

# **Ein Beitrag zur Ertüchtigung bestehender Stahltragwerke unter besonderer Berücksichtigung des Fügeverfahrens Schweißen**

von der Fakultät  
– Bauingenieurwesen –  
der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften  
– Dr.-Ing. –  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Falk Lüddecke  
aus Lutherstadt Wittenberg

Tag der Verteidigung: 15. März 2006

Gutachter:

Referent:	Prof. Dr.-Ing. habil. W. Graße
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Albrecht
Korreferent:	Dr.-Ing. M. Mehdiانpour

Berlin 2006

Die vorliegende Arbeit entstand an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).

Impressum

BAM-Dissertationsreihe - Band 17

**Ein Beitrag zur Ertüchtigung  
bestehender Stahltragwerke unter besonderer  
Berücksichtigung des Fügeverfahrens Schweißen**

2006

Herausgeber:

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Unter den Eichen 87

12205 Berlin

Telefon: +49 30 8104-0

Telefax: +49 30 8112029

E-mail: [info@bam.de](mailto:info@bam.de)

Internet: [www.bam.de](http://www.bam.de)

Copyright © 2006 by Bundesanstalt für  
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Verlag und Vertrieb:

Wirtschaftsverlag N. W.

Verlag für neue Wissenschaft GmbH

27568 Bremerhaven

Telefon: +49 471 94544-0

Telefax: +49 471 94544-77

Layout: BAM-Arbeitsgruppe Z.67

ISSN 1613-4249

ISBN 3-86509-533-X

---

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) im Rahmen des Doktorandenprogramms in Verbindung mit der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden.

Besonderen Dank möchte ich meinen wissenschaftlichen Betreuern, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Graße von der TU Dresden und Herrn Dr.-Ing. Milad Mehdianpour von der BAM, aussprechen. Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Graße für die Anregung, sich mit diesem interessanten Themenbereich auseinander zu setzen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gert Albrecht danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Weiterhin möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd W. Zastrau für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses und Herrn Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller für die Bereitschaft zur Abnahme des Rigorosums recht herzlich danken.

Für die Bereitstellung der Prüfinfrastruktur und die Beratung bei der Umsetzung der Versuche möchte ich Herrn Prof. und Dir. Dr.-Ing. Werner Rücker danken.

Den Kollegen der Fachgruppe VII.2 – Ingenieurbau – der BAM, insbesondere Jürgen Herter, Ingo Feick, Enrico Kretzschmar, Ralf Makris, Nobert Neumann, Hans-Joachim Peschke und Holger Wegner gilt mein herzlicher Dank für die Unterstützung und Mithilfe bei den zahlreich durchgeführten experimentellen Untersuchungen, die einen wesentlichen Bestandteil dieser Arbeit bilden.

Zudem möchte ich Matthias Baeßler für die zahlreichen wissenschaftlichen Diskussionen rund um die zu erstellende Dissertation und die darüber hinaus gehende Unterstützung besonders danken.

Ohne das Verständnis, die Hilfe und Unterstützung aus dem Kreise meiner Familie, meiner Lebensgefährtin Jana Hechler und von Freunden wäre das Gelingen dieser Arbeit nicht denkbar gewesen.

Berlin, im Juni 2006



---

## **Kurzfassung**

Bei einer Vielzahl im Betrieb befindlicher, vorwiegend ermüdungsbeanspruchter Stahltragwerke, um 1900 erbaut, ist die rechnerische Lebensdauer bereits überschritten.

Die Bereitstellung möglicher Sanierungskonzepte zur Erhöhung der Tragsicherheit – damit zur weiteren Nutzung – dient für die Brückenbetreiber als wichtige Entscheidungsgrundlage bei der Wahl zwischen Ertüchtigungsmaßnahme und Neubau.

Im Zuge von Ertüchtigungen muss oftmals bestehendes und beschädigtes Material durch Neumaterial ersetzt oder ergänzt werden. Der Erfolg der Ertüchtigungsmaßnahme hängt entscheidend von der kraftschlüssigen Verbindung zwischen Alt- und Neumaterial ab.

In dieser Arbeit wird zur Steigerung der Effizienz von Ertüchtigungs- und Sanierungsmaßnahmen die Anwendbarkeit des Schweißens detaillierter untersucht. Da durch örtliche Ertüchtigungsmaßnahmen sowohl strukturelle Systemänderungen als auch lokal metallurgische Veränderungen hervorgerufen werden können, ist die Wahl eines geeigneten Schweißverfahrens und dessen Anpassung besonders wichtig.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden häufig verwendete Altstahltypen hinsichtlich ihrer Gefügestrukturen untersucht, um allgemeingültige Aussagen zur Schweißbarkeit treffen zu können. Für den Puddelstahl, der vorwiegend bis 1900 in den Bauwerken eingesetzt wurde, konnte aufgrund der unregelmäßig verteilten lamellaren Schlackeneinschlüsse keine prinzipielle Schweißbarkeit ausgesprochen werden. Dagegen weist der Flussstahl in ausgewählten Bereichen des Profilquerschnittes, den sogenannten Speckschichten, eine prinzipielle Schweißbarkeit auf. In dieser Arbeit wurden anhand von Messungen an Flussstahlquerschnitten Speckschichtdicken und deren Streuungen ermittelt.

Stickstoff, der im gesamten Querschnitt konstant verteilt ist, verursacht eine transiente Versprödung des Werkstoffs. Daher wurde ein Spröbruchnachweis auf bruchmechanischer Basis in Anlehnung an DAST-RICHTLINIE 009 entwickelt.

Infolge der Speckschichtdicken war eine Anpassung des gewählten Lichtbogenhandschweißverfahrens in Hinblick auf die Einbrandtiefe erforderlich. Im Laborversuch wurden in Abhängigkeit von der eingebrachten Streckenenergie die zugehörigen Einbrandtiefen ermittelt. Durch die vergleichende Gegenüberstellung von vorhandenen Speckschichtdicken und Einbrandtiefen wurde der maximale Energieeintrag unter besonderer Berücksichtigung einer praxisgerechten Umsetzung definiert. Die zur Durchführung einer „altstahlgerechten“ Schweißung zu verwendenden Schweißparameter wurden dafür experimentell ermittelt.

Zur Untersuchung der Eignung einer solchen Schweißverbindung für nicht ruhende Beanspruchung wurden Ermüdungsversuche an geschweißten Flussstahlproben durchgeführt. Die ermittelten Bruchlastwechselzahlen waren bei gleicher Kerbgrundbeanspruchung und Bauteilform denen heutiger Baustähle ähnlich. Damit wurde gezeigt, dass eine erfolgreiche Schweißung an Flussstählen prinzipiell möglich ist.

Zur Quantifizierung der Vorgeschichtseinflüsse auf die Lebensdauer wurden weitere Versuche durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass die Vorgeschichte keinen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer der neu eingebrachte Kerbe ausübt.

---

Der Einfluss der Alterung infolge Stickstoff auf die erreichbare Lebensdauer der geschweißten Verbindung wurde ebenfalls untersucht. Es zeigte sich, dass die gealterten im Vergleich zu ungealterten Proben keine Minderung der erreichbaren Ermüdungsfestigkeit erfuhren.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1	VERANLASSUNG .....	1
1.2	ZIELSETZUNG .....	2
1.3	STAND DER FORSCHUNG .....	2
1.4	DEFINITIONEN .....	4
<b>2</b>	<b>BAUSTAHL VON 1860 – 1940</b> .....	<b>7</b>
2.1	PROBLEMSTELLUNG – MOTIVATION.....	7
2.2	EISEN- UND STAHLERZEUGUNG .....	7
2.2.1	Stahlherstellung .....	7
2.2.1.1	Puddelstahl .....	7
2.2.1.2	Flussstahl.....	8
2.2.2	Verfahrensanteile an der Stahlherstellung.....	9
2.3	WALZTECHNIK .....	10
2.3.1	Effiziente Walzprozesse .....	10
2.3.2	Walzgutinhomogenitäten .....	13
2.3.3	Werkstoffprüfung – Qualitätskontrollen im Walzbetrieb .....	14
2.3.4	Materialumschichtung infolge Walzen .....	16
2.3.5	Fazit .....	18
2.4	METALLURGISCHE BESONDERHEITEN.....	18
2.4.1	Speckschichten und Seigerungen in Flussstählen .....	18
2.4.1.1	Entstehung und Auswirkung von Seigerungen .....	19
2.4.1.2	Entstehung und Auswirkung von Hohlräumen.....	22
2.4.2	Chemische Zusammensetzung .....	23
2.4.2.1	Puddelstahl .....	23
2.4.2.2	Flussstahl.....	24
2.4.3	Transiente Werkstoffeigenschaften des Flussstahls .....	26
2.4.3.1	Definition und Auswirkung .....	26
2.4.3.2	Weiterführende Untersuchungen .....	29
2.5	MECHANISCH-TECHNOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN.....	29
2.5.1	Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung und -zähigkeit.....	29
2.5.2	Sprödbrechneigung .....	30

---

<b>3</b>	<b>ERTÜCHTIGUNGEN</b> .....	<b>32</b>
3.1	BEGRIFFSBESTIMMUNG.....	32
3.2	ANALYSE UND BEWERTUNG DES BAULICHEN ZUSTANDS .....	33
3.3	ERTÜCHTIGEN VON BAUTEILEN .....	34
3.4	VARIANTEN DES KRAFTSCHLÜSSIGEN FÜGENS.....	35
3.4.1	Nieten / Schrauben .....	35
3.4.2	Schweißen .....	35
3.4.3	Löten – Kleben.....	36
3.4.4	Maschinenbaumäßige Verbindungen .....	37
3.5	ALTSTAHLGEEIGNETE FÜGEVERFAHREN.....	38
3.5.1	Allgemein .....	38
3.5.2	Fazit .....	38
<b>4</b>	<b>UNTERSUCHUNGEN AN FLUSSSTAHL</b> .....	<b>39</b>
4.1	SPECKSCHICHTDICKENBESTIMMUNG AN FLUSSSTÄHLEN .....	39
4.1.1	Motivation und Vorgehensweise .....	39
4.1.2	Untersuchungsergebnisse und Fazit .....	41
4.1.3	Verifikation der Messergebnisse.....	45
4.2	SPRÖDBRUCHNACHWEIS NACH DAST-RI 009.....	46
4.2.1	Vorgehensweise .....	46
4.2.2	Ergebnisauswertung und Fazit .....	51
<b>5</b>	<b>FÜGEN DURCH SCHWEIßEN</b> .....	<b>54</b>
5.1	STAND DES SCHWEIßENS UM 1900 .....	54
5.2	SCHWEIßEIGNUNG .....	54
5.2.1	Begriffsdefinition .....	54
5.2.2	Beurteilung des Baustahls von 1860 – 1940 .....	56
5.2.2.1	Erfahrungen mit alten Baustählen.....	56
5.2.2.2	Zitate aus dem Schrifttum um 1900 .....	57
5.2.2.3	Puddelstahl .....	57
5.2.2.4	Flussstahl.....	59
5.3	SCHWEIßVERFAHREN.....	60
5.3.1	Anforderungen an das Schweißverfahren .....	60
5.3.2	Wahl des Schweißprozesses.....	60
5.4	SCHWEIßZUSATZWERKSTOFFE.....	60



---

5.5	SCHWEIßNAHTVORBEREITUNG, -AUFBAU UND -NACHBEHANDLUNG .....	61
5.6	EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG VON EINBRANDTIEFEN .....	62
5.6.1	Gegenstand der Untersuchungen und Vorgehen .....	62
5.6.2	Ergebnisse.....	63
5.7	ERFORDERLICHE EINBRANDTIEFEN/VORHANDENE SPECKSCHICHTEN.....	68
5.7.1	Schlussfolgerungen für die Schweißung .....	68
5.7.2	Maßnahmen zur Ertüchtigung .....	70
5.8	EIGENSPANNUNGEN INFOLGE SCHWEIßEN.....	72
5.8.1	Allgemeines .....	72
5.8.2	Eigenspannungsberechnung .....	72
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTELLE VERIFIKATION.....</b>	<b>79</b>
6.1	STRATEGIE.....	79
6.2	EINFLUSS DER VORGESCHICHTE AUF DIE REPARATURSCHWEIßUNG .....	79
6.2.1	Phänomenologie der Rissbildung und des Risswachstums .....	80
6.2.2	Vorgehensweise .....	83
6.2.3	Generierung des Ersatzbauteils .....	85
6.2.3.1	Allgemeines .....	85
6.2.3.2	Verwendung des Kerbspannungskonzepts .....	85
6.2.3.3	Ermittlung der Kerbgeometrie des Ersatzbauteils.....	88
6.2.4	Beanspruchungen zur Einprägung der Vorgeschichte .....	91
6.2.5	Versuchsdurchführung.....	95
6.2.6	Versuchsergebnisse .....	98
6.2.7	Fazit.....	102
6.3	LEBENSDAUERERMITTLUNG AN SCHWEIßVERBINDUNGEN.....	103
6.3.1	Vorgehensweise .....	103
6.3.2	Probenherstellung.....	107
6.3.3	Versuchsdurchführung.....	109
6.3.4	Versuchsergebnisse .....	113
6.3.4.1	Auswertung der Laborergebnisse .....	113
6.3.4.2	Fraktografische Untersuchungen.....	116
6.3.5	Übertragbarkeit auf größere Bauteile .....	118
6.3.6	Fazit.....	119

---

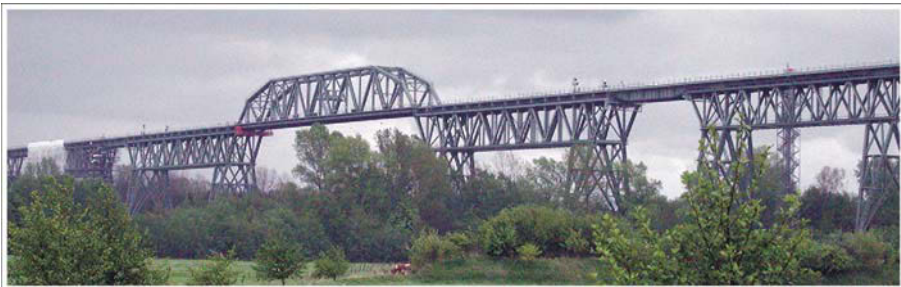
6.4	LEBENSDAUERERMITTLUNG AN GEALTERTEN SCHWEIßVERBINDUNGEN .....	120
6.4.1	Vorgehensweise und Versuchsdurchführung .....	120
6.4.2	Versuchsergebnisse und Fazit .....	122
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>125</b>
<b>8</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>128</b>
<b>9</b>	<b>UNTERSUCHUNGEN AN FLUSSSTAHL – ANHANG .....</b>	<b>139</b>
9.1	SPECKSCHICHTDICKENBESTIMMUNG AN FLUSSSTÄHLEN .....	139
9.1.1	Statistische Auswertung der Speckschichtdicken von Flusstählen.....	139
<b>10</b>	<b>FÜGEN DURCH SCHWEIßEN – ANHANG.....</b>	<b>160</b>
10.1	EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG VON EINBRANDTIEFEN .....	160
10.1.1	Messwerte der Einbrandtiefen .....	160
<b>11</b>	<b>EXPERIMENTELLE VERIFIKATION – ANHANG.....</b>	<b>166</b>
11.1	EINFLUSS DER VORGESCHICHTE AUF DIE REPARATURSCHWEIßUNG.....	166
11.1.1	Mechanisch-Technologische Eigenschaften des verwendeten Flusstahls .	166
11.1.2	Chemische Zusammensetzung des verwendeten Flusstahls.....	167
11.1.3	Versuchsergebnisse .....	168
11.2	LEBENSDAUERERMITTLUNG AN SCHWEIßVERBINDUNGEN.....	169
11.2.1	Chemische Zusammensetzung des verwendeten Flusstahls.....	169
11.2.2	Versuchsergebnisse der geschweißten Laborproben .....	170
11.2.3	Versuchsergebnisse der geschweißten, gealterten Laborproben .....	171

# 1 Einleitung

## 1.1 Veranlassung

Die Aufgaben des Bauwesens erfahren derzeit einen Strukturwandel. Lagen beispielsweise noch vor einigen Jahren die Schwerpunkte in der Errichtung von neuen Bauwerken, ist derzeit ein deutlicher Trend zum Bauen im Bestand erkennbar, der sich gegenüber dem Neubau aus Wirtschaftlichkeitsgründen ableitet. Hierunter sind insbesondere die Pflege der Bauwerke, dessen Anpassung an veränderte Nutzungsbedingungen sowie Maßnahmen zur Verlängerung der Nutzungsdauer zu verstehen.

Eine wichtige Grundlage bei der ökonomischen Entscheidung für Reparaturarbeiten am Bestand oder für den Neubau ist die Bereitstellung innovativer Konzepte zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit bestehender Tragwerke. Hierbei sind insbesondere ermüdungsbeanspruchte Stahlbauwerke des Strassen- und Eisenbahnbaus aus der Zeit von 1860 bis 1940, wie beispielsweise in Bild 1–1 dargestellt, zu nennen. Bei diesen Tragwerken ist der Neubau stets mit teilweise kostspieligen Streckensperrungen und dem Rückbau der bestehenden Konstruktion verbunden.



*Bild 1–1: Eisenbahnhochbrücke über den Nord-Ostsee-Kanal in Hochdonn – Baubeginn 1915*

Im Zuge der Reparaturmaßnahmen muss oftmals bestehendes und beschädigtes Material durch Neumaterial ersetzt oder ergänzt werden. Für die Beteiligung der neu eingebrachten Bauelemente an der Lastabtragung kommt der kraftschlüssigen Verbindung zwischen Alt- und Neumaterial eine besondere Bedeutung zu.

Die Wahl eines geeigneten und effizienten Fügeverfahrens zur Verbindung bedarf der besonderen Berücksichtigung der vorhandenen Tragstruktur im Globalen sowie der metallurgischen Besonderheiten der Materialien im Lokalen.

Das Schweißen hat sich im Stahlbau als besonders wirtschaftliches Fügeverfahren etabliert, findet jedoch bei der Reparatur der Altstahltragwerke nur rudimentär Verwendung. Es erscheint daher aus ökonomischer Sicht als sinnvoll, dieses Fügeverfahren in Bezug auf Reparaturmaßnahmen weiter zu entwickeln.

## **1.2 Zielsetzung**

Zur Steigerung der Effizienz von Ertüchtigungs- und Sanierungsmaßnahmen soll die Anwendbarkeit des Schweißens als etabliertes Fügeverfahren im Stahlbau detaillierter untersucht werden.

Die Gesamtkonzeption der Arbeit ist Bild 1–2 zu entnehmen. Als ein Ziel dieser Arbeit werden die verschiedenen Typen an Altstähle hinsichtlich ihrer Gefügestrukturen untersucht, um möglichst jeweilig allgemeingültige Aussagen zur Schweißseignung treffen zu können. Die wesentlichen Prozesse der Stahl- und Halbzeugherstellung, die die Gefüge- und Struktureigenschaften der Altstähle beeinflussen, erfahren eine gesonderte Erläuterung.

Bei der Schweißung am bestehenden Tragwerk werden neben Kerben und metallurgischen Gefügeänderungen auch zusätzliche Eigenspannungen induziert – die Gefahr des unvorangekündigten, verformungslosen Sprödbruchs steigt. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Altstähle sollen in Hinblick auf ausreichende Sicherheit gegen Sprödbruch gesondert betrachtet werden.

Ein weiterer Schwerpunkt besteht in der Erforschung und positiven Beeinflussung der beim Schweißen ablaufenden Prozesse, die sich entscheidend auf die Güte der Verbindung ausüben. Hieraus entsteht eine Adaption des Schweißprozesses hin zur „altstahlkonformen“ Schweißung.

Die erreichbare Güte der Schweißverbindung soll an geschweißten Proben im zyklischen Einstufenversuch durch Vergleich der erreichbaren Schwingenspiele mit heutigen Baustählen gleicher Festigkeit verifiziert werden.

Der Einfluss der Vorgeschichte ist in Hinblick auf eine ingenieurmäßige Bemessung bestehender und ertüchtigter Konstruktionen zu untersuchen.

## **1.3 Stand der Forschung**

Derzeit besteht in der Fachwelt eine große Diskrepanz hinsichtlich der Möglichkeit des Fügens durch Schweißen an Altstahl. Im Schrifttum werden zum Schweißen Möglichkeiten offeriert, die teilweise widersprüchlich sind. Im Allgemeinen wird der Altstahl als Werkstoff sehr stark pauschalisiert, und daher wird von der Schweißung abgeraten, vgl. Kapitel 5.

Im Rahmen dieser Arbeit soll daher systematisch die Möglichkeit des Schweißens an Altstahl, mit den wesentlichen Einflüssen auf den Grundwerkstoff auswirkend, untersucht werden.

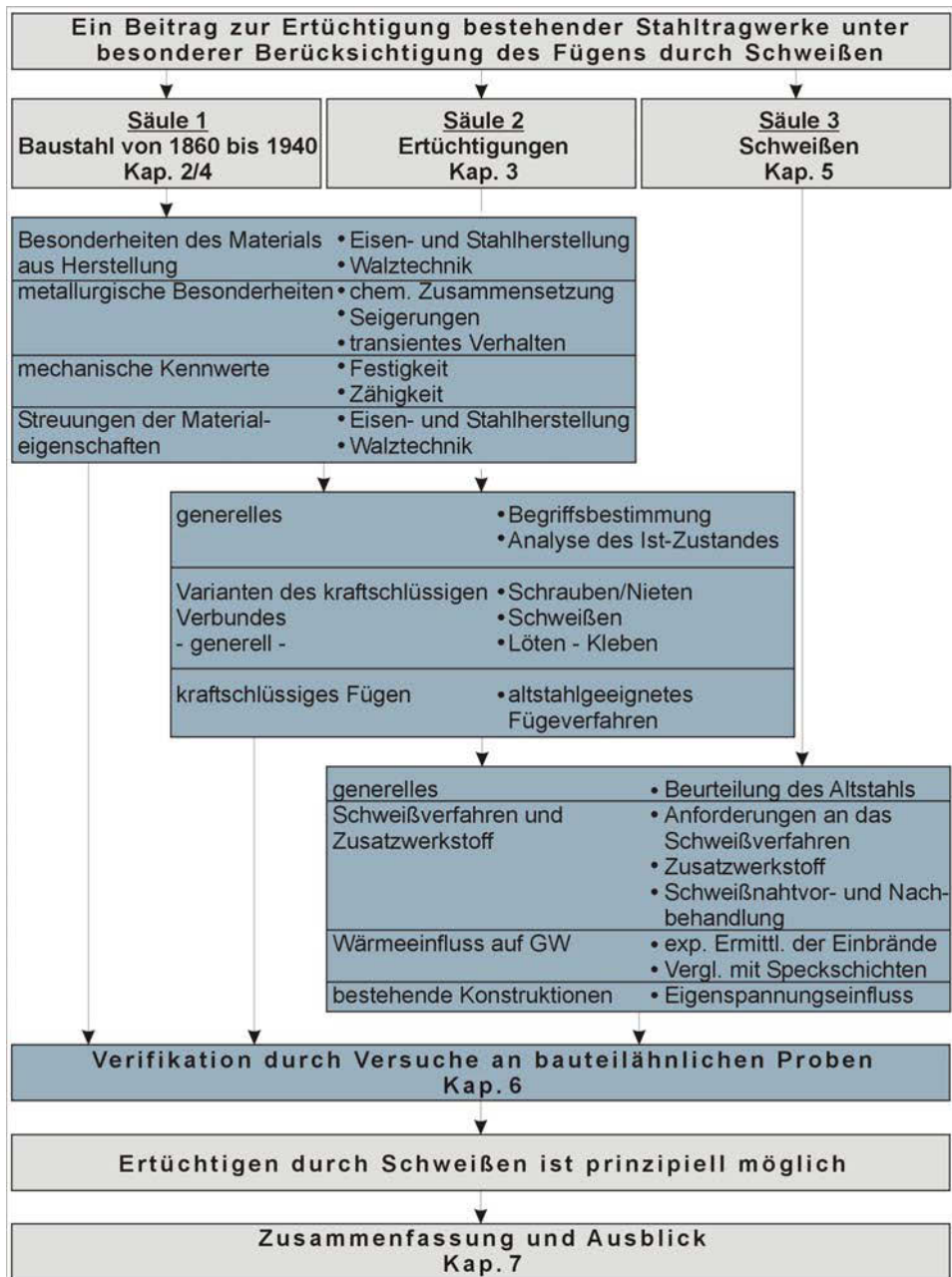


Bild 1–2: schematische Darstellung der Gliederung der Arbeit

## **1.4 Definitionen**

### ***Altstahl***

Als Altstahl wird im Rahmen dieser Arbeit der Baustahl bezeichnet, der bis 1940 verbaut wurde. Die grundsätzlichen Typen Puddelstahl und Flussstahl werden als relevante Vertreter der Epochen bis 1940 detaillierter untersucht.

### ***Neustahl***

Der Neustahl repräsentiert die Baustähle, die nach derzeitig gültigen Normen für den Bau von Stahltragwerken Verwendung finden.

### ***Kalibrierung***

Während des Walzens von Profilen durchläuft das Material mehrere Phasen, in den es sich ständig dem gewollten Endquerschnitt nähert. Der jeweilige Walzschritt zur Formgebung wird Kalibrierung genannt, vgl. [WEIß 1911], [VDE 1929] und [DAEL 1902].

### ***Stichzahl***

Die für die Walzung eines Profils erforderlichen Anzahl an Kalibrierungen wird als Stichzahl bezeichnet, vgl. [WEIß 1911], [VDE 1929] und [DAEL 1902].

### ***Stauchstich***

Durch das Walzen verändern sich die Abmessungen des zu walzenden Materials. Beim Stauchstich wird die Profilhöhe vermindert, ohne die weiteren Profilabmessungen zu verändern, vgl. [WEIß 1911], [VDE 1929] und [DAEL 1902].

### ***Lunker***

Die Volumenkontraktion des Werkstoffs beim Abkühlen vom flüssigen in den festen Zustand wird als Schwinden bezeichnet. Die weitere Volumenverringern im festen Zustand wird Schrumpfen genannt. Beim Schwinden kann es zur Hohlräumbildung kommen, wenn der feste Körper nicht mehr vollständig das Flüssigkeitsvolumen ausfüllt, vgl. [BARG 1983]. Diese Hohlräume werden als Lunker bezeichnet.

### ***Gleitbruch***

Unter Gleitbruch wird eine Werkstofftrennung meist unter Schubspannungen verstanden, die unter Ablauf plastischer Verformungen erfolgt, wobei mikroskopisch grundsätzlich drei Phasen unterschieden werden, die den Bruchvorgang bestimmen. Dies sind die Hohlräumbildung, der Hohlraumwachstum und das Zusammenwachsen der Hohlräume untereinander bzw. mit der Risspitze bei Vorliegen eines rissbehafteten Bauteils. Der Gleitbruch versteht sich als mikroskopische Betrachtungsweise des Bruchvorgangs, vgl. [LANG 1996].

### **Spaltbruch**

Unter Spaltbruch wird die Werkstofftrennung senkrecht zur Hauptnormalspannungsrichtung entlang von Kristallebenen geringer Packungsdichte verstanden. Es tritt wegen des Fehlens von Gitterebenen hoher Packungsdichte hauptsächlich bei Metallen mit kubisch raumzentriertem Gitter auf. Daher ist bei ferritischen Stählen mit abnehmender Temperatur ein Übergang vom Gleit- zum Spaltbruch zu verzeichnen. Bei den kubisch flächenzentrierten Gittern von austenitischen Stählen tritt dieser Übergang nicht ein. Der Spaltbruch erfolgt zumeist transkristallin. Bei Anlagerung, beispielsweise von Phosphor, kann infolge der auftretenden Korngrenzenversprödung ein interkristalliner Bruch entstehen. Der Spaltbruch versteht sich als mikroskopische Betrachtungsweise des Bruchvorgangs. Er kann bei makroskopisch verformungsarmen Brüchen und bei Brüchen, denen ein Anteil von Fließen vorausgegangen ist, vorhanden sein, vgl. [LANG 1996].

### **Duktiler Bruch**

Der duktile Bruch ist ein Bauteilversagen, das makroskopisch mit größeren Verformungen einhergeht. Vor dem Bruch wird mindestens im Nettoquerschnitt die Fließgrenze erreicht. Daher ist beim Versagen mindestens von einem lokal plastischen Verhalten auszugehen, vgl. [GEIß 1995].

### **Sprödbbruch**

Der Sprödbbruch bezeichnet ein makroskopisch verformungsarmes Versagen von Bauteilen noch vor dem Erreichen der Fließgrenze im Nettoquerschnitt. Damit wird Bauteilversagen nach global elastischem Verhalten oder nach Auftreten von Kleinbereichsfließen als Sprödbbruch bezeichnet, vgl. [KÜHN 2005].

### **Zähigkeit**

Als Kennzeichen der Zähigkeit wird die bei der Verformung bis zum Bruch aufgenommene Arbeit bezeichnet. Die Zähigkeit gibt die Fähigkeit eines Werkstoffs an, Verformungsarbeit aufzunehmen und sich plastisch zu verformen. Zähle Werkstoffe erlauben größere Verformungen bis zum Bruch als spröde Werkstoffe. Durch im Werkstoff befindliche Ungängen, wie Kerben oder Risse, entstehen höhere Beanspruchungen und damit höhere Anforderungen an die Zähigkeit.

Die Zähigkeit kann anhand von Kerbschlagbiegeproben, bruchmechanischen Versuchen und durch die Einschnürung beim Zugversuch bestimmt werden, vgl. [KÜHN 2005].

### **Temperaturübergangsbereich**

Der Temperaturübergangsbereich ist der Bereich der Zähigkeits-Temperatur-Kurve, in dem die Materialzähigkeit mit abnehmender Temperatur stark abfällt und die Versagensart vom duktilen Bruch zum spröden Bruch wechselt, vgl. [BERG 1989].

***Hochlage***

Die Hochlage ist der Bereich der Zähigkeits-Temperatur-Kurve, in dem Stahlbauteile ihr volles elastisch-plastisches Verhalten aufweisen und ein duktiler Bruch vorliegt, unabhängig von kleinen Fehlern im Grundmaterial oder auch kleinen Schweißnahtfehlern, die aus der Fabrikation resultieren, vgl. [BERG 1989].

***CEGB-R6-Diagramm***

Das CEGB-R6-Diagramm ist ein von HARRISON entwickeltes Verfahren, mit dem sowohl sprödes als auch duktiler Bruchverhalten abgeschätzt werden kann. Der Übergang vom linear-elastischen zum plastischen Bauteilverhalten wird im „Failure-Assessment-Diagramm“ (FAD) durch eine geometrieunabhängige Grenzkurve beschrieben. Die Eingangsgrößen zur Benutzung dieses Diagramms sind auf der Ordinate die elastische Beanspruchung an der Rissspitze, ausgedrückt als Spannungsintensitätsfaktor  $K$ , normalisiert durch den entsprechenden bruchmechanischen Werkstoffkennwert  $K_{IC}$ , und auf der Abszisse die aufgebrachte Beanspruchung, normalisiert mit der Beanspruchung, bei der Fließen im Nettoquerschnitt auftritt, vgl. [KÜHN 2005].



## **2 Baustahl von 1860 – 1940**

### **2.1 Problemstellung – Motivation**

In Hinblick auf die durchzuführenden Schweißungen wird im Kapitel 2 der Baustahl in seinen wesentlichen metallurgischen und mechanischen Eigenschaften beschrieben und dessen Streuungen beurteilt. Die Stahlherstellung und Walztechnik beeinflussen die Eigenschaften der Stähle und speziell deren Streuungen. Daher werden diese Prozesse in Hinblick auf die damaligen qualitätssichernden Maßnahmen untersucht. In diesem Zusammenhang wird besonders die Entstehung und Verteilung der Konzentrationsunterschiede der chemischen Begleitelemente im Flusstahlquerschnitt betrachtet, um hieraus Bereiche für mögliche Schweißungen zu detektieren.

### **2.2 Eisen- und Stahlerzeugung**

#### **2.2.1 Stahlherstellung**

##### **2.2.1.1 Puddelstahl**

Der Puddelstahl, 1784 von HENRY CORT entwickelt, stellte bis zum Ende des 19. Jahrhunderts den Hauptanteil des produzierten Stahls, vgl. Bild 2–1.

Bei der Herstellung des Puddelstahls wurde das Roheisen über die Liquiduslinie erhitzt. Durch die Abführung des in der Schmelze befindlichen Kohlenstoffs durch den Vorgang des Frischens ( $\text{FeC} + \text{O} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$ ) steigt die Liquiduslinie des noch in der Schmelze befindlichen Gemischs aus Eisen und Begleitelementen. Die Wärmeleistung der verwendeten fossilen Brennstoffe genügte nicht, um dieses Gemisch auf höhere Temperaturen aufzuheizen. Zur weiteren Austreibung des Kohlenstoffs bedarf es jedoch fortwährend eines schmelzflüssigen Zustands, der durch das Rühren (engl.: rühren – to puddle) erreicht werden konnte. Die Schmelze wurde weiterhin mit Luft versorgt. Infolge geringerer Dichte der Schlacken lagerten sich diese im oberen Bereich der Schmelze ab. Durch den Rührvorgang erfolgte erneut eine Vermischung zwischen Schmelze und Schlacke. Da sich die Schmelze in einem zähflüssigen Zustand befand, wurde das erneute Ansammeln der Schlacke im oberen Bereich der Schmelze verhindert. Im kohlenstoffarmen Stahl verblieben Schlacken zurück, die sich willkürlich in den Luppen wiederfinden. Weitere Begleitelemente wie Phosphor und Stickstoff wurden beim Puddelstahl, der ein ferritisches Gefüge mit sehr geringen Anteil an Perlit aufweist, unzureichend abgeführt.

Durch das Aufeinanderstapeln und nachfolgender Bearbeitung mit dem Schmiedehammer entstand aus den einzelnen, sich nahe der Liquidustemperatur befindlichen Luppen durch Verschmelzen, auch als Verschweißen bezeichnet, Blöcke. Schlacken wurden durch das Hämmern teilweise ausgetrieben. Die in den Blöcken verbliebene Schlacke erfuhr durch den

## **2 Baustahl von 1860 – 1940**

### **2.2 Eisen- und Stahlerzeugung**

---

anschließenden Walzvorgang einen richtenden Einfluss. Es traten längs zur Walzrichtung Schlackenzeilen auf, die über den gesamten Querschnitt verteilt sind. Die Festigkeitseigenschaften quer zur Walzrichtung unterscheiden sich durch den fehlenden Verbund signifikant von denen in der Längsrichtung. Die ausgeprägte Anisotropie der mechanischen Eigenschaften ist für den Puddelstahl charakteristisch.

Der Puddelstahl gilt aufgrund der zeitigen Schlackeneinschlüsse als relativ ermüdungsunempfindlich und ist korrosionsbeständiger als heutige Baustähle, vgl. [BRÜH 1989].

Eine Verbesserung der Qualität der erzeugten Stähle konnte durch die nachträgliche Einschmelzung in einem feuerfesten Tiegel erzeugt werden. Dieser Stahl war 5 bis 7 mal so teuer wie der unbehandelte Puddelstahl und dadurch für den materialintensiven Brückenbau wirtschaftlich nicht durchsetzbar.

#### **2.2.1.2 Flusstahl**

Aufgrund des steigenden Bedarfs an Stahl waren vorhandene Verfahren der Gewinnung, insbesondere das Puddeln mit einer Jahresleistung von fixen 600 t je Puddelofen, überfordert und konnten der gesteigerten Nachfrage nicht nachkommen.

Im Jahr 1855 stellte HENRY BESSEMER mit dem BESSEMER-Verfahren den ersten Flusstahl her, der den teuren Tiegelstahl durch eine preiswertere und effektivere Herstellung des Stahls durch Schmelzen des Roheisens im Flammofen unter Weiterverarbeitung in einem vorgewärmten Konverter, der BESSEMERbirne, ablöst, vgl. [WIEN 1996]. Um den Abbrand der Begleitelemente beim Frischen mit Sauerstoff zu beschleunigen, wurde im Konverter unterseitig Luft eingeblasen. Die BESSEMERbirne war sauer ausgekleidet.

Mit dem BESSEMERstahl konnte erstmalig ein hochwertiges Massenprodukt mit reproduzierbaren Eigenschaften und nahezu isotropen mechanischen Eigenschaften erzielt werden.

1878 kleidete SIDNEY THOMAS den Konverter mit gebranntem Kalk aus. Das damit entstandene THOMAS-Verfahren orientiert sich am BESSEMER-Verfahren, wobei die Kalkauskleidung des Konverters nicht mit dem Stahl und dem für die Phosphorbindung zugegebenen Kalk reagiert. Die Konzentration an Silizium, Kohlenstoff und Mangan ist bei THOMASstählen aufgrund der schnellen Verbrennung beim Blasen besonders gering.

Beim BESSEMER-Verfahren und beim THOMAS-Verfahren erfolgte die Frischung jeweils mit Luft. Dies führte bei beiden Stählen zu hohen Stickstoffgehalten.

Die Firmen KRUPP und BORSIG führten 1869 das SIEMENS-MARTIN-Verfahren ein. Aufgrund der Vorwärmung der zum Frischen benötigten Luft und der zum Brennen benötigten Gase konnten Temperaturen bis 1700°C erreicht werden. Dies ermöglichte erstmalig die Verarbeitung von Schrott. Die Konverter wurden anfänglich sauer, später basisch ausgekleidet. Durch den im Vergleich zum BESSEMER- und THOMAS-Verfahren verlängerten Frischvorgang von 5 bis 8 Stunden war es möglich, die Schmelze metallurgisch zu beeinflussen. Es entstanden qualitativ hochwertige und homogene Blöcke, die mit einem Phosphorgehalt von maximal 0,03 Gew.-% und einer Stickstoffkonzentration von maximal

0,008 Gew.-% einen gut kaltumformbaren und wenig alterungsanfälligen Stahl ergaben. Infolge der fossilen Regenerativfeuerung und in den Ofenraum gelangender Schwefeloxide weist der SIEMENS-MARTIN-Stahl einen erhöhten Schwefelgehalt auf, vgl. [REIC 2000].

### 2.2.2 Verfahrensanteile an der Stahlherstellung

Mit der voranschreitenden Entwicklung und Normung der Walzprofile aus Stahl und dem zunehmendem Bewehren von Betonbauteilen entstanden neuartige Möglichkeiten des Bauens. Der Bedarf an Stahl stieg. Wurden im deutschen Zollgebiet 1877 an die 422.000 t Stahl erzeugt, waren es 1911 bereits 14.200.000 t, vgl. [REIC 2000].

Im Bild 2–1 ist die produzierte Stahlmenge einzelner Stahlherstellungsverfahren im Vergleich zur Gesamtstahlproduktion der Epoche aufgetragen. Mit dem Beginn der Flusstahlerstellung durch das BESSEMER-Verfahren sank der Puddelstahlanteil kontinuierlich. Das BESSEMER-Verfahren verzeichnet seine Blütezeit um 1880. Danach ist aus den in Kapitel 2.2.1.2 genannten Gründen ebenfalls ein Abfall erkennbar.

