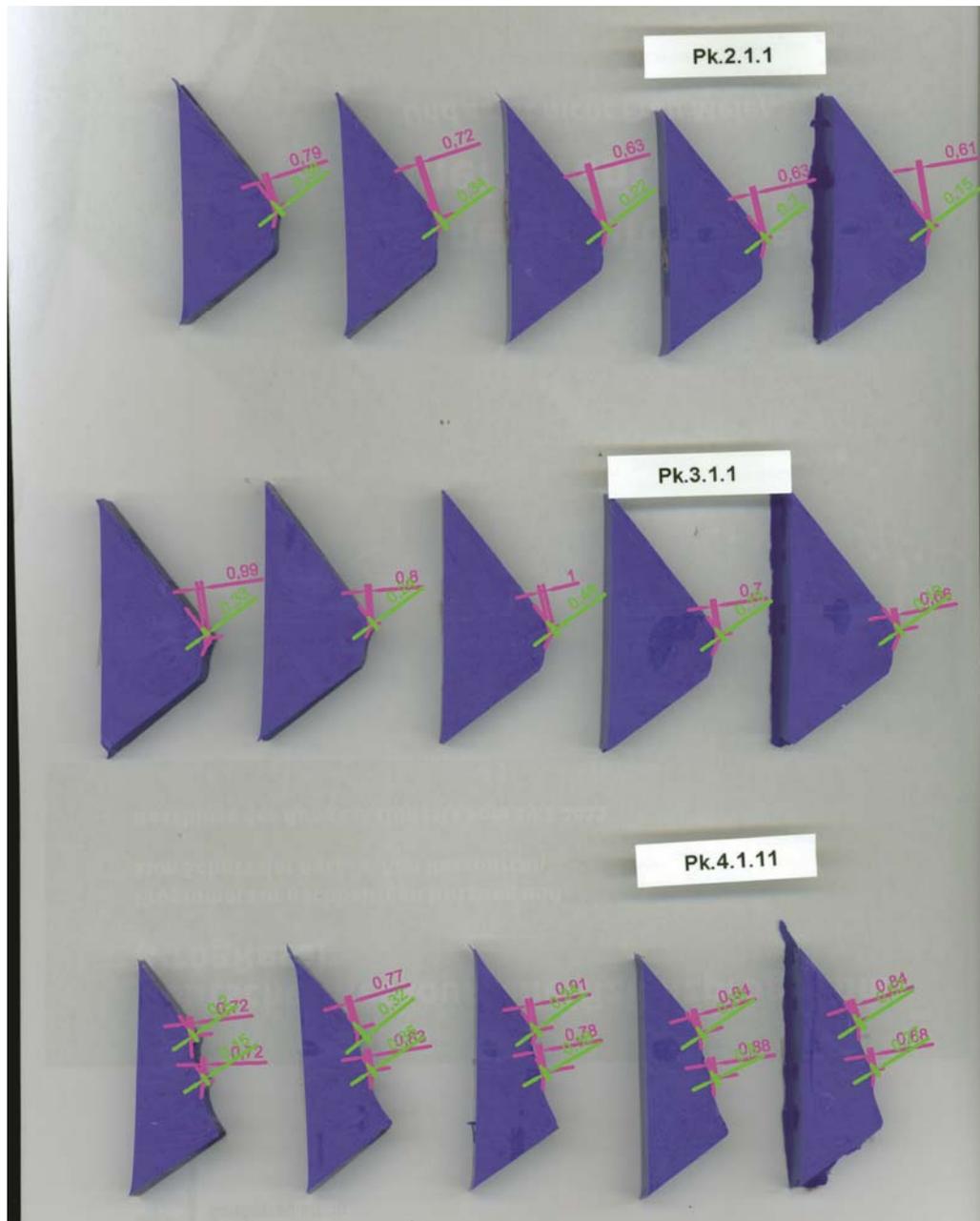
Bild 12:

Ausschnitt 7 aus Bild 5:

Übergang Schwingriss I (blau angelaufen) zu weiterführendem Schwingriss II (= Rastlinie)

## 12 Anhang D

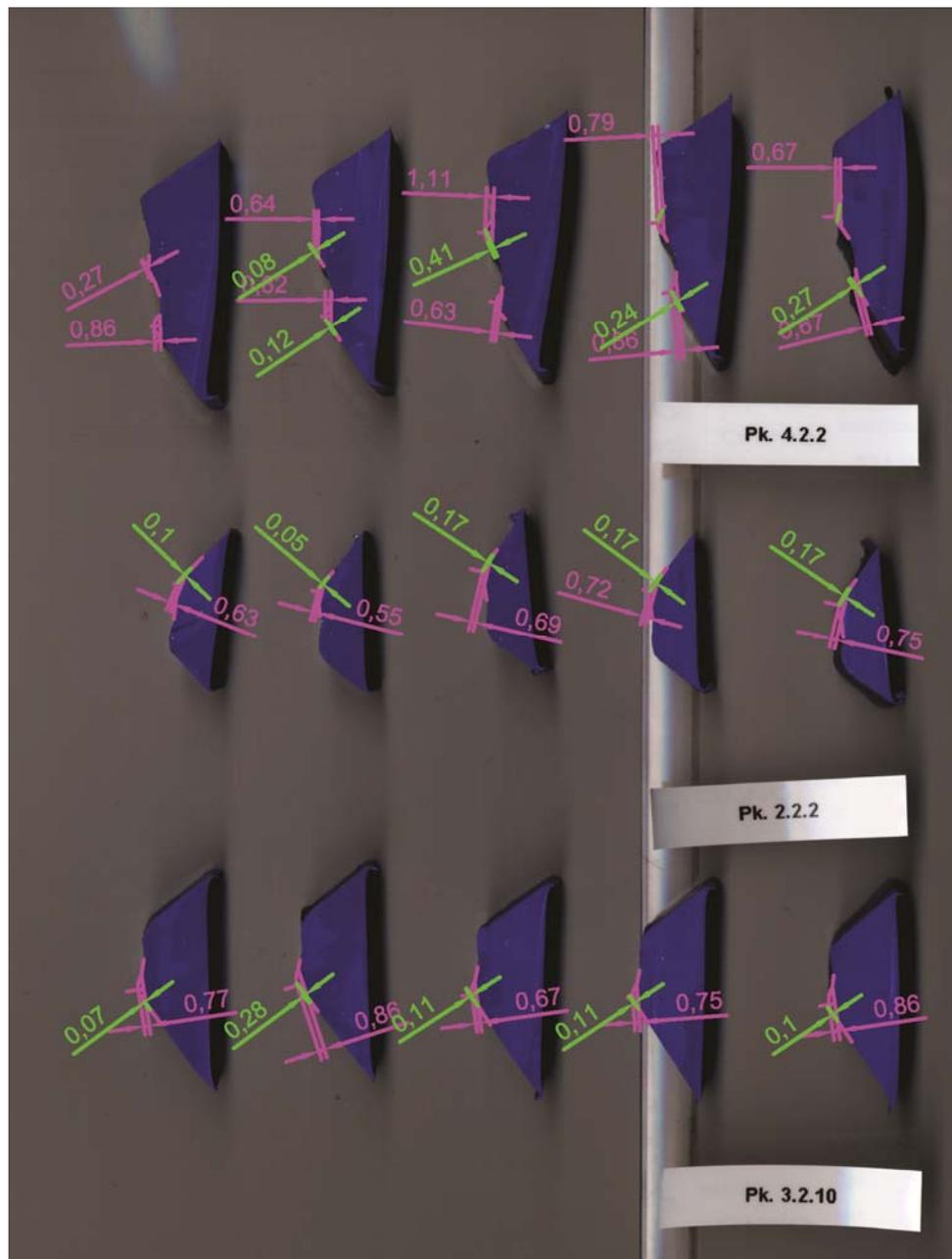
### 12.1 Dokumentation der Eindrucktiefenmessung HiFIT



