

Weitgespannte, stählerne Straßenbrücke über die BAB A73 / „Brücke Suhl Lichtenfels“

Versuchstechnische Untersuchungen im
Rahmen der Zustimmung im Einzelfall

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak
Labor für Stahl- und Leichtmetallbau
Hochschule München FK02

Brücke Suhl - Lichtenfels



Das Labor ist eine vom [DIBt](#) bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle

Kennziffer: BAY27

NB 1643

- Prüfstelle für die Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse,
- Prüfungstelle von Bauprodukten zur Ausstellung von Übereinstimmungszertifikaten,
- Zertifizierungsstelle,
- Überwachungsstelle für Fremdüberwachungen,
- Überwachungsstelle für Überwachung nach Art. 19 Abs. 6 BayBO

anerkannt nach :

- der [Landesbauordnung \(BayBO, Kennziffer BAY27\)](#)
- dem [Bauproduktengesetz \(BauPG, NB 1643\)](#)



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 2

März 2009

Brücke Suhl - Lichtenfels



für Bauprodukte im Bereich:

Stahl
Glas
Aluminium
Fügetechnik

und ebenfalls tätig in den Bereichen:

Holzbau
Sandwichelemente
Brandschutz
Seile
Klebtechnik



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

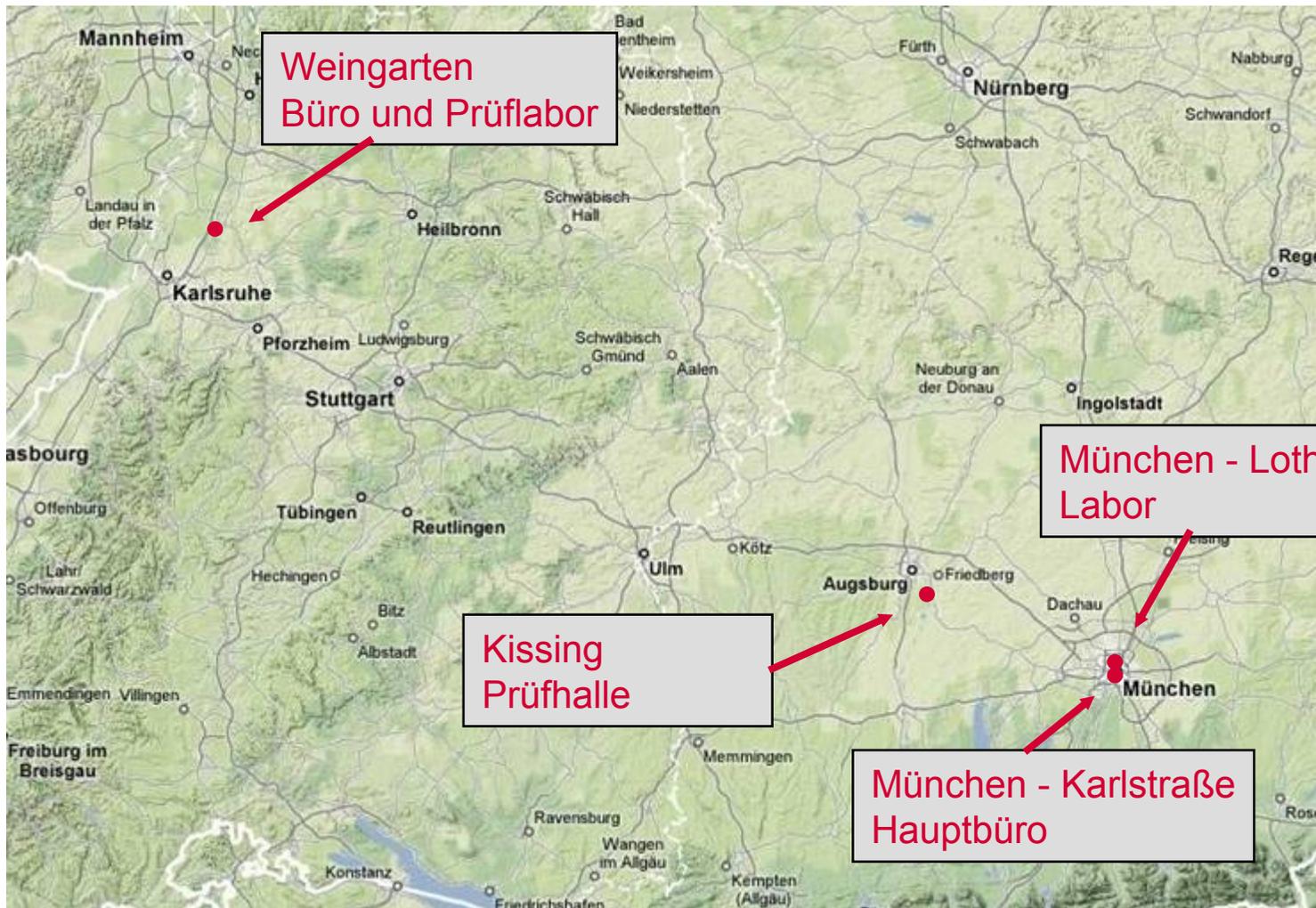
Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 3

März 2009

4 Standorte im Süden Deutschlands



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02



Brücke Suhl - Lichtenfels

Brücke Suhl- Lichtenfels

- Konstruktionsbeschreibung
- „Verfahrensprüfung“
- Statische Nachweisführung der Knotenpunkte (Maßstabseffekt, Strukturspannungsmethode)
- UIT - Nachbehandlungsverfahren
- Ermüdungsversuche zur versuchstechnischen Nachweisführung unter Berücksichtigung Nachbehandlung / Reparaturverfahren (Wöhler / Prüfaufbau)
- Ergebnisse



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 5

März 2009

Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 16
BW 67-1 Überführung der Kreisstraße LIF 2

Verkehrsprojekt dt. Einheit BAB A 73 => Thüringer
Raum soll erschlossen und damit Thüringen mit
Bayern, also Franken verbunden werden

Stahlverbundbrücke überspannt A 73 Suhl –
Lichtenfels im Regierungsbezirk Oberfranken



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 6

März 2009

Durch die exponierte Lage (Kloster Banz / Nordrand Maintal) hoher gestalterischer Anspruch



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 7

März 2009



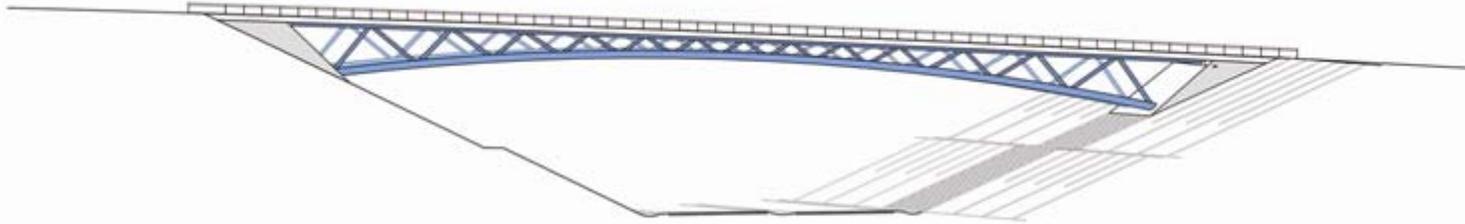
Örtlicher Geländeeinschnitt von ca. 20 m

Keine Verwendung von Gussknoten
und Lager minimieren die
Herstellungskosten und stellen eine
innovative Bauweise dar

Transparenz und Leichtigkeit durch schlankes
Rohrfachwerk und Vermeidung sichtbarer
Widerlagerwände