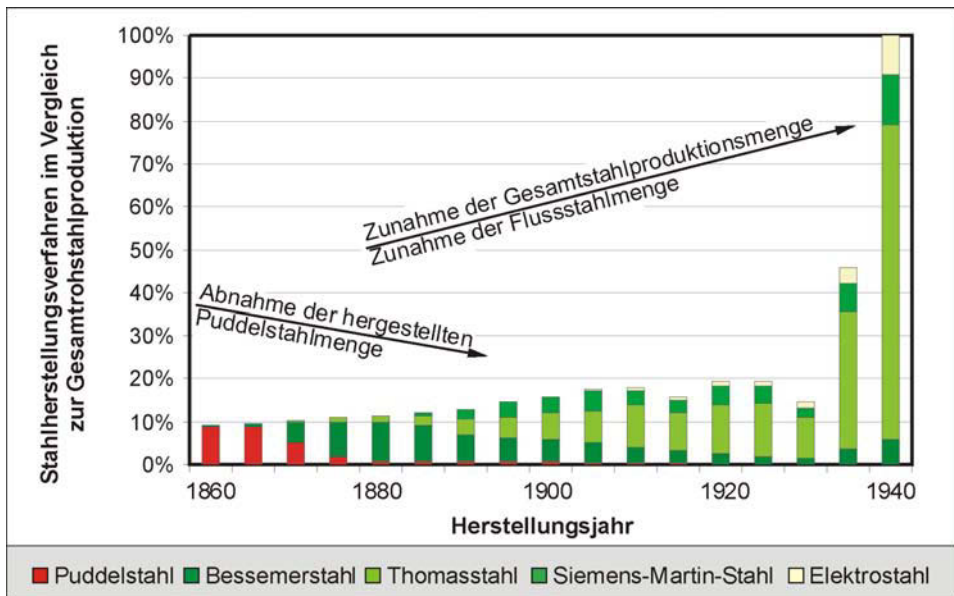


Bild 2–1: Stahlherstellung; Darstellung auf Grundlage von [BURG 1983]

Der THOMAS-Stahl wird ab etwa 1910 vom SIEMENS-MARTIN-Stahl aufgrund der verbesserten mechanisch-technologischen Eigenschaften verdrängt.

In den Stahlkonstruktionen des Hochbaus ist bis ca. 1908 und im Stahlbrückenbau in der Regel bis etwa 1900 Puddelstahl zu finden, da die Anforderungen an die im Brückenbau einzusetzenden Stähle im Vergleich zu denen im Hochbau höher waren, vgl. [NORM 1893], [VORS 1893], [BEST 1910] und [BESO 1912].

## 2.3 Walztechnik

### 2.3.1 Effiziente Walzprozesse

Im Bild 2–2 ist der durch Walzung des Ausgangsquerschnitts – dem Block – entstandene Endquerschnitt als Doppel-T- und U-Profil erkennbar (NP – Normalprofil).

WEIßENBERG beschäftigte sich mit dem Stand der Technik in den Walzbetrieben, vgl. [WEIß 1911]. Ziel seiner Untersuchungen war die Vereinheitlichung und Standardisierung der Erfahrungen bezüglich Konfiguration und Kalibrierung von Walzstraßen.

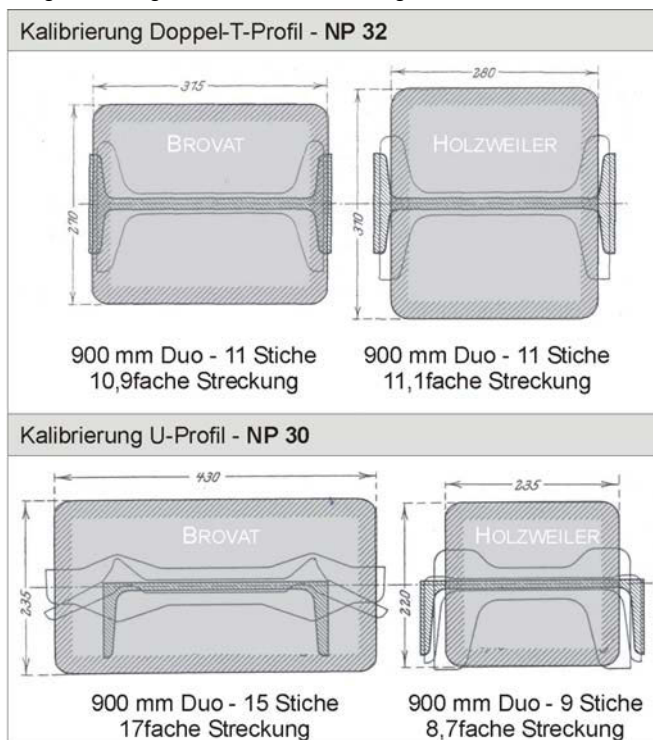


Bild 2–2: Kalibrierung von Profilen aus unterschiedlichen Querschnitten der Blöcke (NP 32) sowie Kalibrierung nach grundsätzlich verschiedenen Fabrikationscharakteren (NP 30); Darstellung auf Grundlage von [WEIß 1911]

Die Grundforderung für das Kalibrieren definiert WEIßENBERG als Ausbildung des Endprofils aus dem Anfangsprofil ohne schädliche Beeinflussung der Materialeigenschaften sowie ohne Fabrikationsspannungen bei geringer Stichzahl und niedrigem, möglichst gleichmäßigem Gesamtenergieverbrauch. Die Bezeichnung Fabrikationsspannung steht für die während der Walzung eingepprägten Eigenspannungen.

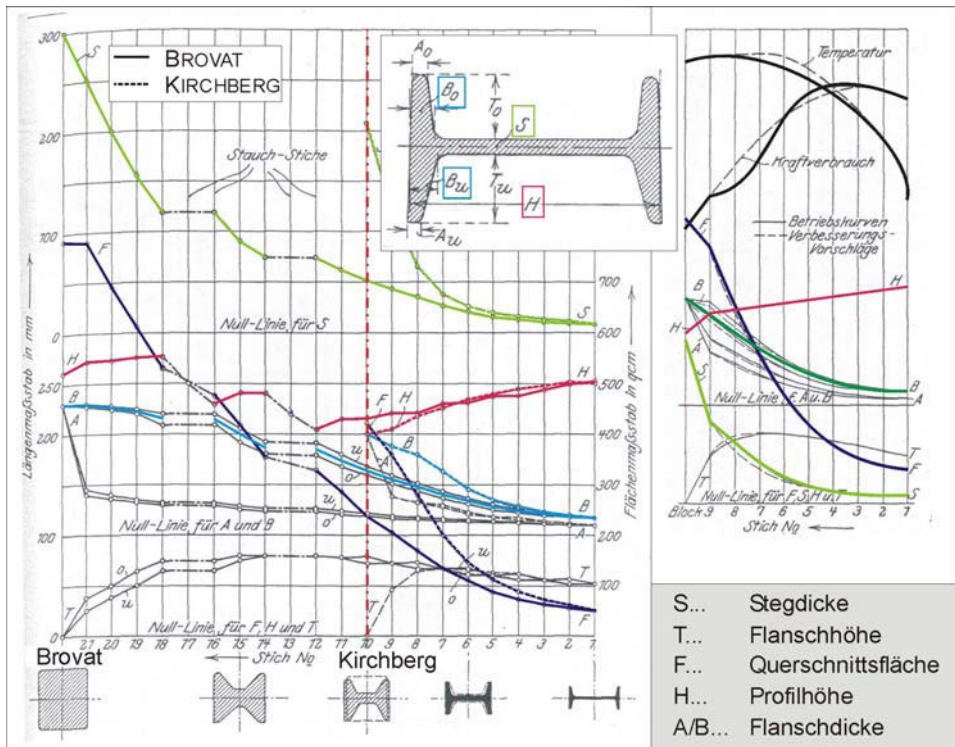


Bild 2–3: links – Kalibrierung von NP 25 im Vergleich zweier unterschiedlicher Walzprozesse nach BROVAT und KIRCHBERG; rechts – Kalibrierung mit zusätzlicher Information über Temperatur und Energieverbrauch; Darstellung auf Grundlage von [VDE 1929]

Es wird festgestellt, dass die Walztemperatur und das verwendete Blockmaterial den Kraftverbrauch beim Walzen entscheidend beeinflussen, wobei deren empirische Beschreibung unter Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren, wie beispielhaft im Bild 2–3 enthalten, zu diesem Zeitpunkt aufgrund der Komplexität nicht möglich war.

Um eine Vergleichbarkeit der Kalibrierschritte einzelner Profilquerschnitte untereinander gewährleisten zu können, wird nach HOLLENBERG eine graphische Auftragung der Kurven gewählt, vgl. Bild 2–3. Der gleichmäßige und harmonische Verlauf der Kurven der Querschnittsabmessungen ist ein Maß für die Güte des entstehenden Profils, vgl. [WEIß 1911].

Durch die im Bild 2–3 exemplarisch für ein Doppel-T-Profil NP 25 aufgetragenen Kurven der Querschnittsabmessungen werden die wesentlichen, die Kalibrierung betreffenden Daten übersichtlich dargestellt. Die Kurven weisen, mit Ausnahme des ersten Stiches sowie der Stauchstiche, einen stetigen Verlauf auf. Im ersten Stich wird aufgrund der Ungleichheit des eingeführten Blocks eine Vereinheitlichung vorgenommen. Weitere Unstetigkeitsstellen in

## 2 Baustahl von 1860 – 1940

### 2.3 Walztechnik

den Kurven entstehen bei der Anwendung von erforderlichen Stauchstichen, die für die Einhaltung der Profilhöhe  $H$  unerlässlich sind.

Das Bild 2–3 zeigt einen weiteren Vorteil der graphischen Auftragung in Form der direkten Vergleichbarkeit zweier unterschiedlicher Kalibrierabfolgen. Als Endquerschnitt wird jeweils ein Doppel-T-Profil NP 25 erzeugt. Im direkten Vergleich fällt die geringere Stichanzahl beim KIRCHBERG'schen-Prozess auf, die auf einen kleineren Anfangsquerschnitt und auf höheren Temperaturen, mit erheblich größeren möglichen Streckungen arbeitend, zurückzuführen ist. Weitere Verbesserungen der graphischen Darstellungen ergeben sich, wie im Bild 2–3 gezeigt, durch die Auftragung zusätzlicher für den Walzprozess relevanter Parameter, wie Kraft- und Temperaturverbrauch. Durch die Anpassung der Walztemperatur und dem Walzdruck an einen stetigen Kurvenverlauf wurden die Verfahrensabläufe in Hinblick auf Effizienz und Ökonomie optimiert.

Die Fortschritte aus dieser Darstellungsmethode für die Entwicklung des Walzprozesses sind im Wegfall von Stauchstichen und in der Anpassung der Ausgangsquerschnitte an den Endquerschnitt zu erkennen. Optimierungskriterium ist hierbei das Walzen ohne Veränderung der mechanisch-technologischen Eigenschaften des Stahls, vgl. [WEIß 1911].

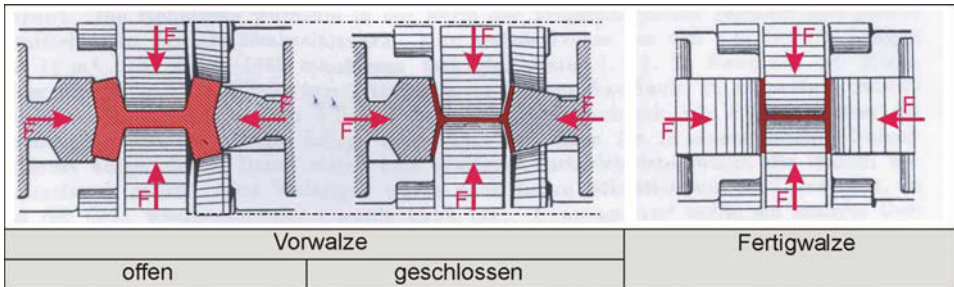


Bild 2–4: Walzprozess nach HUGO SACK; Darstellung auf Grundlage von [VDE 1929]

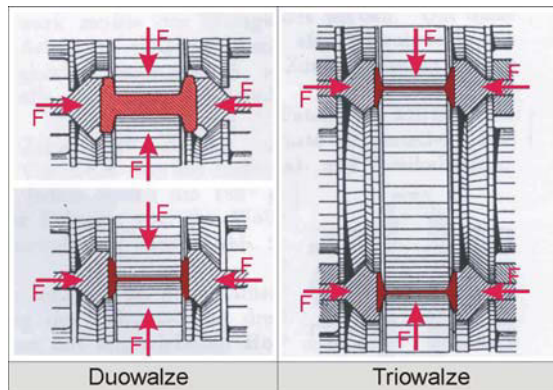


Bild 2–5: Duowalze und Triowalze nach HUGO SACK; Darstellung auf Grundlage von [VDE 1929]

Universalwalzwerke stellten seit dem Jahr 1883 die neue Generation von Walzwerken für die Profilverstellung dar. Im Walzwerk von SACK walzte das erste Universalgerüst die Flansche in schräger Lage aus, im Bild 2–4 im linken Teil schematisch erkennbar. Im zweiten Universalgerüst erfolgte die vertikale Ausrichtung der Gurte, vgl. Bild 2–4 rechts. Zur Vermeidung von entstehendem Walzgrat wurden die Walzen unsymmetrisch verbaut und das Walzgut nach jedem Stich  $180^\circ$  um die Längsachse gedreht.

Im wirtschaftlichen Vergleich erzielte die Duo-Walze die höhere Tagesleistung bei gegenüber der Trio-Walze verminderten Verschleiß. Die Mittelwalze des Trios ist gegenüber den Nachbarwalzen wegen der Doppelbeanspruchung bei jedem Walzdurchgang besonders verschleißempfindlich, vgl. Bild 2–5 und [DAEL 1902]. Die Walzgeschwindigkeit ist beim Duo höher. Hohe Ausfallzeiten infolge des Wechsels der Walzen werden beim einfacher aufgebauten Duo vermindert.

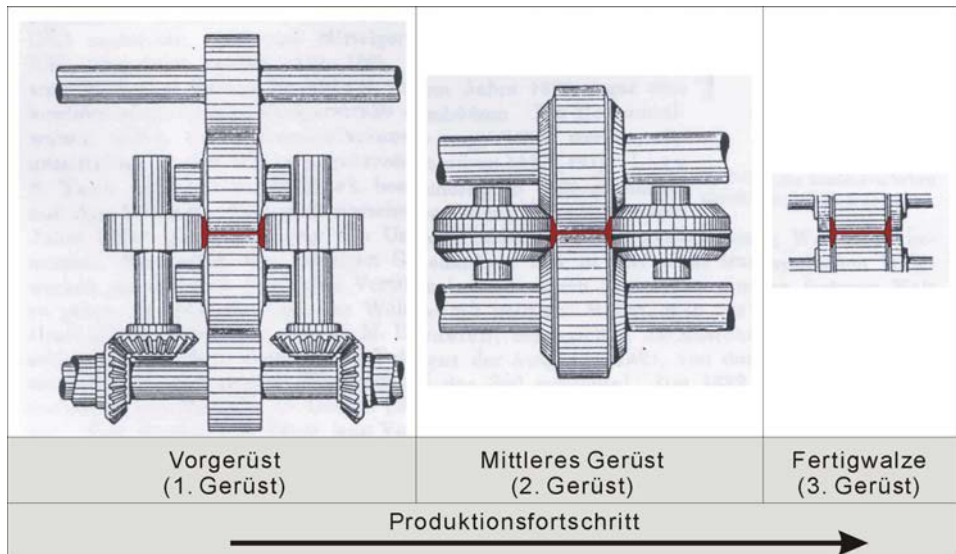


Bild 2–6: Walzstraße aus 3 Gerüsten nach KENNEDY und AIKEN; Darstellung auf Grundlage von [DAEL 1902]

Im Jahr 1889 schlugen KENNEDY und AIKEN die Bearbeitung des Walzgutes auf drei verschiedenen Gerüsten vor, vgl. Bild 2–6. Die grundsätzlichen Schwierigkeiten bestanden auch hier während des Walzens in der Entstehung von Grat an den Endquerschnitten und in der gebogenen Form der Träger.

### 2.3.2 Walzgutinhomogenitäten

Häufige im Walzgut auftretende Fehler sind einer Aufstellung nach REICHE nachfolgend kurz wieder gegeben, vgl. [REIC 2000].

Hierunter sind als wesentliche Fehler Abdrücke, Druckfältelungen, Einwalzungen, Flocken, Randblasen, Randentkohlung, Riefen, Risse, Schalen und Überwalzungen zu nennen.

Die Fehler sind nicht eindeutig einer Ursache zuzuordnen. Oftmals kann eine Kette mehrerer beteiligter Randbedingungen einen Fehler bewirken.

Die Ursachen hierfür sind in der Stahlherstellung und in der Kalibrierung zu suchen. Häufig sind die Fehler auf eine falsche Gießtemperatur, eine unangepasste Gießgeschwindigkeit und auf fehlerhaft eingestellte Erstarrungsbedingungen im Stahlwerk zurückzuführen. Im Walzwerk sind eine unsachgemäße Vorwärmung und die mechanische Beschädigung der Walzgutoberfläche Ursachen für Fehler.

Die genannten Fehler einschließlich Ursachen und Ursachenbehebung können Anfang des 20. Jahrhundert allesamt als bekannt vorausgesetzt werden. Literaturquellen, beispielsweise [ECKS 1971], [VDE 1929], [WEIß 1911], [DAEL 1902] und [REIC 2000], belegen dies hinreichend.

#### 2.3.3 Werkstoffprüfung – Qualitätskontrollen im Walzbetrieb

Anfang des 19. Jahrhunderts entstanden eine Vielzahl von Arbeiten zum Thema Festigkeitseigenschaften von Gusseisen. Die Untersuchungen wurden durch Eisenbahnunfälle in Verbindung mit Gusseisen in Gang gesetzt.

Im Jahr 1807 wurde der E-Modul definiert. Seit 1887 wird die Aufzeichnung der Arbeitslinie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm von MAEHTENS zur Charakterisierung des Stahls benutzt, vgl. [WERN 1992].

Obwohl 1782 die Metallurgie noch nicht in der Lage war, Auswirkungen des Gefüges auf die mechanischen Eigenschaften zu erklären, erwähnt RINMAN, dass die Härte der Gussstücke durch die Abkühlungsgeschwindigkeit zu steuern ist. Die unterschiedliche Härte ließ sich an der Helligkeit der Bruchfläche ablesen, vgl. [VDE 1929].

Chemische Analysen spielten zu Beginn des 19. Jahrhunderts in Hüttenwerken und Gießereien wegen der Schwerfälligkeit der Verfahren eine untergeordnete Rolle. 1860 dauerte die Bestimmung des Kohlenstoffgehalts mindestens zwölf Stunden und die Ermittlung des Mangangehalts zwei Tage, vgl. [HEYN 1906].

Erste Proben wurden bereits im Stahlwerk geprüft. Ein Teil der Qualitätsprüfung konnte bereits am Material vor dem Schmelzen erfolgen. Am hergestellten Block wurde die Qualität des Gusses kontrolliert. Für die Prüfung kamen optische Verfahren zum Einsatz, bei denen Fehler in der Oberfläche entdeckt werden konnten. Teilweise wurde der vergossene Block einer akustischen Prüfung durch Abklopfen mit Hammerschlag unterzogen, vgl. [WERN 1992]. Weitere Eckdaten sind die Gießtemperatur, Gießzeit sowie ab etwa 1900 die chemische Analyse. Nach einem Bericht von MEYER wurde zudem bei der Herstellung von Stahl gleichzeitig ein Kontrollstab mit zuvor definierten Abmessungen hergestellt und ein Biegeversuch durchgeführt, vgl. [VDE 1929].



Für den Walzprozess bedeutende Einflussgrößen untersuchte im Walzwerk eine eigene Werkstoffabteilung bereits während der Kalibrierung, insbesondere die für die Qualität verantwortliche Wärmebehandlung. Hierunter zählt die Temperatur beim Ziehen aus Gruben oder Wärmöfen sowie beim Walzen selbst und die Verzunderung im Ofen.

Bei einer Abweichung der Sollwerte wurde das Ofenpersonal verständigt und zu veränderter Feuerführung angewiesen. Bei hochwertigem Material wurden außerdem für jedes Produkt während der Verarbeitung Sichtkontrollen hinsichtlich auftretender Schuppen, Schalen, Blasen sowie Risse durchgeführt und ein Walzbericht oder eine Laufkarte ausgefüllt. Die aus Produktionsfehlern resultierenden Folgen für das Walzprodukt waren damals offensichtlich bekannt. So führt beispielweise eine ungleichmäßige Erwärmung zu einem Krummwalzen, auch Bäumen genannt, oder die Lunkerbildung zu sichtbaren schwarzen Stellen. Bei besonderen Qualitätsfragen wurde die Arbeit an ein Laboratorium übergeben. Durch diese durchgeführten Beobachtungen im laufenden Betrieb konnte der Produktionsprozess schnell angepasst und somit die Güte verbessert werden.

Als wesentlicher Bestandteil der Materialprüfung wird nachfolgend der Stand der Metallurgie um die Jahrhundertwende hin zum 20. Jahrhundert beschrieben, um die Möglichkeiten der Erzeugniskontrolle bei der Stahlherstellung aufzuzeigen.

GOERENS beschreibt die Vorteile der Metallurgie als ein Mittel, die gewünschten mechanisch-technologischen Eigenschaften des Stahls mit möglichst effizienten und preiswerten chemischen sowie mechanischen Behandlungen günstig zu beeinflussen, vgl. [GOER 1906]. Die junge Wissenschaft wurde zunehmend fester Bestandteil der Kontrollinstanzen der Hütten und Walzwerke.

Zum Ende des 19. Jahrhunderts ist die Erkennung von Seigerungen durch Untersuchungen an den Abschnitten des gewalzten Profils – jeweils am Kopf- und Fußende – mit Hilfe einer Ätzprobe mit einer Kupferammonchloridlösung möglich. Die geseigerten Bereiche werden durch eine Reaktion mit dem Werkstoff befindlichen Phosphor gefärbt. Hieraus konnten Rückschlüsse über die Wirkung der Kaliber gezogen werden. Zudem war eine fortwährende Überwachung des Seigerungsgrads in den Blöcken ohne Betriebsstörung möglich, vgl. [HEYN 1906].

Methoden zur Erkennung weiterer Begleitelemente waren bekannt. Durch Versuche, die TALBOT durchführte, wurde die Seigerungsneigung von Schwefel und Kohlenstoff, vgl. [HEYN 1906], bestimmt.

Die Wirkung des eingelagerten Wasserstoffs auf Eisen war ebenfalls bekannt. Die Härtebiegeprobe und die Abschreckbiegeprobe, wie sie beispielsweise für Kesselbleche verlangt wurden, charakterisierten die vorhandene Sprödigkeit.

Durch die Regelung der Abkühlungsgeschwindigkeit von gewalzten oder geglühten Werkstücken konnten die Festigkeitseigenschaften der Stähle verbessert werden.

Als Kenngröße für die Klassifikation der Stähle diente anfänglich die Zugfestigkeit in den verschiedenen Walzrichtungen für Schweiß-, Fluss- und Gusseisen sowie für Fluss- und Nickelstahl. Es wurden hieraus zulässige Spannungen für die Tragelemente eiserner Brücken, unterhalb der Elastizitätsgrenze liegend, bestimmt, vgl. [SCHA 1908].

#### 2.3.4 Materialumschichtung infolge Walzen

Mit dem Beginn des Walzens entstand zugleich Klärungsbedarf hinsichtlich mechanischer Wirkungsweisen in Interaktion der Walzen mit dem Walzgut und den stattfindenden Stoffverschiebungen. Erste Versuche zur Deutung der Beziehungen zwischen Verformung und Spannung, die im Bereich der Walzumformungen den elastischen Bereich des Materials zumeist verlassen, wurden von TRESCA in [TRES 1865] und von SAINT VENANT in [SAIN 1870] aufgestellt. Weitere Ansätze sind beispielhaft in [KIES 1914] und [LIß 1922] zu finden. Die genannten Autoren beschäftigten sich in ihren Arbeiten vorrangig mit der Ermittlung der für die Verformung des Walzgutes notwendigen Walzkräfte.

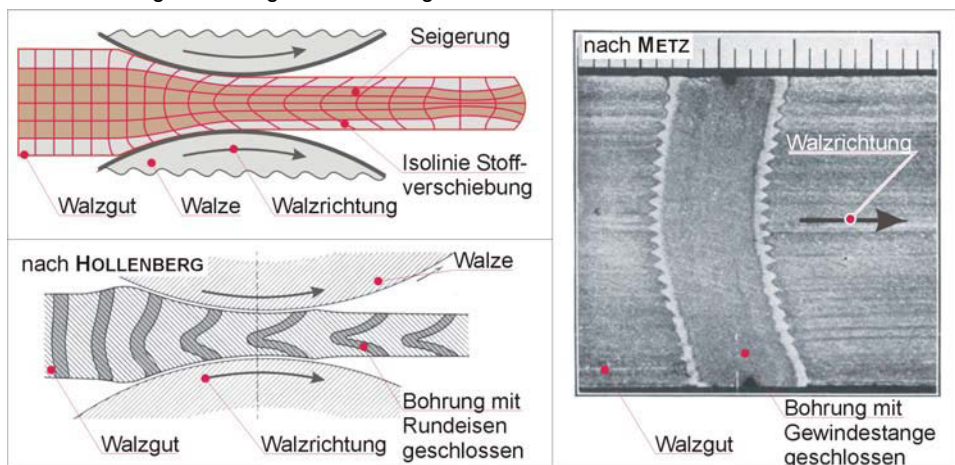


Bild 2–7: Stoffverschiebungen im Walzgut während der Kalibrierung; Darstellung auf Grundlage von [VDE 1929]

Der beim Walzen erzwungene Stofffluss im Walzgut wird in den Betrachtungen zum Energieaufwand beim Walzen als wesentlicher Einfluss mit berücksichtigt. Zur experimentellen Untersuchung der stattfindenden Stoffverschiebungen kamen verschiedene Modelle, beispielsweise aufgeschichtetes Porzellan nach KIECK oder geschichtete Flusstahlzylinder nach TRESCA, zur Anwendung, vgl. [VDE 1929]. Hiernach konnten Isolinien der Stoffverschiebungen festgestellt werden, die die grundsätzlichen Verformungsvorgänge im Walzgut klärten, vgl. Bild 2–7 oben links. Weiterführende experimentelle Untersuchungen nach HOLLENBERG bestätigten das Verformungsverhalten an einem Flusstahl, der vor dem Kalibrieren in einer äquidistanten Schrittweite aufgebohrt wurde und die Bohrlöcher mit einem Rundisen wieder verschlossen wurden, vgl. Bild 2–7 unten links. Auch hier findet eine Stauchung des Stabes, insbesondere in Blechdickenmitte, statt. Die Stauchung des Querschnitts erfolgt von den Randschichten zur Mitte hin zunehmend, was im Bild 2–7 insbesondere in der Abbildung nach METZ an der Abnahme der Gewindehöhe erkennbar ist. Dieses Verhalten ist auf den Oberflächeneinfluss der Walzen auf die Randschichten

zurückzuführen. Die Walzen stellen während der Kalibrierung eine Verformungsbehinderung dar. Hierdurch ist das „Wegfließen“ der Randschichten verhindert.

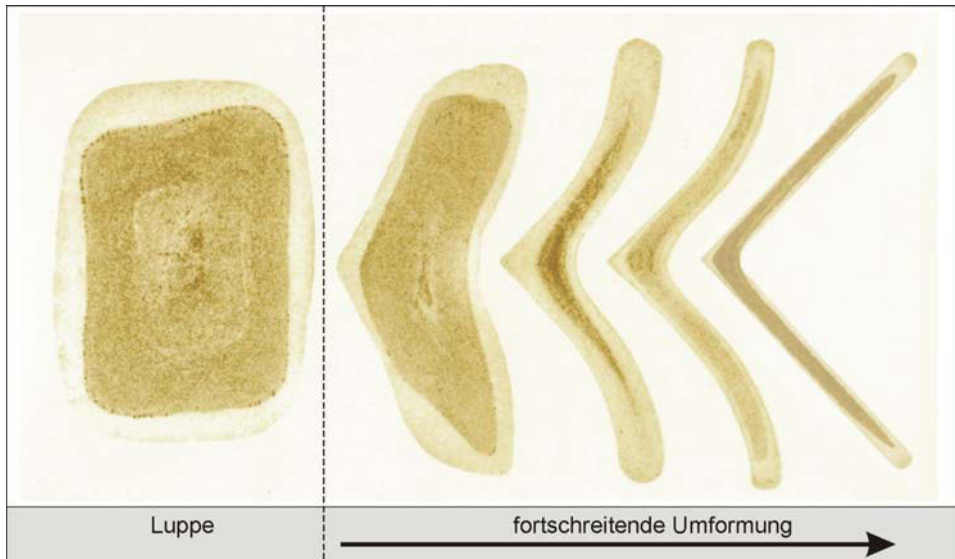


Bild 2–8: Stoffverschiebung im Walzgut bei Kalibrierungen – Schwefelkonzentrationen durch BAUMANNabdruck sichtbar; Darstellung auf Grundlage von [DEFÉ 1961]

Für weiterführende Literatur zu diesem Thema wird auf [FALK 1910], [FALK 1912A] und [FALK 1912B] verwiesen.

Seigerungen, die in den Blöcken aufgrund der unberuhigten Vergießung bei der Stahlherstellung mittig angeordnet sind, werden durch die Kalibrierung komprimiert und longitudinal zur Walzrichtung verschoben. Ein Ausquetschen der geseigerten Bereiche auf äußere Randschichten findet nicht statt, wie Bild 2–7 und Bild 2–8 zeigen.

Der grundlegende Ablauf der Verformung des Walzgutes während des Kalibrierens ist somit aufgezeigt. Eine quantitative Bestimmung der Dicke der vorhandenen Seigerungszone und Speckschichten ist auf Grundlage der hier dargestellten Informationen nicht möglich. Dafür sind grundsätzlich umfangreichere Angaben über die Stahlherstellung, das Vergießen im Block, die Kalibrierungsschritte sowie über den zu betrachteten Querschnittstyp erforderlich. Die Bereitstellung der benötigten Informationen ist aufgrund unvollständiger Dokumentation der durchgeführten Walzprozesse nicht möglich.

Eine wissenschaftliche, modellhafte Beschreibung aller Einflüsse auf die Ausbildung der Stoffverschiebungen, insbesondere der Verteilung der Speck- und Seigerungsgebiete, ist sehr komplex. Eine Abschätzung ist mit erheblichen Unschärfen verbunden. Daher wird die Vermessung der Konzentrationen der chemischen Begleitelemente an Flusstahlquerschnitten, dem aus der Herstellung resultierendem Endprodukt, zur Bestimmung der unterschiedlichen Seigerungs- und Speckschichtbereiche empfohlen.

#### **2.3.5 Fazit**

Die Qualität der Puddelstahlherstellung war stark von der Handfertigkeit des Puddlers abhängig. Daher war hier mit hohen Inhomogenitäten zu rechnen. Dies schlug sich in der Streuung der mechanischen Kennwerte und dem Grad der Anisotropie nieder.

Die Herstellung von Flussstahl wurde im Gegensatz zum Puddelstahl stark automatisiert durchgeführt. Größere Mengen konnten in einem Prozess hergestellt werden, deren chemische Zusammensetzungen simultan zur Herstellung überprüft und gegebenenfalls die Charge bei Unbrauchbarkeit durch Nichteinhaltung der definierten Toleranzen erneut eingeschmolzen wurde. Die vielfältigen Möglichkeiten der Kontrolle wurden aufgezeigt. Daher ist davon auszugehen, dass der das Stahlwerk verlassende Flussstahl aufgrund der durchgeführten Qualitätssicherungsmaßnahmen definierten Grundstandards genügt. Flussstahlblöcke mit Ausreißercharakter bezüglich der geprüften chemischen Zusammensetzung sowie der mechanischen Kennwerte wurden bereits aussortiert.

Die Kalibrierung von Flussstahlprofilen war ebenfalls als Massenfertigung zu verstehen. Der bis zum Ende des 19. Jahrhunderts vorherrschende Individualismus in der Kalibrierung der Profile wurde ab ca. 1900 allgemeingültig beschrieben, wie das Schrifttum zeigt.

Aufgrund der fortgeschrittenen Kenntnisse in der Metallurgie konnten die den Walzprozess beeinflussenden Parameter optimiert werden. Beispielsweise war das Auftreten von Doppelungen sowie Maßnahmen zur Vermeidung bereits bekannt. Fachinstanzen überwachten den Herstellungsprozess in den Walzwerken, adaptierten diesen gegebenenfalls und führten anschließend an den Halbzeugen eine Endkontrolle durch, die stets eine Werkstoffprüfung beinhaltete. Damit sank die Gefahr von Ausreißern in der Profilkalibrierung. Die hergestellten Halbzeuge wurden herstellungsbegleitenden und abschließenden Prüfungen unterzogen. Ausreißer sind dadurch nicht zu vermuten. Es ist von einem verhältnismäßig hochwertigen Produkt auszugehen. Dies traf für Halbzeuge aus Puddelstahl nicht zu.

## **2.4 Metallurgische Besonderheiten**

### **2.4.1 Speckschichten und Seigerungen in Flusstählen**

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei dem hier untersuchten Flussstahl um einen unruhig vergossenen Stahl. Im Profilquerschnitt treten erwartungsgemäß Konzentrationsunterschiede der chemischen Begleitelemente auf. Die Bereiche der Speckschichten sind aufgrund der geringen Konzentration an Stahlschädlingen für die Schweißung prädestiniert. Die Verteilung und Ausdehnung der Speckschichten wird im Kapitel 4.1 detailliert untersucht. Nachfolgend werden die wesentlichen Einflüsse und Erscheinungen, die mit der Seigerung in Verbindung stehen, beschrieben.

### 2.4.1.1 Entstehung und Auswirkung von Seigerungen

Seigerungen sind bei der Erstarrung von Legierungen entstehende örtliche Entmischungserscheinungen, die zu Konzentrationsunterschieden der beteiligten Elemente führen. Die schmelzflüssige Legierung wird im Anschluss an das Durchlaufen des Hochofenprozesses in die Kokille überführt. Im Randbereich der Schmelze, am Übergang zur Kokillenwand, beginnt der Abkühlprozess, da hier die Wärme der Schmelze an die Umgebung abgegeben werden kann. Infolge der Unterkühlung der Randbereiche in Verbindung mit den existenten Verunreinigungen wird eine verstärkte Keimbildung im langsam erstarrenden Randbereich der Kokille induziert. Es bilden sich Dendrite, die aufgrund des vorhandenen Platzangebotes in alle Richtungen gleichmäßig wachsen. In Richtung Kokillenmitte nimmt der Temperaturgradient und damit die Abkühlgeschwindigkeit ab. Es stellt sich ein zeitlich veränderlicher Temperaturgradient ein, wobei die höchste Temperatur immer in Kokillenmitte vorzufinden ist. Dieser Vorgang findet sinngemäß auch in vertikaler Richtung statt, vgl. Bild 2–9.

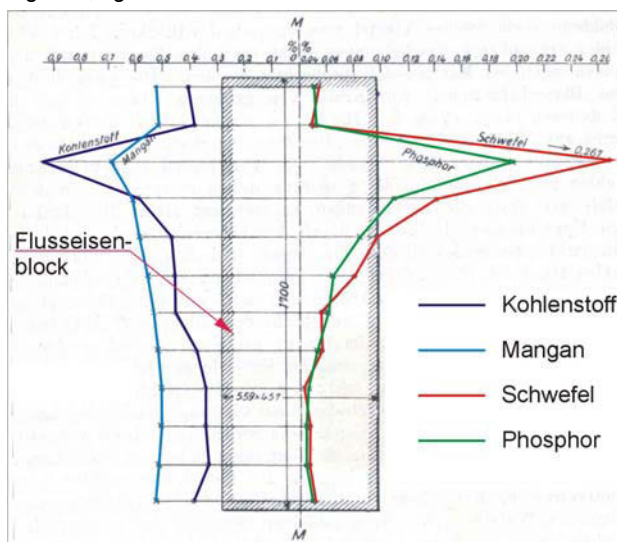


Bild 2–9: Konzentration ausgewählter Begleitelemente über die Blockhöhe; Darstellung auf Grundlage von [VDE 1929]

Die Konzentration lösbarer Legierungsbestandteile hängt maßgeblich von den vorhandenen Temperaturen ab. Im festen Aggregatzustand ist die Lösbarkeit der Begleitelemente gegenüber der flüssigen Phase prinzipiell stark vermindert.

Während der Abkühlung wird ein Zweiphasengebiet zwischen Solidus- und Liquiduslinie durchlaufen. Bei Unterschreitung der Liquiduslinie scheiden sich die ersten Kristalle aus der restlichen Schmelze aus. Diese Kristalle entsprechen in ihrer Zusammensetzung nicht der Durchschnittskonzentration. Der Gehalt an Legierungsbestandteilen ist geringer als der

## 2 Baustahl von 1860 – 1940

### 2.4 Metallurgische Besonderheiten

---

Durchschnittsgehalt. Vor der Phasengrenze fest/flüssig entstehen Entmischungen, die zu einer Anreicherung der Legierungsbestandteile in der Schmelze führen. Somit ändern sich die Konzentrationen der Legierungselemente in der Schmelze sowie in den erstarrten Kristallen. Die in der Schmelze befindliche hohe Konzentration an Begleitelementen verbleibt dort und wird bei Abkühlung in das Gefüge eingelagert.

Die Blockseigerung, auch Makroseigerung genannt, ist das Resultat der unterschiedlich abkühlenden Schmelze sowie der damit verbundenen Entmischung. Im Bild 2–9 ist beispielsweise die chemische Konzentration von Begleitelementen über die Blockhöhe dargestellt.

Die für die Feststellung einer möglichen Schweißseignung relevanten Begleitelemente verhalten sich hierzu affin. Jedes Element besitzt ein unterschiedliches Bestreben zu seigern. Als Maß für die Seigerungsneigung findet der Verteilungskoeffizient  $k_0$  Verwendung, vgl. [REIC 2000]. Der Verteilungskoeffizient  $k_0$  wird beim Erstarren des Gefüges ermittelt. Nach [ECKS 1971] ist  $k_0$  als Verhältnis der Konzentration des betrachteten Begleitelements im festen Zustand zu der Konzentration im flüssigen Zustand definiert. Je kleiner der Wert von  $k_0$ , um so größer ist die Neigung zum Seigern.

Die Blöcke wurden im warmen Zustand weiter verarbeitet und zu Knüppeln verwalzt. Aus den Knüppeln wurden die gewünschten Profile über diverse Kalibrierungen geformt, vgl. Kapitel 2.3.1.

Element	Kohlenstoff	Silizium	Phosphor	Schwefel	Stickstoff
	C	Si	P	S	N
	in %	in %	in %	in %	in %
$k_0$	30	50	6	5	28

Tabelle 2-1: Verteilungskoeffizient  $k_0$  der ausgewählter Begleitelemente nach [ECKS 1971]

Die Intensität und Lage der geseigerten Bereiche ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren der Stahlerstellung und Kalibrierung abhängig. Nachfolgend seien wesentliche Kriterien für die Stahlerzeugung genannt.

- Blockformat
- Blockgröße
- Kokillengestaltung
- Gießüberhitzung
- Legierungsgehalt

Durch das Gießen kleinerer Blöcke und durch das Pressen der Blöcke – im Wesentlichen zur Verringerung des „Kochens“ – wird das Seigern vermindert. Durch eine langsame Abkühlung wird ebenfalls die Seigerungsneigung minimiert, da die Konzentrationsunterschiede durch Diffusion teilweise wieder ausgeglichen werden, vgl. [BARG 1983].

Die Konzentrationsunterschiede in der Zusammensetzung zwischen Seigerungszone und umgebener Speckschicht können der Tabelle 2-2 entnommen werden.