**Eindrucktiefe A [mm]**

Prüfkörper	Schnitt 1	Schnitt2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
Pk. 2.1.1	0,79	0,72	0,63	0,63	0,61
Pk. 3.1.1	0,99	0,8	1	0,7	0,66
Pk. 4.1.11	0,72	0,77	0,91	0,64	0,84
	0,72	0,83	0,78	0,88	0,68
<b>Eindrucktiefe B [mm]</b>					
Pk. 2.1.1	0,38	0,34	0,22	0,2	0,15
Pk. 3.1.1	0,33	0,24	0,49	0,19	0,19
Pk. 4.1.11	0,2	0,32	0,34	0,29	0,52
	0,15	0,35	0,38	0,5	0,27

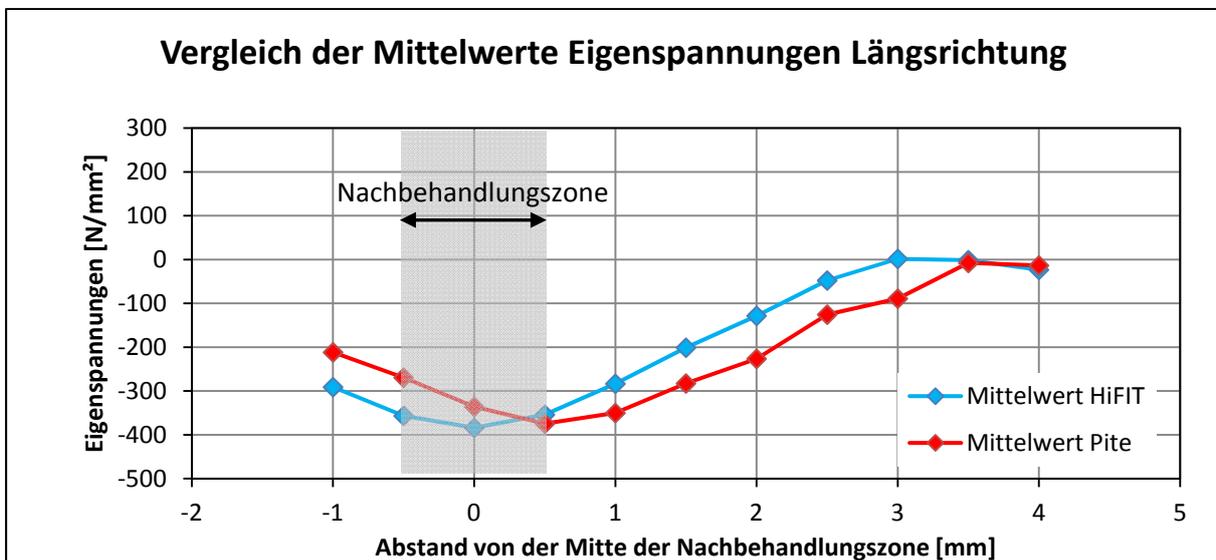
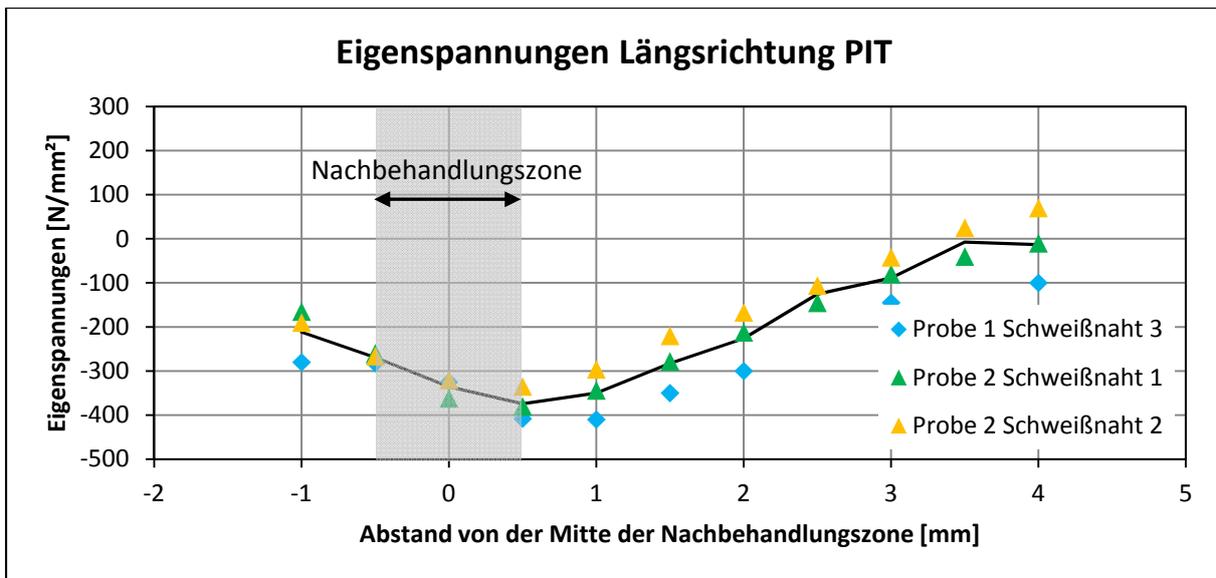
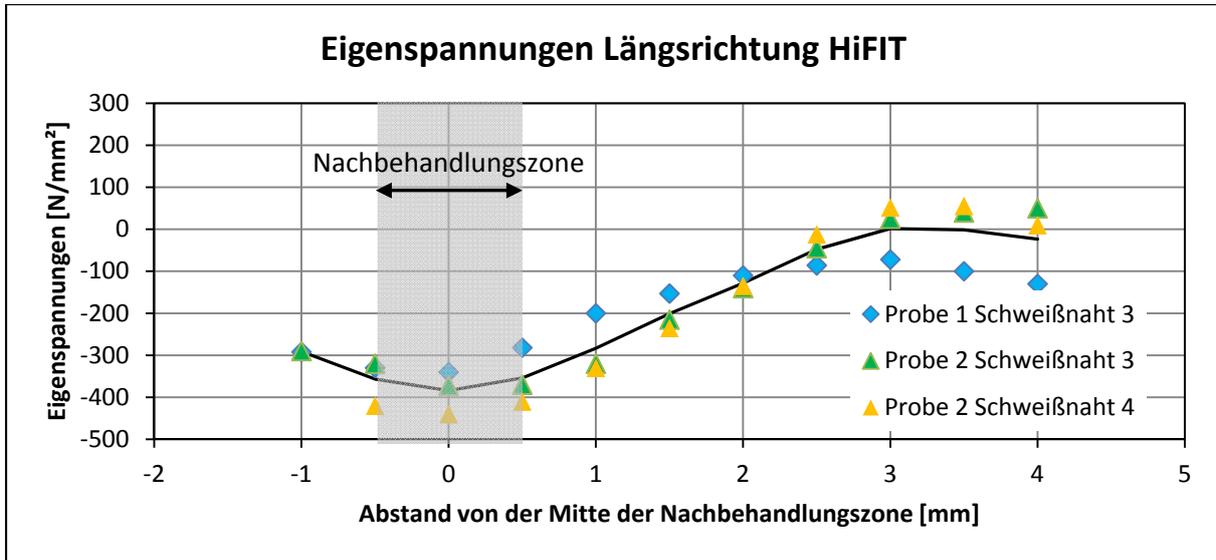
## 12.2 Dokumentation der Eindrucktiefenmessung PIT