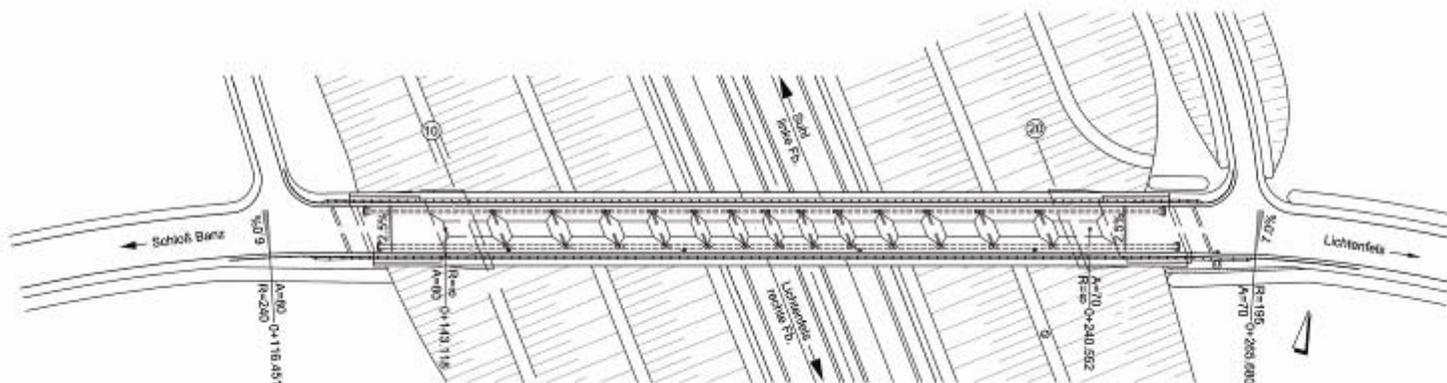
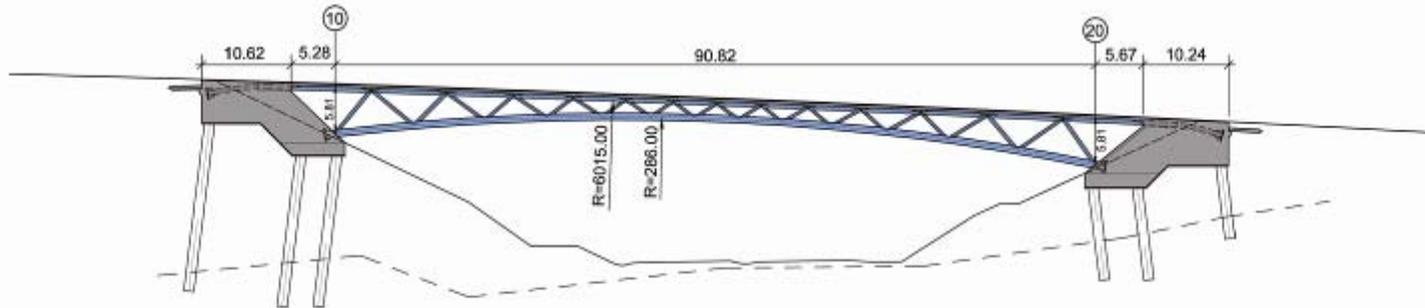
Bauentwurf



- Anlehnung an das charakteristische Erscheinungsbild der Strecke mit seinem hohen gestalterischen Anspruch
- Entfall von Mittelstützen
- Transparenz und Leichtigkeit durch gevoutetes, aufgelöstes Fachwerk
- Widerlager ohne sichtbare Wände
- Rohre als zukunftsweisende Profile mit geschweißten Knoten



Längsschnitt und Grundriss



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

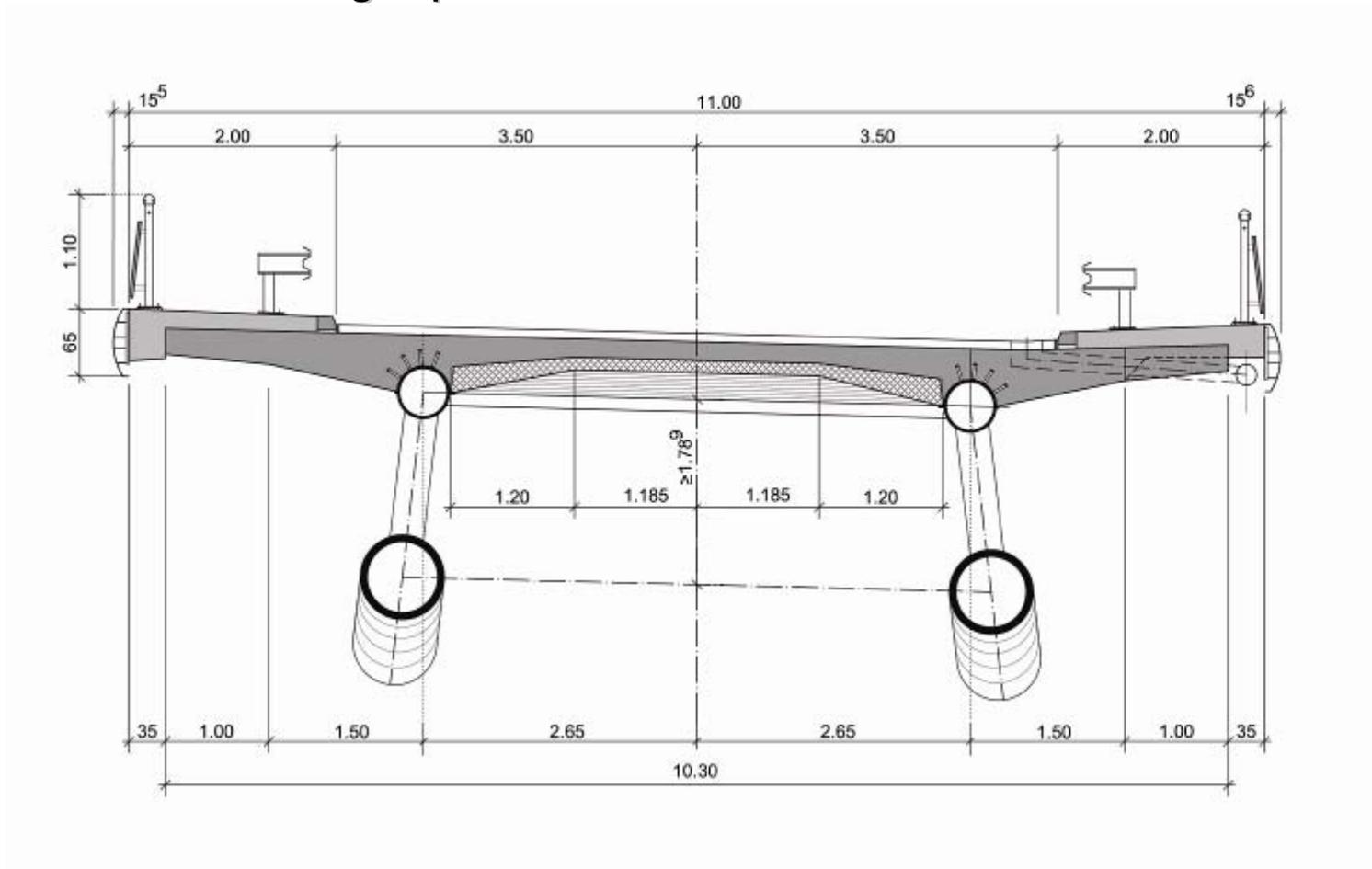
Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 10

März 2009

Regelquerschnitt Stahlverbundbauweise



Untergurt 813 mm; Obergurt 508 mm; Diagonale 475 mm; Wanddicken bis 50 mm



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 11

März 2009

Verfahrensprüfung (zerstörende Prüfung) in Anlehnung an die EN ISO 15614-1
durch die LGA Bautechnik GmbH

Fertigung des Überbaus (Stahlbau) durch STS Stahltechnik GmbH durch 5 vorgesehene Schweißer mit Zusatzprüfung nach DIN 18808 (Stahlbauten / Tragwerke aus Hohlprofilen)

Fertigung eines Prüfknotens unter wirklichkeitsnahen Bedingungen mit originalen Abmessungen und Wandstärken

HV - Naht bei Öffnungswinkel $> 60^\circ$; Kehlnaht bei Öffnungswinkel $< 30^\circ$

Schweißnahtprüfung am BV (nach Fertigung) bei 50% der Knotenschweißungen (HV- Nähte)
Kehlnähte stichprobenartig

=>Geschweißte Fachwerkknoten leicht zu überprüfen und schadenstolerant im Gegensatz zu Stumpfstößen
bei z.B. Gussknotenverbindung



Brücke Suhl - Lichtenfels

Verfahrensprüfung

STS Verfahrensprüfung
Bohrknoten

Seite

EN ISO 15609-1:2004 (D) *Brücke Suhl - Lichtenfels*
2005

Schweißanweisung (WPS)

Schweißanweisung: *2005-Verfahr.*
WPQR Nr.:
Hersteller: *STS* Art der Vorbereitung und Reinigung: *Gestrahlt SA2*
Art des Tropfenübergangs: *Kurz-u. Sprüht.* Bezeichnung des Grundwerkstoffs: *S 355 J2 H*
Verbindungsart und Nahtart: *V-u. Kehlnaht* Werkstückdicke (mm): *45/22*
Einzelheiten der Fugenvorbereitung (Skizze)¹⁾ Außendurchmesser (mm): *508/457 +*
Schweißposition: *PA u. PF*

Gestaltung der Verbindung		Schweißfolgen	
<i>Skizze 2005-1 bis 4</i>		<i>2005-bis 4</i>	