	Kohlenstoff C in Gew.-%	Phosphor P in Gew.-%	Schwefel S in Gew.-%
Gesamtquerschnitt	0,04	0,07	0,05
Randzone (Speckschicht)	0,04	0,04	0,02
Seigerungszone	0,06	0,20	0,12

Tabelle 2-2: Konzentrationsunterschiede zwischen Seigerungszone und Speckschicht, vgl. [RUGE 1991]

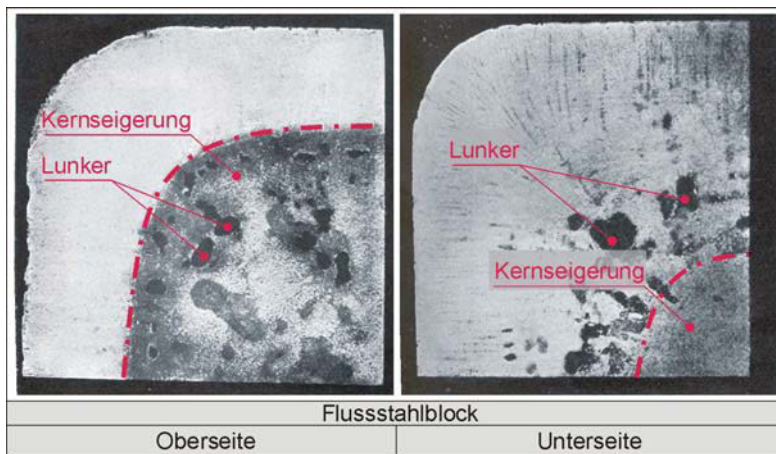


Bild 2–10: Seigerungen im Block – vor dem Kalibrieren; Darstellung auf Grundlage von [HEYN 1906]

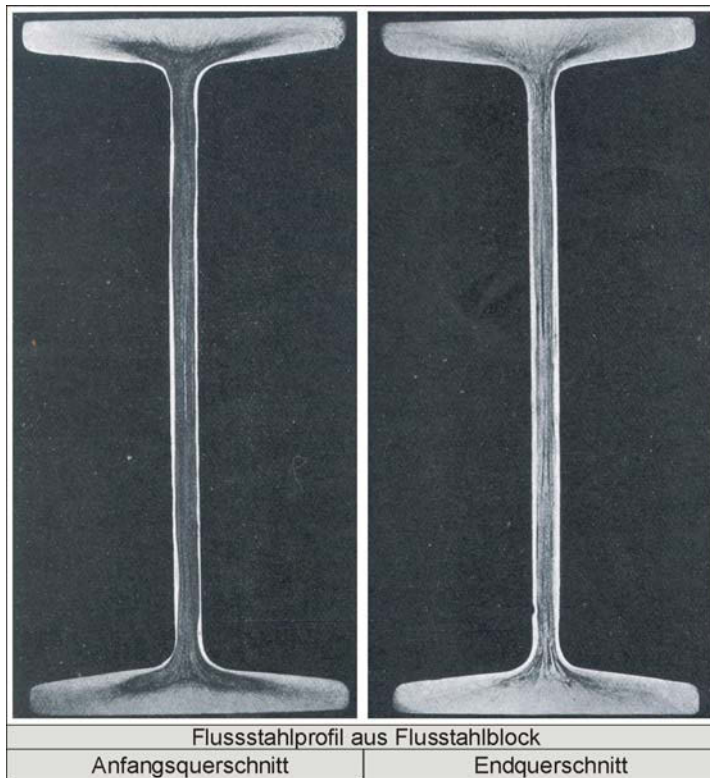
Das Bild 2–10 zeigt exemplarisch die geseigerten Bereiche eines Blockes am oberen und unteren Rand sowie die infolge Schwinden entstandenen Lunker. Ein solcher Block in ausgewalzter Form ist im Bild 2–11 dargestellt. Hieraus ist erkenntlich, dass sich eine minimale Änderung der Konzentrationen der Begleitelemente aber nicht deren qualitative Lage in der Seigerungszone ergibt. Die Blockseigerungen, Materialbereiche mit örtlich schlechteren Materialeigenschaften, erfahren während des Walzens der Blöcke zu Normalprofilen einen richtenden Einfluss. Hierbei ändert sich das Verhältnis zwischen dem Querschnitt der Seigerungszone zum Gesamtquerschnitt nicht, vgl. [HEYN 1906]. Die Lunker sind nicht erkennbar. Dies ist auf die Verschweißung während des Walzvorgangs zurückzuführen. Diese Mechanismen waren bereits am Ende des 19. Jahrhunderts bekannt. Bei der Betrachtung der im Bild 2–10 und Bild 2–11 dargestellten Phosphorseigerungen ist zu beachten, dass hieraus in der Regel ausschließlich qualitative Aussagen über die Konzentrationsverteilung des Phosphors zu treffen sind. Das Element Stickstoff ist infolge der geringeren Seigerungsneigung annähernd gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. Zum Einfluss des Stickstoffs auf die Güte der Schweißung und

## 2 Baustahl von 1860 – 1940

### 2.4 Metallurgische Besonderheiten

---

auf die erzielbare Ermüdungsfestigkeit werden im Kap. 6 gesonderte Untersuchungen durchgeführt.



*Bild 2–11: Seigerungen im Profil – nach dem Kalibrieren; Darstellung auf Grundlage von [HEYN 1906]*

#### 2.4.1.2 Entstehung und Auswirkung von Hohlräumen

Zwei prinzipielle Vorgänge erzeugen Hohlräume im Block. Hohlräume entstehen durch die bei der Erstarrung und bei der Abkühlung induzierte Volumenkontraktion – sie können zudem in Form von Gasblasen vorliegen, die auf die bei der Abkühlung verringerte Löslichkeit der Gase zurückzuführen sind. Insbesondere Stickstoff, Wasserstoff sowie Sauerstoff scheiden sich in Verbindung mit Kohlenstoff gasförmig aus. Diese für die unberuhigte Vergießung typische Reaktion, auch als Kochen bezeichnet, wird durch die Zugabe von Aluminium, Mangan und Silizium beim beruhigt vergossenem Stahl verhindert.



Ein Teil der Gasblasen, insbesondere mit reduzierenden Gasen, verschweißt während des weiteren Profilstahlherstellungsprozesses. Die Anzahl der Materialtrennungen wird dadurch stark verringert, vgl. [SCHU 2004].

Bereits zum Ende des 19. Jahrhunderts waren die hauptsächlichen Ursachen für die Hohlraumbildung bekannt, vgl. [REIC 2000]. Um eine Beeinträchtigung der Stahlqualitäten durch Hohlräume und Lunker zu minimieren, können prinzipiell zwei Verfahrensgruppen genannt werden. Der ersten Gruppe sind Vorgänge wie beispielsweise die Verringerung des Temperaturgradienten zwischen Blockrand und Blockmitte, die Minderung der Erstarrungszeit, die Wahl der Gießgeschwindigkeit, die Verringerung der Gießtemperatur und die Form der Kokille zuzuordnen, die auf die Beeinflussung des Erstarrungsvorgangs basieren, vgl. [BEUT 1901], [RIEM 1903]. Eine zweite Verfahrensgruppe zur Minimierung von Hohlräumen bieten mechanische Verfahren. HARMET und WHITWORTH entwickelten Möglichkeiten der vollständigen Verdichtung des Blockes unter Zuhilfenahme von hydraulischen Pressen, vgl. [OSAN 1908]. Weitere Verfahren beruhen auf dem Verdichten des Stahls während des Walzens, vgl. [HEYN 1906].

### 2.4.2 Chemische Zusammensetzung

Der Einfluss der wesentlichen Begleitelemente Kohlenstoff, Silizium, Mangan, Phosphor, Schwefel und Stickstoff auf die Eigenschaften des Werkstoffs, insbesondere auf die Schweißbarkeit, sind dem Schrifttum, beispielsweise [RUGE 1991], [SCHU 2004] und [BARG1983] zu entnehmen. In Tabelle 2-3 sind die Grenzwerte der chemischen Konzentrationen der Begleitelemente für die Einhaltung der Schweißbarkeit für unlegierte Stähle zusammengefasst, vgl. [DIN 17100] für  $t \leq 16$  mm.

Kohlenstoff	Silizium	Phosphor	Schwefel	Stickstoff
C	Si	P	S	N
in Gew.-%	in Gew.-%	in Gew.-%	in Gew.-%	in Gew.-%
< 0,21	k. A.	< 0,065	< 0,065	< 0,010

Tabelle 2-3: *Schweißbarkeit – zulässige Konzentrationen ausgewählter Begleitelemente nach der Stückanalyse, vgl. [DIN 17100]*

#### 2.4.2.1 Puddelstahl

Statistische Angaben der chemischen Konzentrationen der Begleitelemente können nach [REIC 2000] wie folgt festgehalten werden, vgl. Tabelle 2-4. Als Verteilungsform wird die GAUß-Normalverteilung verwendet.

## 2 Baustahl von 1860 – 1940

### 2.4 Metallurgische Besonderheiten

---

Statistische Kennwerte	Kohlenstoff C in Gew.-%	Silizium Si in Gew.-%	Phosphor P in Gew.-%	Schwefel S in Gew.-%	Stickstoff N in Gew.-%
n [-]	102	102	102	102	102
<b>m</b>	<b>0,025</b>	<b>0,147</b>	<b>0,396</b>	<b>0,061</b>	<b>0,009</b>
<b>s</b>	<b>0,022</b>	<b>0,048</b>	<b>0,113</b>	<b>0,036</b>	<b>0,007</b>
v in %	88,0	32,6	28,5	59,0	77,7
Minimum	0,001	0,120	0,179	0,023	0,001
Maximum	0,091	2,830	0,650	0,135	0,026

*Tabelle 2-4: Puddelstahl – chemische Zusammensetzung (n Stichprobenanzahl, m Mittelwert, s Streuung)*

Hierbei steht n für die Stichprobenanzahl, m für das arithmetische Mittel, s für die Standardabweichung und v für den Variationskoeffizient.

Der Puddelstahl zeichnet sich durch einen herstellungsbedingt niedrigen Kohlenstoffgehalt aus. Die mittleren Gehalte an Phosphor, Schwefel und Stickstoff übersteigen die Grenzen heutiger Normenwerke für Baustahl, beispielsweise der [DIN 17100], um ein Vielfaches.

Die Analyse der chemischen Konzentrationen der Begleitelemente erfolgte beim Puddelstahl mit dem nasschemischen Verfahren. Die Funkenemissionsspektroskopie liefert verfälschte Ergebnisse, da bei diesem Verfahren neben dem Stahl die Schlackenzeilen übermäßig stark angeschmolzen werden und die Analysewerte deren Gehalt an Begleitelementen ebenfalls beinhalten.

#### 2.4.2.2 Flussstahl

Flussstahl weist aufgrund seiner unberuhigten Vergießung Kernseigerungen auf, die durch den Walzvorgang in die inneren Bereiche der Querschnitte konzentriert eingelagert werden, vgl. Kapitel 2.3. Die Seigerungszone ist von Speckschichten umgeben. Dies sind Bereiche mit erheblich verminderten Konzentrationen an chemischen Begleitelementen. Der Flussstahl besteht aus einem ferritisch-perlitischen Gefüge.

Die statistischen Angaben der chemischen Konzentrationen der Begleitelemente sind nach [REIC 2000] in Tabelle 2-5 zusammengefasst. Als Verteilungsform wurde die GAUß-Normalverteilung verwendet.

Unter dem Begriff Flussstahl gliedern sich verschiedene Stähle ein. Das Bild 2–12 zeigt strukturgrafisch eine Möglichkeit der Zuordnung der untersuchten Stähle zu ihrem Herstellungsverfahren anhand der chemischen Zusammensetzung, wobei es sich hierbei um eine Darstellung auf Grundlage der Dissertation nach [LANG 1996] mit dem Thema „Bruchmechanische Sicherheitsanalyse anrissgefährdeter Bauteile im Stahlbau“ handelt.

Statistische Kennwerte	Kohlenstoff C in Gew.-%	Silizium Si in Gew.-%	Phosphor P in Gew.-%	Schwefel S in Gew.-%	Stickstoff N in Gew.-%
n [-]	290	290	290	290	290
m	<b>0,070</b>	<b>0,020</b>	<b>0,043</b>	<b>0,042</b>	<b>0,010</b>
s	<b>0,047</b>	<b>0,034</b>	<b>0,019</b>	<b>0,019</b>	<b>0,008</b>
v in %	67,1	170,0	44,2	45,2	80,0
Minimum	0,010	0,001	0,001	0,011	0,001
Maximum	0,215	0,170	0,092	0,094	0,061

Tabelle 2-5: Flusstahl – chemische Zusammensetzung (n Stichprobenanzahl, m Mittelwert, s Streuung)

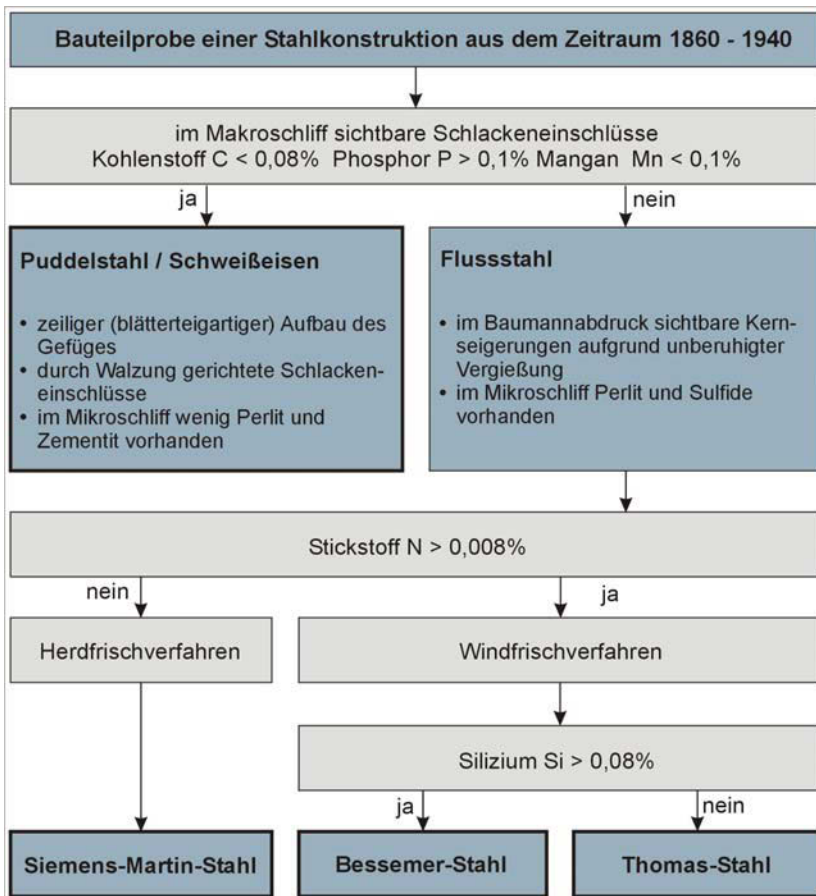


Bild 2-12: Klassifizierungshilfe für Flusstähle, vgl. [LANG 1996]

## **2 Baustahl von 1860 – 1940**

### **2.4 Metallurgische Besonderheiten**

---

Die Kohlenstoffkonzentration ist im Vergleich zu den Grenzwerten heutiger Baustähle als sehr gering einzustufen. Die Konzentrationen an Phosphor, Schwefel und Stickstoff liegen teilweise über den Grenzwerten für heutige Baustähle, vgl. [DIN 17100]. Es ist hierbei zu beachten, dass für die Analyse der chemische Zusammensetzung der untersuchten Flusstahlquerschnitte in der Regel das Material in der Mitte der Flanschdicke in Anlehnung an [DIN 10025] untersucht wurde. Hieraus ist ersichtlich, dass die angegebenen Kennwerte der chemischen Konzentrationen der Begleitelemente repräsentativ für den Seigerungsbereich stehen, jedoch nicht die chemischen Konzentration der Speckschichten widerspiegeln.

#### **2.4.3 Transiente Werkstoffeigenschaften des Flusstahls**

##### **2.4.3.1 Definition und Auswirkung**

Alterung ist die zeitabhängige Änderung der mechanisch-technologischen Eigenschaften eines Werkstoffs. Die Alterung begünstigt die Zunahme von Festigkeit und Härte im Bauteil. Als ungünstige Erscheinung der Alterung ist die Zunahme des spröden Bauteilverhaltens zu nennen, vgl. [BARG 1983].

Die Alterung entsteht durch Entmischung übersättigter Mischkristalle infolge von Diffusionsvorgängen. Die Geschwindigkeit der ablaufenden Diffusionsvorgänge ist im Wesentlichen von der Temperatur sowie von den Konzentrationsunterschieden des betrachteten Begleitelementes abhängig. Als weitere Einflüsse sind die chemische Zusammensetzung, die Umformart, die Umformtemperatur beim Kalibrieren und die Abkühlbedingungen zu nennen.

Alterungsempfindlich sind Stähle, bei denen keine Möglichkeit besteht, den Stickstoff während des Erstarrens an Elemente zu binden, deren Affinität zu Stickstoff höher ist als die von Eisen. Bei Raumtemperatur liegt dann oftmals der Gehalt an Stickstoff oberhalb der Löslichkeitsgrenze. Ausscheidungen sind die Folge.

Die als Alterung bezeichneten Diffusionsvorgänge stehen prinzipiell in Abhängigkeit zu der Auslagerungs- und Beanspruchungstemperatur und gelangen nach unterschiedlichen Zeitspannen zum Stillstand. Die in den Walzwerken als Teil der Qualitätskontrolle ermittelten mechanischen-technologischen Kennwerte der Walzprofile treffen demnach nicht für die gesamte Lebensdauer des Stahlprofils zu.

In den experimentellen Arbeiten von BAEHRE und KÄPPLEIN werden anhand eines Flusstahls aus dem Jahr 1901 phänomenologisch die Alterungseinflüsse für alte Baustähle untersucht, vgl. [BAEH 1992]. Die Konzentration der wesentlichen Begleitelemente ist in der Tabelle 2-6 angegeben. Es zeigt sich der für Flusstahl charakteristische niedrige Gehalt an Kohlenstoff und die für die Sorte THOMASstahl typisch hohe Konzentration an Stickstoff, der während der Stahlherstellung beim Frischen mit Luft eingebracht wird, vgl. Bild 2–12.

Die Löslichkeitsgrenze von Stickstoff beträgt bei 590°C 0,10 Gew.-% und bei Raumtemperatur 0,014 Gew.-%, vgl. [HANS 1936]. Durch das Frischen mit Luft kann die Konzentration von Stickstoff im Flusstahl bis zu 0,027 Gew.-% betragen.

In dem Versuchsprogramm nach [BAEH 1992] wurde der Flusstahl gegläht und nachfolgend ausgelagert. Durch das Glühen bei 620°C – die vorhandene Stickstoffkonzentration liegt bei dieser Temperatur unterhalb der Löslichkeitsgrenze – wird der ursprüngliche Zustand des Profils nach dem Herstellen durch stattfindende Diffusionsvorgänge erzeugt. BAEHRE und KÄPPLEIN belegen dies mit Kerbschlagbiegeversuchen, die unmittelbar nach dem Glühen bei 620°C eine erhöhte Zähigkeit aufweisen, vgl. Bild 2–14.

Das analoge Verhalten lässt sich durch Zugversuche an Proben feststellen, die ebenfalls zuvor gegläht und nachträglich ausgelagert wurden, vgl. Bild 2–13. Die Zugfestigkeit – umgekehrt proportional zur Zähigkeit – steigt bei kurzer Auslagerungszeit auf einen Höchstwert und fällt anschließend bei weiterer Auslagerung unter den Wert nach dem Glühen. Die Höhe der Auslagerungstemperatur beeinflusst aufgrund des veränderten Diffusionsverhaltens den Zeitpunkt für das Erreichen des Maximalwertes der Zugfestigkeit. Ein identisches Verhalten der Zugfestigkeit hat [KRZY 1968] in eigenen Versuchen an nitrierten Proben aus Roheisen festgestellt. Zudem wird in den Versuchen nach [KRZY 1968] der Verlauf der Bruchdehnung als asynchron zur Zugfestigkeit beschrieben. Die Bruchdehnung nimmt bei Auslagerung bis zum Erreichen eines Tiefpunktes ab, um dann wieder stetig anzusteigen.

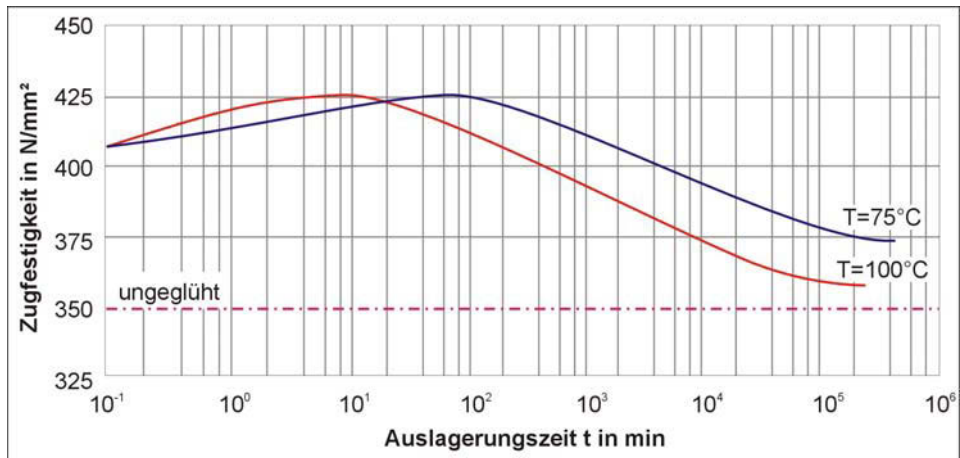


Bild 2–13: transientes Verhalten der Zugfestigkeit, vgl. [BAEH 1992]

Kohlenstoff C in Gew.-%	Silizium Si in Gew.-%	Phosphor P in Gew.-%	Schwefel S in Gew.-%	Stickstoff N in Gew.-%	Mangan Mn in Gew.-%
0,034	0,0019	0,054	0,069	0,019	0,44

Tabelle 2-6: Flusstahl nach [BAEH 1992] – chemische Zusammensetzung

## 2 Baustahl von 1860 – 1940

### 2.4 Metallurgische Besonderheiten

Nach [BAEH 1992] und [KUBA 1968] ist der charakteristische Verlauf der mechanischen Eigenschaften über die Zeit auf zwei wesentliche, während der Entmischung stattfindende Vorgänge zurückzuführen. Die Auslagerung führt zunächst zu einer einphasigen Ausscheidung von Nitriden entlang kristallographischer Ebenen, die sich bevorzugt in Versetzungszonen einlagern. Diese kohärenten Ausscheidungen führen zur Versetzungsblockade und damit u.a. zur Festigkeitssteigerung.

Anschließend setzt das Wachstum dieser Teilchen unter gleichzeitiger Verminderung ihrer Anzahl ein – als Überalterung oder OSTWALD-Reifung bezeichnet [GLAE 2005]. Der Vorgang der Ausscheidung von Nitriden muss hierbei noch nicht abgeschlossen sein.

Die Ausscheidungen des mit Stickstoff übersättigten  $\alpha$ -Eisens nehmen anfänglich eine plättchenförmige Gestalt an, als  $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$ , und sind zumeist rechtwinklig zueinander angeordnet. Nach längerer Zeit findet eine Umwandlung der metastabilen Phase  $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$  in  $\text{Fe}_4\text{N}$  mit spitzwinkligem Aussehen statt, vgl. [KUBA 1968]. Mit dem Umwandeln in die Phase  $\text{Fe}_4\text{N}$  ist davon auszugehen, dass sich der Stahl erholt und die Abnahme der Zugfestigkeit nach Erreichen des Hochpunktes einsetzt, vgl. Bild 2–13.

Damit zeigt sich, dass sich die Alterungserscheinung infolge von Stickstoff auf einen eingrenzbaren Zeitbereich auswirkt und danach eine Verbesserung der Zähigkeits-eigenschaften des Materials zu verzeichnen ist. In [BAEH 1992] wird davon ausgegangen, dass bestehende Stahltragwerke bei ausreichend hohem Alter hinsichtlich der Zähigkeits-eigenschaften günstig zu beurteilen sind.

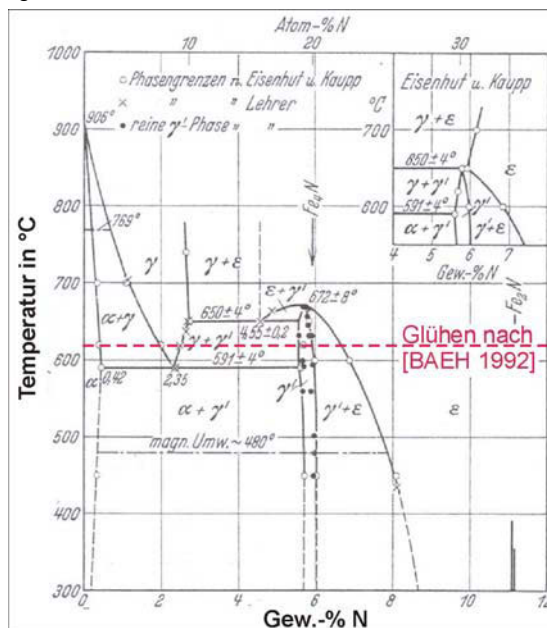


Bild 2–14: Eisen-Stickstoff-Schaubild; Darstellung auf Grundlage von [HANS 1936]

Weitere Elemente wie Kohlenstoff und Wasserstoff führen unter Verwendung anderer Mechanismen ebenfalls zur Versprödung des Materials. Aufgrund der sehr geringen Konzentrationen dieser Elemente im Flussstahl ist von keiner Beeinträchtigung der Zähigkeit infolge von Kohlenstoff oder Wasserstoff auszugehen.

### 2.4.3.2 Weiterführende Untersuchungen

Der Einfluss der Alterung auf das Werkstoffverhalten bei Ermüdungsbeanspruchung ist nach derzeitigem Kenntnisstand nur lückenhaft analysiert. Infolge dessen wird im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss der Alterung auf die Ermüdungsfestigkeit der Altstähle in Hinblick auf die zusätzliche Wärmeeinwirkung beim Schweißen erforscht, vgl. Kap. 6.

## 2.5 Mechanisch-Technologische Eigenschaften

### 2.5.1 Zugfestigkeit, Streckgrenze, Brucheinschnürung und -zähigkeit

Die in Versuchen ermittelten Werte der Streckgrenze  $R_{eH}$ , Zugfestigkeit  $R_m$ , Bruchdehnung  $A_5$  und Brucheinschnürung  $Z$  der Puddel- und Flussstähle sind in Tabelle 2-7 und Tabelle 2-8 dokumentiert. Als Basis der angegebenen statistischen Kennwerte mechanischer Eigenschaften dienen bis zu 557 Einzelzugversuche, die sich aus Prüfungen an der MFPA Leipzig, in [REIC 2000] veröffentlicht, und aus in der BAM durchgeführten, jedoch unveröffentlichten Versuchen zusammensetzen. Zur Auswertung der Laborprüfungen wurde für die Verteilung der mechanischen Kennwerte eine GAUßsche Normalverteilung unterstellt.

Statistische Kennwerte	$R_{eH}$ in N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ in %	$Z$ in %
n [-]	200	219	121	98
<b>m</b>	<b>244</b>	<b>361</b>	<b>22,5</b>	<b>29</b>
<b>s</b>	<b>28</b>	<b>31</b>	<b>6,0</b>	<b>9,5</b>
v in %	10,5	7,9	27,7	32,7
Minimum	177	235	5,7	5,9
Maximum	307	426	34,4	53,1

*Tabelle 2-7: Puddelstahl – mechanische Eigenschaften längs zur Walzrichtung (n Stichprobenanzahl, m Mittelwert, s Streuung, v Variationskoeffizient)*

Durch den Vergleich der Werte aus Tabelle 2-7 und Tabelle 2-8 ist ersichtlich, dass die mechanischen Kennwerte, obere Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und die Brucheinschnürung, vom Puddelstahl hin zum Flussstahl zunehmen. Die im Vergleich zum Puddelstahl auftretende erhöhte Streuung des Flussstahls ist möglicherweise auf die

## 2 Baustahl von 1860 – 1940

### 2.5 Mechanisch-Technologische Eigenschaften

---

zugrunde gelegte Basis aus BESSEMER-, THOMAS- sowie SIEMENS-MARTIN-Stahl und deren Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung zurückzuführen.

Zum Zwecke des Vergleichs der auftretenden Streuungen an Flusstählen wurden die für einen modernen Baustahl an verschiedenen Chargen durchgeführten Zugfestigkeitsversuche, vgl. [MEHD 2003], ausgewertet. Der Variationskoeffizient für die Streckgrenze beträgt  $v = 7,2\%$  und für die Zugfestigkeit  $v = 3,0\%$ . Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass infolge der verbesserten Herstellungsbedingungen und Qualitätsprüfungen die Streuungen geringer als beim Flusstahl ausfallen. Die Streuungen im Flusstahl sind geringfügig höher.

Statistische Kennwerte	$R_{eH}$ in N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ in %	Z in %
n [-]	535	557	148	128
<b>m</b>	<b>290</b>	<b>395</b>	<b>35,1</b>	<b>70,7</b>
<b>s</b>	<b>43</b>	<b>50</b>	<b>6,0</b>	<b>6,1</b>
v [in %]	14,1	12,6	16,2	8,6
Minimum	163	217	10,5	44,2
Maximum	422	513	49,3	88,6

Tabelle 2-8: *Flusstahl – mechanische Eigenschaften längs zur Walzrichtung (n Stichprobenanzahl, m Mittelwert, s Streuung, v Variationskoeffizient)*

#### 2.5.2 Sprödbruchneigung

Es ist bekannt, dass Altstähle im Vergleich zu heutigen Baustählen in der Regel eine geringere Zähigkeit aufweisen. Daher spielt bei der Bewertung bestehender Konstruktionen aus Altstahl die Untersuchung der Sprödbruchgefahr eine wichtige Rolle. Gängige, messbare Größen zur Beurteilung der Sprödigkeit von Materialien sind im Stahlbau die Kerbschlagbiegearbeit  $A_v$  und die Bruchzähigkeit  $K_{IC}$ .

Kerbschlagbiegearbeiten sowie bruchmechanische Kennwerte von Proben aus Fluss- und Puddelstahl sind dem Schrifttum, beispielsweise [BUCA 1998], [MANG 1996], [STEI 1972], [HERT 2000], [SEDL 1992], [SEDL 2003] und [MANG 1985], zu entnehmen.

Für die Beurteilung älterer Baustähle hinsichtlich vorliegender Zähigkeitseigenschaften ist das oftmals verwendete Kriterium der vorhandenen Kerbschlagbiegearbeit nicht zweckdienlich. Durch den beim Kerbschlagbiegeversuch erzeugten Pendelschlag wird auf die zu prüfende und mit einer Kerbe hoher Kerbschärfe versehene Stahlprobe eine mehraxiale Beanspruchung mit hoher Dehngeschwindigkeit induziert, die keinem realen Beanspruchungsverhalten bestehender Stahltragwerke des Ingenieurbaus entspricht. In der Arbeit von [MANG 1996] wurde die Kerbschlagbiegearbeit  $A_v$  und der bruchmechanische Zähigkeitskennwert  $K_{IC}$  von Flusstählen vergleichend gegenübergestellt. Es zeigte sich in



dieser Untersuchung, dass die analysierten Baustähle trotz Unterschreitung der in Normenwerken geregelten Mindestkerbschlagbiegearbeiten nach bruchmechanischen Ansätzen eine gewisse Zähigkeit ausweisen.

Der gegenüber den bruchmechanischen Versuchen sehr preiswerte Kerbschlagbiegeversuch ist eine geeignete Methode, um Baustähle hinsichtlich ihrer Zähigkeitseigenschaften vergleichen zu können. Für die Bewertung der Mindestzähigkeit eines Baustahls erscheint die Kerbschlagbiegearbeit als ungeeignet.

Im EUROCODE 3 werden für den in Tragwerken zu verwendenden Stahl Anforderungen an das Bruchverhalten bei Raumtemperatur gestellt, vgl. [ENV 1993]:

- Das Verhältnis Zugfestigkeit zu Streckgrenze soll größer gleich 1,2 sein.
- Der Wert der Bruchdehnung darf nicht kleiner als 15 % sein.
- Die zur Zugfestigkeit gehörende Dehnung muss mindestens der 20-fachen Dehnung bei der Streckgrenze entsprechen.

Im Allgemeinen werden die gestellten Forderungen an Flusstähle erfüllt. Durch die Anforderungen wird sichergestellt, dass der Bruch nicht spröde erfolgt und vor dem Bruch stets ein lokal wirkender plastischer Ausgleich der Spannungen erfolgt. Die Norm geht hierbei davon aus, dass die Beanspruchung bei einer Temperatur stattfindet, die auf der Zähigkeits-Temperaturkurve der Hochlage gehört.

Die betrachteten Flusstähle befinden sich erfahrungsgemäß bereits bei Raumtemperatur zumeist im Übergangsbereich oder in der Tieflage der Zähigkeits-Temperaturkurve, vgl. [MANG 1996]. Im Übergangsbereich und in der Tieflage ist mit verminderter plastischer Verformbarkeit zu rechnen – die Gefahr des Sprödbruchs steigt.

Im Kap. 4.2 wird daher das Sprödbruchproblem für den Flusstahl in Anlehnung an die [DAST 009] detailliert untersucht. Die Fraktilwerte der materialspezifischen Eingangsgrößen werden hierbei dem Schrifttum und Kap. 2.4.2.2 entnommen.

### **3 Ertüchtigungen**

#### **3.1 Begriffsbestimmung**

---

### **3 Ertüchtigungen**

#### **3.1 Begriffsbestimmung**

Zu den lebensdauerverlängernden Maßnahmen zählt grundsätzlich die Sanierung und Instandsetzung wie auch die Verstärkung und Ertüchtigung. Die Begrifflichkeiten werden nachfolgend erläutert.

Unabhängig von der Maßnahme muss bei Realisierung von Sanierungen, Instandsetzungen, Verstärkungen und Ertüchtigungen ein kraftschlüssiges Fügen von neu einzubauenden mit den im Tragwerk vorhandenen Bauteilen gewährleistet werden. Bei der Betrachtung ermüdungsbeanspruchter Bauwerke ist bei der Verbindung des im Bauwerk befindlichen Altmaterials mit neu einzusetzenden oder auszutauschenden Materialien, unabhängig von der Fügemethode, an der Fügestelle unter Ermüdungsbeanspruchung zumeist ein zusätzlicher Unstetigkeitsbereich gesondert zu berücksichtigen.

#### ***Sanierung / Instandsetzung***

Die Begriffe Sanierung und Instandsetzung werden gleichgesetzt.

Infolge der vorhandenen Vorgeschichte bestehender Stahltragwerke entstehen Querschnittschwächungen, beispielsweise durch Korrosion oder Rissfortschritt, die einer Sanierung oder Instandsetzung bedürfen. Unter Sanierungs- und Instandsetzungsmaßnahmen ist demnach das Ausbessern von Bauteilen sowie das Wiederherstellen der Ausgangssituation des Tragwerkes zu verstehen. Die Beanspruchbarkeit der Tragkonstruktion im ursprünglichen Zustand ist damit wieder hergestellt. Eine Adaption des Tragwerkes zur Aufnahme höherer Beanspruchungen findet nicht statt.

#### ***Verstärkung / Ertüchtigung***

Bei der Beurteilung bestehender Konstruktionen hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit ergeben sich für ausgewählte Tragglieder infolge veränderter Einwirkungen, moderner Bemessungssituationen sowie unter den aktuell zu berücksichtigenden Sicherheitskonzepten veränderte Anforderungen. Dies kann zu erhöhten Beanspruchungen einzelner Tragelemente des Bauwerkes führen. Eine Adaption der Querschnittsabmessungen von Bauteilen führt zu einer Angleichung der Beanspruchbarkeit an die Beanspruchung, indem die Querschnitte in der Regel vergrößert werden.

### **3.2 Analyse und Bewertung des baulichen Zustands**

In einem ersten Schritt sind vorhandene Ausführungs- oder Bestandszeichnungen auf Übereinstimmung mit dem vorliegenden Ist-Zustand der Konstruktion zu überprüfen. Abweichungen von den Zeichnungen und feststellbare Schäden sind zu dokumentieren. Bei der Dokumentation der Schäden am Tragwerk ist eine Klassifizierung in verschiedene Schadensarten sinnvoll. Die Klassifizierung nach [MLK E4] unterscheidet in Schäden durch ungeeignete Werkstoffe, Entwurfsfehler, Herstellungs- und Montagefehler, Nutzungsfehler und mangelnde Instandhaltung sowie sonstigen Schäden aus Kriegseinwirkung, Brand und Hochwasser.

Insbesondere für die hoch beanspruchten Hauptbauteile des Tragwerkes sind die Querschnitte einschließlich Querschnittsschwächung detailliert zu erfassen. Für die Identifikation verbauter Walzprofile sind die relevanten Nenngrößen nach dem für das Entstehungsjahr geltenden Profilregelwerk, beispielsweise [NORM 1893] und [VORS 1889], zu bestimmen. Bei Blechen ist die Dicke und die Breite zu ermitteln. Die Querschnittsschwächungen durch Bohrungen, Aus- und Abschnitte, Risse und Korrosion sind ebenfalls zu dokumentieren.

Während der Inspektion von Nietverbindungen ist die Ermittlung des Nenndurchmessers, die Anzahl der Niete, die Lochabstände und der visuelle Zustand, insbesondere hinsichtlich Korrosionsschäden und Risse, für eine Bewertung der Tragfähigkeit erforderlich. Für eine Schweißverbindung ist die Nahtform, die Nahtdicke und -länge sowie der Zustand hinsichtlich Fehlstellen, Rissen und weiterer Mängel zu dokumentieren. Eine Klassifizierung der Schweißnaht nach der aktuellen [DIN 25817] ist möglichst mit zerstörungsfreien Prüfmethoden vorzunehmen.

Für das verbaute Material sind die mechanischen Kennwerte den vorliegenden Tragwerksunterlagen, beispielsweise dem Brückenbuch, zu entnehmen. Sind für den Werkstoff keine spezifischen Unterlagen vorhanden, kann für die Nachweisführung die zulässige Beanspruchbarkeit dem Schrifttum entnommen werden, vgl. [RIL 805], [BARG 1993], [REIC 2000] und [TGL 13451]. Wenn besondere Kenntnis über die vorliegenden werkstoffmechanischen Eigenschaften erforderlich ist, sind Probenentnahmen am bestehenden Tragwerk durchzuführen. Die Proben sollten minimalinvasiv entnommen werden. Grundsätzlich sind an gering beanspruchten Bereichen eines Bauteiles die Proben zu entnehmen, um unnötige Querschnittsschwächungen in hoch ausgelasteten Bereichen zu vermeiden. In Abhängigkeit von der vorliegenden Fragestellung sind die Durchführung von chemischen Analysen, metallurgischen Untersuchungen, mechanisch-technologischen Prüfungen, wie Zug- und Kerbschlagbiegeversuche sowie Härtemessungen, Bauteilprüfungen und bruchmechanischen Untersuchungen denkbar.

Die Frage bezüglich der Übertragbarkeit von Einzelversuchsergebnissen auf die gesamte Konstruktion ist von essentieller Bedeutung. Die Ergebnisse von Stahluntersuchungen eines Profils sind im Allgemeinen auf dieses komplett anwendbar. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf benachbarte Profile oder auf weitere Lamellen eines durch Niete

### **3 Ertüchtigungen**

#### **3.3 Ertüchtigen von Bauteilen**

---

zusammengesetzten Profils ist nicht prinzipiell möglich. Im betrachteten Zeitraum von 1860 – 1940 war es bereits üblich, die zu verbauenden Stahlprofile von verschiedenen Walzwerken anliefern zu lassen, um bei der Herstellung des Bauwerkes Engpässe bei den Lieferanten zu verhindern. Stähle aus verschiedenen Walzwerken weisen aufgrund verschiedener Walzkalibrierungen und unterschiedlichen Stahlherstellungsverfahren (beispielsweise BESSEMER-THOMAS- oder SIEMENS-MARTINverfahren) geringfügig variierende Eigenschaften auf, vgl. Kapitel 2. Es erweist sich als sinnvoll, an verschiedenen Altstahlprofilen der Konstruktion Materialuntersuchungen durchzuführen, um die Schwankungen zwischen den verschiedenen Profilen bewerten zu können. Je nach Bedeutung des Bauteiles – für die Lastabtragung über- oder untergeordnet – und Bedeutsamkeit der Untersuchung, ist der Aufwand der Probenentnahme zu variieren.