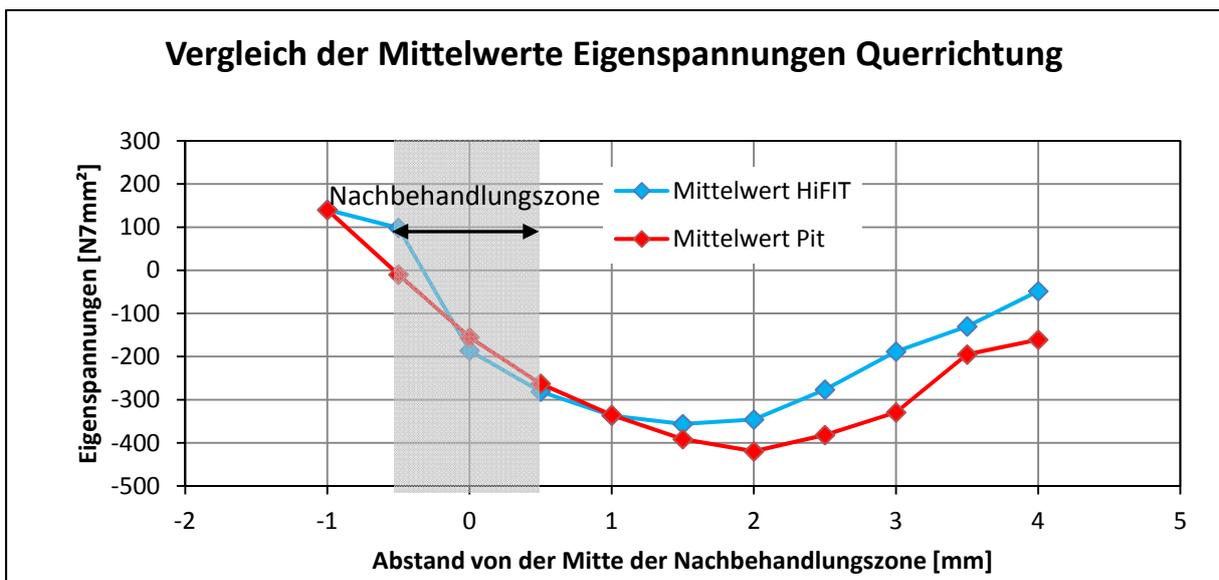
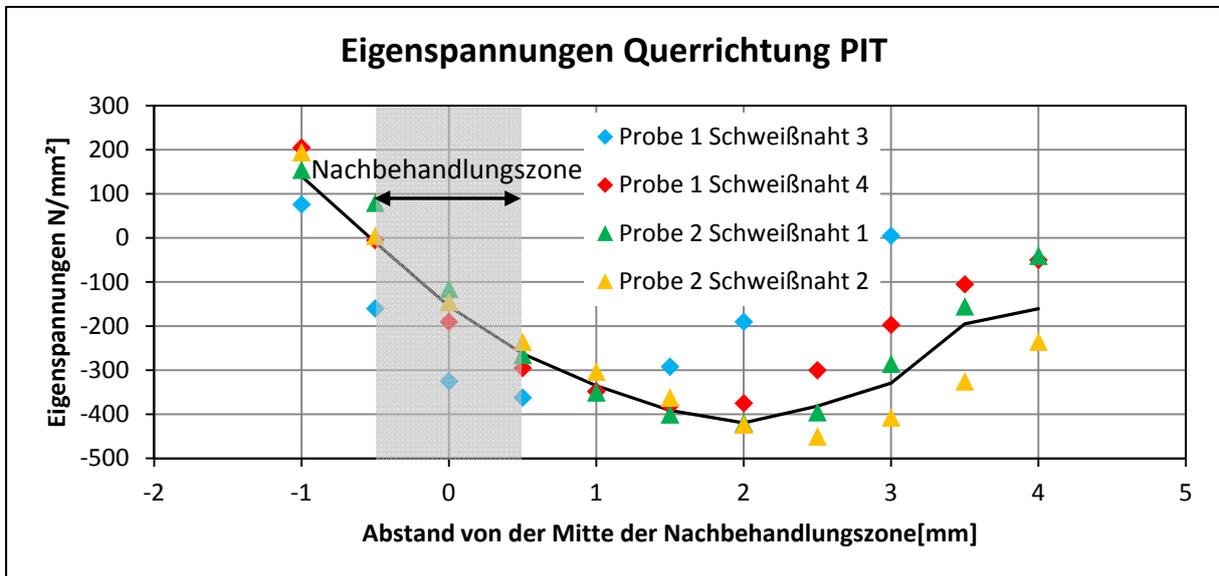
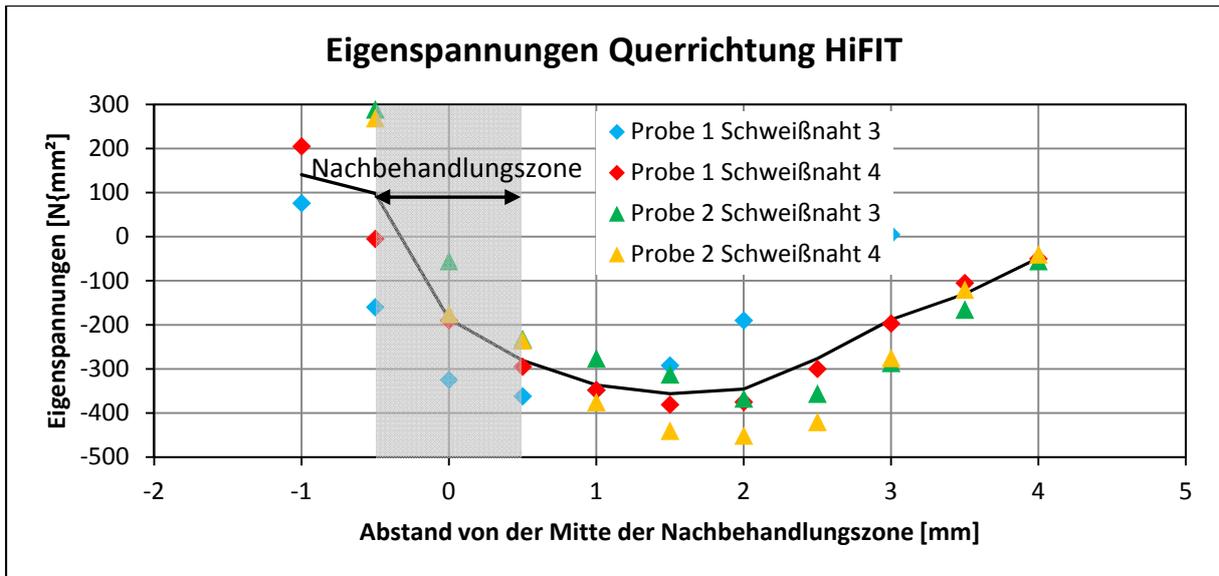
**Eindrucktiefe A [mm]**