Einzelheiten für das Schweißen

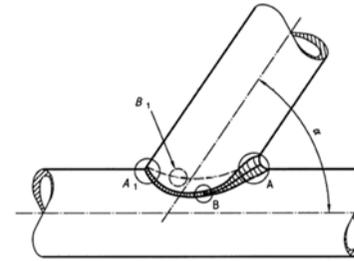
Schweißraupe	Schweißprozess	Abmessung des Zusatzwerkstoffes	Stromstärke A	Spannung V	Stromart/ Polung	Drahtvorschub	Ausziehlänge/ Vorschubgeschwindigkeit ¹⁾	Wärmeeinbringung ¹⁾
<i>1-8</i>	<i>135</i>	<i>1.2</i>	<i>160-290</i>	<i>22-33</i>	<i>+ =</i>	<i>4-9</i>		

Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat: *63Si4*
Sondervorschriften für Trocknung:
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung: — Schutzgas: *Arg. 18* Weitere Informationen¹⁾: z. B.:
Gasdurchflussmenge — Wurzelschutz: Pendeln (maximale Raupenbreite):
— Schutzgas: — Wurzelschutz: Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit:
Wolframelektrodenart/Durchmesser: Einzelheiten für das Pulsschweißen:
Einzelheiten über Ausfugen/Schweißbadsicherung: Abstand Stromkontaktkroch/Werkstück:
Vorwärmtemperatur: *50-100°* Einzelheiten für das Plasmaschweißen:
Zwischenlagentemperatur: Brennerstellwinkel:
Wasserstoffarmglühen
Haltemperatur
Wärmehandlung und/oder Aushärten:
Zeit, Temperatur, Verfahren:
Aufheiz- und Abkühlraten¹⁾

Hersteller: *STS STAHLTECHNIK*
13.05.2006
K. Maub
Wiener Straße 19
93065 Regensburg

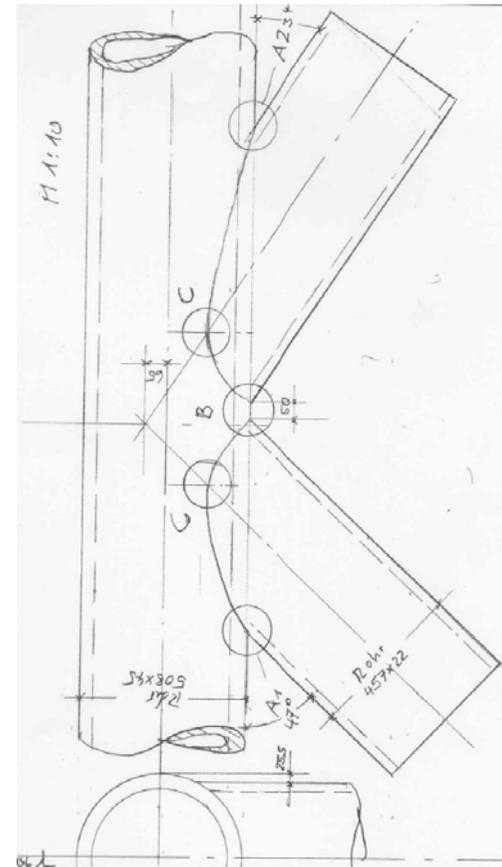
1) Falls gefordert

STS STAHLTECHNIK GmbH · Wiener Str. 19 · 93055 Regensburg · Tel. (09 41) 60 08-0 · Fax (09 41) 60 08-100



- Legende**
- 1 Makroschliff und durchzuführende Härteprüfung (in Position A)
 - 2 Makroschliff in Position B

α Rohrabzweigwinkel



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,
Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz
Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02





Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,
Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz
Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Hersteller: **STS Stahltechnik GmbH**
 Anschrift: **Wiener Straße 19, 93055 Regensburg**
 Beleg - Nr. der Schweißanweisung (WPS): **2005 Verfahr.**
 Datum der Schweißung : **22./23.05.06**
 Regel/Prüfnorm: **EN ISO 15614-1**
 Prüfstück: **Rohrknoten (47°)** **Rohr 508 x 45 mm, Rohr 457 x 22 mm**
 Schweißprozeß: **135 (MAG)** Grundwerkstoffe: **S355J2H, DIN EN 10025**

(Weitere Einzelheiten siehe WPS des Herstellers)

Prüfart	Durchgeführt	Nicht durchgeführt
Sichtprüfung DIN EN 970	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Oberflächenrißprüfung DIN EN 571-1 / DIN EN 1290	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ultraschallprüfung DIN EN 1714	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Querzugversuch DIN EN 895	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Biegeprüfung DIN EN 910	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Kerbschlagbiegeversuch DIN EN 875	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Makroschliff DIN EN 1321	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Härteprüfung DIN EN 1043-1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

(Prüfergebnisse siehe Anlagen)



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

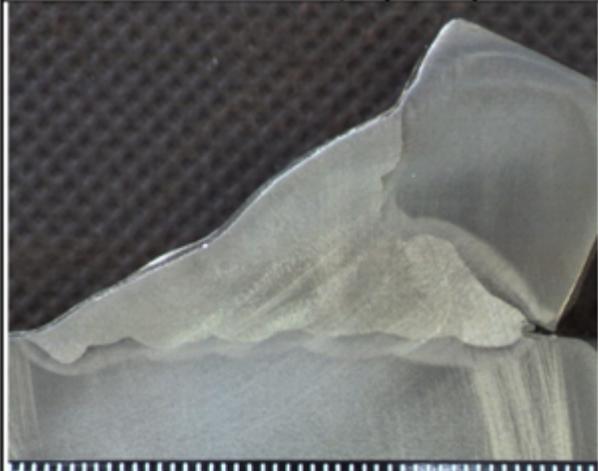
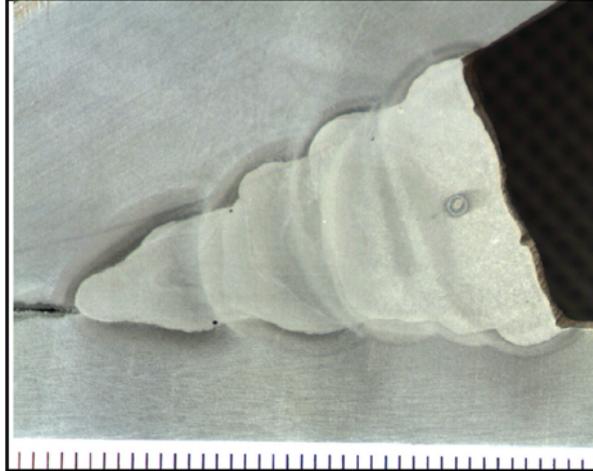
Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02 **Seite 16** März 2009

Makroschliffe

Generelle Bewertung aus dem Zwickelbereich und bei Nahtöffnung unter 30° nur hinsichtlich Fehler im Schweißgut und vorhandenem Nahtquerschnitt

Probe-Nr.: 514/06 30°	Vergrößerung: ca. 2,3 : 1	Befund	Probe-Nr.: 514/06 Zwickel	Vergrößerung: ca 2,6 : 1	Befund
		<p>a = 17,3 mm Keine inneren Fehler</p> <p>Ohne weitere Bewertung, da Nahtöffnungswinkel $\leq 30^\circ$</p>			<p>a = 31,1 mm Wurzelpunkt erfasst Pore 0,2 mm Keine sonstigen inneren Fehler</p> <p>Ohne weitere Bewertung, da bei Nahtöffnungswinkel mit ca. 30° (ist 34°) der theoretische Wurzelpunkt nicht immer zuverlässig zu erfassen ist.</p>



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 17

März 2009

Ultraschallprüfung

Wurzelbindefehler in Bereichen bis Nahtöffnungswinkel 30°

⇒ Ausreichender Luftspalt, um sicheres Durchschweißen zu erreichen

Oberflächenrissprüfung

Magnetpulverprüfung ergab keine Beanstandungen



Mögliche Nachweisführung zur Ermüdungsfestigkeit:

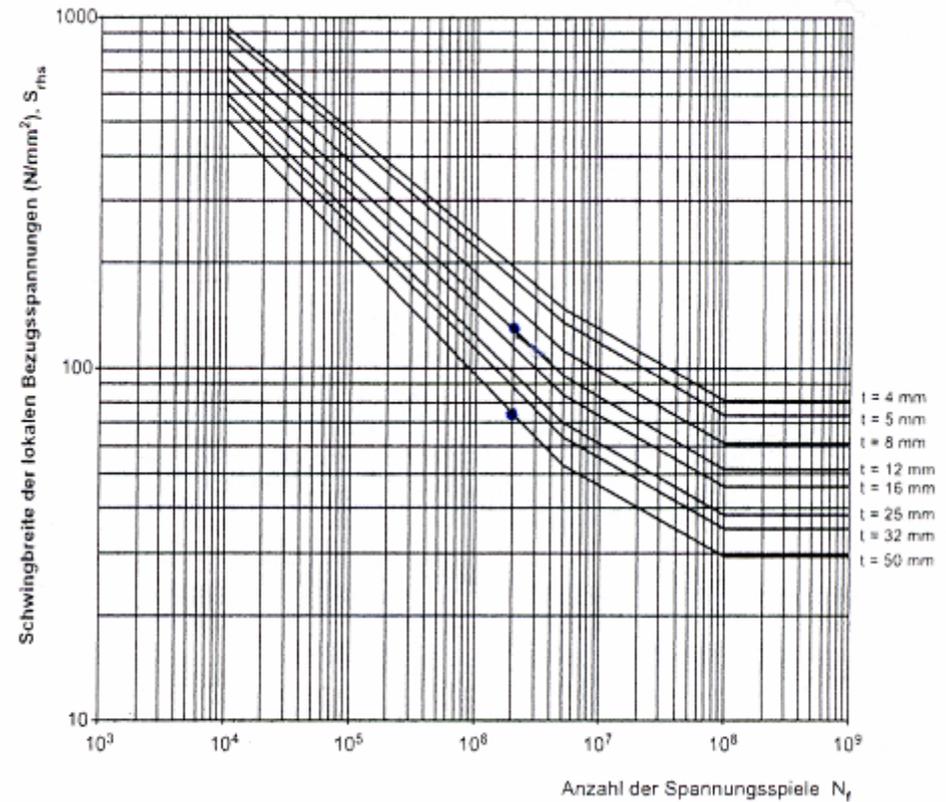
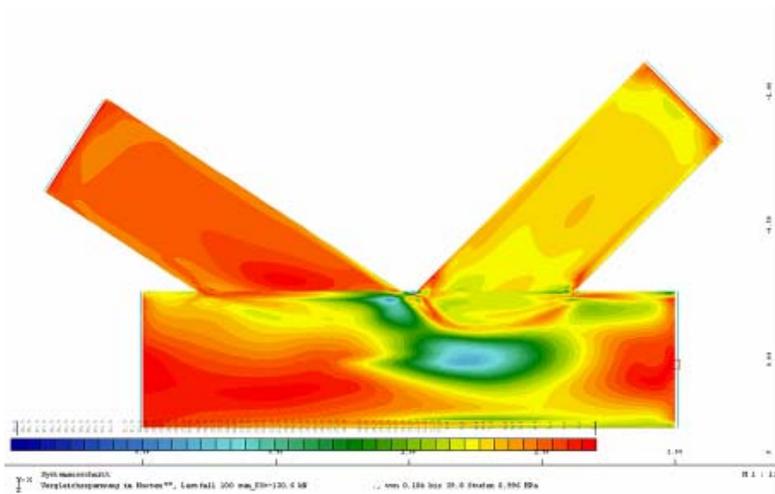
- Nennspannungsnachweis
Berechnung der globalen Spannungsschwingbreiten am Stabsystem
Bewertung mit Hilfe der Kerbfalltabellen EC3
- Strukturspannungsnachweis
Berechnung der Spannungen an der rissgefährdeten Stelle im Tragwerk; Nachweise beinhalten den Spannungszuwachs aus der örtlichen Tragwerksgeometrie
Extrapolation der lokalen Spannungen am Schweißnahtfuß (SCF)
- Kerbspannungsnachweis
Betrachtung der Kerbspannungen im Kerbgrund durch FEM (exaktes Erfassen der geometrischen Gegebenheiten erforderlich)
- Bruchkriterienmethode
Nachweisführung unter Berücksichtigung der Brucharten von Hohlprofilknoten. Bewertung durch Diagramme auf Grundlage zahlreicher Wöhlerversuche an Hohlprofilverbindungen

(keine explizite Regelungen im DIN Fachbericht 103 zu geschweißten Hohlprofilkonstruktionen)



Nachweisführung

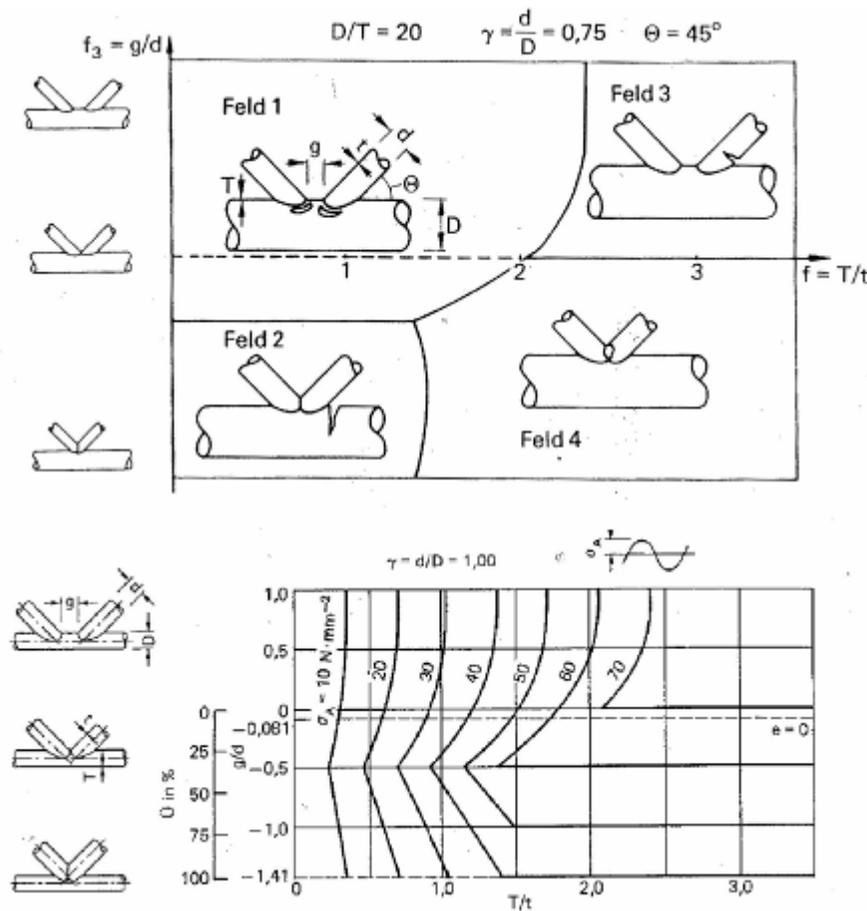
- Strukturspannungsnachweis durch FEM und Vergleich mit Vorgaben des CIDECT Book Nr 8 unter Berücksichtigung des Maßstabeffektes



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,
Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz
Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Brucharten bei Hohlprofilknoten unter Ermüdung
Bruch-Kriterien-Methode