Unter Berücksichtigung der vorhandenen Tragstruktur, aktueller Einwirkungen und Regelwerke für die Bemessung von bestehenden Tragwerken kann eine Bemessung im Ist-Zustand des Bauwerks und eine Bewertung der Nutzungsfähigkeit durchgeführt werden.

#### **3.3 Ertüchtigen von Bauteilen**

Bei der Bemessung eines aus Teilquerschnitten zusammengesetzten, ertüchtigten Querschnitts ist zu berücksichtigen, dass der im Bauteil verbleibende Querschnittsteil bereits eine eingeprägte Beanspruchung aus äußeren ständigen Einwirkungen und Zwangsschnittgrößen besitzt, vgl. [HÜNE 1987].

Die betroffene Konstruktion muss möglichst vollständig und das zu tauschende oder zu ertüchtigende Bauteil komplett entlastet werden. Die Effizienz der Verstärkung von Bauteilen hängt maßgeblich vom Grad der Entlastung ab, da sich die „eingepägten“ Beanspruchungen im verbleibenden Bauteilquerschnitt mit den zusätzlichen Beanspruchungen des sich neu ergebenden zusammengesetzten Querschnitts akkumulieren. Bei der Bemessung des zusammengesetzten Querschnitts aus Alt- und Neumaterial sind die eingepägten Beanspruchungen zu berücksichtigen.

Nach [MLK E4] ist das Auswechseln verschlissener, beschädigter oder nicht ausreichend tragfähiger Bauteile einer Verstärkung vorzuziehen. Hierdurch kann der Eingriff in die Konstruktion und der Aufwand hinsichtlich Kraftschluss zwischen Alt- und Neumaterial minimiert werden, da die konstruktive Ausbildung an die geometrischen und statischen Gegebenheiten anpassungsfähiger ist.

Die Steigerung der Beanspruchbarkeit der Konstruktion wird durch die Verstärkung oder Ertüchtigung einzelner, überbeanspruchter Bauteile oder durch die Änderung des statischen Gesamtsystems der Konstruktion erzielt. Eintretende Spannungumlagerungen müssen bei der Bemessung berücksichtigt werden.

### **3.4 Varianten des kraftschlüssigen Fügens**

#### **3.4.1 Nieten / Schrauben**

Die heiß eingeschlagenen Niete sind punktförmige Verbindungsmittel mit gutem Passsitz, die das Grundmaterial lokal metallurgisch beeinflussen. Die Beanspruchung der Niete erfolgt planmäßig senkrecht zur Nietlängsachse.

Nietverbindungen sind seit Mitte des 20. Jahrhunderts aufgrund der umständlichen und aufwendigen Verarbeitung kein gängiges Verbindungsmittel im Stahlbau.

Vorwiegend aus Gründen des Denkmalschutzes gelangt das Fügen durch Niete auch heutzutage noch zur Anwendung.

Weiterhin werden Bauteile durch lösbare punktförmige Verbindungsmittel, die Schrauben, miteinander verbunden. Die Beanspruchung der Schraube kann in ihrer Längsachse als auch orthogonal dazu erfolgen. Nach ihrer Wirkungsweise wird zwischen Scherlochleibungs- und gleitfest vorgespannten Verbindungen unter Verwendung von rohe Schrauben bzw. Passschrauben unterschieden.

Die Schraubenverbindung zeichnet sich durch eine einfache Handhabung und durch die metallurgische Nichtbeeinflussung des Grundwerkstoffs der zu fügenden Bauteile aus. Weiterhin ist als Vorteil die gute Reproduzierbarkeit zu nennen.

In Hinblick auf die Ertüchtigung bestehender Stahltragwerke sind die nachteilige Schwächung des Nettoquerschnittes durch zusätzlich erforderliche Bohrungen und die nicht zu verhindernden Relativverschiebungen der Lamellenpakete beim Entfernen der Niete unter Weiterverwendung der vorhandenen Nietlöcher zu nennen.

#### **3.4.2 Schweißen**

Beim Schweißen wird unter Verwendung von Wärmeenergie und teilweise Druck zwischen zwei Werkstoffen ein kontinuierlicher innerer Aufbau erzeugt. Der Schweißzusatz kann hierbei zugeführt werden und muss eine Schmelztemperatur in gleicher Größenordnung wie die der zu fügenden Werkstoffe besitzen.

Durch die Gefügaufmischung im Grundwerkstoff wird während des Schweißprozesses infolge stattfindender Diffusionsvorgänge die Verteilung der Konzentrationen der chemischen Begleitelemente verändert. Dies kann zu einer erhöhten Konzentration an Begleitelementen in der wärmebeeinflussten Zone und somit zu einer erhöhten Gefahr bezüglich Versprödung, Kalt- und Heißrissanfälligkeit führen.

Das Schweißen ist im Bauwesen Stand der Technik. Die angewendeten Verfahren sind hoch entwickelt. Für die Prüfung von Schweißnähten existieren zerstörungsfreie Verfahren, die anhand von Festlegungen über die zulässigen Unregelmäßigkeiten die Qualität der durchgeführten Schweißung dokumentieren.

### **3 Ertüchtigungen**

#### **3.4 Varianten des kraftschlüssigen Fügens**

---

##### **3.4.3 Löten – Kleben**

###### ***Löten***

Beim Löten werden zwei Werkstoffe mit Hilfe eines Zusatzstoffes, dem Lot, miteinander verbunden. Der Zusatzstoff wird hierbei über die eigene Liquidustemperatur, die tiefer liegt als die Solidustemperatur der zu fügenden Werkstoffe, hinaus erwärmt. Ein Flussmittel und eine schützende Atmosphäre sind je nach Verfahren mit zu berücksichtigen.

Die Bindung der Werkstoffe erfolgt über Diffusionsvorgänge und der Kapillarwirkung zwischen Lot und Grundwerkstoff.

Die mechanischen Eigenschaften der Verbindung sind beliebig einstellbar. Bei qualitativ hochwertiger Vorbereitung der zu fügenden Flächen sowie einer guten Verarbeitung bei entsprechender konstruktiver Gestaltung sind Festigkeiten, die denen des Grundwerkstoffs ähneln, erreichbar.

Die Güte einer Lötverbindung ist stark von den Benetzungs- und Ausbreitungsvorgängen von Lot und Flussmittel sowie von den Diffusionseigenschaften zwischen Lot- und Grundwerkstoffatomen abhängig.

Diese Vorgänge lassen sich prinzipiell durch geeignete Vorbehandlung der zu fügenden Oberflächen, durch exakte Einstellung der Arbeitstemperatur im Grundwerkstoff, der richtigen Wahl von Lot und Flussmittel sowie der exakten Spaltausrichtung beider Oberflächen entscheidend verbessern, womit die Qualität der Lötverbindung stark von der Erfahrung des Fachpersonals abhängig ist. Diese Empfindlichkeit ist als nachteilig zu bewerten. Eine zerstörungsfreie Prüfung der Lötverbindung und die Reproduzierbarkeit ist nicht gegeben.

Für die Verwendung der Lötverbindungen spricht die Nichtbeeinflussung des problematischen Grundwerkstoffs.

###### ***Kleben***

Kleben ist ein Kaltfügeverfahren, bei dem zwei gleiche oder auch unterschiedliche Werkstoffe durch eine artfremde Substanz miteinander verbunden werden. Aufgrund der wirkenden Adhäsionskräfte zwischen Kleber und den Werkstoffen kommt es zu einer Haftung und es entsteht eine kraftschlüssige Verbindung. Die zu fügenden Werkstoffe ändern hierbei ihre innere Struktur nicht.

Die Vorteile der Klebeverbindungen gegenüber Warmfügeverfahren sind insbesondere in der thermischen Nichtbeeinflussung des Gefüges der zu verbindenden Werkstoffe und der Möglichkeit des Fügens unterschiedlicher Materialien trotz ungleicher Dehnungen in der Scherfuge begründet. Daher wäre das Kleben ein geeignetes Mittel, den metallurgisch problematischen Altstahl zu verbinden, ohne Gefügeänderungen zu provozieren.

Nachteile dieses Verfahrens entstehen durch die schlechte Prüffähigkeit der Qualität der erzeugten Klebung. Zudem ist die Qualität der Klebung von der Oberflächenvorbehandlung und von den Witterungseinflüssen stark abhängig. Die Festigkeitseigenschaften einer Klebung sind zeitabhängig zu betrachten. Das Fügen von Tragwerken des Ingenieurbaus durch Kleben ist normativ nicht geregelt.

#### 3.4.4 Maschinenbaumäßige Verbindungen

Als maschinenbaumäßige Verbindung soll das Metallock-Verfahren vorgestellt werden. Es werden gerissene oder gebrochene Bauteile, insbesondere aus dem Material Guss, durch Metallriegel und ohne Wärmeeinbringung miteinander verklammert. Die Metallriegel besitzen im Vergleich zum Guss höhere Materialgüten, vgl. [PETE 1974].

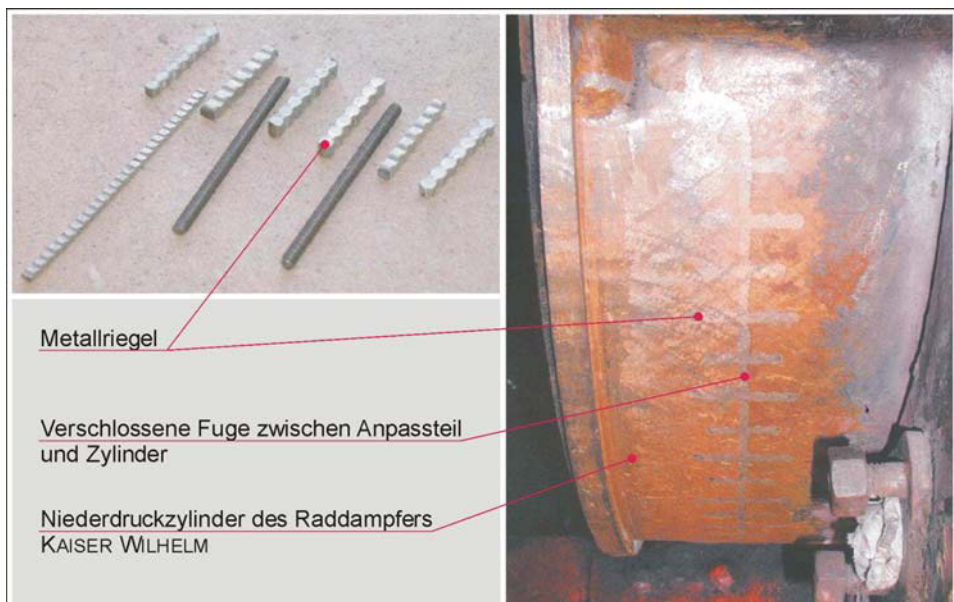


Bild 3-1: Reparatur eines Gussbauteils mit dem Metallock-Verfahren; Darstellung auf Grundlage von [WIES 2003].

Die zu verbindenden Teile erfahren hierbei eine passgerechte Bearbeitung. An der Verbindungsfuge werden orthogonal zum Riss mit Hilfe einer Lochschablone in beide zu fügenden Teile nebeneinander liegende Lochreihen gebohrt, in denen die Metallriegel lagenweise eingetrieben werden. Um gegebenenfalls eine Dichtheit der Fugestelle zu erreichen, wird entlang der Fuge ebenfalls gebohrt und nachträglich angepasste Metallriegel eingebracht, vgl. Bild 3-1.

Dieses Verfahren findet bereits bei der Reparatur von Motorblöcken des PKW- und Schiffs-

### 3 Ertüchtigungen

#### 3.5 Altstahlgeeignete Fügeverfahren

---

baus, bei Turbinen und bei gusseisernen Brücken Anwendung. Die Eignung des Verfahrens für die Ertüchtigung von Altstahlkonstruktionen ist zu prüfen.

#### 3.5 Altstahlgeeignete Fügeverfahren

##### 3.5.1 Allgemein

Die dargestellten Möglichkeiten des Fügens sind in der nachfolgenden Tabelle 3-1 vergleichend zusammengefasst. Für die Ertüchtigung der Stahltragwerke aus Flusstahl ist eine Wertung im Wesentlichen hinsichtlich der metallurgischen Beeinflussung des Grundwerkstoffs (GW), der Handhabung des Verfahrens, der Querschnittsschwächung infolge Bohrungen und der zerstörungsfreien Prüfbarkeit erforderlich.

Eine positive Bewertung erhalten die Fügemethoden, die den Grundwerkstoff metallurgisch nicht beeinflussen, gut handhabbar und reproduzierbar sind, den Bruttoquerschnitt nicht schwächen und deren Qualität der Verbindung mit zerstörungsfreien Prüfmethode prüfbar ist.

Verfahren	Metallurgische Beeinflussung GW	Handhabung des Verfahrens	Querschnitts- schwächung	Prüfbarkeit (zfP)
Schrauben	++	++	--	+
Nieten	-	-	--	+
Schweißen	--	+	++	+
Kleben	++	--	++	--
Löten	++	--	++	--
Metalock	++	+	-	+

Tabelle 3-1: Vergleich von Vor- und Nachteilen verschiedener Fügeverfahren in Hinblick auf die Ertüchtigung bestehender Altstahlkonstruktionen

##### 3.5.2 Fazit

Prinzipiell ist die Wahl der geeigneten Fügemethode von den tatsächlich vorhandenen Eigenschaften des im Bauwerk befindlichen Grundmaterials und den Gegebenheiten vor Ort abhängig. Schrauben und Schweißen sind die gängigen Verfahren zum Fügen von Stahlbauteilen auf der Baustelle.

In Hinblick auf die ökonomische Herstellung von Verbindungen vor Ort und insbesondere bei Anwendung an vorwiegend ermüdungsbeanspruchten Bauteilen stellt das Schweißen eine effiziente und geeignete Methode dar. Aus diesem Grund wird das Schweißen als Verbindungsmethode zwischen Alt- und Neustahl detaillierter untersucht.



## 4 Untersuchungen an Flusstahl

### 4.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

#### 4.1.1 Motivation und Vorgehensweise

In Hinblick auf die Wärmeeinbringung beim Schweißen ist die geometrische Ausdehnung der Speckschichten von essentieller Bedeutung.

Zur Quantifizierung der Speckschichten wurden die Komplementärflächen – die Seigerungs-zonen – vermessen, die durch Verwendung der Methode des BAUMANNabdrucks sichtbar gemacht werden.

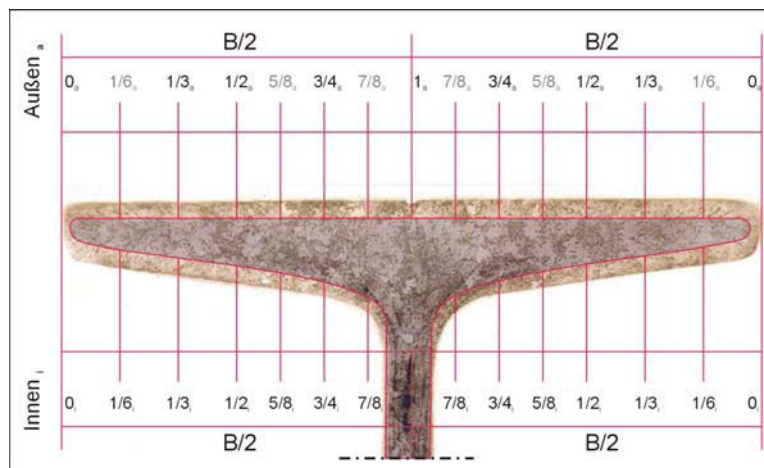


Bild 4–1: Messpunkte im Flanshbereich zur Bestimmung der Speckschichthöhe – schematisierte Darstellung

Zur Anfertigung des BAUMANNabdrucks wird handelsübliches Fotopapier in verdünnter Schwefelsäure für ca. 2 bis 3 Minuten eingeweicht und anschließend kurz abgetropft, um die überschüssige Flüssigkeit zu entfernen. Mit der Schichtseite wird das Fotopapier auf die zuvor geschliffene und gereinigte Probe aufgepresst. Beim Flusstahl hat sich eine Reaktionszeit von 5 Minuten bewährt, in der das Fotopapier keine Verschiebung relativ zur beschliffenen Oberfläche erfahren darf. Anschließend wird das Fotopapier vorsichtig, ohne zu verrutschen, von der Probenoberfläche abgehoben, unter Wasser abgespült, in handelsüblichem Fixiermittel für Fotopapiere einige Minuten fixiert, gewässert und getrocknet. Durch die Reaktion der Sulfide mit der Silberschicht des Fotopapiers färben sich die schwefelhaltigen Bereiche unterschiedlich stark braun. Ein höherer Schwefelgehalt im Stahl verursacht eine stärkere Braunfärbung. Die Reaktionsgleichung hierzu kann wie folgt angegeben werden.



## 4 Untersuchungen an Flusstahl

### 4.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

Das Gelingen eines BAUMANNabdrucks ist jedoch leicht durch Inaugenscheinnahme des Endprodukts – des Abdrucks selbst – erkennbar.

Aufgrund der mit erheblichen Aufwendungen verbundenen Beschaffung einer angemessenen Anzahl an gleichartigen Profilquerschnitten wurde im Rahmen dieser Arbeit die Bewertung der Verteilungen auf die Flansche von Doppel-T- und L-Profilen beschränkt.

Aus dem Fundus der BAM, aus der Literatur sowie dem Forschungsbericht der MFPA Leipzig, vgl. [REIC 2000], wurden ca. 80 BAUMANNabdrücke verschiedener Flusstähle vermessen und in einer Datenbank dokumentiert. Die Eingangsgrößen für die Quantifizierung der Seigerungszonen von Doppel-T-Profilen sind dem Kapitel Untersuchungen an Flusstahl – Anhang zu entnehmen.

Im Bild 4–1 sind die profilgrößenabhängigen Messstellen der Speckschichtdicken angegeben. Die Flansche sind grundsätzlich in Außen- und Innenseite unterteilt. Die Stege der Doppel-T- und L-Profile waren nicht Bestandteil der Untersuchung.

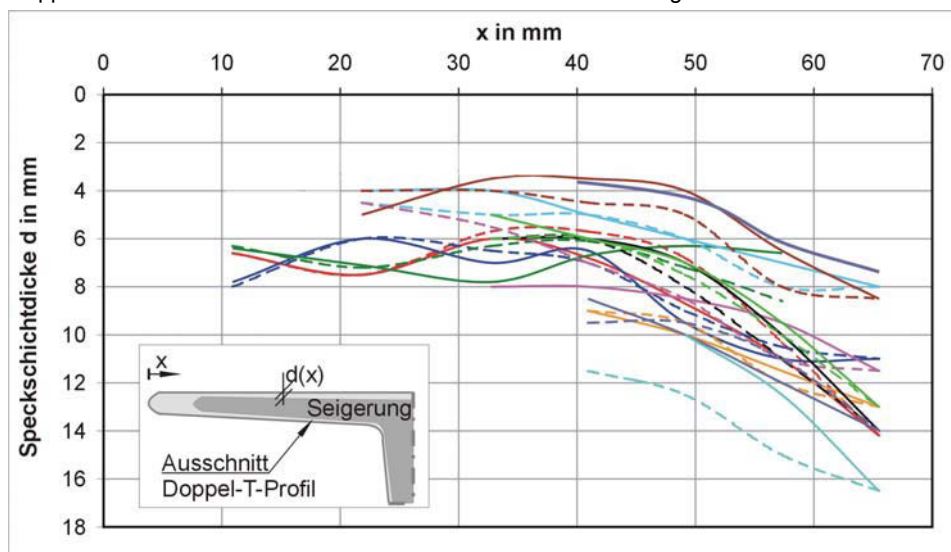


Bild 4–2: Speckschichtdicken an der Flanschaußenseite von Doppel-T-Profilen NP32– vgl. Kap. Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

Für die Auswertung der Messungen wurden Profile identischen Typs und identischer Größe zusammengefasst. Das Bild 4–2 zeigt exemplarisch die gemessenen Speckschichtdicken an den Flanschaußenseiten von Doppel-T-Profilen der Größe NP 32 aus Flusstahl verschiedener Herstellungsverfahren und -jahre.

Die im Bild 4–2 dargestellten Messwertkurven enden in Richtung Flanschaußenseite – der x-Wert wird kleiner – mit der Seigerungszone. Anderenfalls hätte die an dieser Stelle vorhandene Flanschdicke eingesetzt werden müssen. Bei der statistischen Auswertung verzerrt dies die Ergebnisinterpretation.

### 4.1.2 Untersuchungsergebnisse und Fazit

Die Messwerte sind in ausführlicher Form dem Kapitel Untersuchungen an Flusstahl – Anhang zu entnehmen. Die gemessenen Versuchsergebnisse streuen. Daher ist eine statistische Auswertung erforderlich. Hierfür wurde in Hinblick auf die Menge der Stichproben die GAUßsche Normalverteilung und die Log-Normalverteilung als die zwei wesentlichen Verteilungsformen für Materialeigenschaften im Vorfeld untersucht, vgl. [Fisc 1995]. Durch Ermittlung und Vergleich des Bestimmtheitsmaßes konnte festgestellt werden, dass sich die gemessenen Werte der log. Normalverteilung zuordnen lassen.

Für die Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt die Auftragung über eine logarithmische Merkmalsteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz.

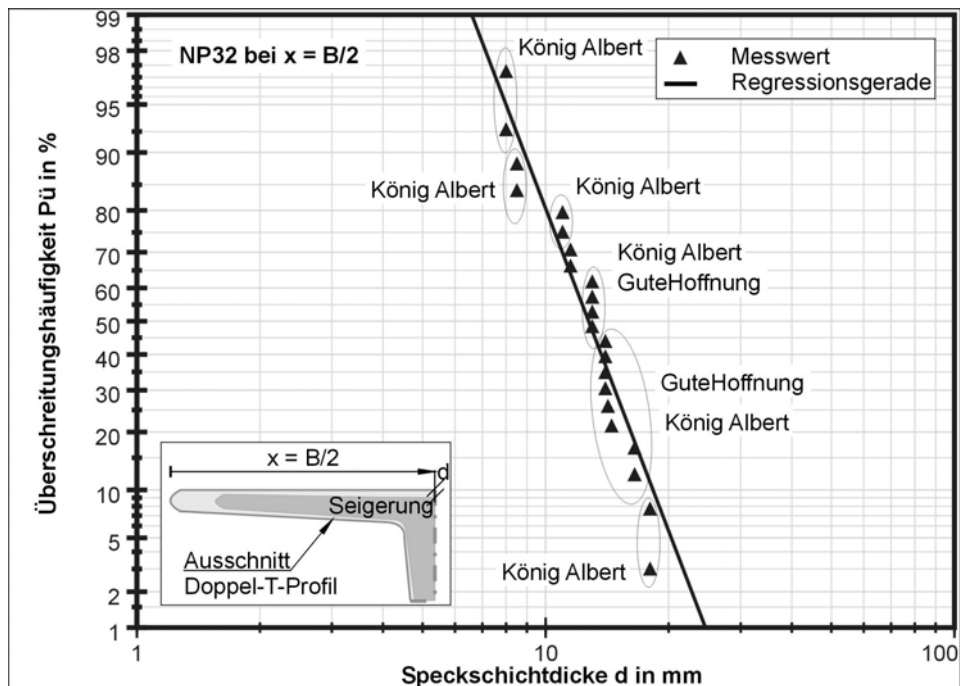


Bild 4–3: Speckschichtdicken von Profilen NP 32 unterschiedlicher Walzwerke im Wahrscheinlichkeitsnetz aufgetragen

Folgende wesentliche qualitative Aussagen über den Verlauf der Seigerungen und Speckschichten sind auf Grundlage der Messungen möglich.

- Die Form und Lage der Seigerungszonen ist in der Regel querschnittsweise konstant.
- Seigerungszonen befinden sich prinzipiell im Mittenbereich des Querschnitts.

## 4 Untersuchungen an Flusstahl

### 4.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

- Im Bereich des maximalen Umformgrades, beispielsweise beim Übergang vom Steg zum Flansch, sind die Seigerungen zur Innenseite der Umformung hin verschoben.
- Die Enden der Flansche sind stets frei von Seigerungen.

Das aufgeführte qualitative Verhalten ist auf den richtenden Einfluss der Seigerungszone während des Walzens zurückzuführen, vgl. Kap. 2.3.

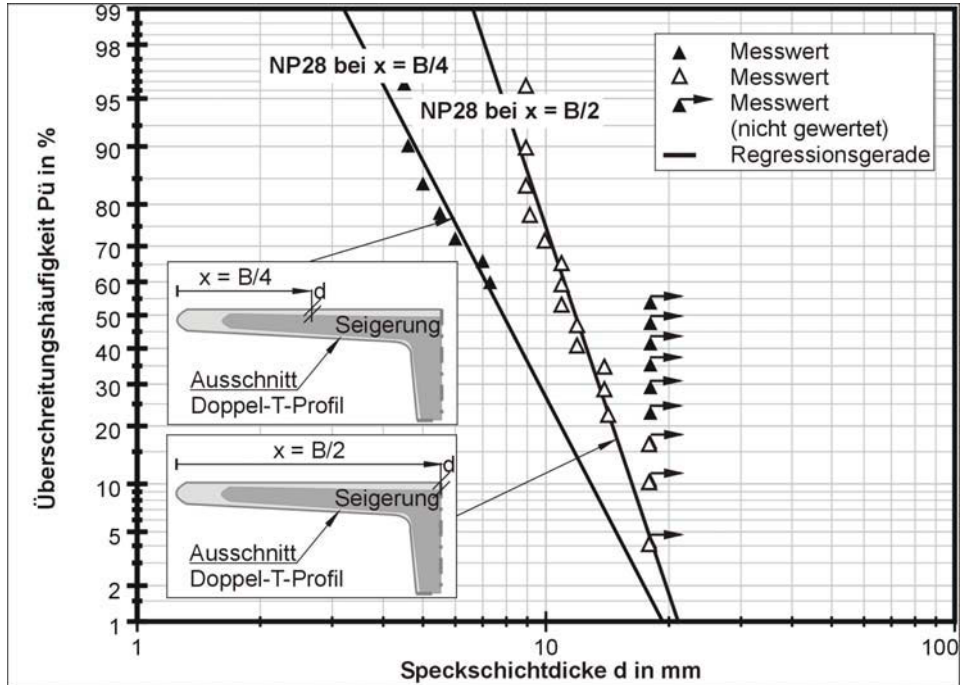


Bild 4–4: Speckschichtdicken von Profilen NP 28 im Wahrscheinlichkeitsnetz für  $x = B/4$  und  $x = B/2$  aufgetragen –  $B$  ... Gesamtflanschbreite des Profils

Im Bild 4–3 ist die Speckschichtdicke der Profilgröße NP 32 in Flanschnitte dargestellt. Aufgrund der auffälligen „Clusterbildung“ bei Auftragung der Speckschichtdicken – durch die elliptische Umrandung hervorgehoben – lag die Vermutung nahe, dass diese Charakteristik auf die Einflüsse infolge unterschiedlicher Walzwerke zurückzuführen ist. Diese Vermutung lässt sich, wie Bild 4–3 zeigt, nicht bestätigen. Es zeigt sich vielmehr, dass die Streuung infolge unterschiedlicher Chargen eines Walzwerkes im Vergleich zu den Streuungen infolge verschiedener Walzwerke höher ist. Detailliertere Betrachtungen über die Größe der Streuungen – chargen- und walzwerkbedingt – sind aufgrund fehlender aussagekräftiger Informationen nicht möglich.

Für die Doppel-T-Profilgröße NP 28 ist im Bild 4–4 exemplarisch die Speckschichtdicke für den äußeren Viertelpunkt der Flanschbreite – bei  $x = B/4$  – und für die Flanschnitte – bei  $x = B/2$  – angegeben.

## 4 Untersuchungen an Flusstahl

### 4.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

Im aufgeführten Bild 4–4 ist die Anzahl der bei  $x = B/4$  eingetragenen Messungen im Vergleich zur Flanschmitte geringer, obwohl als Stichprobenumfang beider Messreihen die gleiche Anzahl an Profilen diente. Die Ursache ist in der geometrischen Ausdehnung der Seigerungszone begründet. Im Messpunkt  $x = B/4$  war teilweise keine Seigerungszone auffindbar. Um die Messreihen nicht mit weiteren Speckschichtdicken – in diesem Fall der gesamten vorhandenen Flanschdicke – zu verfälschen, wurden Messwerte, die den Flanschdicken identisch sind, bei der Ermittlung von Streuung und Mittelwert lediglich als Stichprobe mit Ausreißercharakter berücksichtigt. Dies bedeutet, dass der Wert der Messung nicht berücksichtigt, jedoch die Stichprobenanzahl um diese Messungen erhöht wurde, vgl. Kap. 6.2.6. Die 5 %-Fraktilwerte wurden mit Hilfe einer Regressionsanalyse bestimmt, vgl. Kap. 9.1. Im Bild 4–5 und Bild 4–7 sind für die Flanschaußen- und Flanschinnenseite die Speckschichtdicken als 5 %-Fraktilwerte aufgetragen. Damit besteht eine 5 %-ige Wahrscheinlichkeit, dass die angegebenen Speckschichten noch unterschritten werden. Diese Vorgehensweise liegt hinsichtlich des Zieles der Untersuchungen auf der sicheren Seite.

Als Charakteristikum ist feststellbar, dass die Speckschichtdicke in allen dargestellten Profilen bei  $x = B/4$  kleiner als die Speckschichtdicke bei  $x = B/2$  ist. Zudem ist erkennbar, dass die Speckschichtdicke sich direkt proportional zur Profilgröße verhält. Aufgrund der von der Stichprobenanzahl abhängigen Auftragung im Wahrscheinlichkeitsnetz und der einbeschriebenen Regressionsgeraden wird der letztgenannte Umstand verzerrt.

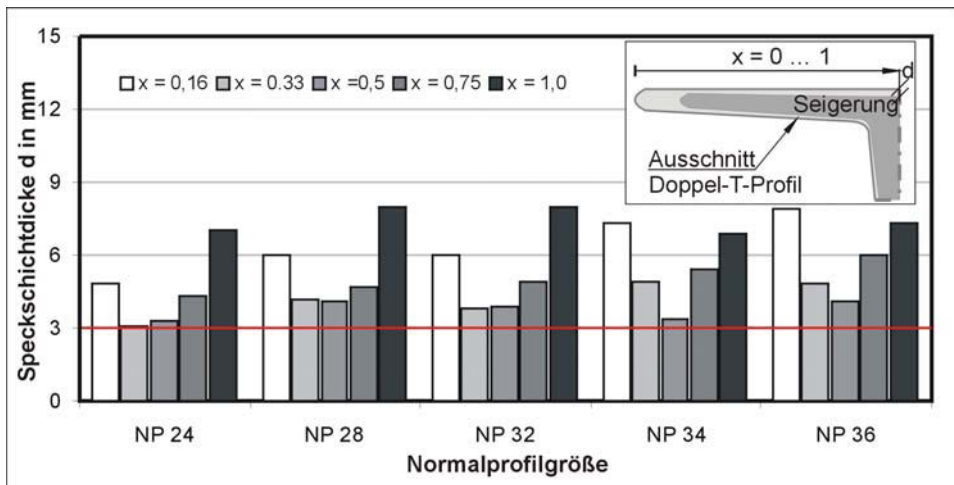


Bild 4–5: Flanschaußenseite – vorhandene Speckschichtdicke  $d$  verschiedener Normalprofilgrößen als 5 %-Fraktilwert aus der Stichprobenauswertung

Im Bild 4–5 zeigt sich, dass die Speckschichten beginnend am Ende der Flanschaußenseite abnimmt, um dann im Bereich über dem Steg wieder an Dicke zu gewinnen. Dieses Verhalten ist auf den für Seigerungen im Flanshbereich von Doppel-T-Profilen typischen delphinflossenartigen Verlauf zurückzuführen, vgl. [REIC 2000] und Bild 4–6.

## 4 Untersuchungen an Flusstahl

### 4.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

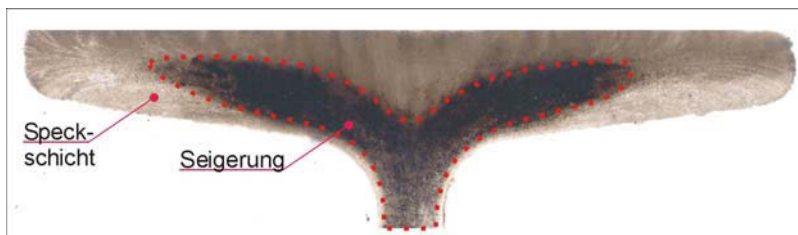


Bild 4–6: exemplarische Darstellung des typischen delphinflossenartigen Verlaufs der Seigerungen im Flanscbereich von Doppel-T-Profilen

Auf der Flanschaußenseite von Doppel-T-Profilen ist ab einer Größe NP 24 die vorhandene Speckschichtdicke als 5%-Fraktilwert stets  $d \geq 3,0$  mm, vgl. Bild 4–5. Wird der gleiche Grenzwert für die Innenseite der Flansche definiert, kann fest gestellt werden, dass  $d \geq 3,0$  mm für den Definitionsbereich von  $0 \leq x \leq 0,33$  gilt.  $x = 0,33$  entspricht  $1/3$  der halben Flanschbreite.

Im Gegensatz zur Flanschaußenseite nimmt die vorhandene Speckschicht bei  $x = 0$  beginnend kontinuierlich ab. Im Bild 4–7 sind die Speckschichtdicken für  $x > 0,5$  nicht aufgetragen, da hier mit verminderten Speckschichten zu rechnen ist, die für eine Schweißung ungeeignet sind.

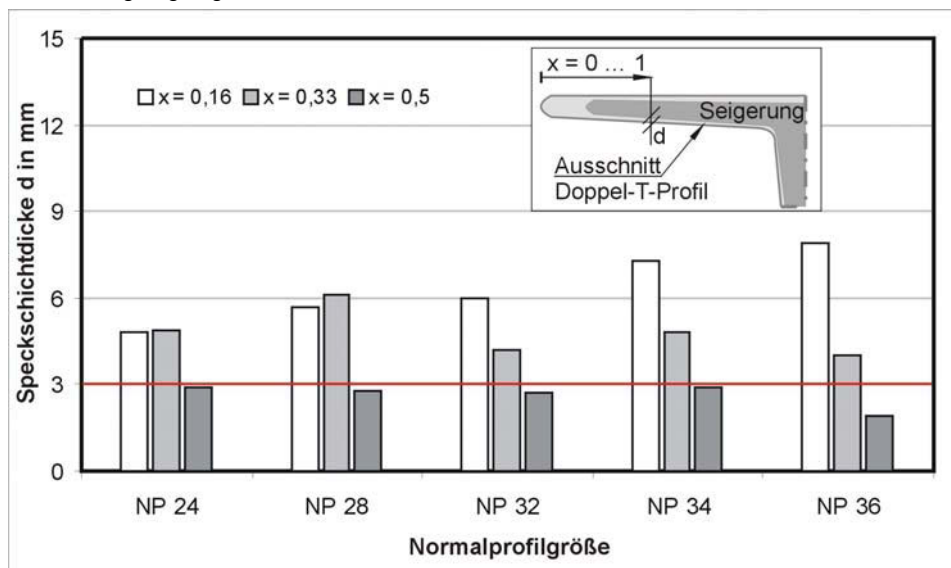


Bild 4–7: Flanschinnenseite – vorhandene Speckschichtdicke  $d$  verschiedener Normalprofilgrößen als 5%-Fraktilwert aus der Stichprobenauswertung

### 4.1.3 Verifikation der Messergebnisse

Um die Genauigkeit der aus den BAUMANNabdrücken resultierenden Messwerte zu verifizieren, wurden bereits vermessene Querschnitte stichprobenartig ausgewählt und für eine chemische Analyse mittels Funkenemissionsspektroskopie vorbereitet. Hierfür wurde schräg über die Flanschdicke ein Sägeschnitt durchgeführt und entlang der ergebnen Oberfläche die Konzentration der Begleitelemente erfasst, vgl. Bild 4–8. Der schräge Schnitt besitzt gegenüber einem parallel zur Oberfläche verlaufendem Schnitt den wesentlichen Vorteil, dass über die gesamte Flanschdicke der Verlauf der chemischen Konzentrationen kontinuierlich erfasst werden kann. Zudem ist eine wirtschaftlichere Herstellung gegenüber Parallelschnitten möglich.

Es zeigt sich auch hier qualitativ, dass die Elemente Schwefel, Phosphor und Kohlenstoff seigern. Im Flanscmittbereich ist ebenfalls die höhere Konzentration an Begleitelementen erkennbar, wie dies zuvor der BAUMANNabdruck gezeigt hat. Der Übergang von der Speckschicht zur Seigerungszone liegt in der ähnlichen Tiefe wie in den zuvor durchgeführten BAUMANNabdrücken.

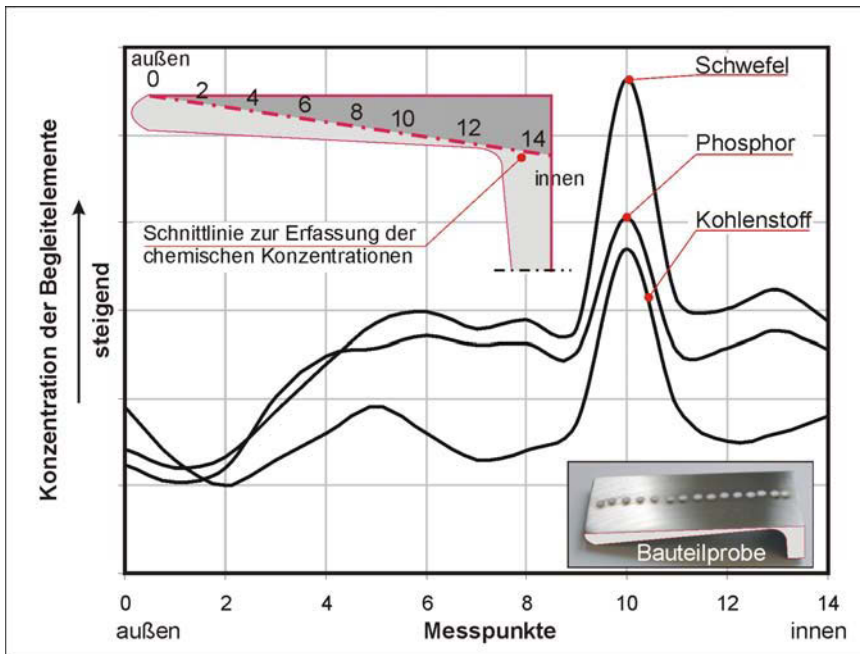


Bild 4–8: Verlauf der chemischen Konzentration wesentlicher Begleitelemente des Flusstahls über die Flanschdicke, exemplarisch an einem L-Profil dargestellt; Stickstoffkonzentrationsverlauf nicht angegeben, da Konzentration über Querschnitt konstant

## 4 Untersuchungen an Flusstahl

### 4.2 Sprödbruchnachweis nach Dast-Ri 009

---

## 4.2 Sprödbruchnachweis nach DAST-Ri 009

### 4.2.1 Vorgehensweise

Zur Vermeidung der Gefahr von Sprödbruch wurde im Rahmen der DAST-Richtlinie 009 ein bruchmechanischer Nachweis zur Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten entwickelt, vgl. [DAST 009].

Die Nachweisführung erfolgt hierbei durch eine vergleichende Betrachtung von Temperaturen, auf der Beanspruchungs- sowie auf der Widerstandsseite.