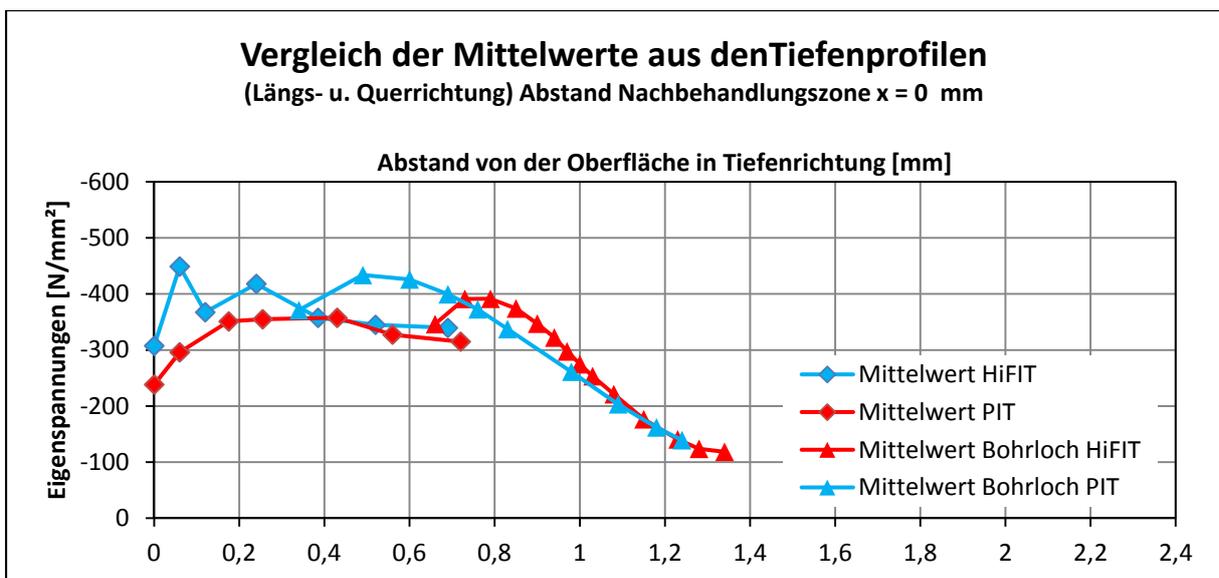
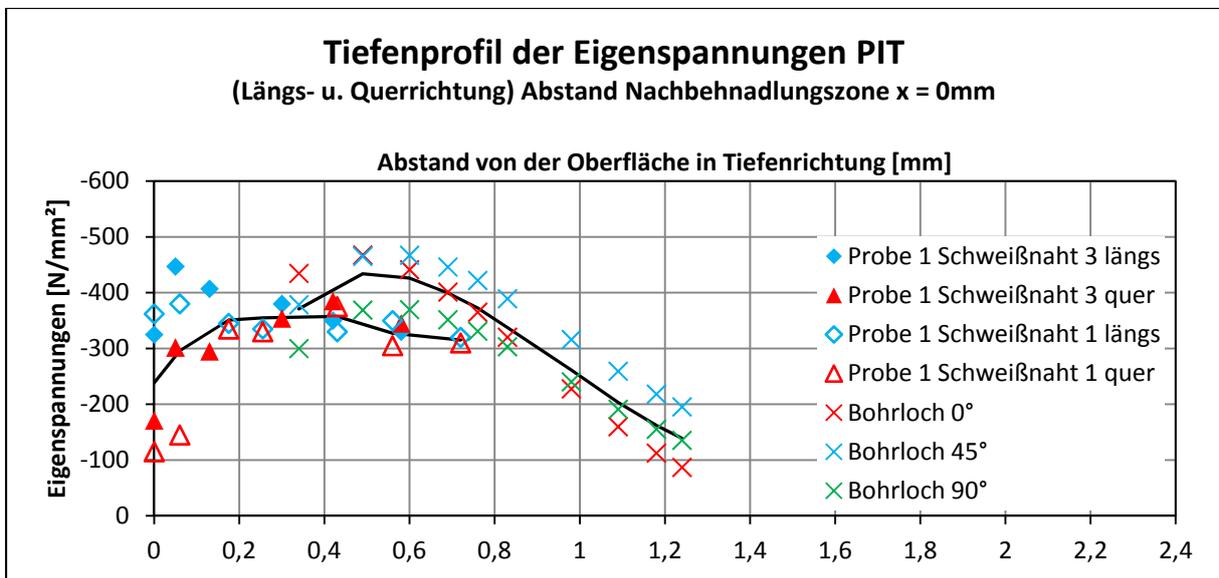
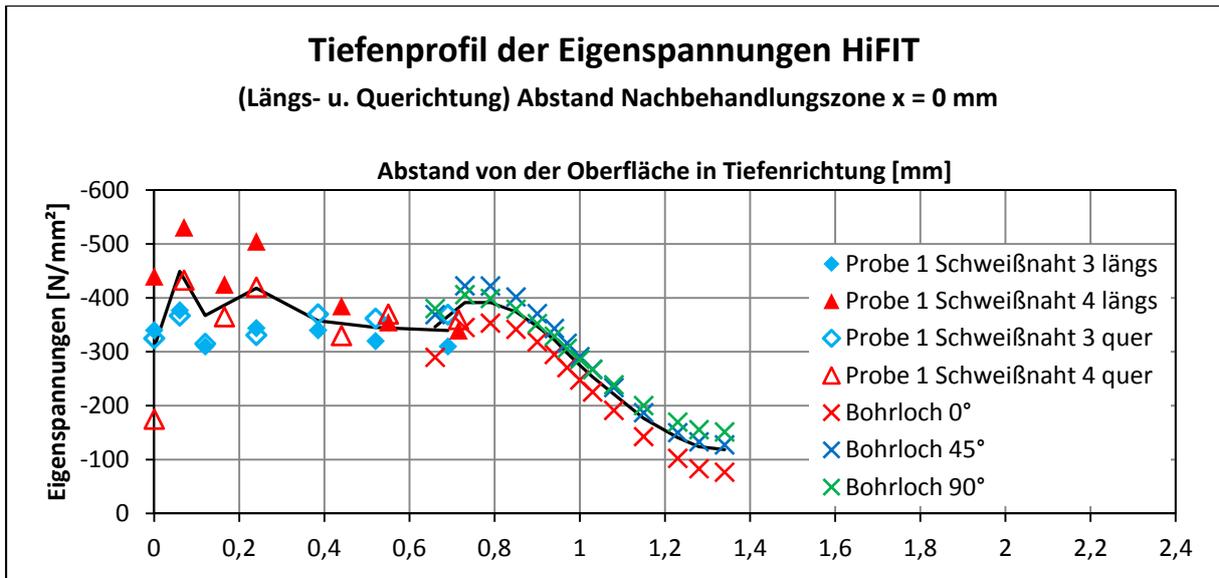
	Schnitt 1	Schnitt2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
Pk. 2.2.2	0,1	*	0,17	0,17	0,17
Pk. 3.2.10	*	0,28	*	*	*
Pk. 4.2.2	*	*	0,41	*	*
	*	0,12	*	0,24	0,27
<b>Eindrucktiefe B [mm]</b>					
Pk. 2.2.2	0,1	*	0,17	0,17	0,17
Pk. 3.2.10	*	0,28	*	*	*
Pk. 4.2.2	*	*	0,41	*	*
	*	0,12	*	0,24	0,27