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Vergleichende Berechnungen in Anlehnung an EC3; Nennspannungskonzept (Tabelle 8.7)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Anforderungen
90 $m = 5$	<p>Anschluss mit Spalt: Kerbdetail 1): K- und N-Knoten, Rundhohprofile:</p>	<p>Kerbfälle 1) und 2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Es sind getrennte Nachweise für Gurte und Diagonalen zu führen. - Bei Zwischenwerten von t_o/t_i ist zwischen den Kerbgruppen linear zu interpolieren. - Bei Diagonalen mit $r \leq 8$ mm sind Kehlnähte erlaubt. - l_o und $t_i \leq 8$ mm - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $h_o/l_o \cdot t_o/t_i \leq 25$ - $d_o/l_o \cdot t_o/t_i \leq 25$ - $0,4 \leq h_o/h_o \leq 1,0$ - $0,25 \leq d_o/d_o \leq 1,0$ - $h_o \leq 200$ mm - $d_o \leq 300$ mm - $-0,5h_o \leq e_{top} \leq 0,25h_o$ - $-0,5d_o \leq e_{top} \leq 0,25d_o$ - $e_{top} \leq 0,02h_o$ oder $\leq 0,02d_o$ <p>[e_{top}]: Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsebene]</p>
45 $m = 5$		
71 $m = 5$	<p>Anschluss mit Spalt: Kerbdetail 2): K- und N-Knoten, Rechteckprofile:</p>	<p>Kerbfälle 3) und 4):</p> <ul style="list-style-type: none"> - 30 % \leq Überlappung \leq 100 % - Überlappung = $(g/p) \times 100$ % - Es sind getrennte Nachweise für Gurte und Diagonalen zu führen. - Bei Zwischenwerten von t_o/t_i ist zwischen den Kerbgruppen linear zu interpolieren. - Bei Diagonalen mit $r \leq 8$ mm sind Kehlnähte erlaubt. - l_o und $t_i \leq 8$ mm - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $h_o/l_o \cdot t_o/t_i \leq 25$ - $d_o/l_o \cdot t_o/t_i \leq 25$ - $0,4 \leq h_o/h_o \leq 1,0$ - $0,25 \leq d_o/d_o \leq 1,0$ - $h_o \leq 200$ mm - $d_o \leq 300$ mm - $-0,5h_o \leq e_{top} \leq 0,25h_o$ - $-0,5d_o \leq e_{top} \leq 0,25d_o$ - $e_{top} \leq 0,02h_o$ oder $\leq 0,02d_o$ <p>[e_{top}]: Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsebene]</p>
36 $m = 5$		
71 $m = 5$	<p>Anschluss mit Überlappung: Kerbdetail 3): K-Knoten, Rechteck- oder Rundhohprofile:</p>	<p>Kerbfälle 3) und 4):</p> <ul style="list-style-type: none"> - 30 % \leq Überlappung \leq 100 % - Überlappung = $(g/p) \times 100$ % - Es sind getrennte Nachweise für Gurte und Diagonalen zu führen. - Bei Zwischenwerten von t_o/t_i ist zwischen den Kerbgruppen linear zu interpolieren. - Bei Diagonalen mit $r \leq 8$ mm sind Kehlnähte erlaubt. - l_o und $t_i \leq 8$ mm - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $h_o/l_o \cdot t_o/t_i \leq 25$ - $d_o/l_o \cdot t_o/t_i \leq 25$ - $0,4 \leq h_o/h_o \leq 1,0$ - $0,25 \leq d_o/d_o \leq 1,0$ - $h_o \leq 200$ mm - $d_o \leq 300$ mm - $-0,5h_o \leq e_{top} \leq 0,25h_o$ - $-0,5d_o \leq e_{top} \leq 0,25d_o$ - $e_{top} \leq 0,02h_o$ oder $\leq 0,02d_o$ <p>[e_{top}]: Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsebene]</p>
56 $m = 5$		
71 $m = 5$	<p>Anschluss mit Überlappung: Kerbdetail 4): N-Knoten, Rechteck- oder Rundhohprofile:</p>	<p>Definition von p und g:</p>
50 $m = 5$		



- DIN- Fachbericht regelt geschweißte Fachwerkknoten nicht explizit
- EC3 regelt Schweißnahtdetails und Wanddickenabhängigkeit nur unzureichend

=> Zustimmung im Einzelfall

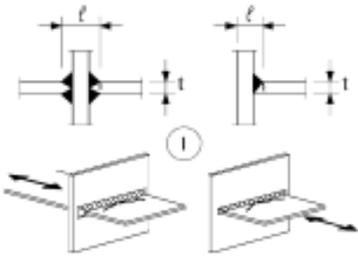
Versuchstechnische Untersuchungen zur

- Verifizierung der statischen Berechnungen nach der Bruchkriterienmethode und dem Strukturspannungskonzept
- Bewertung des Maßstabeffektes
- Bestätigung der lokalen Bezugsspannungen gemäß CIDECT Book 8
- Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit durch UIT-Behandlung
- Tragverhalten reparaturgeschweißter Knoten



Lebensdauer von geschweißten Konstruktionen unter dynamischer Belastung wird bestimmt durch Schweißnahtausführung und Kerbschärfe („geometrischer“ Spannungszustand / Eigenspannungen)

- Versagen
 - Schweißnahtübergang
 - Wurzelpunkt

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Beschreibung	Anforderungen
80	$l < 50$	alle t		<p>Kreuz- und T-Stöße:</p> <p>1) Riss am Schweißnahtübergang in voll durchgeschweißten Stumpfnähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten.</p> <p>2) $\Delta\sigma$ ist mit korrigierten Nennspannungsschwingbreiten zu ermitteln.</p> <p>3) Es sind 2 Ermüdungsnachweise erforderlich: zum einen der Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Spannungen nach Abschnitt b mit Kerbgruppe 36* für α_x und Kerbgruppe 80 für τ_w, zum anderen der Nachweis des Nahtüberganges mit Bestimmung von $\Delta\sigma$ in den belasteten Blechen.</p>
71	$50 < l \leq 80$	alle t		
63	$80 < l \leq 100$	alle t		
56	$100 < l \leq 120$	alle t		
56	$l > 120$	$t \leq 20$		
50	$120 < l \leq 200$ $l > 200$	$t > 20$ $20 < t \leq 30$		
45	$200 < l \leq 300$ $l > 300$	$t > 30$ $30 < t \leq 50$		
40	$l > 300$	$t > 50$	<p>2) Riss am Schweißnahtübergang, ausgehend von der Kante des Anschlussbleches, mit Spannungskonzentrationen an den Schweißnahtenden infolge Blechverformungen.</p> <p><u>Kerbfälle 1) bis 3):</u></p> <p>Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.</p>	
wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5			<p>3) Wurzelschweißnaht bei nicht voll durchgeschweißten T-Stößen oder Kehlnahtanschlüssen und voll durchgeschweißten T-Stößen.</p>	



Schweißnahtnachbehandlungen, wirksam im Bereich des Schweißnahtübergangs, können in zwei Gruppen aufgeteilt werden

-mechanisch wirksame Methoden

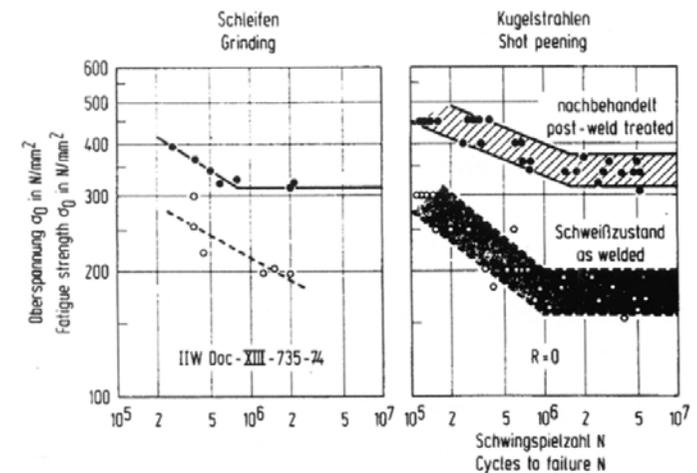
- Kugelstrahlen, Hämmern / Nageln, UIT HiFIT, PITec

-geometrisch wirksame Methoden

- Schleifen, (UIT, HiFIT, PITec)

Die mechanisch wirksamen Methoden erzeugen Druckeigenspannungen an der Oberfläche und erzielen eine Verfestigung der oberflächennahen Schichten (Kaltverformung) und somit an den Stellen, an denen der Riss initiiert wird.

Durch die geometrisch wirksamen Methoden wird die Schweißnahtgeometrie verbessert und somit die Kerbwirkung entschärft.



UIT (Ultrasonic Impact Treatment) basiert auf einer Umwandlung von harmonischen Schwingungen durch einen Ultraschallwandler in mechanische Impulse und hochfrequenter Ultraschallenergie, die über gehärtete Bolzen auf die zu behandelnde Oberfläche übertragen werden.

Während diesem Vorgang wird das Spannungsprofil geändert und bei Schweißnähten die Geometrie des Nahtüberganges wesentlich verbessert.

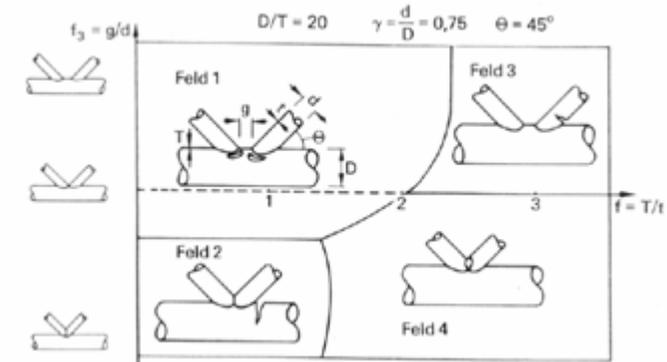
Schweißnahtnachbehandlung zur

- Reduzierung von negativen Eigenspannungen
- Einbringen von Druckeigenspannungen in der Oberfläche
- Verbesserung der Schweißnahtgeometrie

Daraus resultiert eine signifikante Verbesserung der Ermüdungslebensdauer bzw. eine wesentliche Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit



Bruchart	Bruchbild	geometrische Verhältnisse
<p>Bruch ausgehend von der Schweißkerbe am Sattelpunkt des Gurtrohrs</p> <p>Nr. 1</p>		<p>Gurtstab: \varnothing 101,6 x 5,6</p> <p>Füllstab: \varnothing 51,0 x 4,0</p>
<p>Bruch ausgehend von der Schweißkerbe in den Füllstab</p> <p>Nr. 2</p>		<p>Gurtstab: \varnothing 101,6 x 8,0</p> <p>Füllstab: \varnothing 51,0 x 4,0</p>
<p>Bruch ausgehend von der Gurtrohrinnenseite im nicht geschweißten Bereich infolge der Verformungen des Gurtrohrs zwischen den Füllstäben</p> <p>Nr. 3</p>		<p>Gurtstab: \varnothing 101,6 x 8,0</p> <p>Füllstab: \varnothing 82,5 x 4,0</p>



Unterschiedliche Versagensformen an geschweißten Rohrverbindungen

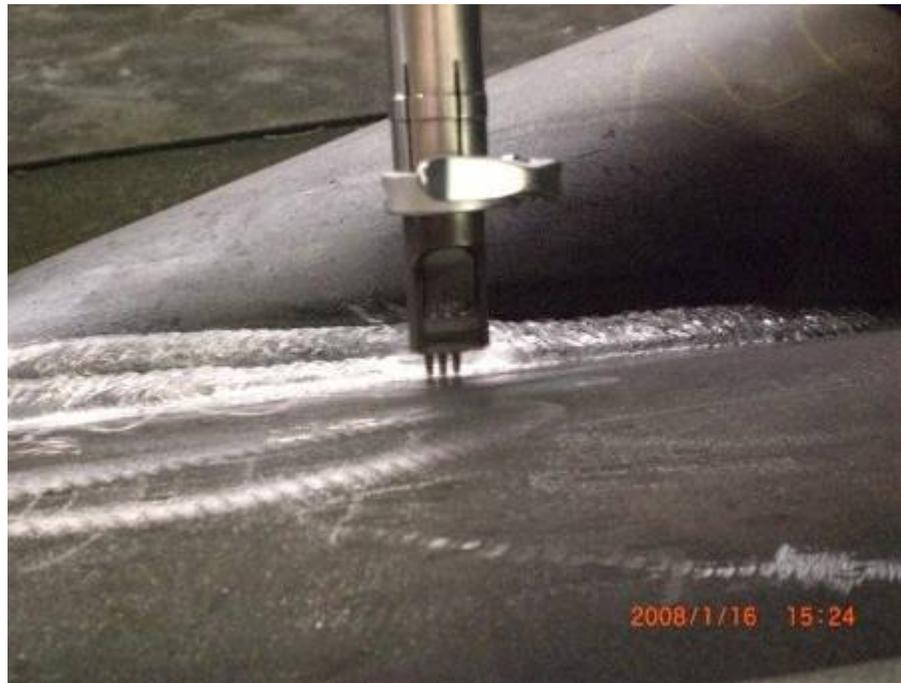




Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,
Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz
Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

UIT- Behandlung im Werk



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,
Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz
Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 30
März 2009



Schwerpunkte der Prüfungen

- Ermüdungsfestigkeit Schweißzustand
- Ermüdungsfestigkeit nach Reparaturschweißung
- Ermüdungsfestigkeit nach UIT-Verfahren (Ultraschallhämmern)



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

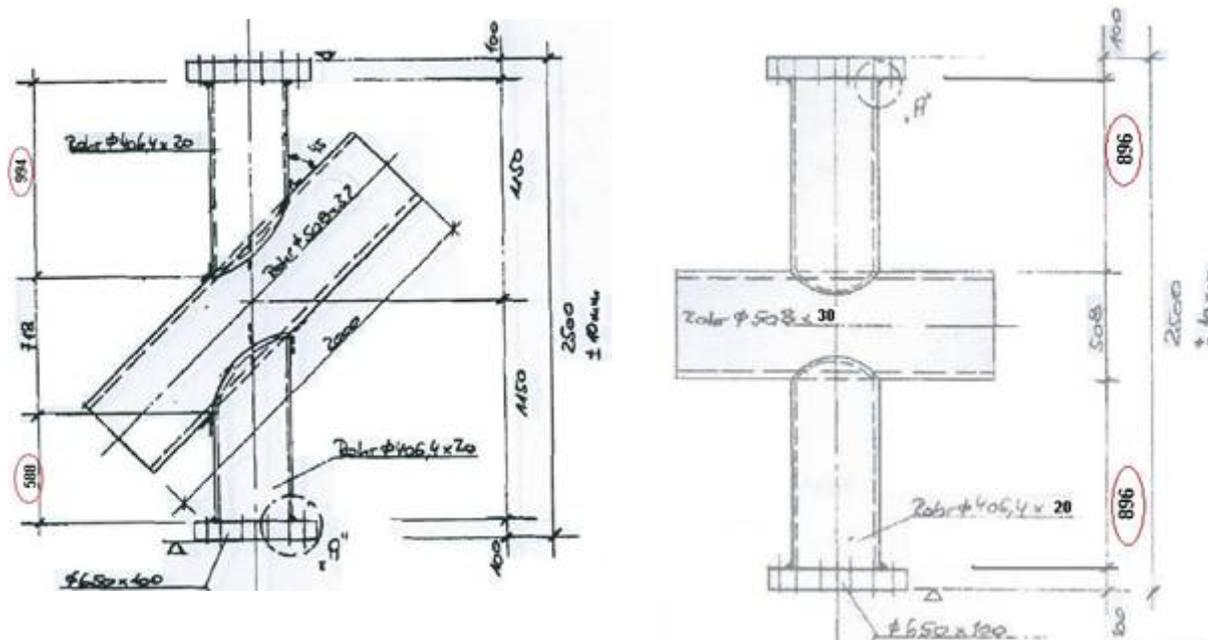
Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 31

März 2009

Brücke Suhl - Lichtenfels



Series	chord	brace	d / d ₀	t ₀ / t	Θ	R
1	273,2 x 20	139,8 x 14,2	0,5	1,4	90°	0,1
1Θ	273,2 x 20	139,8 x 14,2	0,5	1,4	45°	0,1
2	323,9 x 20	159 x 14,2	0,5	1,4	90°	0,1
3	323,9 x 30	159 x 14,2	0,5	2,1	90°	0,1
4Θ ^(*)	508 x 32	406,4 x 20	0,8	1,6	45°	0,1

^(*) tested at Bundeswehr University, Munich



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 32

März 2009

Brücke Suhl - Lichtenfels

Probekörper HS München

Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4 UIT	Serie 5 UIT
139,75 x 14,2	159 x 14,2	159 x 14,2	139,75 x 14,2	159 x 14,2
273,2 x 20	323,9 x 20	323,9 x 30	273,2 x 20	323,9 x 30



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 33

März 2009

Brücke Suhl - Lichtenfels



Probekörper
Universität der Bundeswehr
 $F_{max} = 140 \text{ to}$



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 34

März 2009

Brücke Suhl - Lichtenfels



Schenk 600 kN Pulsator

- Frequenzen bis 35 Hz

- Prüflasten $F_0 = 600 \text{ kN}$

- liegende Bauweise

- Schwingung in Eigenfrequenz
über Unwuchtmotoren



Lasteinleitung auf Magnesiumschwingen



Auflager mit Kraftmessdose



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

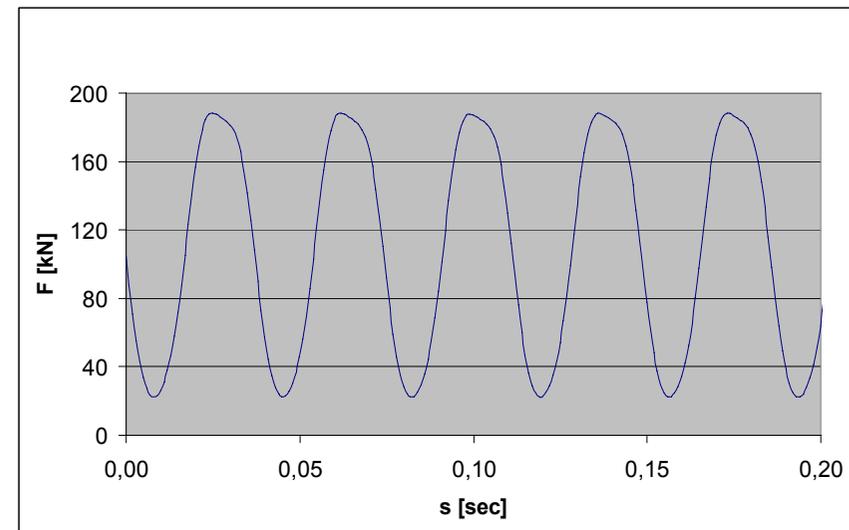
Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Wöhlerversuche