Der Sprödbruchnachweis wird nachfolgend für Flusstähle konform zum Nachweiskonzept der [DAST 009] in allgemeiner Form durchgeführt. Um die für Flusstähle in Laborversuchen zumeist bei Raumtemperatur ermittelten Bruchzähigkeiten  $K_{Ic}$  den Beanspruchungen der [DAST 009] für Schweißverbindungen gegenüberstellen und dem Sicherheitskonzept unterwerfen zu können, wurde das bestehende Nachweisformat für diesen Anwendungsfall adaptiert.

Das modifizierte Nachweisformat ist schematisch im Bild 4–9 dargestellt. Folgende Annahmen für Stahltragwerke aus Flusstahl wurden hierbei in Anlehnung an die [DAST 009] zu Grunde gelegt.

- Das Beanspruchungsniveau  $\sigma_{appl}$  liegt bei 50% der ansetzbaren rechnerischen Streckgrenze zuzüglich eines Eigenspannungsanteils in Höhe von 100 N/mm<sup>2</sup>.
- Als auf der sicheren Seite liegende Abschätzung der Streckgrenze wird der Wert der 5%-igen Überschreitungshäufigkeit unter Verwendung des in Tabelle 2-8 angegebenen Mittelwertes und der zugehörigen Standardabweichung in Ansatz gebracht.
- Die Betrachtung erfolgt für üblicherweise in genieteten Flusstahlprofilen verbaute Blechdicken  $t$  bis einschließlich  $t \leq 20$  mm.
- Die Rissfortschrittskonstanten werden nach [BARS 1987] zu  $m = 3$  und  $C = 1.8E-13$  angesetzt.
- In Anlehnung an die [DAST 009] wird angenommen, dass sich der bruchauslösende Riss im Grundwerkstoff befindet, so dass sämtliche Einflüsse aus der WEZ – verändertes Materialverhalten – oder durch Alterung – durch die Wärmeeinbringung beim Schweißen verändertes Materialverhalten – vernachlässigt werden können.
- Als bemessungsrelevantes Kerbdetail wird wie in der [DAST 009] die längs aufgeschweißte Steife gewählt.
- Für die Ermittlung der Bemessungsrisslänge, aus der Anfangsrisslänge und dem Risswachstum resultierend, wird für die aufzubringenden 500.000 Lastwechsel das  $\Delta\sigma_c = 56$  N/mm<sup>2</sup> nach EC 3 angesetzt, vgl. [BACK 2001].
- Es wird unterstellt, dass sich die im Versuch bei Raumtemperatur ermittelten Zähigkeiten von Flusstahl bereits im Übergangsbereich bzw. in der Tieflage befinden.



**4 Untersuchungen an Flusstahl**  
 4.2 Spröbruchnachweis nach Dast-Ri 009

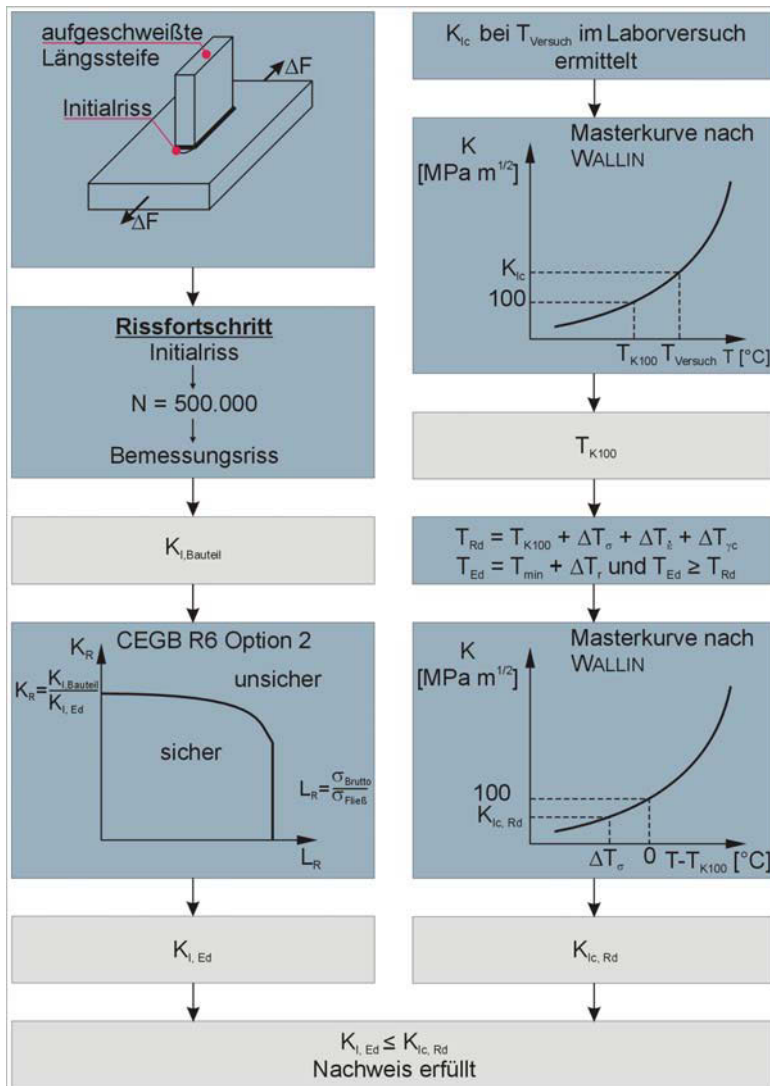


Bild 4–9: modifizierter Spröbruchnachweis nach [DAST 009]

Die Formeln für die modifizierte Nachweisführung sind nachfolgend angegeben. Die Notation orientiert sich hierbei im Wesentlichen an [KÜHN 2005].

## 4 Untersuchungen an Flusstahl

### 4.2 Sprödbruchnachweis nach Dast-Ri 009

---

#### **Ermittlung des Spannungsintensitätsfaktors $K_{I,Ed}$ auf der Beanspruchungsseite**

Die Risstiefe  $a_0$  des halb elliptischen Initialrisses wird blechdickenabhängig wie folgt nach [BACK 2001] angegeben.

$$a_0 = 0,5 \cdot \ln \left( 1 + \frac{t}{t_0} \right) \quad \text{für } t < 15 \text{ mm und} \quad (\text{Gl. 4-1})$$

$$a_0 = 0,5 \cdot \ln \left( \frac{t}{t_0} \right) \quad \text{für } t > 15 \text{ mm.} \quad (\text{Gl. 4-2})$$

$t_0$  beträgt hierbei 1 mm und  $t$  steht für die vorhandene Blechdicke.

Die Rissbreite  $c_0$  des Initialrisses ergibt sich zu

$$c_0 = \frac{5}{2} a_0. \quad (\text{Gl. 4-3})$$

Aus dem Initialriss entsteht durch Ermüdungsbeanspruchung nach  $N = 500.000$  Lastwechseln mit einem nach EC 3 anzusetzenden  $\Delta\sigma_c = 56 \text{ N/mm}^2$  die Endrissgeometrie. Durch Integration der Parisgleichung, vgl. [PARI 1961],

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (\text{Gl. 4-4})$$

lässt sich die Endrissgeometrie bestimmen – diese entspricht gleichzeitig dem Bemessungsriß.

Der Spannungsintensitätsfaktor  $\Delta K$  ist hierbei allgemein wie folgt definiert

$$\Delta K = \Delta\sigma_c \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y \cdot M_k. \quad (\text{Gl. 4-5})$$

Die Funktion  $Y$  zur Erfassung der Rissgeometrie und die Funktion  $M_k$  zur Erfassung der Geometrie des gerissenen Körpers sind für das im Bild 4–9 links oben dargestellte Kerbdetail [RAJU 1968] und [HOBBS 1993] zu entnehmen. Die oben angegebenen werkstoffabhängigen Konstanten  $m$ ,  $C$  finden nach [BARS 1987] Verwendung.

Aus der Endrisstiefe  $a_d$  ergibt sich der zugehörige Wert des Spannungsintensitätsfaktors unter Berücksichtigung des Beanspruchungsniveaus  $\sigma_{appl}$  zu

$$K_{I, Bauteil} = \sigma_{\text{appl}} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_d} \cdot Y \cdot M_k \cdot \frac{1}{31.6} \quad (\text{Gl. 4-6})$$

Für die Spannung  $\sigma_{\text{appl}}$  wird in Anlehnung an [BACK 2001]

$$\sigma_{\text{appl}} = \frac{\sigma_{\text{fließ}}}{2} + 100 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Gl. 4-7})$$

angesetzt, wobei  $\sigma_{\text{fließ}}$  die blechdickenabhängige Streckgrenze des Materials darstellt. Der konstante Wert 100 N/mm<sup>2</sup> repräsentiert pauschal den Anteil an Schweißeigenstressungen. Die Streckgrenze  $\sigma_{\text{fließ}}$  ergibt sich zu

$$\sigma_{\text{fließ}} = f_y - 0.25 \cdot \frac{t}{t_0}, \quad (\text{Gl. 4-8})$$

wobei für die Streckgrenze  $f_y = f_{y,5\%} = f_{y,m} + k \cdot f_{y,s}$

der Wert der 5%-igen Überschreitungshäufigkeit in Ansatz gebracht wird.

$f_{y,m}$  Mittelwert der Streckgrenze, vgl. Tabelle 2-8

$f_{y,s}$  Standardabweichung der Streckgrenze, vgl. Tabelle 2-8

$k = k_{n=535} \approx k_{n=\infty} = 1,644$  für  $P_{\bar{u}} = 5\%$ , vgl. [HAIB 2002]

$$f_y = f_{y,5\%} = 290 \text{ N/mm}^2 + 1.644 \cdot 43 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Gl. 4-9})$$

$$f_y = 361 \text{ N/mm}^2$$

Durch die Berechnung des Plastizierungsgrades  $L_R$  zu

$$L_R = \frac{\sigma_{\text{appl}}}{\sigma_{\text{fließ}}} \quad (\text{Gl. 4-10})$$

errechnet sich nach dem Failure Assessment Diagramm bei Anwendung der Option 2 das Verhältnis

$$K_R = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.5 \cdot L_R^2}} = \frac{K_{I, Bauteil}}{K_{I, Ed}} \quad (\text{Gl. 4-11})$$

## 4 Untersuchungen an Flusstahl

### 4.2 Sprödbbruchnachweis nach Dast-Ri 009

---

von Bemessungsintensität  $K_{I, Bauteil}$  zu Materialbeanspruchbarkeit  $K_{I, Ed}$ , vgl. [KÜHN 2005]. Durch Umformung lässt sich der erforderliche Spannungsintensitätsfaktor  $K_{I, Ed}$  berechnen.

$$K_{I, Ed} = K_{I, Bauteil} \cdot \sqrt{1 + 0.5 \cdot L_R^2} \quad (Gl. 4-12)$$

#### **Ermittlung der vorhandenen Materialbeanspruchbarkeit $K_{Ic, Rd}$**

Im Nachweiskonzept der DAST-Ri 009 wird die Zähigkeit des Materials üblicherweise über die modifizierte SANZ-Korrelation ermittelt, indem die experimentell bestimmten Kerbschlagbiegearbeiten in äquivalente Bruchzähigkeiten umgerechnet werden. Für Flusstähle liegen bereits im Versuch ermittelte Bruchzähigkeiten vor, die nachfolgend für das Nachweiskonzept aufbereitet werden.

Für die Ermittlung von  $K_{Ic, Rd}$  wird durch Anwendung der WALLIN-Masterkurve, vgl. [Back 2001], die  $T_{K100}$  Temperatur – bei welcher der zugehörige Wert für den Spannungsintensitätsfaktor  $100 \text{ MPa m}^{1/2}$  beträgt – aus den Versuchsergebnissen rückgerechnet.

$$T_{K100} = T_{\text{Versuch}} - 52 \cdot \ln \left[ \frac{(K_{Ic} - 20) \cdot \left( \frac{25}{5 \cdot a} \right)^{-0.25} - 10}{70} \right] \quad (Gl. 4-13)$$

$K_{Ic}$  in  $\text{MPa m}^{1/2}$

Die Bemessungstemperatur (Design-Temperatur) ergibt sich durch Berücksichtigung der anzusetzenden Minimaltemperatur für Bauwerke ( $-25^\circ\text{C}$ ), dem Strahlungsverlust ( $-5 \text{ K}$ ), dem Sicherheitselement nach [BACK 2001] ( $-7 \text{ K}$  bzw.  $-38 \text{ K}$ ) und dem Dehnrateneinfluss, der pauschal mit  $20 \text{ K}$  angesetzt wurde, vgl. [KÜHN 2005]. Der Einfluss aus der Kaltumformung wird nicht berücksichtigt.

Durch nochmalige Anwendung der WALLIN-Masterkurve und durch Einsetzen der bekannten Werte für  $T_{K100}$  und für die Temperatur  $T$  wird

$$K_{Ic, Rd} = 20 + \left[ 70 \cdot e^{\frac{T - T_{K100}}{52}} + 10 \right] \cdot \left[ \frac{25}{5 \cdot a} \right]^{0.25} \quad (Gl. 4-14)$$

ermittelt.

Die Design-Temperatur  $T$  ergibt sich aus

minimale Außentemperatur für Deutschland	$T_{\min} = -25^{\circ}\text{C}$
Berücksichtigung von Strahlungsverlusten	$\Delta T_r = -5\text{ K}$
Berücksichtigung des Dehnrateneinflusses (in sicherer Abschätzung)	$\Delta T_{(e)} = -20\text{ K}$
Additives Sicherheitselement (bei Verwendung des 5 %-Fraktilwertes)	$\Delta T_{\gamma c} = -7\text{ K}$
Additives Sicherheitselement (bei Verwendung von Mittelwerten, beispielsweise aus Laborversuchen ermittelt)	$\Delta T_{\gamma c} = -38\text{ K}$

### 4.2.2 Ergebnisauswertung und Fazit

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist im Bild 4–10 und im Bild 4–11 dokumentiert. Für eine im Laborversuch bei Raumtemperatur, vgl. Bild 4–10, oder bei  $T = 0^{\circ}\text{C}$ , vgl. Bild 4–11, ermittelte Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  kann die maximal zulässige Blechdicke  $t$  durch Einhaltung der Bedingung  $K_{Ic,Rd} \geq K_{I,Ed}$  ermittelt werden.

Anhand von in der BAM und der TU Freiberg durchgeführten bruchmechanischen Versuchen an Flusstählen konnte gezeigt werden, dass die vorhandene Zähigkeit  $K_{Ic}$  in der Regel der geforderten Zähigkeit genügt, da diese zumeist über  $100\text{ MPa m}^{1/2}$  lagen.

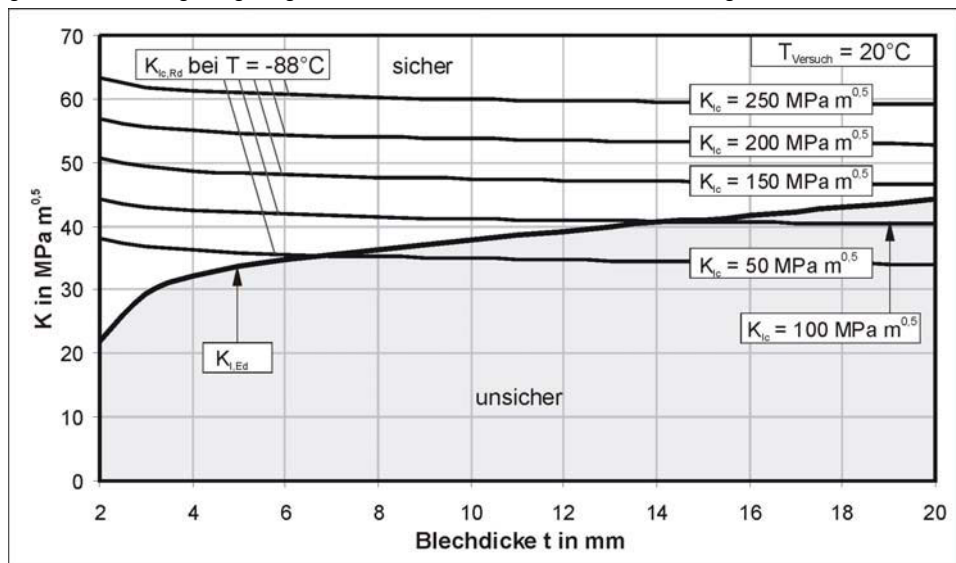


Bild 4–10: Parameterstudie –  $K$  in Abhängigkeit von der Blechdicke  $t$  für unterschiedliche bei Raumtemperatur ermittelten Bruchzähigkeiten  $K_{Ic,Rd}$  sowie Angabe der erforderlichen Bruchzähigkeit  $K_{I,Ed}$  – Temperatur der Versuchsdurchführung  $T = 20^{\circ}\text{C}$

## 4 Untersuchungen an Flusstahl

### 4.2 Spröbruchnachweis nach Dast-Ri 009

In der Arbeit von [LANG 1996] sind für Bruchmechanikversuche statistische Auswertungen vorgenommen wurden. Legt man die Mittelwerte und die 5%-Unterschreitungshäufigkeiten als Eingangswerte für die Nachweisführung fest, so ergibt sich der im Bild 4–12 dargestellte Zusammenhang. Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Bruchzähigkeit fand hierbei bei  $T = 0^\circ\text{C}$  statt. Hierbei ist zu erwähnen, dass als Sicherheitselement  $\Delta T_{yc}$  konform zu [Back 2001] bei Verwendung von 5 %-Fraktilwerten  $\Delta T_{yc} = 7\text{ K}$  und bei Verwendung des Mittelwertes  $\Delta T_{yc} = 38\text{ K}$  einberechnet wird. Daraus ergeben sich die unterschiedlichen Temperaturen  $T = -57^\circ\text{C}$  und  $T = -88^\circ\text{C}$ .

Für  $K_{Ic}$  –Werte, die den 5%-Fraktilwert oder den Mittelwert darstellen, ergibt sich bis ca. 11 mm bzw. 17 mm Blechdicke eine ausreichende Sicherheit gegen Spröbruch.

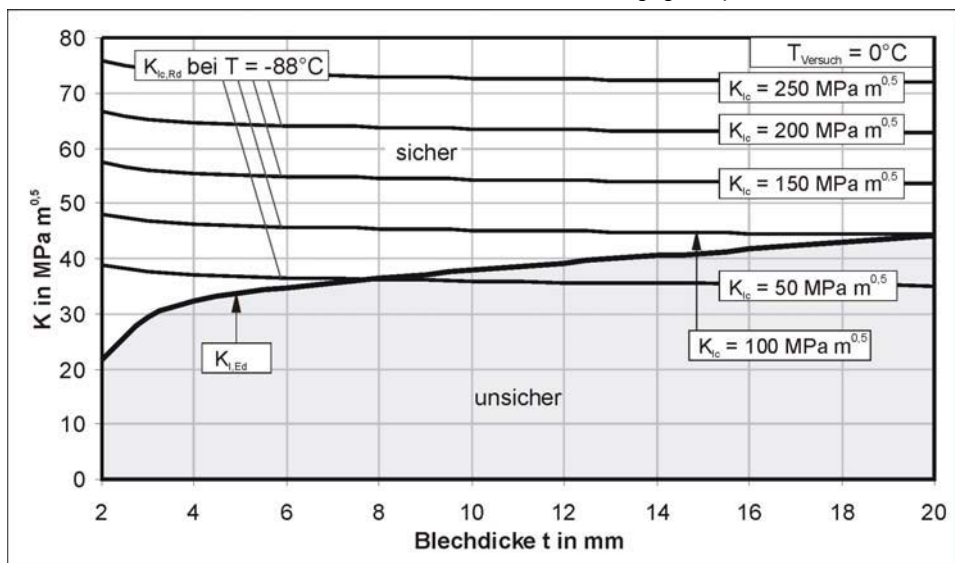


Bild 4–11: Parameterstudie –  $K$  in Abhängigkeit von der Blechdicke  $t$  für unterschiedliche bei Raumtemperatur ermittelten Bruchzähigkeiten  $K_{Ic,Rd}$  sowie Angabe der erforderlichen Bruchzähigkeit  $K_{I,Ed}$  – Temperatur der Versuchsdurchführung  $T = 0^\circ\text{C}$

Für Blechdicken  $t \geq 11\text{ mm}$  wird daher empfohlen, die reale Streckgrenze in die Berechnung mit einfließen zu lassen. Für die hier durchgeführten Berechnungen wurde wie oben angegeben eine konservative Schätzung der Streckgrenze in Ansatz gebracht. Wird für die Streckgrenze statt dem Wert der 5%-igen Überschreitungshäufigkeit der Mittelwert nach Tabelle 2-8 angesetzt, so ergibt sich die im Bild 4–12 grau dargestellte Kurve für  $f_y = 290\text{ N/mm}^2$ . Mit dieser Grenzkurve – also bei verminderter Streckgrenze – errechnet sich eine maximal zulässige Blechdicke  $t < 17,5\text{ mm}$ , wenn weiterhin für die Bruchzähigkeit der 5 %-Fraktilwert angesetzt wird. Bei ausschließlicher Verwendung der Mittelwerte der Streckgrenze sowie der Bruchzähigkeit, ergibt sich ein Schnittpunkt jenseits von  $t = 20\text{ mm}$ . Damit lassen sich folgende Aussagen formulieren. Die Nachweise der DAST-Richtlinie 009 gelten generell für moderne Baustähle. Blechdicken, welche nach diesem Nachweis ohne

Spröbruchgefahr verwendet werden, sind mit Flusstahl nicht realisierbar, da er im Vergleich eine geringere Zähigkeit besitzt. Jedoch lässt sich nach Bild 4–12 feststellen, dass bis zu einer Blechdicke  $t < 11$  mm ein Spröbruch nicht zu erwarten ist. Für Blechdicken  $t \geq 11$  mm empfiehlt sich eine genauere Betrachtung der vorhandenen Werkstoffparameter. Die maximal verbauten Blechdicken liegen wie schon erwähnt in der Regel unter 14 mm, vgl. [BARG 1993]. In bestehenden Bauwerken rettet sich der Baustoff Flusstahl damit im Spröbruchnachweis über die geringen Blechdicken.

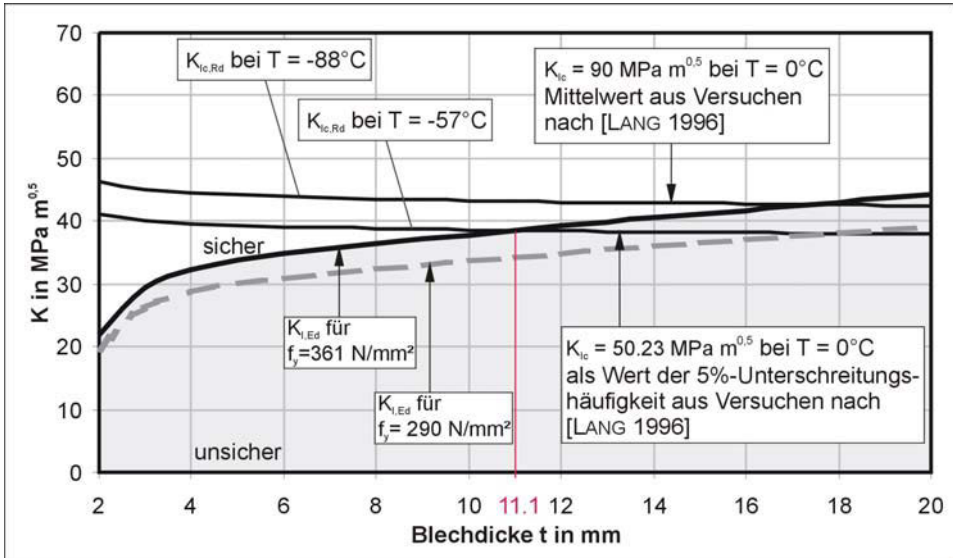


Bild 4–12: Gegenüberstellung der Beanspruchbarkeit  $K_{Ic,Rd}$  sowie der Beanspruchung  $K_{I,Ed}$  –  $f_y = 361 \text{ N/mm}^2$  entspricht dem oberen 5%-Fraktilwert der Streckgrenze von Flusstahl nach Tabelle 2-8 –  $f_y = 290 \text{ N/mm}^2$  entspricht dem Mittelwert der Streckgrenze von Flusstahl nach Tabelle 2-8

## **5 Fügen durch Schweißen**

### **5.1 Stand des Schweißens um 1900**

---

## **5 Fügen durch Schweißen**

### **5.1 Stand des Schweißens um 1900**

Ende des 19. Jahrhunderts bestand bereits die Möglichkeit, elektrischen Strom zur Erzeugung eines Lichtbogens zu nutzen. Als Erfinder des heute noch angewendeten Lichtbogenhandschweißens gilt NIKOLAI NIKOLAJEWITSCH BERNADOS. Er entwickelte ein Verfahren zum Fügen von Werkstoffen, indem er zwischen Werkstück und Kohleelektrode einen Lichtbogen erzeugte. Die Werkstücke wurden durch Hinzufügen eines Zusatzwerkstoffes miteinander verschweißt. Im Jahr 1881 führte er dieses Verfahren in Paris erstmalig öffentlich vor.

Im Jahr 1890 modifiziert der russische Ingenieur NIKOLAI GAWRILOWITSCH SLAWJANOW das Lichtbogenschweißen, indem er die Kohleelektrode durch eine Metallelektrode ersetzte, die gleichzeitig als abschmelzender Zusatzwerkstoff diente. In der Industrie fand dieses Verfahren vereinzelt bereits Ende des 19. Jahrhunderts Anwendung, vgl. [VDI 1926].

Es war bekannt, dass die das Schweißgut umgebende Atmosphäre die Güteeigenschaften der Schweißung beeinflussen. OSKAR KJELLBERG entwickelte 1908 die erste umhüllte Stabelektrode, um die Umgebungsluft von der Schweißstelle fern zu halten. Anfang der 20er Jahre des 20. Jahrhunderts wurden die umhüllten Elektroden eingesetzt und beschleunigten die Nutzung des Lichtbogenhandschweißens, vgl. [TEWE 1948].

Mit der Weiterentwicklung und Verbreitung der Schmelzschweißverfahren wuchsen die chemischen und metallurgischen Anforderungen an die zu verschweißenden Baustähle. Die Stahlhersteller wurden gezwungen, ihre Herstellungsverfahren an die erhöhten Ansprüche anzupassen, um einen schweißgeeigneten Baustahl zur Verfügung stellen zu können.

## **5.2 Schweißeignung**

### **5.2.1 Begriffsdefinition**

Die Möglichkeit des Fügens zweier Bauteile mittels Schweißen wird nach [DIN 8528] mit dem Begriff der Schweißbarkeit beschrieben. Schweißbarkeit bedeutet sinngemäß die Eignung für die Herstellung einer metallischen Bindung durch ein geeignetes und angemessenes Schweißverfahren. Die Verbindung soll sowohl hinsichtlich örtlicher Eigenschaften als auch bezüglich ihres Einflusses auf die Konstruktion den gestellten Anforderungen genügen.

Die Schweißbarkeit gliedert sich nach Bild 5–1 in die Schwerpunkte Schweißsicherheit, Schweißmöglichkeit sowie Schweißeignung.

Die Schweißsicherheit umfasst die Einflüsse auf die Schweißbarkeit, die aus der Konstruktion und ihrer schweißgerechten Ausführung resultieren. Das Bauteil ist demnach konstruktiv so zu gestalten, dass es in den vorgegebenen Betriebszuständen die Funktionstüchtigkeit nicht verliert, vgl. [DIN 8528].



Sind die vorgesehenen Schweißarbeiten, insbesondere die erforderliche Schweißvorbereitung und -nachbehandlung sowie die Schweißnahtausführung unter den vorgesehenen Fertigungs- und Qualitätsbedingungen durchführbar, dann ist die Schweißmöglichkeit gegeben.

Die Schweißbeignung befasst sich mit den werkstoffabhängigen Besonderheiten des Bauteils. Die chemischen, metallurgischen und physikalischen Eigenschaften des Materials müssen definierten Anforderungen genügen, damit für den untersuchten Werkstoff die Schweißbeignung ausgesprochen werden kann, vgl. [SCHU 2004].

Anhand grundsätzlich zweier Kriterien kann die Schweißbeignung eines Werkstoffes charakterisiert werden. Zum einen soll der Bereich der Schweißnaht einschließlich der Wärmeeinflusszone (WEZ) die gleichen mechanischen Eigenschaften aufweisen wie der unbehandelte Grundwerkstoff. Des weiteren ist eine Rissunempfindlichkeit im Bereich der Schweißung erforderlich, um bei zyklischen Beanspruchungen günstigere Schwingfestigkeitskennwerte zu erhalten.

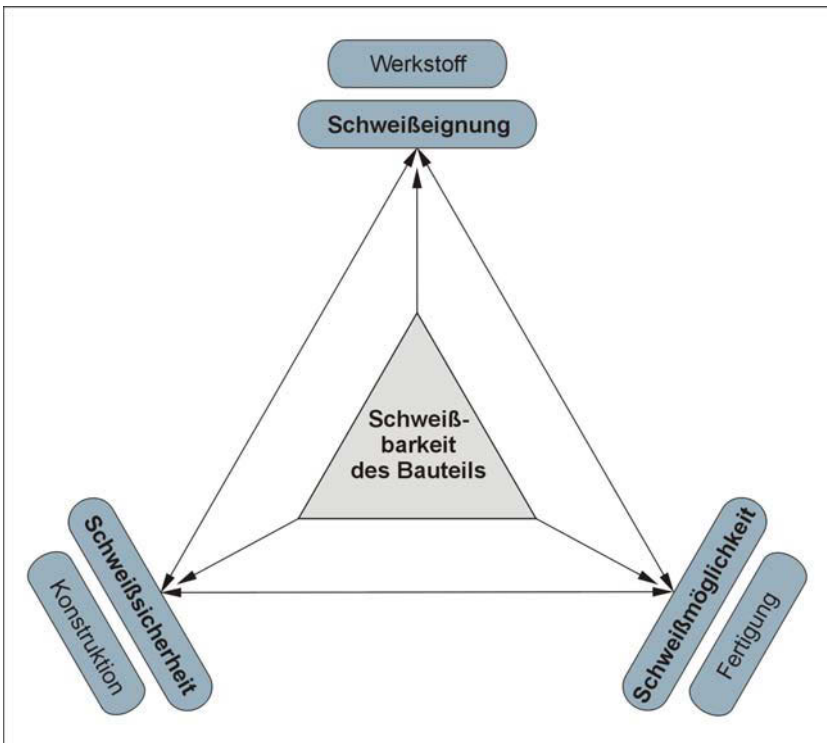


Bild 5–1: Einflussfaktoren auf die Schweißbarkeit

Der beim Schweißen erzeugte Temperatur-Zeit-Zyklus verursacht hohe Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten. In Abhängigkeit von der Werkstoffdicke entstehen im Bauteil mehraxiale Eigenspannungszustände. Gleichgewichtszustände der Gefüge sind aufgrund

## **5 Fügen durch Schweißen**

### **5.2 Schweißeynung**

---

der kurzen Reaktionszeit nicht erreichbar. Daher sind für die wärmebeeinflusste Zone des Grundwerkstoffes oftmals grobkörnige, harte und spröde Gefügebestandteile das Ergebnis. In Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der Werkstoffe ergeben sich hinsichtlich Spröbruch-, Alterungs-, Härte-, Heißriss- und Kaltrissneigung sowie der Löslichkeit und Diffusion von Gasen unterschiedliche, oftmals nachteilige Eigenschaften.

Bei den zu untersuchenden Altstählen handelt es sich um Materialien, die für definierte mechanische Eigenschaften konzipiert, jedoch nicht unter dem Gesichtspunkt einer Schweißeynung hergestellt wurden. Daher ist die Schweißeynung gesondert zu untersuchen.

#### **5.2.2 Beurteilung des Baustahls von 1860 – 1940**

##### **5.2.2.1 Erfahrungen mit alten Baustählen**

An Altstählen wurden in der Vergangenheit bereits vielfältige Untersuchungen durchgeführt. Die wesentlichen Arbeiten des Themenbereiches Schweißen und Metallurgie im Zusammenhang mit Altstählen sind nachfolgend in kurzer Form dokumentiert und bewertet.

Die Fachaufsätze zum Thema Altstahl von [STEI 1972], [MANG 1985], [BUCA 1998], [MÖLL 1997] und [MÖLL 2000] können als richtungsweisend angesehen werden. Die beschriebenen Sachverhalte bedürfen jedoch vereinzelt einer kritischen Hinterfragung.

Oftmals wird bei der Beschreibung des Altstahls der Puddel- und der Flusstahl gemeinsam betrachtet. Dies führt zu Aussagen, die nur partiell für den Flusstahl und teilweise auf den Puddelstahl zutreffen. Hierdurch werden entscheidende Vorteile der einzelnen Stähle nicht sichtbar. Die Tabelle 5-1 stellt vergleichend die mechanischen Eigenschaften von Fluss- und Puddelstahl dem St37 gegenüber. Es werden die teilweise erheblichen Unterschiede in den Eigenschaften zwischen den beiden prinzipiellen Altstahlarten sichtbar. Nur eine separierte Betrachtung von Puddelstahl und Flusstahl führt zu einer aussagefähigen Bewertung.

Durch hohe Gehalte an Schwefel, Phosphor und Stickstoff im Altstahl wird oftmals pauschalisierend eine Schweißeynung verwehrt. Die Konzentration an Kohlenstoff beträgt zumeist ein Zehntel heutiger Baustähle. Daher ist eine Argumentation hinsichtlich Martensitbildung und zugehöriger Versprödung beim Abkühlen nach einer Schweißeynung nicht plausibel.

Wird eine Schweißeynung erforderlich, werden unterschiedliche und teilweise sich widersprechende Randbedingungen genannt, die zu einer erfolgreichen Schweißeynung führen. Beispielsweise wird für eine altstahlkonforme Schweißeynng die Stumpfnah- und an anderer Stelle die Kehlnahschweißeynung favorisiert.

Einig sind sich alle Autoren hinsichtlich hoher Streuungen bei den mechanischen Eigenschaften, vgl. Kap.2, der eingeschränkten oder nicht vorhandenen Schweißeynung, der teilweise hohen Konzentrationen an Begleitelementen und der Überprüfung der Schweißeynung in jedem zu schweißenden Bereich oder Stahlprofil.

Mit Ausnahme von MÖLL in [MÖLL 2000] und [MÖLL 1997] distanzieren sich die Autoren von der Schweißung am Altmaterial.

Eigenschaft des Stahls	Puddelstahl	Flussstahl	St37
Zugfestigkeit	+	+	+
Streckgrenze	+	+	+
Bruchdehnung	-	+	+
Bruchzähigkeit	+	+	+
Rissfortschritt	+	+	+
Korrosionsbeständigkeit	+	-	-
Schweißreignung	-	-/+	+

*Tabelle 5-1: Eigenschaften von Fluss- und Puddelstahl im qualitativen Vergleich zum heutigen Baustahl St37*

### 5.2.2.2 Zitate aus dem Schrifttum um 1900

In Standardwerken des Brücken- und Stahlbaus aus dem Beginn des 20. Jahrhunderts wird angegeben: „Es muss als Grundsatz aufgestellt werden, dass das Zusammenschweißen von Teilen, die an einer Kraftübertragung teilnehmen sollen, unter allen Umständen verboten ist, wegen der Unzuverlässigkeit, welche die Schweißstelle hinsichtlich der Festigkeit besitzt“ [SCHÖL 1904]. In [SCHA 1908] wird erwähnt: „Als Grundregel gilt, dass jede Verbindung durch Schweißung zu vermeiden ist, da erfahrungsgemäß diese Verbindung die im Brückenbau an sie zu stellenden Anforderungen nicht erfüllen kann.“ Diese Meinungen repräsentieren den Stand der Technik im Schweißen, vgl. Kapitel 5.1. Aufgrund der unzureichenden Kenntnis vom Fügen mittels Schweißen und der ungenügenden Güte der verwendeten Baustähle sind die daraus gezogenen Schlussfolgerungen für die damalige Zeit gerechtfertigt.

### 5.2.2.3 Puddelstahl

Der Puddelstahl besitzt aufgrund der Herstellung einen zeiligen, blättereartigen Aufbau. Das ferritische Gefüge ist mit nichtmetallischen Schlackenzeilen durchsetzt. Dieser „Kompositwerkstoff“ besitzt zwei wesentliche Nachteile, die eine Schweißreignung verwehren. Zum einen wird durch das Aufschmelzen der Schlacken das Schmelzbad stark verunreinigt – der Stoffschluss zwischen Zusatzwerkstoff und Grundwerkstoff wird verhindert. Zum anderen besitzen die beteiligten Komponenten, die Schlacke und der ferritische Stahl, grundlegend verschiedene mechanische Eigenschaften. Der Stahl kann höhere Beanspruchungen aufnehmen. Durch die zeiligen Schlackeneinschlüsse entstehen Materialtrennungen, die eine Kraftübertragung verhindern. Hierdurch ist das notwendige duktile Fließen zum Abbau

## 5 Fügen durch Schweißen

### 5.2 Schweißbeignung

von Spannungsspitzen nicht möglich. Im Bild 5–2 ist exemplarisch eine Stumpfnahtschweißung am Grundwerkstoff Puddelstahl dargestellt. Der erkennbare Riss entstand während des Schweißens in der wärmebeeinflussten Zone des Grundwerkstoffs ohne weitere äußerliche Beanspruchung während des Abkühlvorganges.

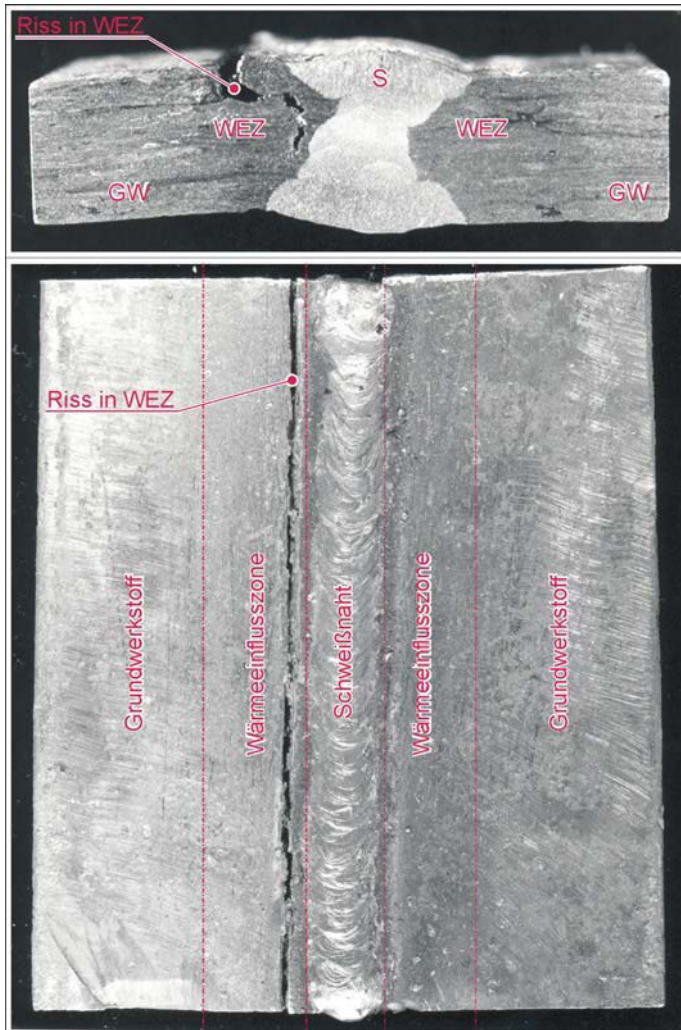


Bild 5–2: Stumpfnahtschweißung an einer Puddelstahlprobe – Rissentstehung in der Wärmeinflusszone; Darstellung auf Grundlage von [Kusc 2003]

Der Riss ist auf die Überbeanspruchung der randnahen Fasern des Puddelstahls beim Abkühlen durch entstehende Eigenspannungen und die fehlende Möglichkeit der Lastabtragung auf benachbarte Bereiche durch Fließen zurückzuführen. Die randnahen

Fasern versagten – im Bereich der größten Rissöffnung – und der Riss vergrößerte sich in Dickenrichtung.