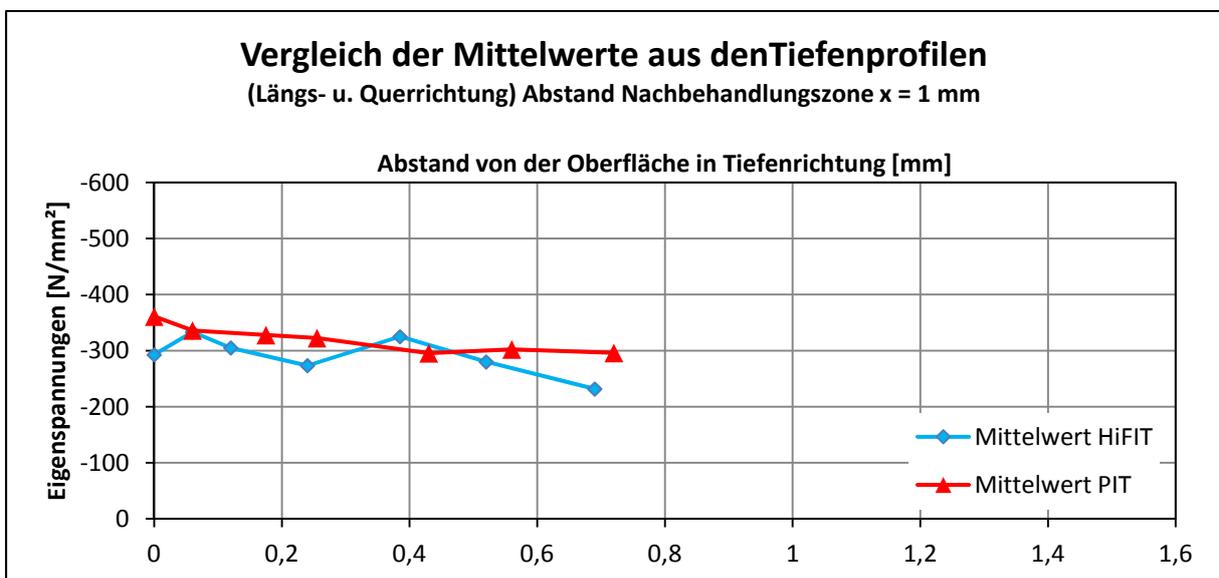
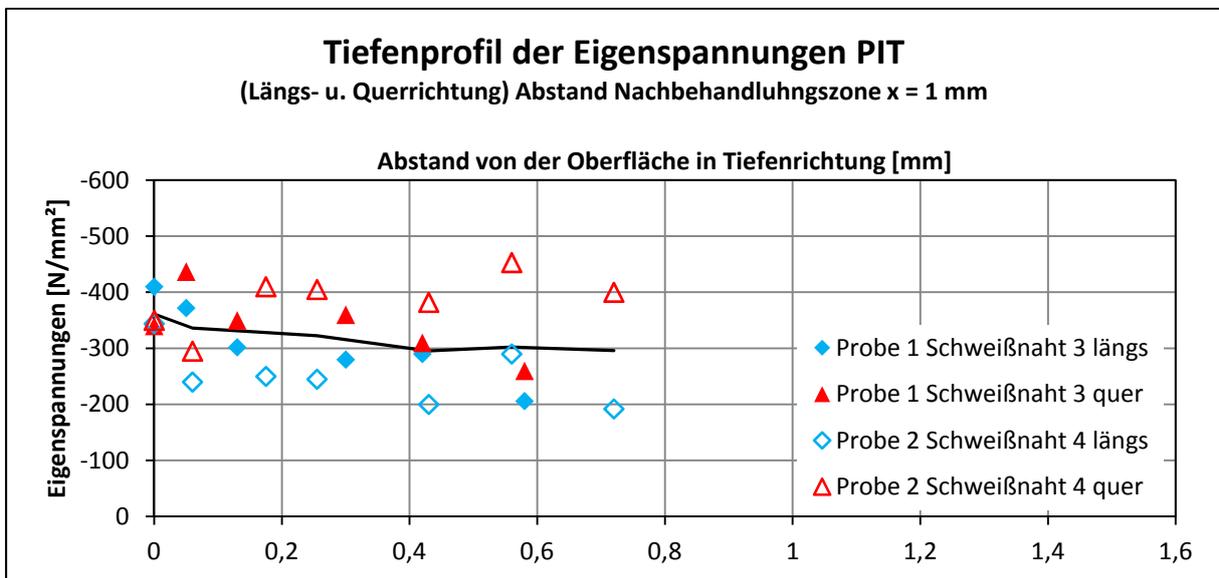
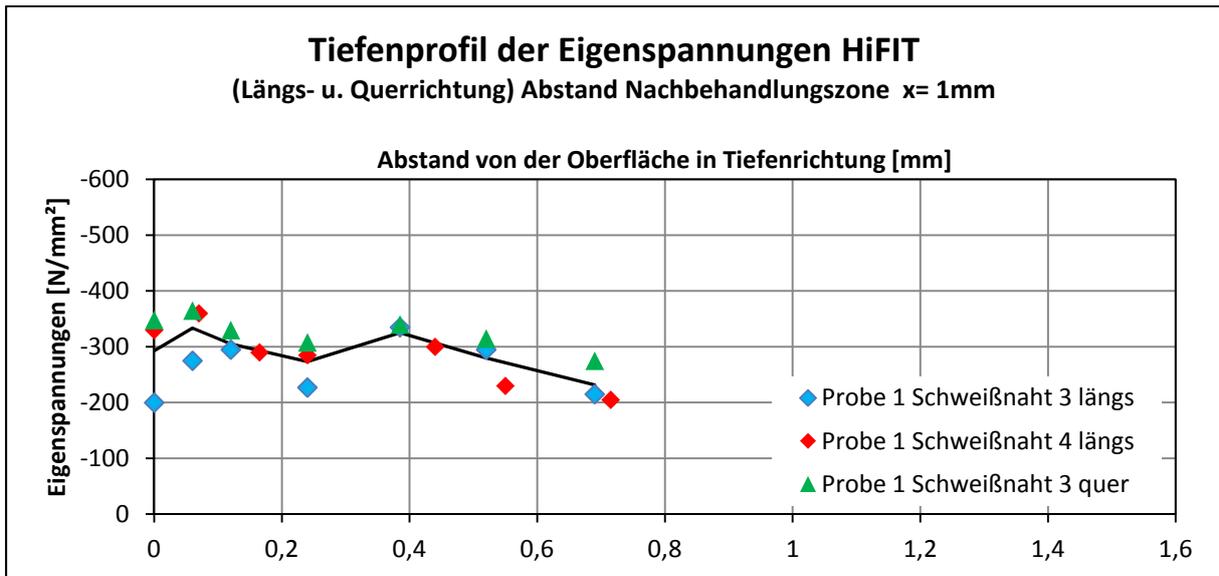
### 13 Anhang E