$\Delta\sigma = \text{min. } 26 \text{ N/mm}^2 \text{ max. } 52 \text{ N/mm}^2 \text{ (Nennspannung Füllrohr)}$

Bei $\kappa = 0,1$

Abschaltkriterien über Maschinensteuerung
Nachfolgende Werte bei Wegzunahme 0,1 mm



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

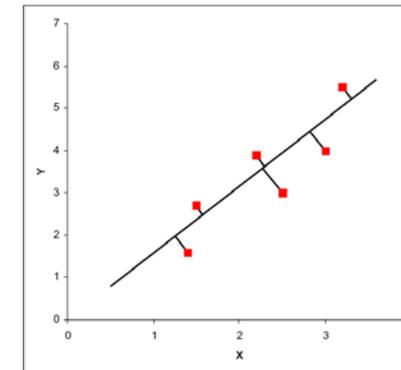
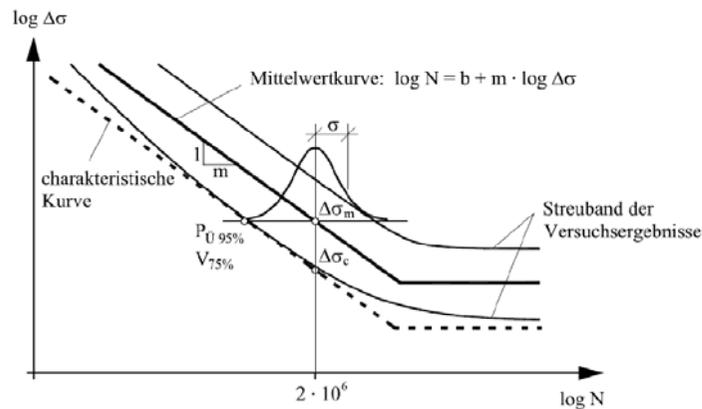
Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 36

März 2009

Auswertung der Ermüdungsversuche

- Durch Statistik wird aufgrund vorliegender Versuchswerte (Stichproben) auf die Eigenschaften der Grundgesamtheit geschlossen
- Durch Regressionsanalyse der Datenpaare (Versuchsergebnisse) im doppelt logarithmischen Maßstab wird die Mittelwertkurve (50 % Überlebenswahrscheinlichkeit P_0) erfasst
- => Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ in Abhängigkeit der Steigung bei 2 Mio Lastwechsel
- Streubereich wird festgelegt Vertrauensintervall P_a (75%) und Überlebenswahrscheinlichkeit P_0 (97,5%) unter Annahme der Normalverteilung (Gaußsche Glockenkurve)



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

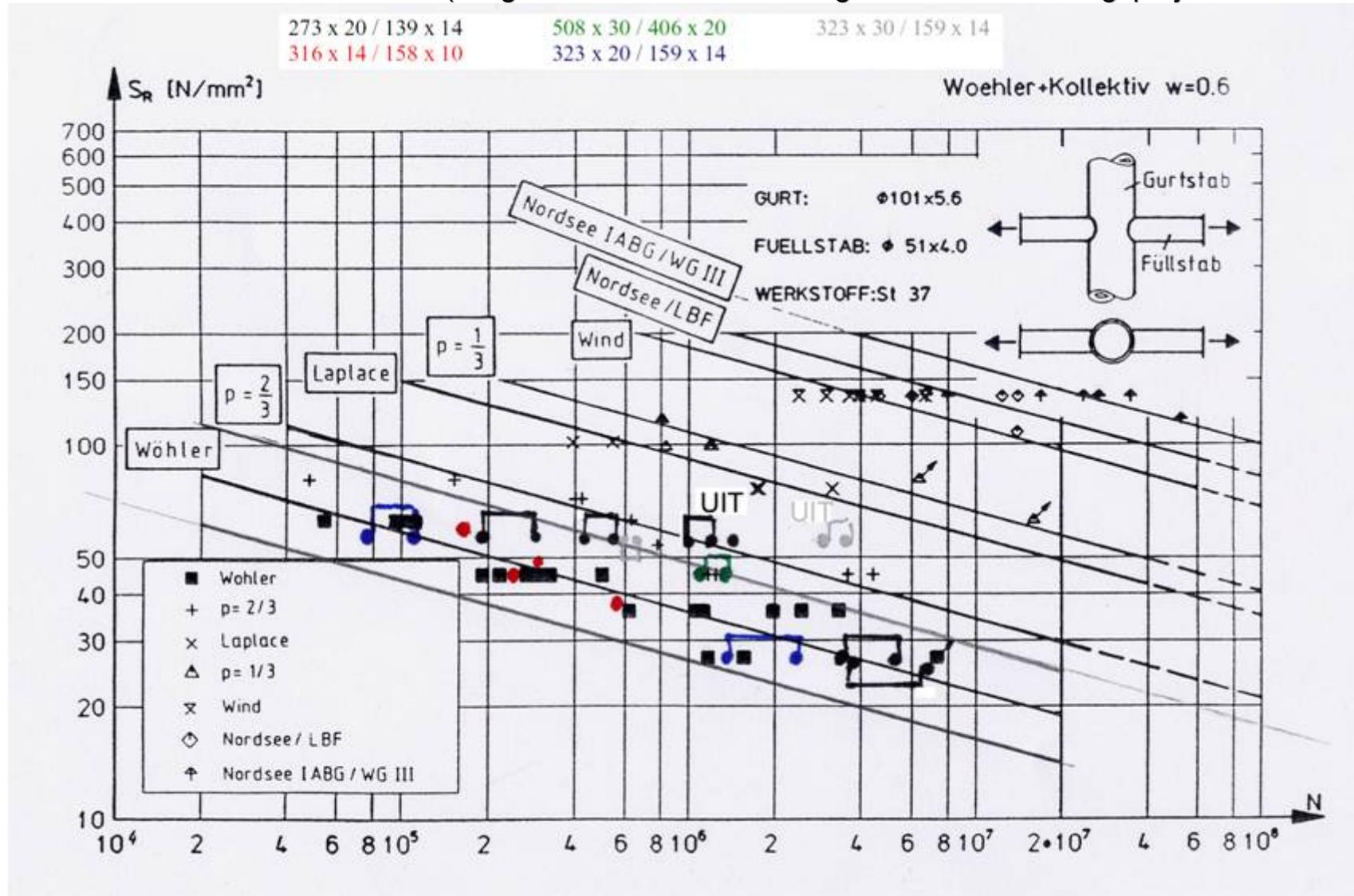
Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 37

März 2009



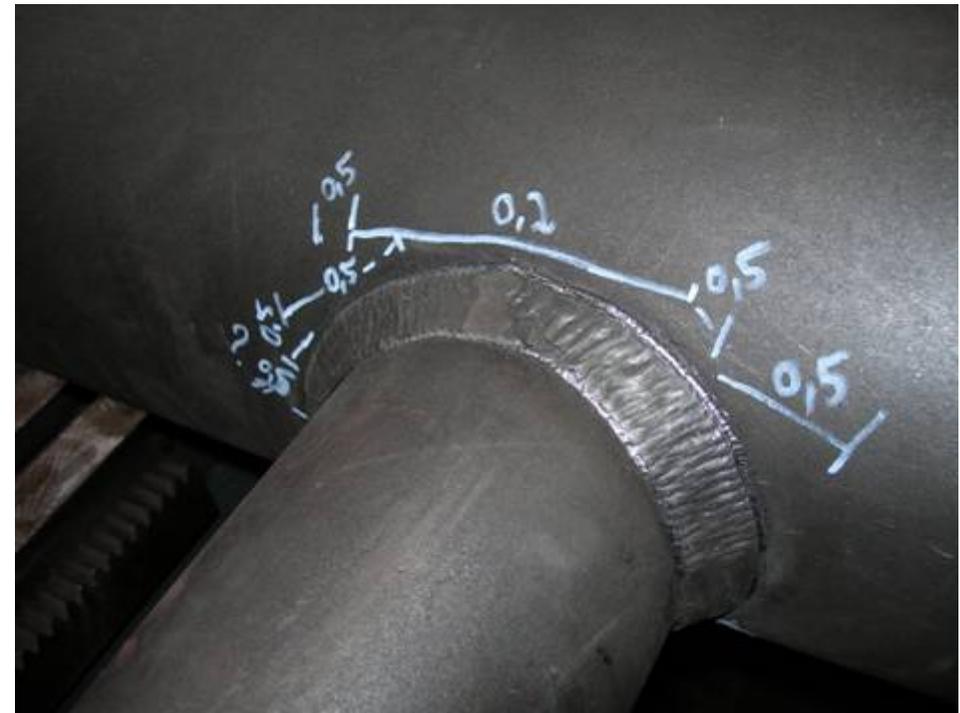
Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Brucharten / Rissfortschritt