Die im Bild 5–2 dargestellte Erscheinung kann für die Schweißung am Puddelstahl als typisch bezeichnet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit ist dadurch der Puddelstahl nicht weiter Gegenstand der Untersuchungen. Es wird vielmehr empfohlen, am individuellen Bauwerk durch Prüfungen im Einzelfall die Schweißseignung zu überprüfen, wie es beispielsweise in [MÖLL 2000] durchgeführt wurde.

#### **5.2.2.4 Flusstahl**

Eine grundsätzliche Aussage zur Schweißseignung kann beim Flusstahl, unabhängig von den verschiedenen Herstellungsverfahren, nicht erteilt werden. Eine detaillierte Betrachtung ist erforderlich.

Die unberuhigte Vergießung der Stähle sowie die Streuung der chemischen Konzentrationen der Begleitelemente lässt keine pauschalisierte Aussage zu. Die Untersuchungen im Kapitel 4 zeigen, dass Regelmäßigkeiten in der Verteilung der Konzentrationen an Begleitelementen im Profilquerschnitt vorhanden sind. Eine Aussage hinsichtlich Schweißseignung in Abhängigkeit der Schweißnahtlage im Profilquerschnitt ist nach derzeitigen Kenntnisstand formulierbar. Eine Schweißseignung ist im Speckschichtbereich in der Regel gegeben – im Bereich der Seigerungszonen ist keine Schweißseignung vorhanden. Die Anmerkungen im Kapitel 5.7 hinsichtlich Speckschichtdicken und Kapitel 6 in Bezug auf die Alterung sind zu beachten. Die Aussage hinsichtlich Schweißseignung basiert auf den in der [DIN 17100] als maximal zulässig angegebenen chemischen Konzentrationen an Begleitelementen sowie weiteren Sonderbetrachtungen zum Begleitelement Stickstoff, vgl. Kap. 6. Die [DIN 17100] gibt zulässige chemische Konzentrationen für Begleitelemente an, die nach Recherche des Schrifttums zu keinen signifikanten Beeinträchtigungen des Grundwerkstoffs hinsichtlich Schweißseignung im Vergleich zu Baustählen nach derzeit geltenden Normen führen.

Der seit Beginn der 20er Jahre des 20. Jahrhunderts verbaute höherfeste Siliziumstahl ist als generell nicht schweißgeeignet einzustufen, da neben den bekannten Problemen durch Zugabe von Silizium die Bildung von harten Silikateinschlüssen gefördert wurde. Eine erhöhte Sprödigkeit ist die Folge. Die nicht zureichende Schweißseignung zeigt sich im Gutachten nach [EDEL 1992] und durch die bekannten Schadensfälle an der Eisenbahnbrücke am Bahnhof Zoo in Berlin in den 30er Jahren, vgl. [KÜHN 1953], und an der Rüdersdorfer Brücke bei Berlin, vgl. [EDEL 1991].

## **5 Fügen durch Schweißen**

### **5.3 Schweißverfahren**

---

#### **5.3 Schweißverfahren**

##### **5.3.1 Anforderungen an das Schweißverfahren**

Zwei wesentliche Anforderungen werden an das zu verwendende Schweißverfahren gestellt. Zum einen muss der Einbrand in den Grundwerkstoff begrenzt werden. Daher sind Schweißverfahren mit konzentriertem Energieeintrag ungeeignet. Zudem muss das Schweißverfahren baustellene geeignet sowie robust gegenüber Witterungseinflüssen sein.

##### **5.3.2 Wahl des Schweißprozesses**

Aus der Vielzahl der derzeit möglichen Schweißverfahren wird für die Anwendung auf der Baustelle im Wesentlichen das Lichtbogenhandschweißen, SP 111 nach [DIN 857], gewählt, weil sich dieses Verfahren hinsichtlich der vorhandenen Randbedingungen, vor allem den Witterungseinflüssen gegenüber, als resistent erweist. Das Lichtbogenhandschweißen ist ein kostengünstiges, sehr anpassungsfähiges und robustes Verfahren. Die Qualität der Schweißnaht hängt jedoch besonders von den Handfertigkeiten des Schweißers ab. Infolge von Dämpfen, Verbrennungsgasen und stark bewegtem Gasschutz sind Bindefehler, Poren und Einschlüsse nicht auszuschließen.

Da sich dieses Verfahren in der Baubranche jedoch bewährt hat, wird das Lichtbogenhandschweißen hinsichtlich Brauchbarkeit für das Schweißen an Altstählen untersucht.

Das E-Handschweißen weist im Vergleich zu anderen gängigen Schweißprozessen des Bauwesens, beispielsweise MIG/MAG, einen verhältnismäßig geringen zentrierten Energieeintrag auf. Daher ist mit weniger tiefen, jedoch breiteren Einbränden zu rechnen, vgl. [SCHU 2004].

#### **5.4 Schweißzusatzwerkstoffe**

Dem Zusatzwerkstoff kommen beim Schweißen besondere Bedeutung und Aufgaben zu. Der abschmelzende Zusatzwerkstoff ist zum Grundwerkstoff artgleich aufgebaut und besitzt ähnliche mechanische Eigenschaften. Die Elektrodenumhüllung ist grundsätzlich für das Stabilisieren des Lichtbogens, das Bilden eines Schutzgasstromes um das Schmelzbad herum und für das weitere Auflegieren des Schmelzbades verantwortlich. Bei Altstählen ist im Hinblick auf die vorhandenen mechanischen und chemischen Eigenschaften ein Zusatzwerkstoff zu empfehlen, der Phosphor, Schwefel und Stickstoff bindet, für vorwiegend nicht ruhend beanspruchte Bauteile eine hohe Zähigkeit besitzt und ein Schweißen mit möglichst geringem Wärmeeintrag in den Grundwerkstoff – die Stabelektrode wird am wärmeren Pluspol verschweißt – gewährleistet.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden handelsübliche und DIN EN 499-konforme basischumhüllte Stabelektroden verwendet.

Für die Schweißuntersuchungen kam die basische Stabelektrode TS 85 der Firma TECHNOLIT GmbH – Normenbezeichnung EN 499: E 42 4 B 32 H5 – zum Einsatz.

Diese Stabelektrode eignet sich laut Hersteller besonders für die Schweißung von Grundwerkstoffen aus unlegierten Baustählen und Feinkornbaustählen mit erhöhtem Gehalt an Phosphor, Schwefel und Kohlenstoff. Das Schweißgut zeichnet sich durch eine hohe Zähigkeit aus.

Zugfestigkeit	Streckgrenze	Bruchdehnung	Kerbschlagarbeit bei - 40°C
in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in %	in J
>510 – 610	>440	>24	>47

*Tabelle 5-2: Mechanische Gütewerte der Elektrode TS 85*

Detailliertere Angaben zur verwendeten Stabelektrode sind dem DB-Kennblatt Nr. 10.130.09 zu entnehmen.

**5.5 Schweißnahtvorbereitung, -aufbau und -nachbehandlung**

Bei der anstehenden Nahtvorbereitung, dem Nahtaufbau und der Nahtnachbehandlung gilt der Grundsatz des Schweißens mit minimalem Wärmeeintrag in den Grundwerkstoff, um ein Aufschmelzen von Begleitelementen in der Seigerungszone auszuschließen und um die Heißrissgefahr, die Ausscheidungsneigung, die Gefahr der Kornvergrößerung sowie die Größe der Wärmeeinflusszone zu minimieren. Des weiteren gilt als Prinzip, bestehende Erfahrungswerte zum Schweißen mit geringem Wärmeeintrag zu nutzen, vgl. [SCHU 2004]. Sämtliche Farbanstriche und Rostprodukte sind von der zu verschweißenden Oberfläche des Grundwerkstoffes restlos zu beseitigen. Die Oberfläche ist mit baustellengeeigneten Geräten plan herzustellen.

Ein Vorwärmen des Grundwerkstoffes in Hinblick auf die vorhandenen chemischen Begleitelemente ist nicht erforderlich. Ein geringfügiges Vorwärmen auf 50°C stellt jedoch in Bezug auf wasserstoffinduzierte Kaltrisse sicher, dass die Oberfläche, auf der geschweißt werden soll, von Feuchtigkeit befreit ist.

Wasserstoffinduzierte Kaltrisse sind zudem durch Rücktrocknung der wasserstoffbegrenzten, basischumhüllten Stabelektroden auszuschließen.

Heißrisse werden durch Begleitelemente hervorgerufen, die sich beim Erstarren des Schmelzbades als niedrigschmelzende Elemente vor der Erstarrungsfront her bewegen und sich gehäuft in der Restschmelze anlagern. Beim Abkühlen entstehende Schrumpfspannungen führen zur Bildung von Heißrissen. Vermeiden lassen sich Heißrisse prinzipiell

## 5 Fügen durch Schweißen

### 5.6 Experimentelle Ermittlung von Einbrandtiefen

---

durch die Wahl einer geeigneten Schweißreihenfolge und die Minimierung der Aufschmelzung von Begleitelementen.

Durch die geringe Konzentration von Kohlenstoff, vgl. Kapitel 2, ist die Entstehung von Martensit durch hohe Abkühlgeschwindigkeiten nicht zu erwarten.

Beim Schweißen ist die Mehrlagentechnik in Verbindung mit der Zugraupentechnik zu verwenden, um das Wärmeeinbringen in den Grundwerkstoff zu minimieren. Die Grobkornzone der im Vergleich zur Einlagentechnik in der Größe verringerten WEZ kann durch die doppelte Umkristallisation verfeinert werden. Beim Schweißen in der Mehrlagentechnik wird eine Minderung der Eigenspannungen durch das Anlassen der darunter befindlichen, geschweißten Nahtlage erzeugt.

Eine Schweißnahtnachbehandlung aus wärmetechnischer Sicht ist nicht erforderlich. Die Nahtübergänge sind bei ermüdungsbeanspruchten Bauteilen kerbfrei auszuarbeiten.

### 5.6 Experimentelle Ermittlung von Einbrandtiefen

#### 5.6.1 Gegenstand der Untersuchungen und Vorgehen

Die Speckschichten der Flusstähle eignen sich für das Schweißen, vgl. Kap. 5.2.2.4. Durch die Manipulation der Schweißparameter wird die Tiefe der Aufschmelzung und die Größe des wärmebeeinflussten Bereichs des Grundwerkstoffs beim Schweißen beeinflusst. In Hinblick auf die Verteilung der chemischen Begleitelemente im Flusstahl ist die Tiefe des Einbrands im Grundwerkstoff zu ermitteln, der ein in Lösung bringen oder eine signifikante Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeiten der ungünstig auf die Schweißeignung auswirkenden Begleitelemente nach sich zieht.

In sicherer Abschätzung wird daher als Einbrand  $E_{WEZ}$  der aufgeschmolzene und der wärmebeeinflusste Bereich des Grundwerkstoffs verstanden, der den wirklichen Einbrand bereits enthält. Es wird damit sichergestellt, dass der Bereich des Grundwerkstoffs vermessen wird, in dem aufgrund der vorhandenen Temperaturen ein in Lösung bringen der sich ungünstig auf die Schweißeignung auswirkenden Begleitelemente erfolgt, vgl. [LYMA 1973]. Der tatsächlich vorhandene Einbrand  $E_{Einbr.}$  wird informativ mit angegeben.

In Parameterstudien wurde für das E-Handschiessen mit der basisch umhüllten Stabelektrode nach Kapitel 5.4 die Einbrandtiefe ermittelt. Hierfür wurde eine Blechdicke von 10 mm gewählt, um für die Größe der WEZ ungünstige Verhältnisse im Abkühlverhalten zu schaffen. Zur Bestätigung sind Schweißungen an einem Blech mit 30 mm Dicke angefertigt worden. Im Rahmen der ersten Untersuchungen wurden die Schweißpositionen PA und PB, vgl. [DIN 6947], analysiert und die eingebrachte Streckenenergie variiert. Weitere Schweißpositionen, die möglicherweise einen höheren Einbrand erzeugen können, beispielsweise die Steigposition PF, wurden nicht betrachtet.

Laborversuche zur Untersuchung der Abkühlgeschwindigkeit, üblicherweise als  $t_{9/5}$ -Zeit beschrieben, wurden nicht durchgeführt. Eine Verkürzung der  $t_{9/5}$ -Zeit führt insbesondere bei



Feinkornbaustählen zu einer Verminderung der Einbrände und trägt bei schneller Abkühlung aufgrund der Bildung von Martensit zur Versprödung des wärmebeeinflussten Grundwerkstoffs bei, vgl. [RUGE 1991]. Die Versprödung infolge Martensitbildung ist wie bereits erwähnt infolge kurzer Abkühlzeiten bei den untersuchten Flusstählen aufgrund der geringen Konzentrationen an Kohlenstoff nicht zu erwarten, vgl. Kapitel 2.

### 5.6.2 Ergebnisse

Der Einfluss der Einbrandtiefe in Abhängigkeit von der Blechdicke des Grundwerkstoffs ist für die Schweißposition PA im Bild 5–3 und Bild 5–4 dargestellt. Bei den 10 mm dicken Blechen ist von einem zweidimensionalen Wärmefluss auszugehen. Da sich hierbei die Wärme ausschließlich in der Blechebene ausbreitet, führt dies im Gegensatz zum 30 mm dicken Blech mit dreidimensionaler Wärmeausbreitung zu einer schlechteren Wärmeableitung im dünneren Blech, vgl. [SCHU 2003]. Hieraus folgen erwartungsgemäß geringere Abkühlgeschwindigkeiten und höhere Einbrände im 10 mm Blech im Vergleich zum 30 mm Blech, vgl. Bild 5–3. Bei einer Streckenenergie von 20 kJ/cm beträgt die Einbrandtiefe  $E_{WEZ} = 3,8$  mm, wenn  $t = 30$  mm – bei  $t = 10$  mm wird  $E_{WEZ} = 4,7$  mm erreicht.

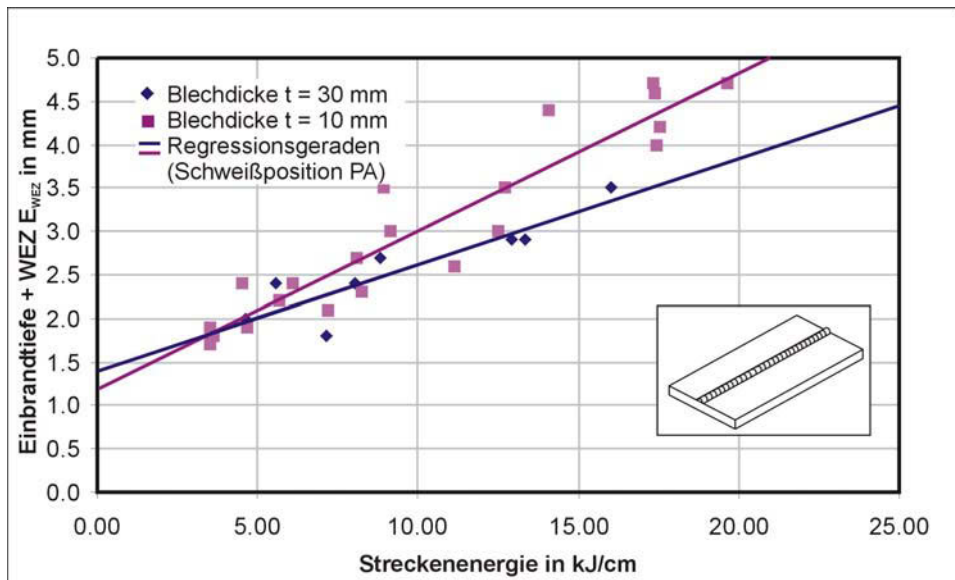


Bild 5–3: Einbrandtiefe  $E_{WEZ}$  in Abhängigkeit der Streckenenergie und der Blechdicke des Grundwerkstoffs

Daher sind die an Blechen mit  $t = 10$  mm durchgeführten Untersuchungen zur Einbrandtiefe als auf der sicheren Seite liegend zu werten. Realistische Blechdicken für Flusstahlprofile

## 5 Fügen durch Schweißen

### 5.6 Experimentelle Ermittlung von Einbrandtiefen

sind [BARG 1993] zu entnehmen. Diese liegen zumeist zwischen  $10 \text{ mm} \leq t \leq 14 \text{ mm}$  für Profile des Brückenbaus.

Der tatsächliche Einbrand  $E_{\text{Einbr.}}$ , vgl. Bild 5–4, steigt mit zunehmender Streckenenergie langsamer als  $E_{\text{WEZ}}$  – dieses Verhalten ist definitionsgemäß für alle weiteren Auswertungen zu erwarten.

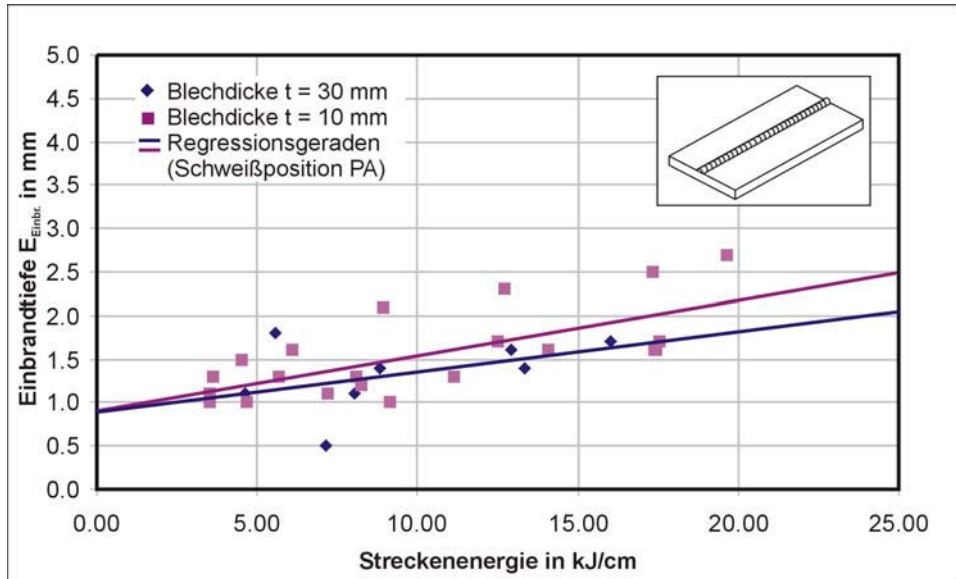


Bild 5–4: Einbrandtiefe  $E_{\text{Einbr.}}$  in Abhängigkeit der Streckenenergie und der Blechdicke des Grundwerkstoffs

Erkennbar ist im Bild 5–5 und Bild 5–6 die Einbrandtiefe  $E_{\text{Einbr.}}$  und  $E_{\text{WEZ}}$  in Abhängigkeit von der Streckenenergie und der Schweißposition. Die Einbrandtiefe steigt erwartungsgemäß bei der Schweißposition PA mit zunehmender Streckenenergie schneller an als in der Schweißposition PB. Der geringere Einbrand in der Schweißposition PB ist auf die verbesserte Wärmeableitung in beide Bleche mit  $t = 10 \text{ mm}$  und auf die gegenüber der Schweißposition PA geneigten Stabelektrode zurückzuführen. In der Schweißposition PB ist die Einbrandtiefe sinngemäß vom Kosinus des Winkels, den die Stabelektrode zur Vertikalen einnimmt, abhängig. Da die Einbrandtiefe orthogonal zur Oberfläche des Bleches gemessen wird, muss die ermittelte Einbrandtiefe geringer ausfallen.

Der quantitative Einfluss der Nahtform auf die Abkühlzeit  $t_{9/5}$  zwischen einer Auftragsraupe und einer einlagigen Kehlnaht am T-Stoß – in der Berechnung der  $t_{9/5}$ -Zeit als Nahtfaktoren  $F_2$  und  $F_3$  berücksichtigt – wird damit im Bild 5–5 und Bild 5–6 bestätigt, vgl. [SCHU 2003].

Die Wechselbeziehung zwischen Stabelektrodendurchmesser, Streckenenergie und Einbrandtiefe ist im Bild 5–7 bis Bild 5–10 dargestellt. Anhand der Verteilung der Schweißungen mit unterschiedlichen Stabelektrodenrößen ist erkennbar, dass der Stabelektrodendurchmesser keinen signifikanten Einfluss auf die Einbrandtiefe ausübt, vgl.

Bild 5–7 und Bild 5–8, sondern dass vielmehr die Streckenenergie die geeignete Größe zur Charakterisierung des Wärmeeintrags ist.

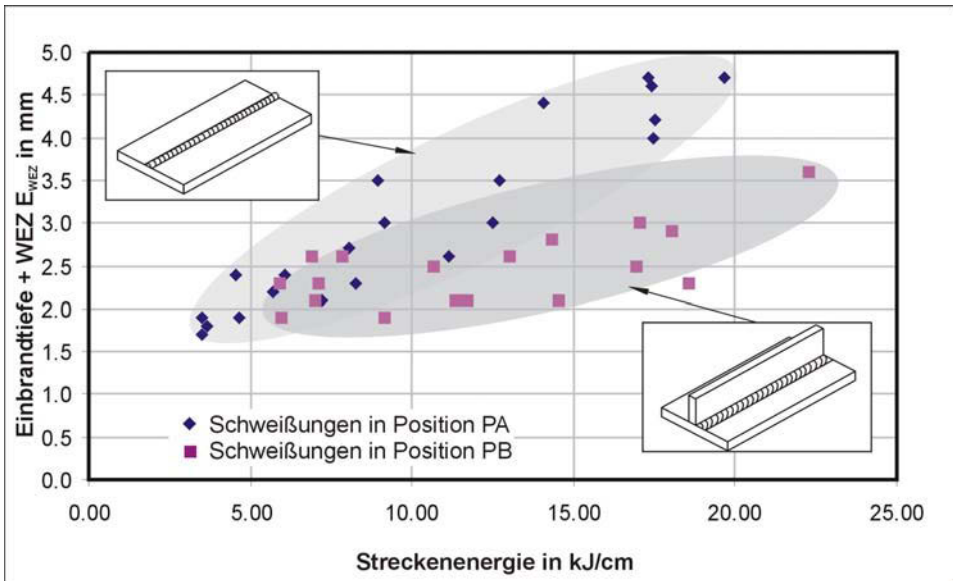


Bild 5–5: Einbrandtiefe  $E_{WEZ}$  in Abhängigkeit von der Streckenenergie und der Schweißposition, Blechdicke des Grundwerkstoffs  $t = 10\text{ mm}$

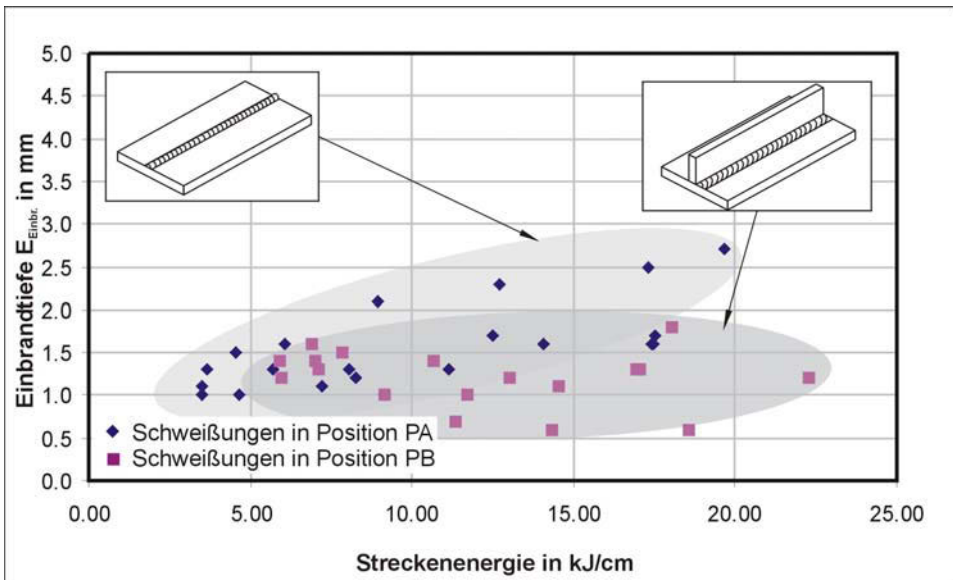


Bild 5–6: Einbrandtiefe  $E_{Einbr.}$  in Abhängigkeit von der Streckenenergie und der Schweißposition, Blechdicke des Grundwerkstoffs  $t = 10\text{ mm}$

## 5 Fügen durch Schweißen

### 5.6 Experimentelle Ermittlung von Einbrandtiefen

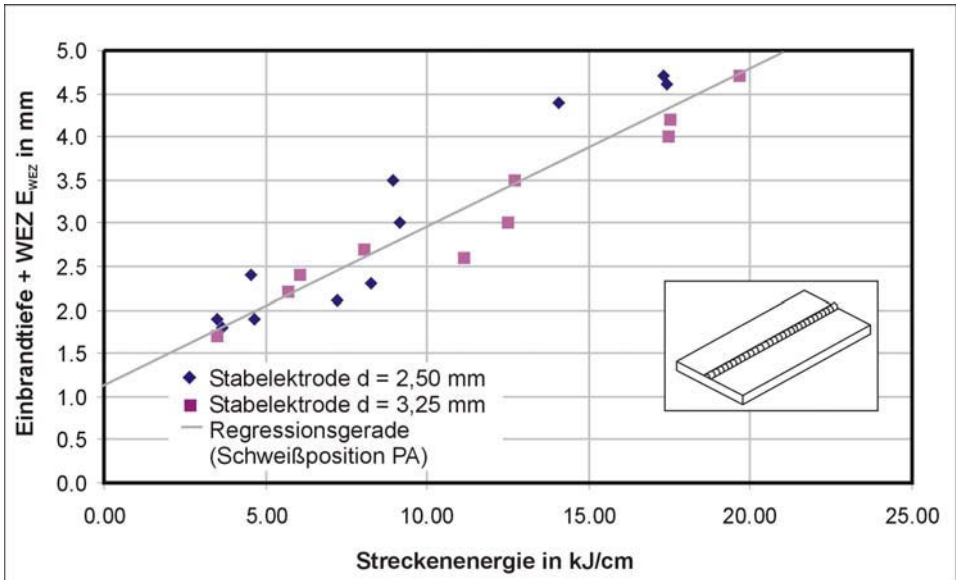


Bild 5–7: Einbrandtiefe  $E_{WEZ}$  in Abhängigkeit der Stabelektrodengröße und der Streckenenergie in der Schweißposition PA, Blechdicke des Grundwerkstoffs  $t = 10$  mm

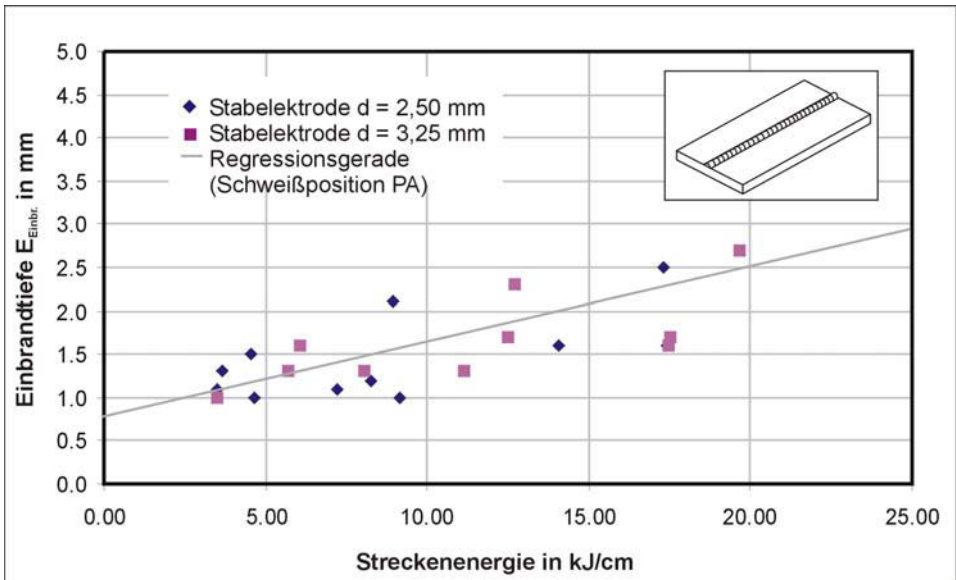


Bild 5–8: Einbrandtiefe  $E_{Einbr.}$  in Abhängigkeit der Stabelektrodengröße und der Streckenenergie in der Schweißposition PA, Blechdicke des Grundwerkstoffs  $t = 10$  mm

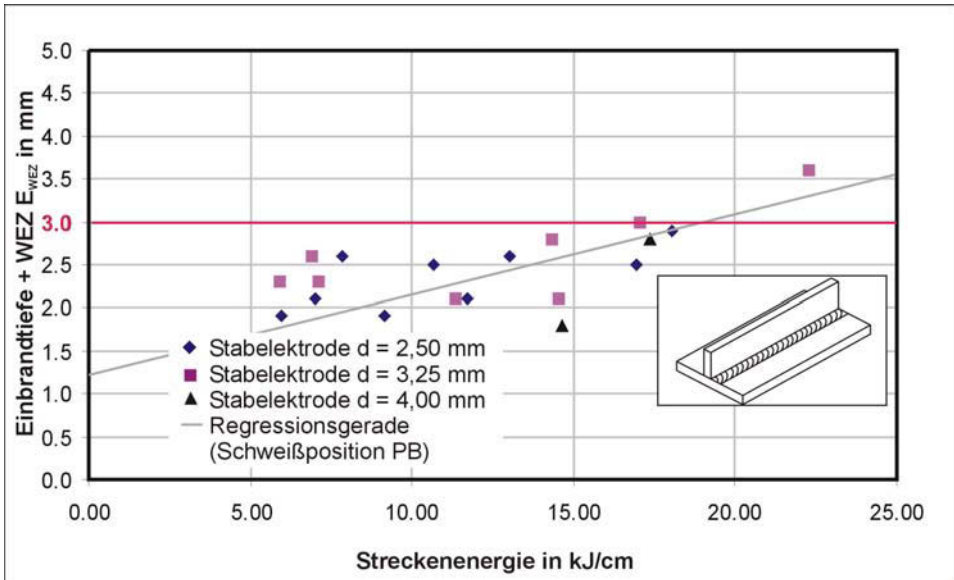


Bild 5–9: Einbrandtiefe  $E_{WEZ}$  in Abhängigkeit der Stabelektrodengröße und der Streckenenergie in der Schweißposition PB, Blechdicke des Grundwerkstoffs  $t = 10\text{ mm}$

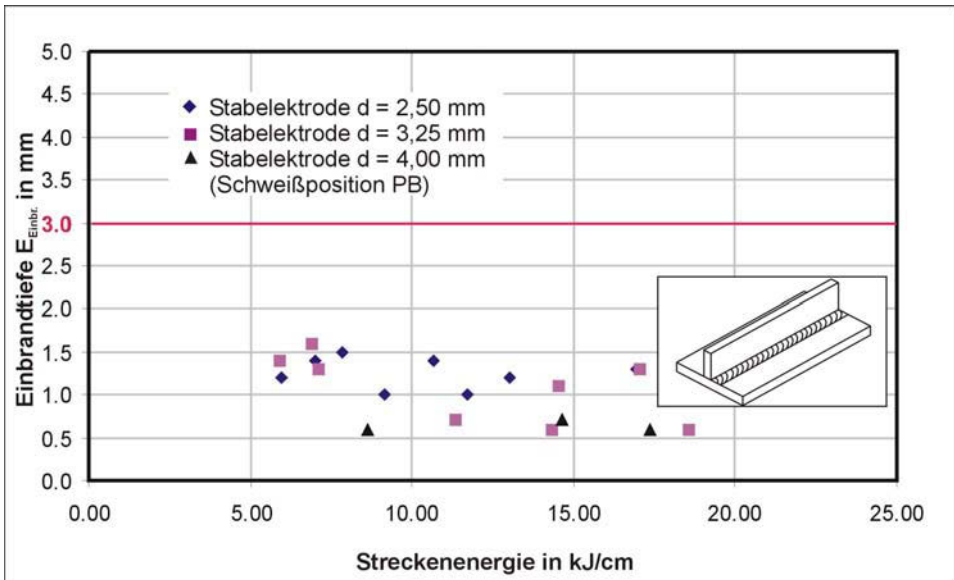


Bild 5–10: Einbrandtiefe  $E_{Einbr.}$  in Abhängigkeit der Stabelektrodengröße und der Streckenenergie in der Schweißposition PB, Blechdicke des Grundwerkstoffs  $t = 10\text{ mm}$

## 5 Fügen durch Schweißen

### 5.7 Erforderliche Einbrandtiefen/Vorhandene Speckschichten

---

Die maximalen Einbrandtiefen  $E_{WEZ}$  beim Schweißen einer Auftragsraupe in der Schweißposition PA betragen ca. 5 mm, unabhängig vom Stabelektrorendurchmesser, vgl. Bild 5–7.

In der Schweißposition PB werden bei konstanter Streckenenergie unabhängig vom Stabelektrorendurchmesser ähnliche Einbrände erzielt. Bei Verwendung der Stabelektrode  $d = 2,5$  mm beträgt die Einbrandtiefe  $E_{WEZ}$  maximal 3 mm – bei der Stabelektrode  $d = 3,25$  mm werden aufgrund der größeren möglichen Streckenenergie höhere Einbrandtiefen  $E_{WEZ}$  als 3,0 mm im Grundwerkstoff erreicht, vgl. Bild 5–9.

Eine prinzipielle Zuordnung von Einbränden  $E_{WEZ}$  über und unterhalb der 3,0 mm-Grenze erscheint in Hinblick auf die ökonomische Anwendung des Schweißverfahrens, um mit möglichst hohen Streckenenergien bei kleinen Stabelektrorendurchmessern arbeiten zu können, als sinnvoll.

Ein Auszug der durchgeführten Schweißungen ist in Form der erstellten Schriffe dem Kapitel Fügen durch Schweißen – Anhang zu entnehmen. Infolge der vordefinierten und eingestellten Schweißparameter kam es infolge zu niedriger oder zu hoher Streckenenergie beispielsweise zu Bindefehlern, unzulässigen Nahtüberhöhungen, ungenügender Verschweißung und Einbrandkerben.

Eine Bewertung der Güte der durchgeführten Schweißungen hinsichtlich Unregelmäßigkeiten in Übereinstimmung mit geltenden Regelwerken, beispielsweise der [DIN 5817], wird nicht durchgeführt, da es sich hierbei vielmehr um eine Machbarkeitsstudie zum Schweißen unter extremen Schweißparametern handelt.

### 5.7 Erforderliche Einbrandtiefen/Vorhandene Speckschichten

#### 5.7.1 Schlussfolgerungen für die Schweißung

Nach Auswertung der durchgeführten Schweißversuche ergab sich eine als sinnvoll erscheinende erforderliche vorzuhaltende Tiefe für den Einbrand  $E_{WEZ}$  von 3,0 mm. Dieser Wert ist als ökonomischer Kompromiss zwischen der Effizienz des Schweißens – Möglichkeit der Anwendung relativ hoher Streckenenergien – und im Hinblick auf die vorhandenen, Speckschichten in Flusstählen zu werten, vgl. Kap. 5.6. Des Weiteren wurden in Kap. 4 die prinzipiell schweißgeeigneten Bereiche von Flusstahlquerschnitten – die Speckschichten – ermittelt und die zugehörigen Werte für die 5%-ige Unterschreitungshäufigkeit angegeben.

Durch Vergleich der Beanspruchungsseite – aus dem Schweißen resultierende Einbrandtiefe – mit der Widerstandsseite – der vorhandenen Speckschichtdicke – wird folgendes angegeben. Geschweißt werden darf mit der Stabelektrode  $d = 2,5$  mm mit den üblichen Schweißparametern in der Schweißposition PB. Die Einbrandtiefe  $E_{WEZ}$  von 3,0 mm wird nicht überschritten, vgl. Bild 5–9. Beim nächst größeren Stabelektrorendurchmesser  $d = 3,25$  mm bedarf es einer Begrenzung der eingebrachten Streckenenergie. Es wird mit Sicht auf die Handhabung durch das Schweißpersonal empfohlen, wahlweise die Schweiß-

geschwindigkeit von 2,5 cm/s nicht zu unterschreiten oder die Stromstärke  $I = 130 \text{ A}$  nicht zu überschreiten. Die Wurzellagen und alle weiteren Schweißlagen, die die Wärme unmittelbar in den Grundwerkstoff Flussstahl einbringen, sind auf den Stabelektrorendurchmesser  $d = 2,5 \text{ mm}$  und  $d = 3,25 \text{ mm}$ , einschließlich für  $d = 3,25 \text{ mm}$  angegebener Bedingungen, zu begrenzen.

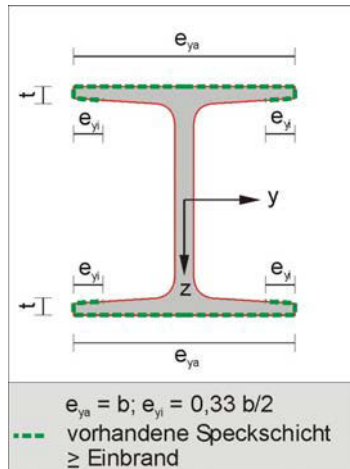


Bild 5–11: für die Schweißung an Flusstählen geeignete Bereiche

Das Bild 5–11 zeigt nochmals die Bereiche von Doppel-T-Profilen, die für eine Schweißung in Frage kommen. Der Wert  $b$  steht hierbei für die Flanschbreite. Die vorhandene Speckschichtdicke ist hier größer oder gleich der für den Einbrand vorzuhaltenden erforderlichen Tiefe, wenn die 3,0 mm-Grenze in Ansatz gebracht wird.

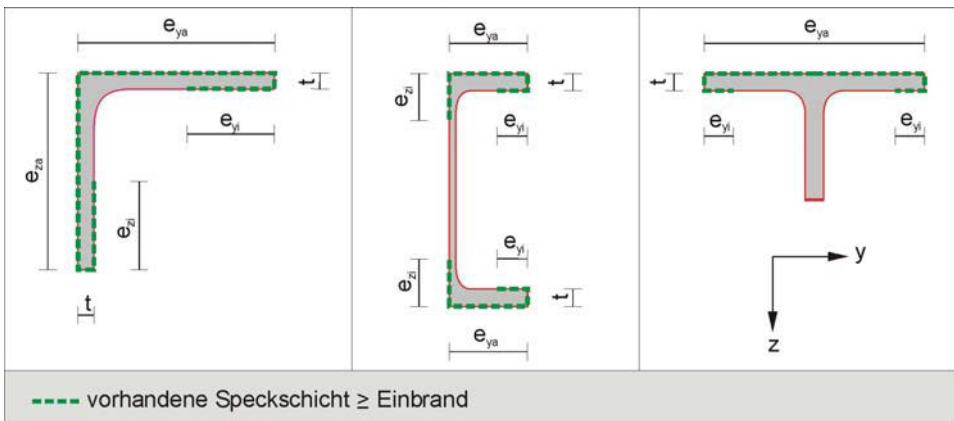


Bild 5–12: schematische Darstellung der schweißgeeigneten Bereiche weiterer häufig verwendeter Profiltypen

## 5 Fügen durch Schweißen

### 5.7 Erforderliche Einbrandtiefen/Vorhandene Speckschichten

Im Bild 5–12 sind für weitere Flusstahlquerschnitte die möglichen Bereiche, die für eine Schweißung in Frage kommen, dargestellt. Zur Ermittlung der vorhandenen Speckschichten liegen derzeit nicht genügend Stichproben vor, um aussagekräftige Ergebnisse liefern zu können. Daher handelt es sich im Bild 5–12 um eine schematische Darstellung.