#### 13.1 Dokumentation der Eigenspannungsmessungen









14 Anhang F

14.1 Materialzeugnis



<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b> <b>Inspection certificate 3.1</b> <b>Certificat de reception 3.1</b> <b>DIN EN 10204</b>		Nr./No./N° (A01) <b>628210</b> Seite/Page/Page <b>1/5</b> Datum/Date <b>25.02.2010</b>
Nr. (A07) <b>71058510 SHM</b> Besteller <b>Salzgitter Mannesmann Stahlhandel</b> Purchaser <b>GmbH NL Gladbeck</b> Acheteur <b>45955 Gladbeck</b>	22.01.2010 Erfüllungsg. <b>Salzgitter Mannesmann Stahlhandel</b> Customer <b>GmbH NL Gladbeck</b> Distribution <b>45955 Gladbeck</b>	Nr. (A07) <b>71058510 SHM</b> Empfänger <b>Salzgitter Mannesmann Stahlhandel</b> Customer <b>GmbH NL Gladbeck</b> Distribution <b>45955 Gladbeck</b>
Erzeugnis <b>Grobblech</b> Product <b>Heavy plate</b> Produit <b>Tôle forte</b>		Weiszauftrags-Nr. <b>0000043458</b> Works order No. N° de commande (A08) Lieferschein-Nr. <b>0082600194</b> Dispatch note No. Avis d'expédition N°
Werkstoff und Lieferbedingung <b>S235JR+N</b> Steel grade and terms of delivery <b>DIN EN 10025-2 04/05</b> Nuance et conditions de livraison <b>AD 2000 W1 07/06</b>	DIN EN 10029 A 10/91 DIN EN 10163-2 Kl. B 03/05	Abnahme <b>WS</b> Inspection Reception (A09)

Kennzeichnung des Materials / Marking of the product / Marquage du produit (B06)  
 Herstellerzeichen/Stahlsorte/Schmelzen-Nr/  
 Erzeugnis-Nr./Sachverständigenstempel  
 Trademark/Steelgrade/Heat-No/Product-No/  
 inspector's stamp  
 Sigle de l'usine/Nuance de l'acier/N° coulée/  
 N° produit/Poinçon de l'expert

Materialdaten / Material data / Données des matériaux (B01-B09)						
Pos. Items Poste	Anzahl Quantity Nombre	Erzeugnis-Nr. Product No. N° produit	Schmelzen-Nr. Heat No. N° Coulee	Lieferzustand Cond. of delivery Etat de livraison	Dicke x Breite x Länge Thickness x Width x Length Epa-ieur x Largeur x Longueur	mm x mm x mm
02	1	820291 1	58570	N	12,00 x 2500,0 x 12000	
02	1	820291 2	58570	N	12,00 x 2500,0 x 12000	
02	1	820292 1	58570	N	12,00 x 2500,0 x 12000	
02	1	820292 2	58570	N	12,00 x 2500,0 x 12000	
02	1	820293 1	58570	N	12,00 x 2500,0 x 12000	
02	1	820293 2	58570	N	12,00 x 2500,0 x 12000	
02	1	820294 1	58570	N	12,00 x 2500,0 x 12000	
X 02	1	820294 2	58570	N	12,00 x 2500,0 x 12000	
04	1	819366 1	29147	N	20,00 x 3000,0 x 12000	
04	1	819366 2	29147	N	20,00 x 3000,0 x 12000	
04	1	819367 1	29146	N	20,00 x 3000,0 x 12000	
02	8	Gewicht	22.608	kg	N: normalisiert/normalized/normalisé	
04	3	Weight	16.956	lbs		
		Poids		kg		
Σ	11	(B11)	39.564			

Maßprüfung und Sichtkontrolle auf äußere Beschaffenheit: ohne Beanstandung  
 Dimensional check and visual examination of the surface condition:  
 without objection  
 Contrôle dimensionnel et examen visuel de l'état de surface: satisfaisants

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.  
 We hereby certify that the delivered material complies with the terms of the order.  
 Nous certifions que la livraison répond aux conditions de livraison.  
 (Z01)  
 DIN System Certification as per ISO 9001 since 28 February 1998



Herstellerzeichen  
 Trademark  
 Sigle du producteur  
 (A04)



Abnahmestempel  
 Inspection Stamp  
 Poinçon de l'expert  
 (Z02)



Abnahmebeauftragter  
 Inspection Representative  
 Représentant autorisé  
 (Z03)

Diese durch ein geeignetes Datenverarbeitungssystem erstellte Bescheinigung ist gemäß EN 10 204, Abschnitt 5, ohne Unterschrift gültig.  
 This certificate was prepared by a suitable data processing system and is valid without signature according to EN 10 204, section 5.  
 Ce certificat a été établi par un système adéquat de traitement de données, il est valable sans signature selon EN 10 204, section 5.

Cyrion



<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b> <b>Inspection certificate 3.1</b> <b>Certificat de reception 3.1</b> <b>DIN EN 10204</b> (A02)		Nr./No./N° (A01) <b>628210</b>
		Seite/Page/Page <b>2/5</b>
		Datum/Date/Date <b>25.02.2010</b>
Nr. (A07) <b>71058510 SHM</b>	<b>22.01.2010</b>	Nr. (A07)
Käufer <b>Salzgitter Mannesmann Stahlhandel</b>	Erfolgr. <b>Salzgitter Mannesmann Stahlhandel</b>	Customer <b>GmbH NL Gladbeck</b>
Purchaser <b>GmbH NL Gladbeck</b>	Destribuira <b>45955 Gladbeck</b>	
Acheteur <b>45955 Gladbeck</b>		
Erzeugnis <b>Grobblech</b> Product <b>Heavy plate</b> Produit <b>Tôle forte</b> (A03)		Werkauftrags-Nr. <b>000043458</b> Works order No. N° de commande (A08)
Werkstoff und Lieferbedingung <b>S235JR+N</b> Steel grade and terms of delivery <b>DIN EN 10025-2 04/05</b> Nuance et conditions de livraison <b>AD 2000 W1 07/06</b> (A02-B03) <b>DIN EN 10029 A 10/91</b> <b>DIN EN 10163-2 Kl. B 03/05</b>		Lieferchein-Nr. <b>0082600194</b> Dispatch note No. Avis d'expédition N° <b>24.02.2010</b>
		Abnahme <b>WS</b> Inspection Reception (A05)