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 39

März 2009

Brücke Suhl - Lichtenfels

Bruchart	Bruchbild	geometrische Verhältnisse
Bruch ausgehend von der Schweißkerbe am Sattelpunkt des Gurtrohrs Nr. 1		Gurtstab: $\varnothing 101,6 \times 5,6$ Füllstab: $\varnothing 51,0 \times 4,0$
Bruch ausgehend von der Schweißkerbe in den Füllstab Nr. 2		Gurtstab: $\varnothing 101,6 \times 8,0$ Füllstab: $\varnothing 51,0 \times 4,0$
Bruch ausgehend von der Gurtrohrinnenseite im nicht geschweißten Bereich infolge der Verformungen des Gurtrohrs zwischen den Füllstäben Nr. 3		Gurtstab: $\varnothing 101,6 \times 8,0$ Füllstab: $\varnothing 82,5 \times 4,0$

$t_o/t = 1,4$
 $d/d_o = 0,5$



159 x 14
323 x 20

$t_o/t = 2,0$
 $d/d_o = 0,5$

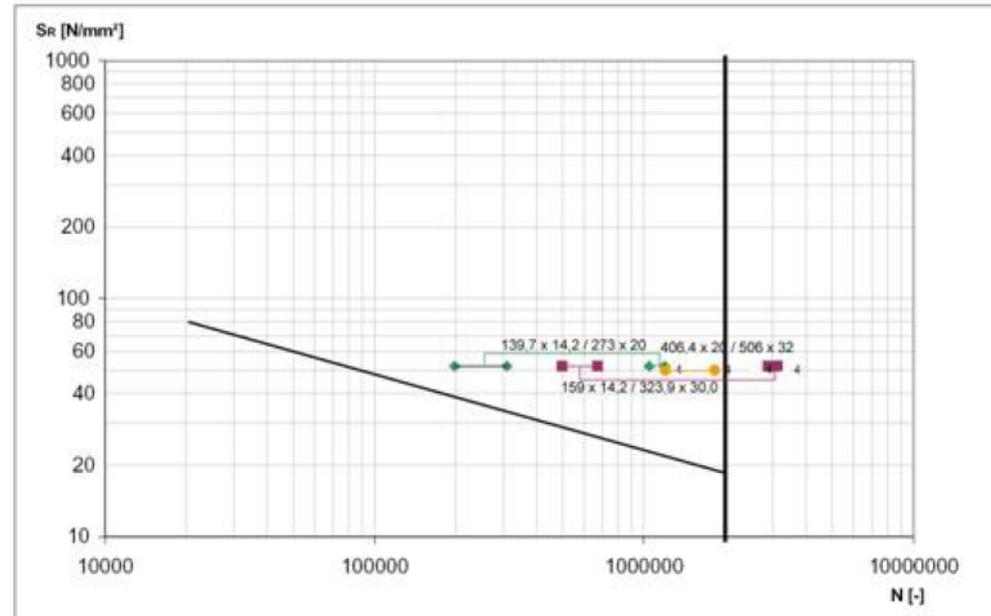


159 x 14
323 x 30



Lebensdauerverlängerung nach UIT- Behandlung

Serie	Probenvergleich	Abmessungen	$\Delta \sigma_L$ [N/mm ²]	Im Schweißzustand	UIT-Behandlung	Verhältnis UIT / as welded
1	2 mit 4	139,75 x 14,2 273,2 x 20,0	52 N/mm ²	198.000 LW Anriss	1.045.646 LW Anriss	f = 5,28
				310.000 Versuchende	1.192.731 Versuchende	f = 3,84
7	7 mit 8	159 x 14,2 323,9 x 30,0	52 N/mm ²	496.650 LW Anriss	2.888.509 LW Anriss	f = 5,81
				672.878 Versuchende	3.117.157 Versuchende	f = 4,63
3	1 mit 1	406,4 x 20,0 508 x 32,0	50 N/mm ²	1.200.000 LW Anriss 1.830.000 Versuchende	> 2.500.000 Versuch läuft	



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,
Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz
Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Brücke Suhl - Lichtenfels

Pk2 mit Reparaturschweißnaht



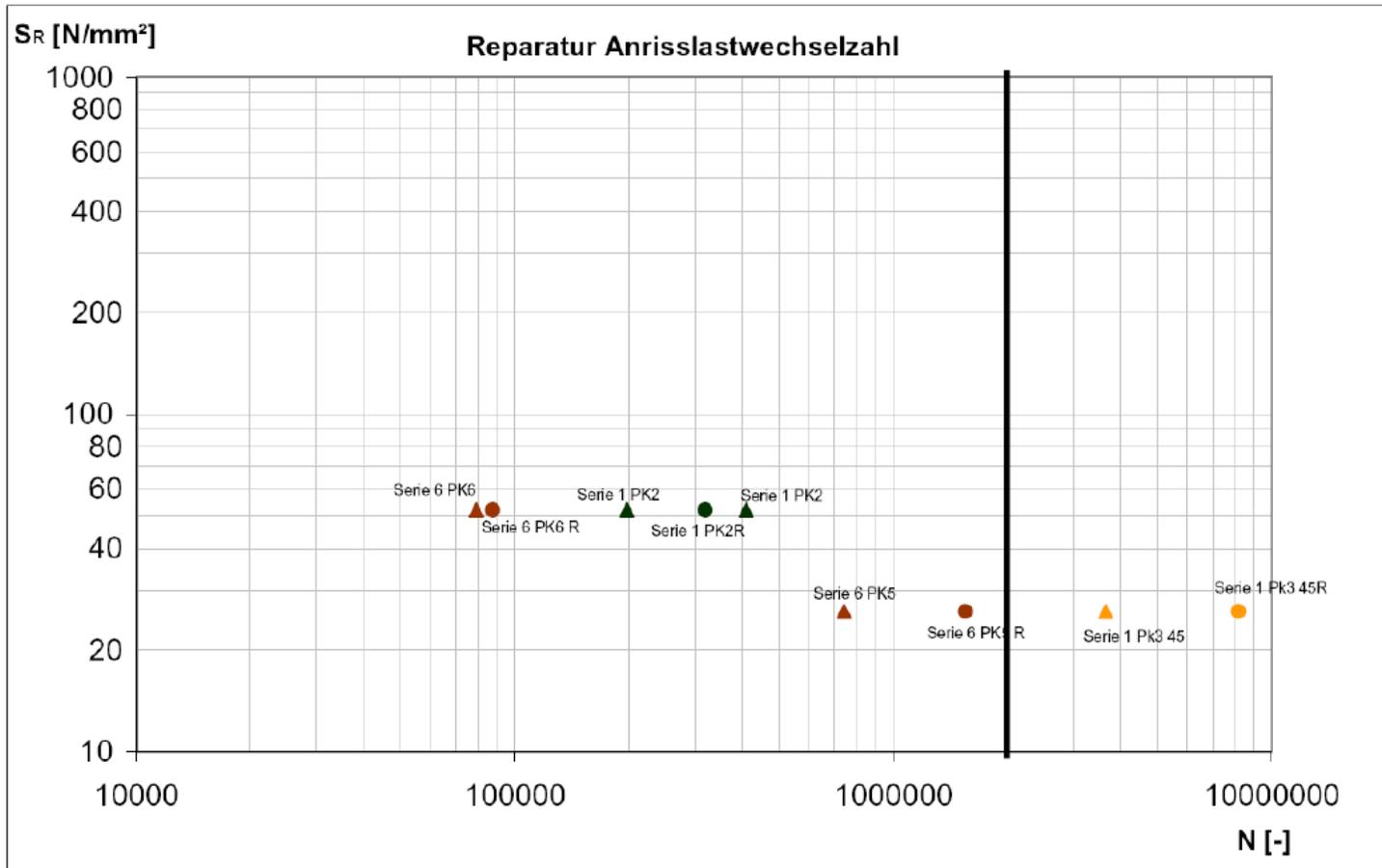
Pk4 mit Reparaturschweißnaht



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,
Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz
Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 42
März 2009



Serie 1; Füllrohr 139 x 14,2; Gurtrohr 273 x 20 **45°**

Serie 1; Füllrohr 139 x 14,2; Gurtrohr 273 x 20 **90°**

Serie 6; Füllrohr 159 x 14,2; Gurtrohr 323 x 20

△ Im Schweißzustand ○ Reparatur



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Brücke Suhl - Lichtenfels



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Erfahrungsaustausch an der LGA, Nürnberg 13.03.2009

Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak,

Dipl.-Ing.(FH) Jan Lorenz

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau - Hochschule München FK02

Seite 44

März 2009