#### 5.7.2 Maßnahmen zur Ertüchtigung

Im Bild 5–13 und Bild 5–14 sind grundsätzliche Varianten zur Bauteilertüchtigung vorgestellt. Die Lage der Schweißnaht und deren Einbrand orientiert sich an den ermittelten, prinzipiell schweißgeeigneten Bereichen der Flusstahlprofile und der Auswertung nach Kapitel 5.7.1.

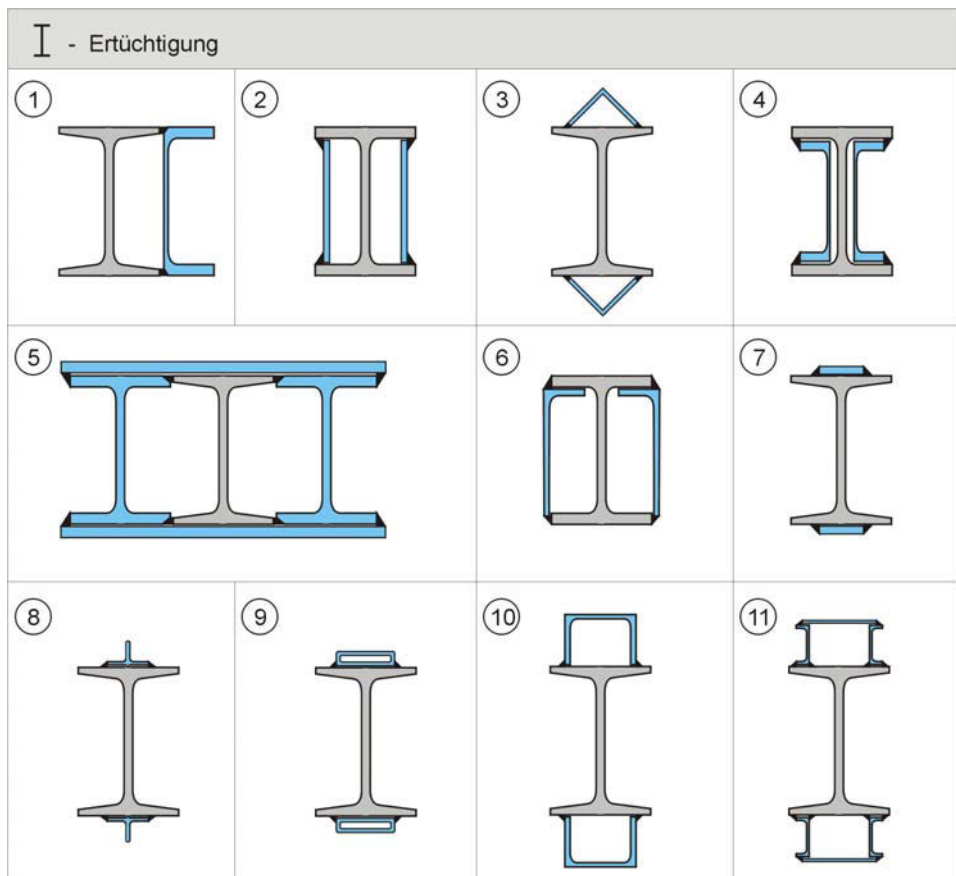


Bild 5–13: Darstellung ausgewählter Ertüchtigungsmaßnahmen – Teil 1 (grau – Altstahl; blau – Neustahl)

Die aufgezeigten Varianten stellen mögliche Querschnittsvergrößerungen dar. Je nach vorliegender Beanspruchung kann speziell eine Erhöhung der Biegesteifigkeit durch das



Aufschweißen von Gurtlamellen, zur Erhöhung der Längskraftbeanspruchung zusätzliche Lamellen im Steg- und Gurtbereich und zur Vergrößerung des Torsionssteifigkeit das Profil geschlossen werden, wie es insbesondere im Bild 5–14 zu sehen ist.

Bei den im Bild 5–13 und Bild 5–14 dargestellten Ertüchtigungsmaßnahmen handelt es sich um schematische Darstellungen. Insbesondere die Einschweißung von Profilen an die zumeist geneigt verlaufenden Flanschinnenseiten der I-Profile muss im Einzelfall hinsichtlich Durchführbarkeit geprüft werden.

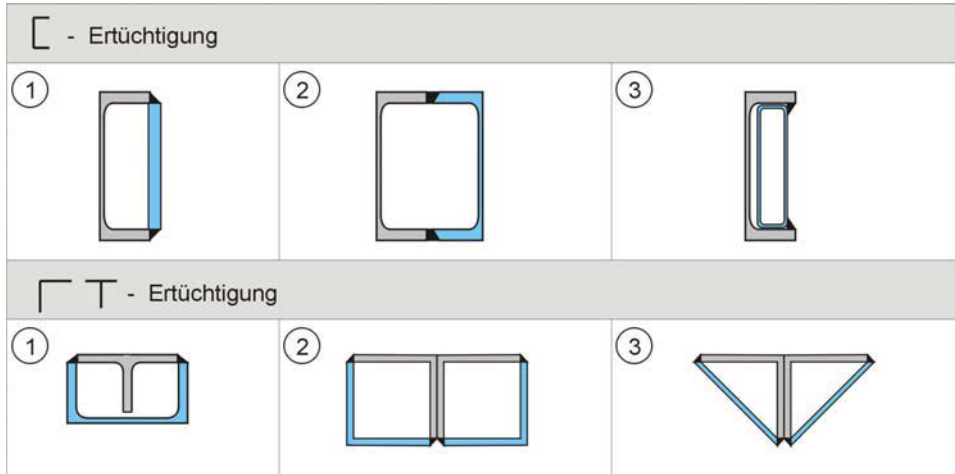


Bild 5–14: Darstellung ausgewählter Ertüchtigungsmaßnahmen – Teil 2 (grau – Altstahl; blau – Neustahl)

Aufgrund der Vielzahl möglicher Varianten der Schweißung wird im Rahmen dieser Arbeit eine wesentliche Anschlussmöglichkeit versuchsstechnisch untersucht und bewertet, um die aufgezeigten Möglichkeiten des Fügens mittels Schweißen zu verifizieren.

## 5.8 Eigenspannungen infolge Schweißen

### 5.8.1 Allgemeines

Für das Schweißen an bestehenden Konstruktionen sind im Kap. 3 grundsätzliche Aspekte angesprochen.

Unter anderem ist es wichtig, das Einbringen von zusätzlicher Wärme und die damit entstehenden Eigenspannungen zu bewerten, vgl. [HÜNE 1987]. Aus diesem Grund erfolgt für die später im Kap. 6.3 detaillierter untersuchte Ertüchtigungsmaßnahme eine qualitative Abschätzung der induzierten Eigenspannungen. Hierfür wird nachfolgend der Schweißprozess mit Hilfe des Programms Ansys simuliert und die sich aus der Temperaturverteilung ergebene Spannungsverteilung errechnet.

Die Berechnung hat hierbei lediglich informellen Charakter, da folgende Punkte im Rahmen dieser Arbeit gegen eine detailliertere Bewertung sprechen:

- Für den untersuchten Flussstahl liegen die benötigten temperaturabhängigen Werkstoffdaten nicht vor. Daher muss eine Abschätzung unter Zuhilfenahme eines verwandten Werkstoffs erfolgen.
- In den derzeit geltenden Bemessungskonzepten existieren bereits realitätsnahe, auf der sicheren Seite liegende Abschätzungen der Eigenspannungen, beispielsweise nach [DAST 009].
- Die im Rahmen dieser Arbeit anhand von Ermüdungsfestigkeitsuntersuchungen an geschweißten Proben ermittelten Bruchlastwechselzahlen wurden Versuchen nach [OLIV 1982] vergleichend gegenübergestellt. Die hierbei aufgetretenen Eigenspannungen spielen beim Vergleich der erreichten Bruchlastwechselzahl eine untergeordnete Rolle.
- Schweißungen stellen eine relativ scharfe Kerbe dar. Der Beanspruchung überlagerte Eigenspannungen erreichen in der Regel im Kerbgrund von Schweißnähten rasch die Fließgrenze und werden somit abgebaut, so dass für die Ermüdung nur die Spannungsdoppelamplitude aus äußerer Beanspruchung maßgeblich ist. Dies geht aus dem HAIGH-Schaubild für scharfe Kerben (extreme Schweiß eigenspannungen) hervor, vgl. [HAIB 2002].

### 5.8.2 Eigenspannungsberechnung

#### ***Geometrie und genereller Aufbau der verwendeten Finite Elemente Modelle***

Es erfolgt eine nichtlineare Berechnung der Strukturspannungen mit Hilfe eines bilinearen Stoffgesetzes sowie eine transiente, nichtlineare Berechnung des Temperaturfeldes. Ziel ist die Bestimmung der Eigenspannungsverteilung sowie die hieraus resultierenden Verformungen. Für die Temperaturfeld- und für die Strukturspannungsberechnung werden

jeweils identische Vernetzungen verwendet. Für die jeweilige Berechnung wurde ein isoparametrischer Standard-Elementtyp mit linearer Ansatzfunktion ausgewählt.

Das für die Temperaturfeldberechnung verwendete Element SOLID87 besitzt einen Freiheitsgrad für die Temperatur. Für die Strukturspannungsberechnung wird das Element SOLID92 benutzt, vgl. [ANSY 1999]. Es besitzt in jeder der drei Koordinatenrichtungen jeweils einen Freiheitsgrad in Form der Knotenverschiebungen  $u_x$ ,  $u_y$  und  $u_z$ . Die Auswahl von Elementtypen mit höheren Ansatzfunktionen, beispielsweise Elemente mit Seitenmittenknoten, wurde nicht weiter verfolgt, um für die Untersuchungen, deren Ergebnisse lediglich qualitativer Natur sind, die Berechnungszeit möglichst gering zu halten. Das Materialverhalten innerhalb jedes Elements wird als homogen und isotrop angenommen.

Das Einbringen des Zusatzwerkstoffs wurde bei der Simulation des Schweißens mittels der sogenannten „Element-birth“-Funktion realisiert, vgl. [NEUH 2005]. Hierbei wird das gesamte Bauteil modelliert und vernetzt, einschließlich der zeitweise nicht aktiven Elemente, die später die Schweißnaht repräsentieren. Um bei der transienten Berechnung die noch nicht vorhandenen Elemente der Schweißnaht auszuschalten, werden die zugehörigen Werkstoffkennwerte mit  $1,0E-25$  multipliziert. Hierdurch üben die noch nicht aktivierten Elemente keinen Einfluss auf die Berechnung aus. Zum Zeitpunkt der „Wiederbelebung“ dieser Elemente werden pro Rechenschritt den Werkstoffeigenschaften reale Werte zugeordnet. Hierdurch können die Elemente aktiv auf die Temperatur- und Spannungsberechnung Einfluss nehmen.

### ***Werkstoffeigenschaften für die Temperaturfeld- und Strukturspannungsberechnung***

Zur Durchführung der transienten Temperaturfeldberechnung werden Informationen über das temperaturabhängige Werkstoffverhalten für den gesamten zu durchlaufenden Temperaturbereich, vom schmelzflüssigen Zustand des Materials bis zur Abkühlung auf Raumtemperatur, benötigt.

Die wesentlichen Werkstoffkennwerte sind die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_k$  und die spezifische Enthalpie  $H$ . Für den zu untersuchenden Flusstahl sind aus der Literatur nur unvollständige Werkstoffdaten verfügbar. Daher erfolgt die Verwendung von bekannten Werkstoffkennwerten eines verwandten Werkstoffs, dem St37. Die Daten hierfür sind in [RICH 1973] und [RICH 1983] dokumentiert.

Der Wärmeaustausch mit der Umgebung hat neben der Wärmeleitfähigkeit und der Enthalpie einen maßgeblichen Einfluss auf die Temperaturentwicklung im Bauteil. Der Wärmetransport aus dem Bauteil in die Umgebung infolge freier Konvektion und durch Wärmestrahlung wird unter dem Begriff Wärmeübergang zusammenfasst.

Für die Strukturspannungsberechnungen sind im Wesentlichen die Werkstoffkennwerte temperaturabhängige Dichte  $\rho$ , der Elastizitätsmodul  $E$ , der das temperaturabhängige Spannungs-Dehnungsverhalten des betrachteten Werkstoffs wesentlich beeinflusst, sowie

## 5 Fügen durch Schweißen

### 5.8 Eigenspannungen infolge Schweißen

der Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha$  zu nennen. Auch diese Werkstoffkennwerte werden nach [RICH 1973] und [RICH 1983] angenommen.

#### Berechnung mit dem FE-Programm Ansys

Im Bild 5–15 ist das für die Berechnung verwendete Modell abgebildet, das wie schon erwähnt eine Ertüchtigungsmaßnahme repräsentiert. Das Modell wurde jedoch für die hier durchgeführten Berechnungen stark vereinfacht, um den Rechenaufwand zu minimieren. Die infolge der Vereinfachungen veränderten Steifigkeitsverhältnisse beeinflussen aufgrund ihrer geringen Größe im Vergleich zum Gesamtmodell jedoch das Ergebnis nur minimal.

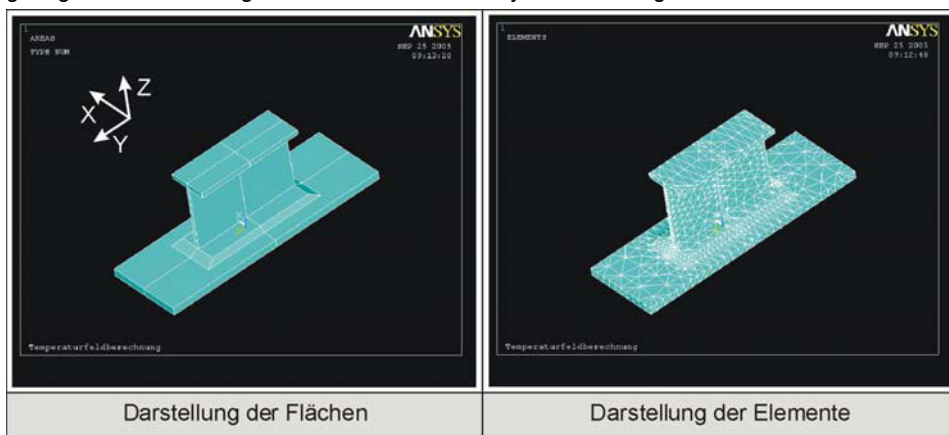


Bild 5–15: Darstellung des verwendeten Modells einer in Kap. 6.3 untersuchten Ertüchtigungsmaßnahme

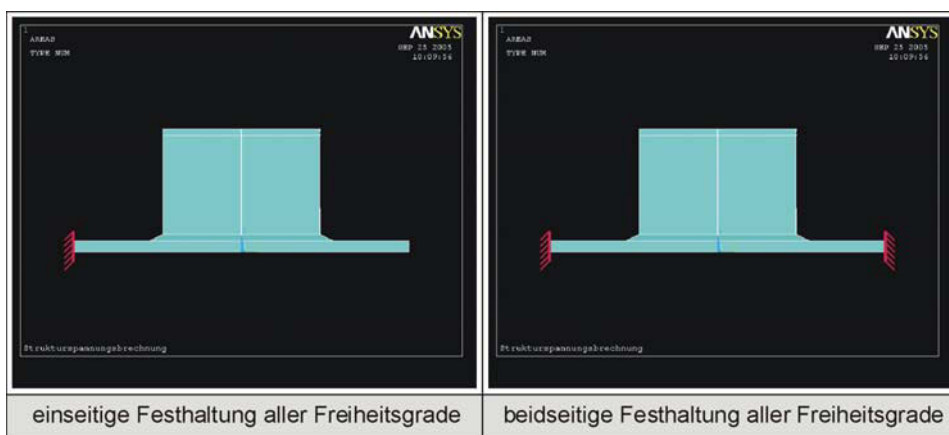


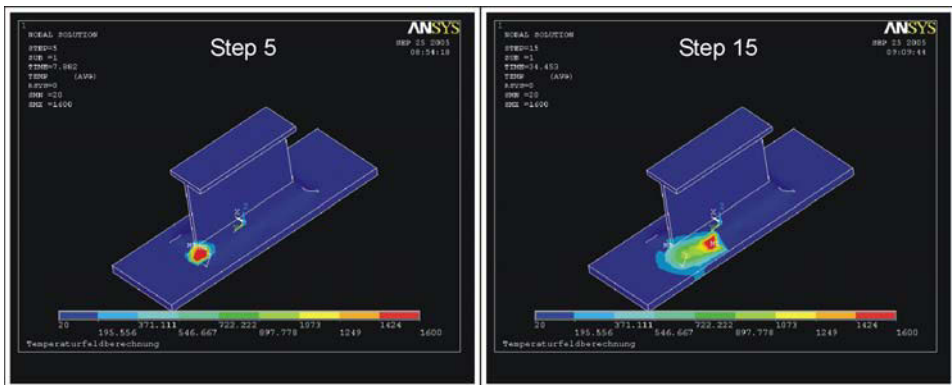
Bild 5–16: Darstellung der in der Strukturspannungsberechnung untersuchten Lagerungsbedingungen

Die Energieeinbringung erfolgte bei der Simulation der Schweißung über eine halbkugelförmige Volumenquelle. Die Schweißung erfolgte rundumlaufend. Das Schweißgut wurde in der Simulation einlagig eingebracht. Dies entspricht nicht dem im Versuch gewählten Mehrlagenaufbau. Die Werte der Eigenspannungen liegen damit auf der sicheren Seite, weil kein Anlassen infolge der Wärmeeinbringung der weiteren Schweißnahtlagen erfolgt. Da es sich um erste Annahmen für die Berechnung handelt, ist das Vorgehen gerechtfertigt.

Die Lagerungsbedingung der Probe beeinflusst die Eigenspannungsverteilung. Um stellvertretend die zwei wesentlichen Fälle äußerer Zwängung infolge von Festhaltungen abzubilden, wurden die im Bild 5–16 dargestellten Lagerungsbedingungen untersucht. In realen Bauwerken wird ein Einspanngrad – äußere Zwängung – zwischen den beiden aufgezeigten Fällen vorzufinden sein.

### **Auswertung der transienten Temperaturfeld- und Strukturspannungsberechnung**

Die Ergebnisse der transienten Temperaturfeldberechnung sind exemplarisch im Bild 5–17, Bild 5–18 und Bild 5–19 zu sehen. Die dargestellten Steps 5, 15, 30, 45 und 80 zeigen das fortschreitende Einbringen des Schweißzusatzwerkstoffs. Der Step 113 stellt das Abkühlen des gesamten Bauteils nach Einbringung des Schweißzusatzwerkstoffs dar.



*Bild 5–17: Temperaturverteilung Teil 1 – beispielhaft an unterschiedlichen Zeitschritten dargestellt; blau – Raumtemperatur  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ; rot –  $T = 1600^{\circ}\text{C}$*

Die transiente Temperaturfeldberechnung wurde nach Erreichen der Raumtemperatur in allen Bereichen des Bauteils infolge des Wärmeübergangs nach ca. 75 min abgebrochen.

Die daran anschließenden Strukturspannungsberechnungen erfolgten wie im Bild 5–16 dargestellt unter Verwendung verschiedener Einspanngrade.

Das Bild 5–20 und das Bild 5–21 zeigen die Verformungen des Gesamtsystems sowie die hauptsächlich zu berücksichtigenden Spannungen in x- und y-Richtung.

Das untere Blech wölbt sich bei einseitiger Festhaltung erwartungsgemäß, da infolge des Abkühlens der Schweißnaht eine Volumenkontraktion auf der Oberseite einsetzt. Bei beidseitiger Festhaltung ist die Verformungsfigur sinngemäß zu erklären.

## 5 Fügen durch Schweißen

### 5.8 Eigenspannungen infolge Schweißen

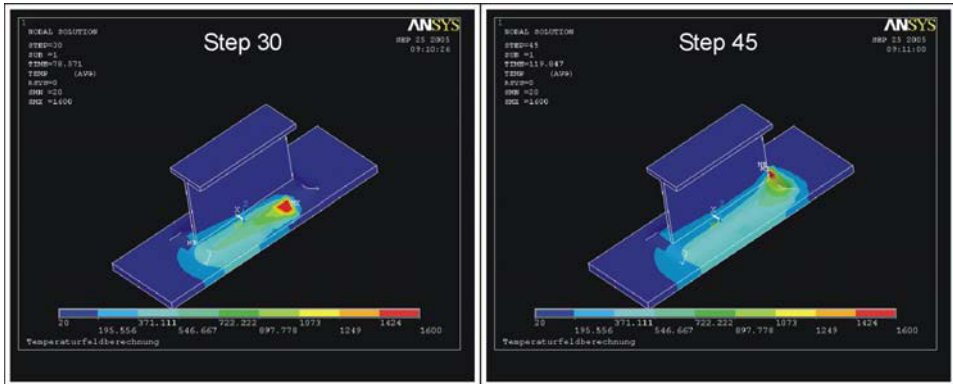


Bild 5–18: Temperaturverteilung Teil 2 – beispielhaft an unterschiedlichen Zeitschritten dargestellt; blau – Raumtemperatur  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ; rot –  $T = 1600^{\circ}\text{C}$

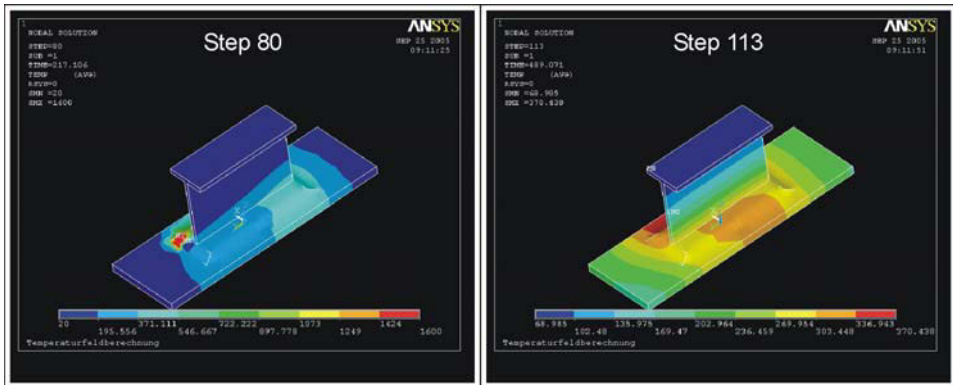


Bild 5–19: Temperaturverteilung Teil 3 – beispielhaft an unterschiedlichen Zeitschritten dargestellt

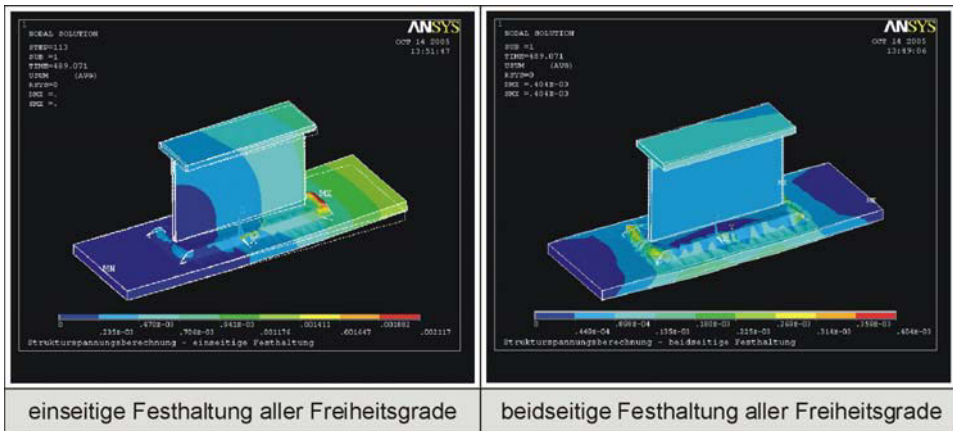


Bild 5–20: Verformungsfigur

Die Spannungen in x-Richtung werden durch die verschiedenen Festhaltungen nicht wesentlich beeinflusst, vgl. Bild 5–21 oben. In der y-Richtung werden die Beanspruchungen durch den Einspanngrad beeinflusst.

Die Auflagerreaktionen ergeben bei beidseitiger Festhaltung eine Normalkraft in y-Richtung wirkend, die im unteren Blech lediglich einer Nennspannung  $\sigma_y = 35 \text{ N/mm}^2$  entspricht. Diese geringfügige Nennspannung ist dadurch erklärbar, dass der Hauptanteil der auftretenden Zwangsschnittgrößen bereits durch das recht steife Doppel-T-Profil aufgenommen wird. Dieses erfährt, wie in Bild 5–21 ersichtlich, Druckbeanspruchungen und schließt somit die infolge der abkühlenden Schweißnaht entstehenden Zugspannungen kurz.

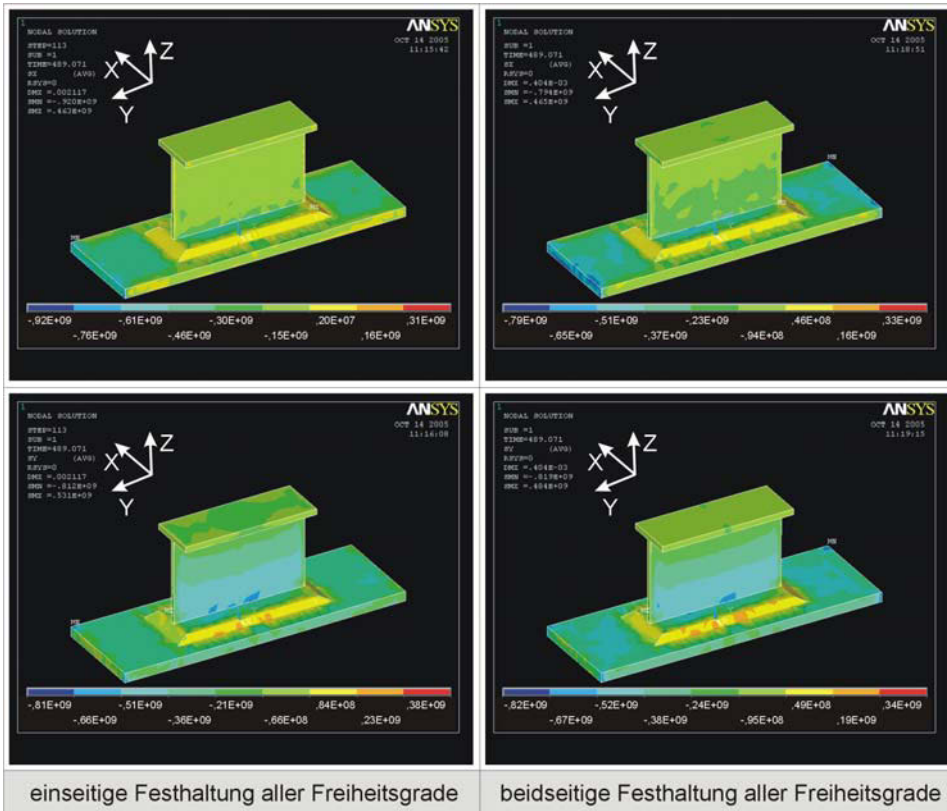


Bild 5–21: Strukturspannungen nach Abkühlung auf Raumtemperatur – Spannungen in x-Richtung (quer zur Bauteillängsachse) oben; Spannungen in y-Richtung (längs der Bauteilachse) unten

Besonders interessant sind die im ermüdungsrelevanten Kerbgrund der Stirnflankennähte vorhandenen Spannungen. Es zeigt sich, dass die Hauptnormalspannungsrichtung im Bereich der Stirnflankennähte in Richtung x-Achse verläuft – also quer zur Probenlängsachse und beträgt ca.  $100 \text{ N/mm}^2$  im Bereich des Kerbgrunds.

## **5 Fügen durch Schweißen**

### 5.8 Eigenspannungen infolge Schweißen

---

Bei der Variation der Festhaltung der Probe, vgl. Bild 5–16, ändert sich der Betrag der Hauptnormalspannung nur geringfügig. Dies ist ebenfalls auf die Hauptnormalspannungsrichtung der Eigenspannungen infolge der Schweißung zurückzuführen. Die beidseitige Festhaltung erzeugt erhöhte Spannungskomponenten in y-Richtung – also in Längsrichtung der Probe. Dieser Anteil ist den vorhandenen Spannungen zu überlagern. Der Betrag der Hauptnormalspannung ändert sich kaum – jedoch die Richtung der Hauptnormalspannung. Für weiterführende Untersuchungen sind die unter Kap. 5.8.1 angegebenen Bemerkungen unbedingt zu beachten. Die ermittelten Beanspruchungen wurden zudem an einem Modell mit relativ grober Vernetzung errechnet. Bei weiterführenden Simulationsrechnungen wird empfohlen, die Vernetzung feiner zu wählen.



## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.1 Strategie

In den vorangegangenen Kapiteln wurden für das Schweißen an Altstählen die wesentlichen Fragestellungen geklärt. Für die Profilquerschnitte aus dem Werkstoff Flusstahl konnten prinzipiell schweißgeeignete Bereiche definiert und zugehörig das Schweißverfahren mit dem Ziel adaptiert werden, Verbindungen zwischen Alt- und Neustahl ohne Beeinträchtigung der Güte sowie der Gebrauchseigenschaften herzustellen.

Zur Beurteilung einer generellen Eignung des Konzepts zur Ertüchtigung bestehender Bauwerke, insbesondere Brückentragwerke, sind drei wesentliche Untersuchungen erforderlich:

- Eignung für den Einsatz unter nicht ruhender Beanspruchung, vgl. Kap. 6.3
- Einfluss der Vorgeschichte, d. h. Einfluss der im Grundwerkstoff bisher stattgefundenen Lastwechsel auf die zukünftige Lebensdauer, vgl. Kap. 6.2
- Einfluss der Alterung bzw. Alterungsneigung auf die Ermüdungsfestigkeit, vgl. Kap. 6.4

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

Bei der ingenieurmäßigen Bemessung ermüdungsbeanspruchter Bauwerke hat sich der Nachweis der Betriebsfestigkeit, der auf dem Wöhlerlinienkonzept beruht, bewährt. Für die Bewertung bestehender Tragwerke ist stets der Anteil der ermüdungsrelevanten Vorgeschichte abzuschätzen und in der Nachweisrechnung zu berücksichtigen. Beim Betriebsfestigkeitsnachweis von Ertüchtigungsmaßnahmen ist zu beachten, dass die Kerbe, die infolge der neuen Schweißung entsteht, in einen bereits zyklisch belasteten Grundwerkstoff eingebracht wird. Der Einfluss der eingepprägten Vorgeschichte auf die erreichbare Lebensdauer der nachträglich eingebauten Kerbdetails ist zu untersuchen.

Im Kap. 6.3 werden Ermüdungsfestigkeitsversuche an einem geschweißten Kerbdetail aus Alt- und Neustahl durchgeführt. Für diesen konkreten Anwendungsfall sollen die zu berücksichtigenden Einflüsse aus der Vorgeschichte ermittelt werden. Hierfür wird nachfolgend ein Ersatzbauteil konzipiert, das die wesentlichen Einflüsse der geschweißten Laborprobe für die Untersuchung abbildet, jedoch weitere Parameter, die ungewollte Streuungen der Ergebnisse erzeugen, vermeidet.

Im Kap. 6.2.1 soll vorerst in Hinblick auf die experimentellen Untersuchungen das Verhalten des Flusstahls bei Ermüdung, bei Rissbildung und -wachstum unter besonderer Berücksichtigung der vorhandenen Konzentrationen der Begleitelemente erläutert werden. Hieraus erfolgt eine Ableitung der experimentell zu klärenden Fragestellungen.

## **6 Experimentelle Verifikation**

### **6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung**

---

#### **6.2.1 Phänomenologie der Rissbildung und des Risswachstums**

##### ***Stadium Ermüdungsverfestigung***

Anfänglich liegt ein durch eingelagerte Fremdatome verspanntes Metallgitter vor. Die als Ermüdung des Werkstoffs bezeichneten Vorgänge setzen eine mikroplastische Beanspruchungsamplitude voraus. Bei zyklischer Hin- und Herbewegung werden die Versetzungen ebenfalls zur gleichen Bewegung gezwungen. Die Gleitungen können anfänglich reversibel aufgenommen werden, bevor durch entstehende Versetzungswechselwirkung und einsetzender Versetzungsmultiplikation die Reversibilität stark reduziert und hierdurch das Material mit jedem weiteren Beanspruchungszyklus verfestigt wird. Die zyklische Verfestigung des Materials bewirkt bei konstanter Dehnung eine Zunahme der Spannung. Nach einer vom Material abhängigen Zyklenzahl erreicht die Verfestigung einen Sättigungsgrad, der sich durch minimale Änderung der Spannungsunterschiede bei konstanter Dehnung auszeichnet. Der Verfestigungsgrad und die Versetzungsanordnungen verändern sich bis zum Bruch im Allgemeinen nur unwesentlich, vgl. [BERG 1989].

Die Versetzungsstruktur besteht im Sättigungszustand aus Zellen mit Wänden hoher Versetzungsdichte und einem versetzungsarmen Zellinneren. Die Zellgröße wird über die Höhe der Beanspruchungsamplituden gesteuert.

##### ***Stadium Rissinitierung***

Es liegen die in der Verfestigungsphase erzeugten Versetzungen im gesamten, mit identischer Beanspruchung versehenen Materialvolumen vor. Die ausgetretenen Versetzungen, mikrostrukturelle Störungen, bilden an der Oberfläche gleichmäßige Gleitlinien.

Bei weiterer zyklischer Belastung – die Verfestigungsprozesse sind abgeschlossen, der Sättigungszustand der Versetzungsdichte ist erreicht – beruht die auftretende plastische Verformung auf reversiblen Versetzungsbewegungen, die vom Material vornehmlich von nur wenigen Gleitbändern aufgenommen wird. Es werden Bereiche durch Versetzungs-umordnung erzeugt, in denen die angedeuteten reversiblen Versetzungsbewegungen mit wenigen Behinderungen ablaufen können. Durch die Konzentration der plastischen Verformungen auf wenige Gleitbereiche wird hier eine höhere Verformung hervorgerufen als im restlichen Material. Ein vergleichbarer Effekt der Lokalisierung von Dehnung tritt beim Zugversuch im Bereich der Einschnürung auf.

Die konzentrierten Gleitprozesse beginnen an der Oberfläche, da den Versetzungen hier kein Austrittswiderstand entgegengesetzt wird und weil gegenüber dem Werkstoffinneren geringere Unebenheiten und Kerben vorhanden sind. Die persistenten Gleitbänder, eine besondere Form der Ermüdungsgleitbänder, bilden In- und Extrusionen (Materialeinschnitt und Materialaufwurf) an der Oberfläche, vgl. Bild 6–1. Diese Oberflächenverwerfungen

haben eine scharfe Mikrokerbung zur Folge. Hierdurch werden günstige Bedingungen für die Anrissbildung geschaffen.

Die persistenten Gleitbänder zeichnen sich dadurch aus, dass sie nach dem Entfernen durch Wegätzen im Unterschied zu anderen Gleitbändern bei erneuter zyklischer Beanspruchung an der gleichen Stelle wieder neu entstehen. Diese sind im Rasterelektronenmikroskop (REM) als dunkle und helle Stellen erkennbar.

Bei weiterer Belastung wird durch die Intensivierung der In- und Extrusionen eine zunehmende Rauigkeit der Oberfläche erzeugt.

Bei steigender Beanspruchungsamplitude und steigender Schwingspielzahl nimmt die Anzahl der Körner mit vorhandenen Gleitbändern sowie deren Dichte zu. Die fortschreitende Belastung verursacht eine weitere Lokalisierung der plastischen Verformung in den Gleitbändern. Dies führt zu steigenden Verformungen in der Gleitebene selbst sowie zu erhöhten In- und Extrusionen. Hierdurch wird die Bildung von Mikrorissen durch den Zusammenschluss von Versetzungen hervorgerufen.

Auch unter makroskopisch elastischer Beanspruchung werden Mikrorisse relativ früh initiiert. Ein weiteres Wachstum zum Ermüdungsriß schließt sich nicht zwangsläufig an. Nach [BERG 1998] ist für das Wachstum der Mikrorisse hin zum Ermüdungsriß ein höheres Beanspruchungsniveau notwendig als für die Bildung der Mikrorisse. Für die Lebensdauer ist demnach das Ausbreitungsverhalten der Mikrorisse entscheidend, die nach [KRÜMM 1998] stark vom Gefüge abhängt.

Metalle, wie der betrachtete Flusstahl, mit hoher Stapelfehlerenergie und erleichtertem Quergleiten durch Schraubenversetzungen erzeugen durch die Aktivierung verhältnismäßig weniger Gleitbänder eine hohe Aufräuhung der Oberfläche.

Die zuvor beschriebene Mikrorissbildung erklärt die Vorgänge im Inneren eines Kornes – führt demnach zu einer transkristallinen Rissinitiierung. Weiterhin ist eine Rissentstehung an den Korngrenzen denkbar – als interkristalline Rissinitiierung bezeichnet. Bei hohen Beanspruchungsamplituden wird eine Rissbildung an den Korngrenzen oder an Verunreinigungen von Teilchen aktiviert. Die Korngrenzen sind in diesem Fall von vielen Gleitbändern mit starker Gleitstufung durchsetzt und werden durch die „unverformbaren“ Korngrenzen behindert. Es entstehen zwischen Korn und Korngrenze Kerbwirkungen, die lokale Spannungsüberhöhungen und damit Rissinitiierungsbereiche erzeugen. Einschlüsse, insbesondere randschichtnahe oberflächendurchstoßende Einschlüsse, besitzen eine nachteilige Wirkung in Bezug auf die Rissbildung.

#### ***Stadium Risswachstum und -ausbreitung***

Die in den Ermüdungsgleitbändern vorhandenen Mikrorisse verlaufen zunächst in einem Winkel von  $45^\circ$  zur Probenachse und zur Beanspruchungsrichtung, der maximalen Schubspannung entsprechend, entlang der Ermüdungsgleitbänder. An Körnern kann das Risswachstum gestoppt oder umgelenkt werden. Durch den Widerstand benachbarter Bereiche werden einige Risse am Risswachstum gehindert.

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

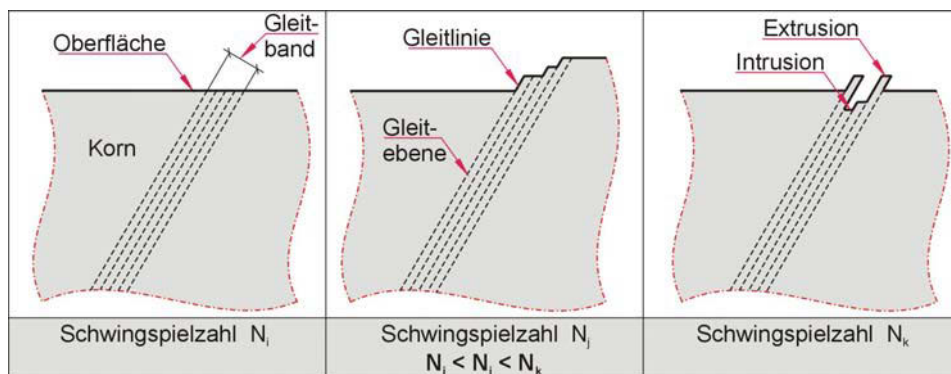


Bild 6–1: Charakteristik der Entstehung von Gleitlinien

Ab einer bestimmten Größe des Risses kann derselbige durch die äußeren Zugspannungen geöffnet werden, wodurch sich die Beanspruchungsart und der Spannungszustand an der Risspitze ändert. Die Beanspruchung wechselt in der Regel von der Schubspannung in den Normalspannungszustand. Infolgedessen ändert sich die Richtung des Risses in eine orthogonal zur Beanspruchungsrichtung verlaufenden Ausbreitungsrichtung. Durch den Übergang wird der Mikroriss in einen sich vom Lastspiel abhängig öffnenden Makroriss überführt.