<b>Schmelzenanalyse / Ladle analysis / Analyse de coulée (C18-C28)</b>										
Herstellerangaben / Manufacturer standard / Données du fabricant										
Schmelzen-Nr. Heat No. N° Coulee (B07)	C %	Si %	Mn %	P %	S %	N %	Al %	Ca %	Cr %	Ni %
	≤0,17		≤1,40	≤0,035	≤0,025	≤0,012		≤0,55		
29146	0,06	0,19	0,84	0,015	0,005	0,003	0,038	0,08	0,37	0,08
29147	0,08	0,18	0,86	0,010	0,007	0,003	0,045	0,06	0,05	0,08
58570	0,06	0,20	0,83	0,008	0,002	0,005	0,034	0,05	0,04	0,05
Schmelzen-Nr. Heat No. N° Coulee (B07)	Mo %	V %	Ti %	Nb %	EV1 1) %					
					≤0,25					
29146	0,02	0,002	0,002	0,002	0,23					
29147	0,02	0,002	0,002	0,002	0,25					
58570	0,01	0,002	0,002	0,001	0,22					

1) EV1: CbV-Cr-Mn-S-Mo-Si-Nb-Ti-Cr-Si-V-S-Cu15

Erschmelzungsverfahren: Sauerstoffaufblasverfahren  
Steelmaking process: Basic oxygen process  
Mode d'élaboration: Procédé de conversion à l'oxygène  
(C70)

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.  
We hereby certify that the delivered material complies with the terms of the order.  
Nous certifions que la fourniture répond aux conditions de livraison.  
(Z01)  
Q14-System Certification as per ISO 9001 since 23 February 1996



Herstellereichen **Ilseburger Grobblech GmbH**  
Trademark **Veckinstädter Weg 10**  
Signe du producteur **0-38871 Ilseburg**  
(A04) **(A31)**

**A<sub>J</sub>** Abnahmestempel  
Inspection Stamp  
Poignon de l'expert  
(Z02)



Abnahmebeauftragter  
Inspection Representative  
Représentant autorisé  
(Z02)

Dieses durch ein geeignetes Datenverarbeitungssystem erstellte Bescheinigung ist gem. EN 10 204, Abschnitt 5, ohne Unterschrift gültig.  
This certificate was prepared by a suitable data processing system and is valid without signature according to EN 10 204, section 5.  
Ce certificat a été établi par un système adéquat de traitement de données, il est valable sans signature selon EN 10 204, section 5.

Cyron



**Abnahmeprüfzeugnis 3.1**  
**Inspection certificate 3.1**  
**Certificat de réception 3.1**  
**DIN EN 10204**  
 (A01)

Nr. (A07) 71058510 SHM 22.01.2010 Nr. (A07)  
 Besteller Salzgitter Mannesmann Stahlhandel Empfänger Salzgitter Mannesmann Stahlhandel  
 Purchaser GmbH NL Gladbeck Customer GmbH NL Gladbeck  
 Acheteur 45955 Gladbeck Destinataire 45955 Gladbeck  
 (A06) (A06)

Erzeugnis Grobblech  
 Product Heavy plate  
 Produit Tôle forte  
 (A01)

Werkstoff und Lieferbedingung S235JR+N  
 Steel grade and terms of delivery DIN EN 10025-2 04/05  
 Nuance et conditions de livraison AD 2000 W1 07/06  
 (B02-B03) DIN EN 10029 A 10/91  
 DIN EN 10163-2 Kl. B 03/05

Nr./No./N° (A03) 628210  
 Seite/Page/Page 3/5  
 Datum/Data/Date 25.02.2010

Werkauftrags-Nr. 0000043458  
 Works order No.  
 N° de commande  
 (A08)  
 Lieferchein-Nr. 0082600194  
 Dispatch note No. 24.02.2010  
 Avis d'expédition N°

Abnahme WS  
 Inspection  
 Réception  
 (A05)

**Zugversuch / Tensile test / Essai de traction (C10-C25)**

Proben-Nr. Specimen No. N° éprovette (C03)	Schmelzen-Nr. Heat No. N° Couée (B01)	Ort Location Lieu (C01)	Richt. Direct. Orient. (C02)	Zustand Cond. Cond. (B03)	Form Type Type (C10)	Streckgrenze Yield point Limite d'élasticité (C11) ReH N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit Tensile strength Résistance (C12) Rm N/mm <sup>2</sup> 380-510	Bruchdehnung Elongation Allongement (C13) A5 7) % ≥24	ReH/Rm ReH/Rm ReH/Rm
818233 *)	58570	K4G	Q	N	P	284	393	39	0,72
819360 *)	29146	K4G	Q	N	P	287	404	36	0,71
819364 *)	29147	K4G	Q	N	P	340	431	36	0,79

1) K: Kopf / Top / Tête  
 2) 4: 1/4 Breite / 1/4 Width / 1/4 Largeur  
 3) G: Erzeugnisstärke / Thickness of product / Epaisseur de produit  
 4) Q: quer / transversal / transversal  
 \*) Das Probstück ist nicht Bestandteil der Lieferung / The sample product is not part of the delivery / Le produit-échantillon ne fait pas partie de la livraison

5) N: normalisiert / normalized / normalisé  
 6) P: prismatisch / prismatic / prismatique  
 7) A5: La-5,85 V5a

**Kerbschlagbiegeversuch / Impact test / Essai de résilience (C40-C45)**

Proben-Nr. Specimen No. N° éprovette (C04)	Schmelzen-Nr. Heat No. N° Couée (B01)	Ort Location Lieu (C01)	Richt. Direct. Orient. (C02)	Zustand Cond. Cond. (B03)	Probenform Type of specimen Type d'éprovette (C40-C41)	Temperatur Temperature Température (C03) °C	Schlagarbeit Impact energy Energie de rupture (C42-C43) J 1 2 3 MW 6) J ≥19
818233 *)	58570	K4D	L	N	KV450	+020	415 420 417 417
819360 *)	29146	K4D	L	N	KV450	+020	308 308 306 307

1) K: Kopf / Top / Tête  
 2) 4: 1/4 Breite / 1/4 Width / 1/4 Largeur  
 3) D: oberflächennah / near surface / près de la peau  
 \*) Das Probstück ist nicht Bestandteil der Lieferung / The sample product is not part of the delivery / Le produit-échantillon ne fait pas partie de la livraison

4) L: Längs / longitudinal / longitudinal  
 5) N: normalisiert / normalized / normalisé  
 6) MW: Mittelwert / Average / Moyenne

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.  
 We hereby certify that the delivered material complies with the terms of the order.  
 Nous certifions que la fourniture répond aux conditions de livraison.  
 (Z01)

QMS-System: Zertifiziertes seit ISO 9001 since 28 February 1999

Herstellerzeichen  
 Trademark  
 Signe du producteur  
 (A04)

Ilseburger Grobblech GmbH  
 Veiterscheider Weg 10  
 D-38871 Ilseberg  
 (A01)

Abnahmeempfang  
 Inspection Stamp  
 Poignon de l'empart  
 (Z03)



Abnahmebeauftragter  
 Inspection Representative  
 Représentant autorisé  
 (Z02)

Cyron

Diese durch ein geeignetes Datenverarbeitungssystem erstellte Bescheinigung ist gemäß EN 10 204, Abschnitt 5, ohne Unterschrift gültig.  
 This certificate was prepared by a suitable data processing system and is valid without signature according to EN 10 204, section 5.  
 Ce certificat a été établi par un système adéquat de traitement de données, il est valable sans signature selon EN 10 204, section 5.



**ILSENBURGER  
GROBBLECH**

Ein Unternehmen der Salzgitter Gruppe

<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b>		Nr./No./N° (A01)	628210
<b>Inspection certificate 3.1</b>		Seite/Page/Seite	4/5
<b>Certificat de reception 3.1</b>		Datum/Date/Date	25.02.2010
<b>DIN EN 10204</b>			
(A02)			
Nr. (A07)	71058510 SHM	22.01.2010	Nr. (A07)
Besteller	Salzgitter Mannesmann Stahlhandel	Empfänger	Salzgitter Mannesmann Stahlhandel
Purchaser	GmbH NL Gladbeck	Kustomer	GmbH NL Gladbeck
Acheteur	45955 Gladbeck	Destinataire	45955 Gladbeck
(A05)			
Erzeugnis	Grobblech	Werkauftrags-Nr.	0000043458
Produkt	Heavy plate	Werte order No.	
Produit	Tôle forte	N° de commande	
(A03)			
Werkstoff und Lieferbezeichnung	S235JR+N	Lieferschein-Nr.	0082600194
Steel grade and terms of delivery	DIN EN 10025-2 04/05	Dispatch note No.	24.02.2010
Nuance et conditions de livraison	AD 2000 W1 07/06	Avis d'expédition N°	
(B01-B03)			
	DIN EN 10029 A 10/91	Abnahme	WS
	DIN EN 10163-2 Kl. B 03/05	Inspection	
		Reception	
		(A06)	

**Kerbschlagbiegeversuch / Impact test / Essai de résilience (C40-C43)**

Proben-Nr. Specimen No. N° éprouvette (C40)	Schmelz-Nr. Heat No. N° Coulee (B07)	Ort Location Lieu (C01)	Richt. Direct. Orient. (C02)	Zustand Cond. Cos. (B05)	Probenform Type of specimen Type d'éprouvette (C40-C43)	Temperatur Temperature Température (C03)	Schlagenwert Impact energy Energie de rupture (C42-C43)			
							1	2	3	MW 6)
819364 *)	29147	K40	L	N	KV450	+020	303	278	289	290

- 1) K: Kopf / Top / Tête
  - 2) 1/4: 1/4 Breite / 1/4 Width / 1/4 Largeur
  - 3) D: oberflächennah / near surface / près de la peau
  - 4) L: längs / longitudinal / longitudinal
  - 5) N: normalisiert / normalized / normalisé
  - 6) MW: Mittelwert / Average / Moyenne
- \*) Das Probekstück ist nicht Bestandteil der Lieferung / The sample product is not part of the delivery / Le produit échantillon ne fait pas partie de la livraison

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.  
We hereby certify that the delivered material complies with the terms of the order.  
Nous certifions que la livraison répond aux conditions de livraison.  
(Z01)  
QM-System: Certification as per ISO 9001 since 28 February 1998

Herstellerzeichen  
Trademark  
Sigle du producteur  
(A24)

**Ilseburger Grobblech GmbH**  
Veckenstedter Weg 10  
D-38871 Ilseburg  
(A01)

Abnahmestempel  
Inspection Stamp  
Poinçon de l'expert  
(Z03)



Abnahmebeauftragter  
Inspection Representative  
Représentant autorisé  
(Z02)

Diese durch ein geeignetes Datenverarbeitungssystem erstellte Bescheinigung ist gemäß EN 10 204, Abschnitt 5, ohne Unterschrift gültig.  
This certificate was prepared by a suitable data processing system and is valid without signature according to EN 10 204, section 5.  
Ce certificat a été établi par un système adéquat de traitement de données, il est valable sans signature selon EN 10 204, section 5.

Cyron

<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b> <b>Inspection certificate 3.1</b> <b>Certificat de reception 3.1</b> <b>DIN EN 10204</b> <small>(A2)</small>		<b>Nr./No./N° (AS3)</b> 628210 <b>Seite/Page/Page</b> 5/5 <b>Datum/Date/Data</b> 25.02.2010
 0045		
<b>Ilsenburger Grobblech GmbH</b> <b>Vackenstedter Weg 10</b> <b>D-38871 Ilsenburg</b>  06 0045-CPD-0673-2005-01		
<b>EN 10025-1</b> Warmgewalzte Baustahlprodukte Hot rolled structural steel products Produits en acier de construction laminé à chaud		
Vorgesehene Verwendungen: Intended uses: Usages prévus:	Hochbauten und Ingenieurbauwerke Building constructions or civil engineering Construction de bâtiments ou génie civil	
Grenzabmaße und Formtoleranzen: Tolerances on dimensions and shape: Tolérances sur les dimensions et la forme:	Warmgewalztes Grobblech Hot rolled heavy plates Tôles fortes refendues laminées à chaud: EN 10029	
Dehnung / Elongation / Élongation: Zugfestigkeit / Tensile strength / Résistance à la traction: Streckgrenze / Yield strenght / Limite d'élasticité: Kerbschlagarbeit / Impact strenght / Résistance au choc: Schweißbeignung / Weldability / Soudabilité:	S235JR+N DIN EN 10025-2 04/05	
Dauerhaftigkeit: Durability: Durabilité:	Keine Leistung festgestellt No performance determined Aucune performance déterminée	
Regulierter Stoff: Regulated substance: Substance Réglementée:	Keine Leistung festgestellt No performance determined Aucune performance déterminée	



## 15 Anhang G

### 15.1 Protokoll Schweißparameter

Schweißstromquelle: EWM Phönix 521

Abicor Binzel Push-Pull-Schlauchpaket

Prozeß: Job 9 → Sprühlichtbogen

SZW: G4Si1 Ø 1,2mm

SG: 82% Ar; 18% CO<sub>2</sub> 15 l/min

Geometrie:

10°stechend

45°geneigt

Stickout: 15 mm

Drahtspitze im theoretischen

Wurzelpunkt

Probe	DV [m/min]	v <sub>s</sub> [m/min]	T v [°C]	U <sub>eff</sub> [V]	I <sub>eff</sub> [A]	E [J/cm]	Naht- Nr.
<b>A</b>	8,5	0,40	RT	28,56	288,5	12361	1
	8,5	0,40	RT	29,07	299,4	13058	2
	8,5	0,40	RT	29,26	291,1	12776	3
	8,5	0,40	RT	29,07	300,0	13080	4
<b>B</b>	8,5	0,40	RT	29,07	300,0	13083	1
	8,5	0,40	RT	29,34	301,3	13260	2
	8,5	0,40	RT	29,41	298,7	13177	3
	8,5	0,40	RT	29,42	297,6	13135	4
<b>C</b>	8,5	0,40	RT	29,32	302,6	13304	1
	8,5	0,40	RT	29,32	302,3	13293	2
	8,5	0,40	RT	29,09	313,1	13658	3
	8,5	0,40	RT	29,35	301,4	13266	4
<b>D</b>	8,5	0,40	RT	29,41	297,1	13104	1
	8,5	0,40	RT	29,43	295,1	13027	2
	8,5	0,40	RT	29,32	298,2	13112	3
	8,5	0,40	RT	29,63	288,0	12797	4
<b>E</b>	8,5	0,40	RT	29,28	300,0	13174	1
	8,5	0,40	RT	29,28	301,9	13260	2
	8,5	0,40	RT	29,42	293,8	12995	3
	8,5	0,40	RT	29,43	296,7	13099	4