#### **Aktueller Ermüdungszustand**

Der aktuelle Ermüdungszustand ist infolge der Komplexität der zuvor genannten Mechanismen nur ungenügend genau bestimmbar. Nach [AURI 1994] lassen sich die Gründe hierfür wie folgt benennen.

Das Verändern der Gitterbaufehler (Versetzungen), als plastische Verformung in der Kontinuumsmechanik benannt, ist nach AURICH eine notwendige, jedoch keine hinreichende Bedingung für das Entstehen eines Ermüdungsbruchs. Als Zusatzbedingung wird das Vorhandensein von Anrissen an Bauteiloberflächen genannt. In Hinblick auf die im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden Flusstähle kann hierbei als Oberfläche auch eine vorhandene, aus der Herstellung des Materials resultierende Trennung im Inneren des Werkstoffes als notwendige Zusatzbedingung für das Entstehen eines Ermüdungsbruchs betrachtet werden. Wird die Zusatzbedingung, Anrisse auf der äußeren Oberfläche, durch Polieren beseitigt, so kann eine gegenüber der Ermüdungsfestigkeitskurve erhöhte Lebensdauer erreicht werden, vgl. [AURI 1994] wenn keine inneren Oberflächen vorhanden sind.

Das zyklische Materialverhalten ist das Ergebnis mikrophysikalischer Veränderungen im Werkstoffinneren. So lassen sich beispielsweise Ver- und Entfestigungsvorgänge als Folgeeffekte der Zunahme der Versetzungsdichte durch plastische Wechselverformung

erklären. Die Zunahme der Versetzungsdichte ist damit ein Volumeneffekt, während die Rissbildung einen örtlich eng begrenzten Oberflächeneffekt darstellt.

#### **Fazit**

Als Resümee ergeben sich zwei wesentliche Fragestellungen für die nachfolgenden Untersuchungen:

- Weist die Gefügestruktur des Flusstahls innere Oberflächen auf, die aufgrund ihrer Erscheinung maßgeblich die Gesamtlebensdauer des Grundwerkstoffs beeinflussen?
- Gewalzte Erzeugnisse besitzen, im Wesentlichen infolge der Walzhaut, eine ermüdungsrelevante Kerbung an der Oberfläche. Besteht durch eine mechanische Oberflächenbearbeitung des Grundwerkstoffs die Aussicht, die möglicherweise vorhandenen, zuvor beschriebenen Ermüdungserscheinungen zu beseitigen und damit auch hier ein „jungfräuliches“ Material zu erzeugen?

#### **6.2.2 Vorgehensweise**

Die zur Lösung der aufgeworfenen Fragestellungen entwickelte Versuchsstrategie wird nachfolgend kurz beschrieben, vgl. Bild 6–2. Das Konzept beruht im Wesentlichen auf der Idee, die unter zyklischer Einstufenbelastung erreichbare Bruchlastwechselzahl zweier geometrisch identischer Probenserien aus Flusstahl zu ermitteln und zu vergleichen. Einziger Unterschied zwischen den beiden Versuchsserien liegt in der bereits in einer Serie eingprägten Vorgeschichte.

Die Versuchsdurchführung 1, vgl. Bild 6–2, liefert für einen „jungfräulich“ gekerbten Grundwerkstoff die bis zum Bruch erreichbare Lastwechselzahl.

Bei der Versuchsdurchführung 2 handelt es sich um den Repräsentanten eines im Bauwerk befindlichen Konstruktionselementes. Der Grundwerkstoff wird hierbei zur Einprägung der Vorgeschichte im ungekerbten Zustand in verschiedenen Versuchsserien auf unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus im Einstufenkollektiv zyklisch beansprucht. Nachträglich erfolgt eine Oberflächenbearbeitung und Kerbung der Probe, die nachfolgend im Text als Ersatzbauteil bezeichnet wird. Der dadurch erreichte Zustand repräsentiert den durch eine neue Schweißverbindung gekerbten und vorbelasteten Grundwerkstoff. Im gekerbten Zustand erfolgt eine zyklische Beanspruchung im Einstufenkollektiv bis zum Versagen des Ersatzbauteils.

Das Beanspruchungsniveau des Einstufenkollektivs im gekerbten Zustand und die Kerbgeometrie der Probenform in der Versuchsdurchführung 1 und Versuchsdurchführung 2 sind identisch. Die Kerbung der Probe erfolgt unter der Maßgabe, dass eine möglichst identische Kerbwirkung wie in der nachfolgend betrachteten geschweißten Laborprobe entsteht. Die

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

erreichten Bruchlastwechselzahlen aus der Versuchsdurchführung 1 werden denen der Versuchsdurchführung 2 – jeweils im gekerbten Zustand – vergleichend gegenübergestellt.

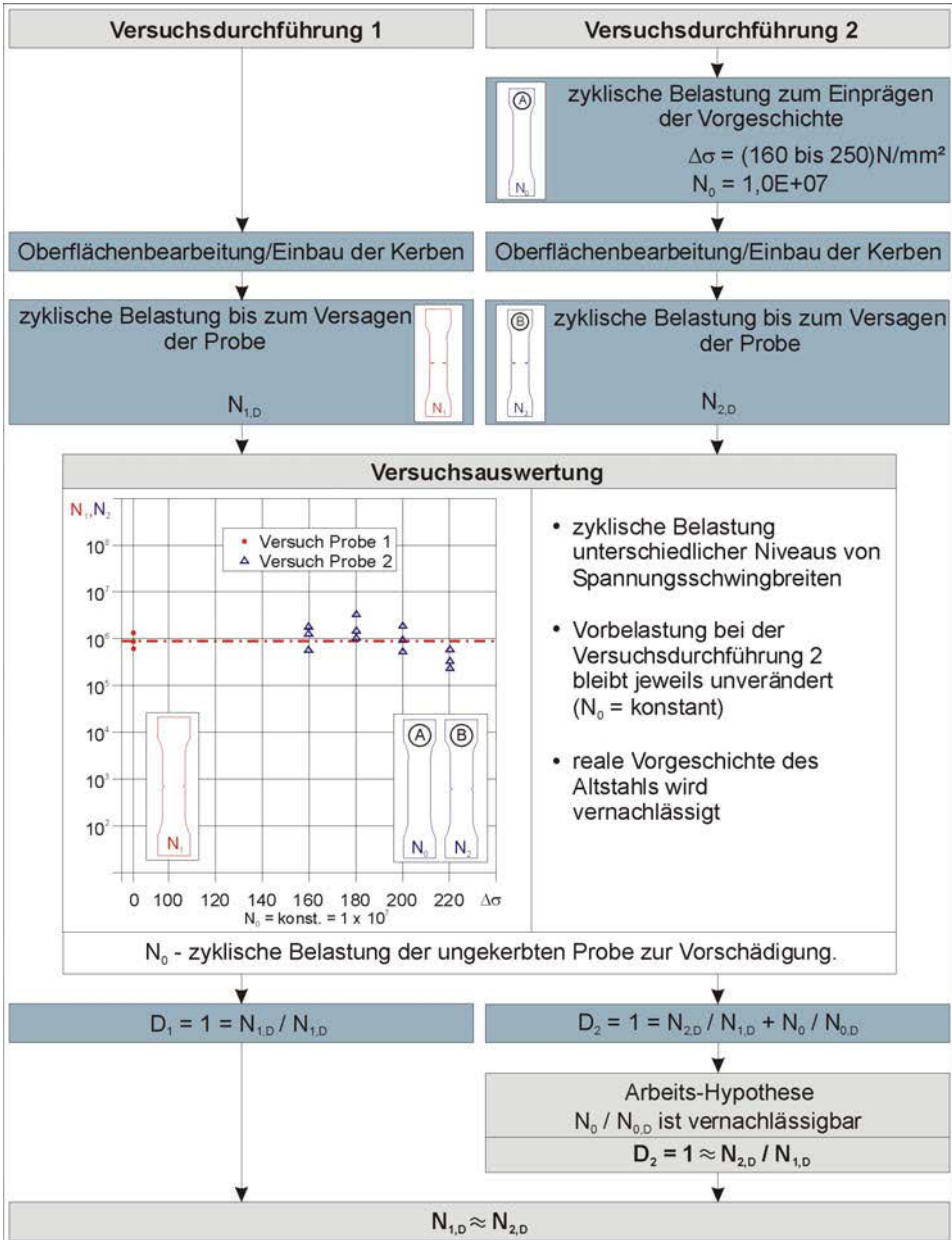


Bild 6–2: Prinzipdarstellung des Versuchsschemas zur Untersuchung der Vorgeschichteinflüsse;  $D_i$  Schädigungsgrad;  $N_{i,D}$  Bruchlastwechselzahl;  $i = 1,2$ ;  $N_{0,D}$  Bruchlastwechselzahl der äußerlich ungekerbten Flussstahlprobe

#### 6.2.3 Generierung des Ersatzbauteils

##### 6.2.3.1 Allgemeines

Bei der Generierung des Ersatzbauteiles müssen alle wesentlichen Einflüsse zur Untersuchung der Vorgeschichte berücksichtigt werden. Insbesondere die Verwendung des betrachteten Materials ist von wesentlicher Bedeutung. Daher werden typische Vertreter des Flusstahls für die Untersuchung verwendet.

Die Form der ermüdungsrelevanten Kerbe im Ersatzbauteil – als Repräsentant der einzubringenden Schweißung – muss weiteren Ansprüchen genügen. Die Form der Kerbe, die mit Hilfe des Kerbspannungskonzepts ermittelt wird, ist so auszulegen, dass die resultierende Kerbwirkung der nachfolgenden Schweißung, vgl. Kap. 6.3, in der Kerbschärfe ähnlich ist. Hierdurch wird zur Untersuchung der Vorgeschichte einfluss eine für den Brückenbau verhältnismäßig hohe Kerbschärfe genutzt. Wesentlicher Vorteil ist die Verkürzung der Versuchszeit. Die Verwendung kleinerer Kerbschärfen würde zu sinn gemäßen Ergebnissen führen, wenn die Hypothese der linearen Schädigungsakkumulation nach PALMGREN und MINER vorausgesetzt wird, vgl. [HAIB 2002].

Die für die Untersuchung der Vorgeschichte unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflüsse zur Anwendung kommende gekerbte Probenform ist im Bild 6–5 dargestellt.

Als Grundlage der Probenform wird die Geometrie einer Flachzugprobe in Anlehnung an die [DIN 50125] verwendet, die beidseitig mit Kerben definierter Abmessungen versehen wird. Die Formgebung der Proben erfolgt mit dem automatisierten Wasserstrahlschneidverfahren. Nachträglich werden alle Oberflächen der Probe gefräst. Die optionalen Kerben werden durch Bearbeitung des Werkstücks mit Sägeblättern hergestellt.

Die Tiefe der Kerbe, gemessen von der Bauteiloberfläche, orientiert sich an der Tiefe des Einbrands beim Schweißen in den Grundwerkstoff des Flusstahls. Der Einbrand bewirkt ein „Zusammenschweißen“ vorhandener oberflächennaher Mikrorisse, die der Vorgeschichte entstammen. Damit ist in diesem Bereich die Vorgeschichte bereits nicht mehr vorhanden.

Die Reproduzierbarkeit der Kerbe ist weiterhin wichtig, um die Streuungen zu minimieren und die auftretenden Lastwechselunterschiede zwischen vorgeschädigter Probe und nicht vorgeschädigter Probe konsequent der Beanspruchung zuordnen zu können.

##### 6.2.3.2 Verwendung des Kerbspannungskonzepts

Für die rechnerische Bewertung ermüdungsbeanspruchter Tragelemente bietet das Schrifttum verschiedene Verfahren an, vgl. [HAIB 2002]. Für die Untersuchung der Einflüsse infolge der Vorgeschichte werden Komponenten des hauptsächlich im Automobilbau sowie im Brückenbau angewandten Kerbspannungskonzeptes benutzt. Es unterstützt hierbei insbesondere die Kerbformfindung des Ersatzbauteils sowie die qualitative Einschätzung der

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

---

vorhandenen Kerbschärfen der Ertüchtigungsmaßnahme. Daher werden die hierfür notwendigen Grundlagen des Konzepts in seinen Besonderheiten für nichtgeschweißte und geschweißte Bauteile beschrieben.

#### **Grundlagen des Kerbspannungskonzepts**

Grundsätzlich entscheidet bei ermüdungsbeanspruchten Bauteilen nicht der höchstbeanspruchte Querschnitt, sondern der Bereich des Bauteils mit der ungünstigsten Kombination aus hoher Kerbschärfe und Beanspruchung über die erreichbare Lebensdauer des gesamten Bauteils. Die Kerbschärfe ist vom Verhältnis der Geometrieunstetigkeiten abhängig. An Kerben sind infolge der zyklischen Einwirkung auftretende, zumeist mehraxiale Spannungserhöhungen zu erwarten. Die resultierende Kerbspannungserhöhung wird von der vorhandenen Einwirkung und der Geometrie verursacht. Die Kerbformzahl  $K_t$  gibt unter Verwendung eines rein elastischen Werkstoffverhaltens Auskunft über das Verhältnis der am Kerbgrund auftretenden Kerbspannungsspitze  $\sigma_{\max}$  zur Nennspannung  $S$ .

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{S} \quad (\text{Gl. 6-1})$$

Durch das unterstellte elastische Werkstoffverhalten ist die Kerbformzahl alleinig von der Kerbform und Art der Beanspruchung – Biegung und Normalkraftbeanspruchung – abhängig. Die Kerbformzahl kann anhand von Berechnungen mit der Finite Element Methode, durch Näherungsformeln sowie durch analytische Lösungen ermittelt werden. Berechnungsmöglichkeiten der Kerbformzahl sind beispielsweise [ANTH 1993], [RAIN 1978], [NISH 1967] und [RADA 1968] zu entnehmen.

Bei kleiner werdenden Kerbradien bzw. bei steilerem bezogenen Spannungsgefälle steigt die ermüdungswirksame Kerbspannung nicht im gleichen Maße wie die Kerbspannungsspitze, die rechnerisch aus der Kerbformzahl resultiert. Dieses Verhalten ist auf die Stützwirkung des den Kerbgrund umgebenden, weniger hoch beanspruchten Werkstoffbereiches zurück zu führen. Eine weitere Erklärungsvariante geht von der statistischen Verteilung der Fehlstellen im Material aus. Die Wahrscheinlichkeit, in einem kleinerem hochbeanspruchten Bereich eine größere Menge an Fehlstellen zu erwarten, ist gering, vgl. [HAIB 2002].

Die ermüdungswirksame Beanspruchung im Kerbgrund ist demnach die um die Stützwirkung der Werkstoffmikrostruktur modifizierte elastische Kerbspannung. Diese örtlich verminderte Spannung ergibt sich als Mittelwert der Kerbspannungen über ein vom Werkstoff selbst abhängiges geometrisches Maß im Kerbgrund und ist auf die werkstoffspezifischen Eigenschaften hinsichtlich Kristallstruktur, Mikrofließen sowie stattfindender Rissinitiierungsprozesse zurückzuführen.



**Vorgehensweise für nichtgeschweißte Bauteile**

Für nichtgeschweißte Bauteile existieren unterschiedliche Mikrostützwirkungshypothesen, beispielsweise nach SIEBEL/STIELER, NEUBER, PETERSON und nach KUGUEL/SONSINO, vgl. [RADA 2000].

Durch die Definition einer Kerbwirkungszahl  $K_f$ , als Verhältnis der Dauerfestigkeit des ungekerbten Prüfstabes  $\Delta\sigma_{R,ungekerbt}$  zur Dauerfestigkeit des gekerbten Prüfstabes  $\Delta\sigma_{R,gekerbt}$ , wird der Einfluss der Mikrostützwirkung berücksichtigt.

$$K_f = \frac{\Delta\sigma_{R,ungekerbt}}{\Delta\sigma_{R,gekerbt}} \quad (\text{Gl. 6-2})$$

Im Schrifttum sind verschiedene Möglichkeiten für die Berechnung der Kerbwirkungszahl angegeben. Nach [HAIB 2002] sind sämtliche Ansätze auf zwei Grundbeziehungen zurückzuführen – auf die Kerbempfindlichkeit nach THUM und Mitarbeitern, vgl. [THUM 1932], sowie auf die Stützziffer nach SIEBEL und Mitarbeitern, vgl. [SIEB 1955].

Für die Ermittlung der Kerbwirkungszahl soll im Rahmen dieser Arbeit als Mikrostützwirkungshypothese der Spannungsgradientenansatz nach SIEBEL und STIELER Verwendung finden. Nachfolgend wird dieser Ansatz für die Bestimmung der Kerbwirkungszahl nichtgeschweißter Strukturen näher betrachtet. Die Stützziffer  $n(\chi)$  ist als Verhältnis der Kerbformzahl  $K_t$  zur Kerbwirkungszahl  $K_f$  definiert.

$$n(\chi) = K_t / K_f \quad (\text{Gl. 6-3})$$

Die Stützziffer steht in Abhängigkeit zum bezogenem Spannungsgefälle, ist vom Kerbradius und vom Gradienten der Nennspannung abhängig und wird durch  $\chi$  ausgedrückt.  $\chi$  ist wie folgt definiert

$$\chi = \frac{1}{\sigma_{\max}} \cdot \frac{d\sigma}{dx}, \quad (\text{Gl. 6-4})$$

und kann in der Literatur für verschiedene Bauteilformen aus Tabellen entnommen werden, beispielsweise [FKM 2002], [Haib 2002] und [Rada 2000].

Für die Berechnung der Anrisslebensdauer sind am Kerbgrund weiterhin die vorhandene Oberflächenrauigkeit, Härte sowie die vorhandenen Eigenspannungen zu berücksichtigen. Die aus mehraxialer Einwirkung resultierende Beanspruchung ist bei duktilem Werkstoffverhalten mit Hilfe der Gestaltänderungshypothese und bei sprödem Werkstoffverhalten mit der Normalspannungshypothese zu ermitteln, vgl. [HAIB 2002].

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

---

#### **Vorgehensweise für geschweißte Bauteile**

Prinzipiell gilt für geschweißte Bauteile das gleiche Vorgehen wie für nichtgeschweißte Bauteile. Es wird jedoch für die Berücksichtigung der Mikrostützwirkung eine andere Herangehensweise gewählt. Auch hier existieren in der Literatur verschiedene Ansätze, von denen die Version nach RADAJ nachfolgend näher betrachtet wird, vgl. [RADA 2000]. Die Abschätzung der Mikrostützwirkung an den durch Schweißungen entstehenden Kerben erfolgt nach RADAJ gemäß der NEUBERSchen Mikrostützwirkungshypothese. Die ermüdungswirksame Kerbhöchstspannung wird durch fiktive Rundung des Kerbradius errechnet. Der fiktive Kerbradius  $\rho_f$  ergibt sich mit  $\rho$  als tatsächlichen Kerbradius,  $s$  als Mehrachsigenkoeffizient und  $\rho^*$  als Ersatzstrukturlänge zu

$$\rho_f = \rho + s \cdot \rho^* . \quad (\text{Gl. 6-5})$$

Für den „Worst Case“-Fall wird  $\rho = 0$  angesetzt und somit auf der sicheren Seite liegend die ermüdungswirksame Kerbspannung und daraus resultierend die Anrisslebensdauer bestimmt. Der Mehrachsigenkoeffizient wird für Schweißverbindungen zu  $s = 2.5$  und die Ersatzstrukturlänge zu  $\rho^* = 0.4$  angesetzt. Dieses Vorgehen hat sich nach [RADA 2000] für Schweißverbindungen an Baustahl bewährt. Hieraus resultiert ein fiktiver Kerbradius von  $\rho_f = 1.0$  mm.

#### **6.2.3.3 Ermittlung der Kerbgeometrie des Ersatzbauteils**

Der prinzipielle Ablauf zur Geometriefindung der im Ersatzbauteil befindlichen Kerbe ist unter Verwendung der Komponenten des Kerbspannungskonzeptes im Bild 6–3 zusammengestellt.

Um die bei der Ermittlung der Kerbung zugrunde gelegte Ertüchtigungsmaßnahme, vgl. Kap. 6.3, hinsichtlich Kerbwirkung quantifizieren zu können, wurde ein räumliches FE-Modell im Programm ANSYS erstellt. Unter Annahme des Kerbspannungskonzeptes, Version nach RADAJ, fand bei der FE-Rechnung der Ausrundungsradius an der Kerbe zu  $\rho_f = 1.0$  mm Verwendung, vgl. Kap. 6.2.3.2. Das FE-Modell ist mit 10-Knoten Tetraederelementen vernetzt. Die Berechnung erfolgte auf Grundlage eines linear elastischen Werkstoffverhaltens. Die Vernetzung der Struktur weist zum Kerbgrund hin eine feiner werdende Elementierung auf. Am Kerbgrund selbst beträgt in Anlehnung an [HAIB 2002] die Elementkantenlänge  $L_{\text{Element}} = \rho_f/6.5 = 0.15$  mm. Die so ermittelte Kerbspannung berücksichtigt bereits die Mikrostützwirkung.

Der Wert der Kerbspannung konvergiert durch Verwendung des Ausrundungsradius gegen einen Grenzwert, den „wahren Wert“ der ermüdungswirksamen Kerbspannungsspitze bei

linear elastischem Werkstoffverhalten. Mit kleiner werdender Elementkantenlänge ist kein weiterer Anstieg der Kerbspannung zu verzeichnen.

Die Ermittlung der Kerbwirkungszahl erfolgt durch Verhältnisbildung mit der Nennspannung und der Spannungsspitze im Kerbgrund, vgl. Bild 6–4.

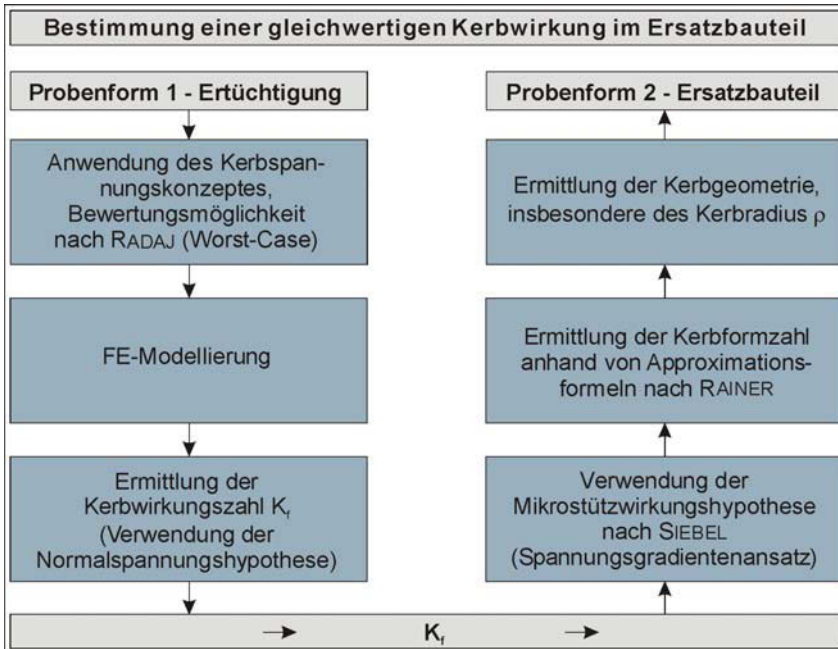


Bild 6–3: prinzipielle Vorgehensweise zur Ermittlung der Kerbformzahl des Ersatzbauteils

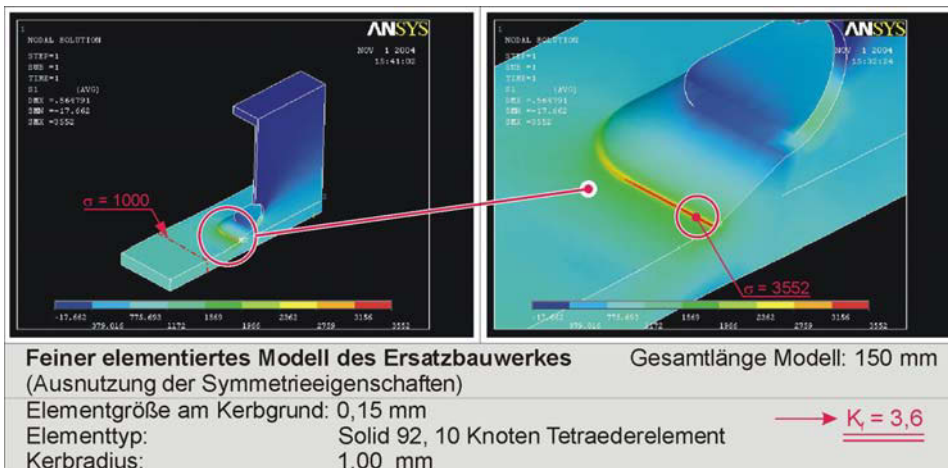


Bild 6–4: Ermittlung der Kerbformzahl für das Kerbdetail der Ertüchtigungsmaßnahme mit Hilfe der Finite Element Methode

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

Die Kerbwirkungszahl ergibt in Verbindung mit der Nennspannung die ermüdungswirksame Spannung am Kerbgrund. Die Kerbgeometrie der Probeform zur Ermittlung der Vorgeschichteinflüsse wird so konfiguriert, dass am Kerbgrund ein ähnlicher Spannungszustand sowie eine ähnliche ermüdungswirksame Spannung bei gleicher Nennspannung auftritt. Durch die Modifikation der Kerbgeometrie wird eine der Ertüchtigungsmaßnahme entsprechende Kerbwirkung, die sich über die Kerbwirkungszahl ausdrücken und vergleichen lässt, eingestellt.

Die angewendete Kerbe ergibt sich durch Vergleich der Kerbwirkungszahl einer geschweißten Ertüchtigungsmaßnahme mit einer sich aus der Kerbung der Probe ergebenden Kerbwirkungszahl. Sind beide Kerbwirkungszahlen identisch, resultiert hieraus die zu verwendende Kerbgeometrie.

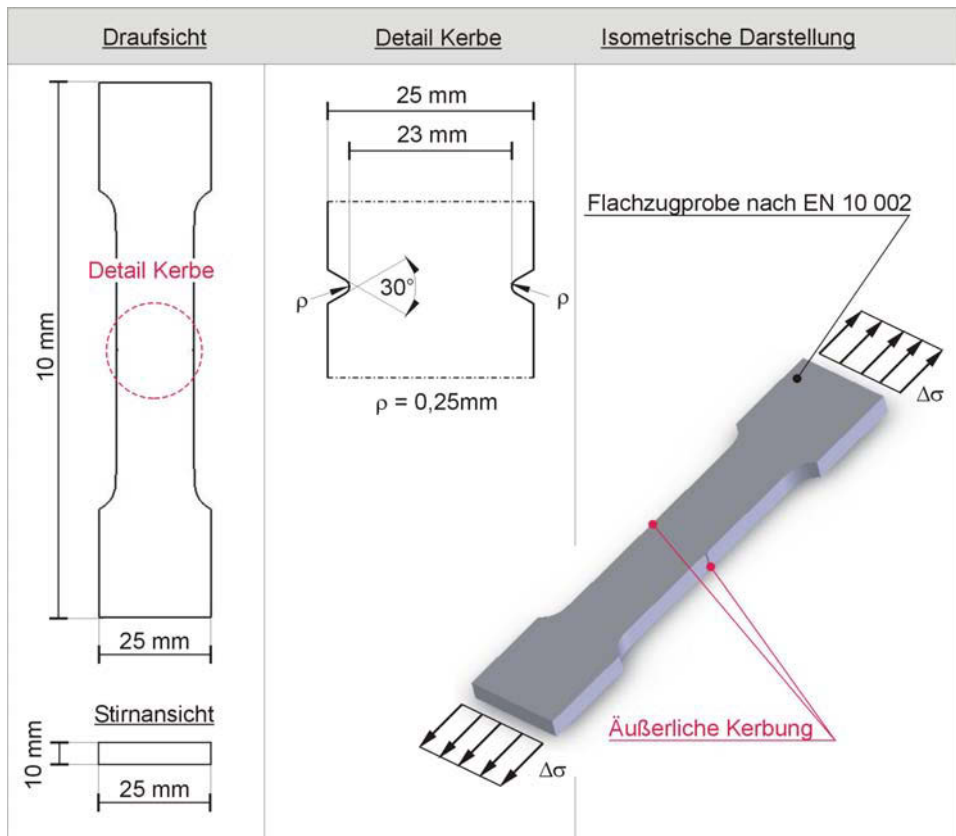


Bild 6–5: gekerbte Probenform (nicht maßstäblich)

Im Bild 6–6 ist im dargestellten Diagramm die aus der FE-Analyse errechnete Kerbwirkungszahl aufgetragen. Des weiteren ist die Kerbwirkungszahl und die Kerbformzahl in Abhängigkeit des Kerbradius für den beidseitig gekerbten und normalkraftbeanspruchten Stab aufgetragen. Es ist das weniger rasante Ansteigen der Kerbwirkungszahl gegenüber

der Kerbformzahl bei kleiner werdendem Kerbradius zu erkennen, das wie schon erwähnt auf die aktivierte Mikrostützwirkung bei kleinen Kerbradien zurückzuführen ist. Zur Modifikation der Kerbformzahl sind im Wesentlichen die Kerbtiefe und der Kerbradius zu variieren. Die Kerbtiefe ist konservativ zu konstant  $t = 1$  mm gewählt. Es wird ausschließlich der Kerbradius variiert.

Durch Schnittpunktsuche der Kerbformzahl des untersuchten Schweißdetails, vgl. Bild 6–4, mit der identischen Kerbformzahl für den Zugstab, ist aus dem Diagramm im Bild 6–6 der erforderliche Kerbradius  $\rho$  abzulesen.

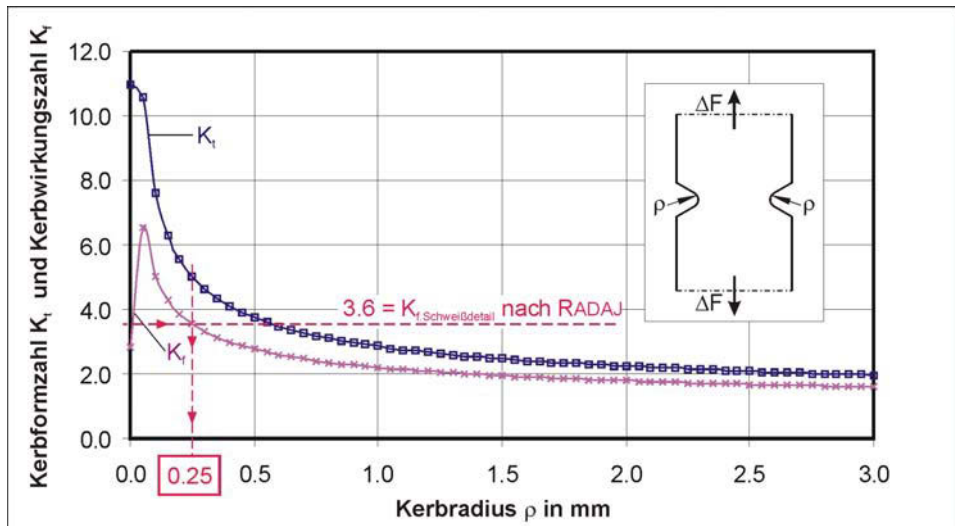


Bild 6–6: Kerbformzahl  $K_t$  und Kerbwirkungszahl  $K_f$  in Abhängigkeit vom Kerbradius für einen beidseitig gekerbten Stab – unter Normalkraftbeanspruchung

#### 6.2.4 Beanspruchungen zur Einprägung der Vorgeschichte

##### Allgemein

Jeder Planer steht bei der Nachrechnung bestehender, ermüdungsbeanspruchter Tragwerke vor dem Problem, die jeweilige Vorgeschichte abschätzen zu müssen. Hierfür stehen verschiedene Modelle zur Verfügung, die beispielhaft in [MEHD 2003] beschrieben und deren Grenzen sowie Unschärfen benannt werden. Ziel ist die realitätsnahe Beschreibung der eingprägten Vorgeschichte unter Berücksichtigung der individuell vorhandenen Randbedingungen des Tragwerks. Die Übertragbarkeit der an ausgewählten Brückenbauwerken ermittelten Vorgeschichte auf weitere Bauwerke ist nicht möglich. Die individuellen und bauwerksspezifischen Merkmale einer Konstruktion, die sich aus äußeren Bedingungen wie die geographische und infrastrukturelle Lage sowie aus konstruktiven Besonderheiten der Konstruktion ergeben, lassen eine vereinheitlichte Beschreibung der Vorgeschichte nicht zu.

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

---

Um trotzdem eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung der Vorgeschichte treffen zu können, wurde für den „Worst Case“-Fall der eingepprägten Vorgeschichte folgende Vorgehensweise entwickelt.

#### **Abschätzung und Wahl der Vorgeschichte für den „Worst Case“-Fall**

Die gewählte Beanspruchung zur Einprägung der Vorgeschichte, die nachfolgend erläutert wird, ist in Tabelle 6-1 angegeben. In der Tabelle 6-2 sind die Beanspruchungen für den gekerbten Zustand dargestellt. Die Versuchsserie R.2 umfasst die Proben ohne vorherige zyklische Belastung, wohingegen die Versuchsserien A.2 bis D.2 die zyklisch vorbelasteten Proben beinhalten, vgl. Tabelle 6-2.

Versuchsserie	$\sigma_o$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u$ in N/mm <sup>2</sup>	$\Delta\sigma$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_a$ in N/mm <sup>2</sup>	R
A.1	160	0	<b>160</b>	80	<b>0</b>
B.1	200	0	<b>200</b>	100	<b>0</b>
C.1	220	0	<b>220</b>	110	<b>0</b>
D.1	250	0	<b>250</b>	125	<b>0</b>

Tabelle 6-1: *Versuchsreihen zur Einprägung der Vorgeschichte im Einstufenversuch – N = konstant = 10E+06*

Versuchsserie	$\sigma_o$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u$ in N/mm <sup>2</sup>	$\Delta\sigma$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_a$ in N/mm <sup>2</sup>	R
R.2	160	0	<b>160</b>	80	<b>0</b>
A.2	160	0	<b>160</b>	80	<b>0</b>
B.2	160	0	<b>160</b>	80	<b>0</b>
C.2	160	0	<b>160</b>	80	<b>0</b>
D.2	160	0	<b>160</b>	80	<b>0</b>

Tabelle 6-2: *zyklischen Belastung der gekerbten Proben im Einstufenversuch bis zum Bruch*

Es erfolgt eine Abschätzung der Vorgeschichte unter Verwendung der in Regelwerken aus der Entstehungszeit der Bauwerke angegebenen zulässigen Spannungen sowie der derzeit geltenden [RIL 804] zur Ermittlung einer schadensäquivalenten Einstufenbeanspruchung, vgl. Bild 6–7.

Als Spannungsdoppelamplitude für die Zugüberfahrt wird die nach den Regelwerken [DR 1925] und [DR 1934] anzusetzende maximal zulässige Spannung  $\Delta\sigma_{zul} = 140 \text{ N/mm}^2$  auf der sicheren Seite liegend verwendet. Dies entspricht bei der statischen Bemessung einer

Spannungsausnutzung von 100 %. Das Spannungsverhältnis R wird ebenfalls in sicherer Abschätzung zu  $R = 0$  in Ansatz gebracht.

Die [RIL 804] bietet für die Bemessung ermüdungsbeanspruchter Tragwerke eine Möglichkeit der ingenieurmäßigen Berechnung der schadensäquivalenten Einstufenbeanspruchung unter Berücksichtigung der Spannungsdoppelamplitude infolge Zugverkehr, der Begegnungshäufigkeit bei mehrgleisigem Betrieb, der effektiven Spannweite des Bauteils sowie der Lebensdauer des Tragwerkes.

Nach der [RIL 804] wird als oberer Grenzwert für die Umrechnung auf das schadensäquivalente Einstufenkollektiv  $\Delta\sigma_{E,2}$ , bezogen auf  $2,0E+06$  Lastwechsel,  $\lambda_{max} = 1,4$  angegeben. Hieraus ergibt sich für  $\Delta\sigma_{E,2} = 196 \text{ N/mm}^2$ .

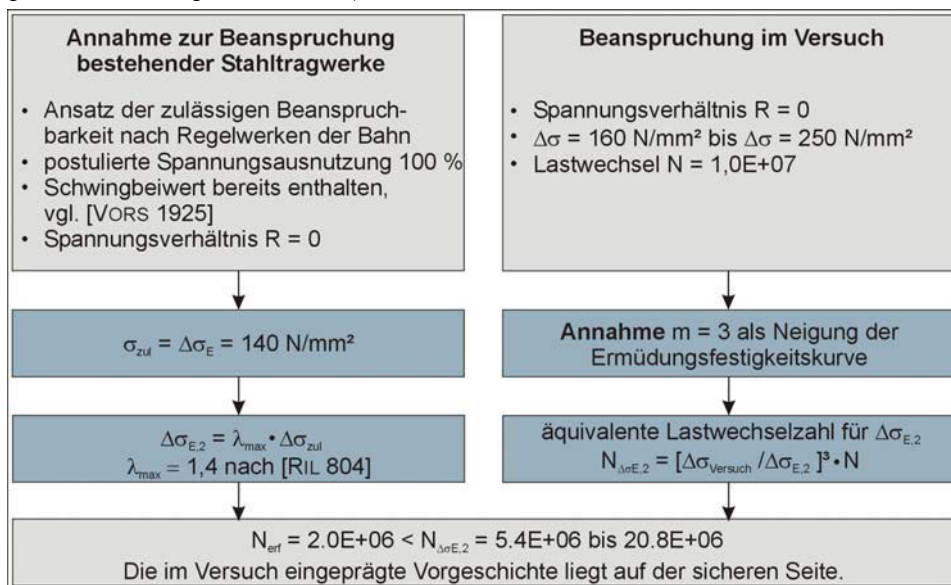


Bild 6–7: schadensäquivalente Einstufenbeanspruchung nach Ril 804 für bestehende Stahltragwerke in ungünstigster Einwirkungskombination im Vergleich zu den Einstufenbeanspruchungen der Versuchsserien A.1 bis D.1

Versuchsserie	$\Delta\sigma$ in $\text{N/mm}^2$	R	$N_{\text{Versuch}}$	$N_{\Delta\sigma E,2}$	$N_{\gamma}$ (= $N_{\Delta\sigma E,2} - 2.0E+06$ )
A.1	160	0	10.0E+06	5.4E+06	<b>3.4E+06</b>
B.1	200	0	10.0E+06	10.6E+06	<b>8.6E+06</b>
C.1	220	0	10.0E+06	14.1E+06	<b>12.1E+06</b>
D.1	250	0	10.0E+06	20.8E+06	<b>18.8E+06</b>

Tabelle 6-3: Vergleich der in den Versuchsserien aufgetragenen Beanspruchungen mit der für bestehende Stahltragwerke konservativ ermittelten Beanspruchung

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

Bei einer Umrechnung der in Tabelle 6-1 angegebenen Beanspruchungen auf äquivalente Beanspruchungen für ein  $\Delta\sigma_{E,2} = 196 \text{ N/mm}^2$  ergeben sich die in Tabelle 6-3 dokumentierten Lastwechsel  $N_{\Delta\sigma_{E,2}}$ , bei der konservativen Annahme der Neigung der Ermüdungsfestigkeitskurve zu  $m = 3$ .

In Anlehnung an [HAIB 2002] ist im Bild 6–8 noch einmal der prinzipielle Zusammenhang zwischen dem geforderten Einstufenkollektiv und den tatsächlich aufgetragenen Kollektiven in den Versuchsserien grafisch dargestellt. Die Werte für  $N_i$  sind der Tabelle 6-3 zu entnehmen.

Die wahre Vorgeschichte der verwendeten Flusstähle wird im Rahmen dieser Untersuchungen vernachlässigt, da die verwendeten Proben aus gering beanspruchten Bereichen eines unterordneten Bauwerkes entstammen und die Vorschädigung im Vergleich zu den hohen Beanspruchungen der Versuchsserien A.1 bis D.1 vernachlässigbar ist.

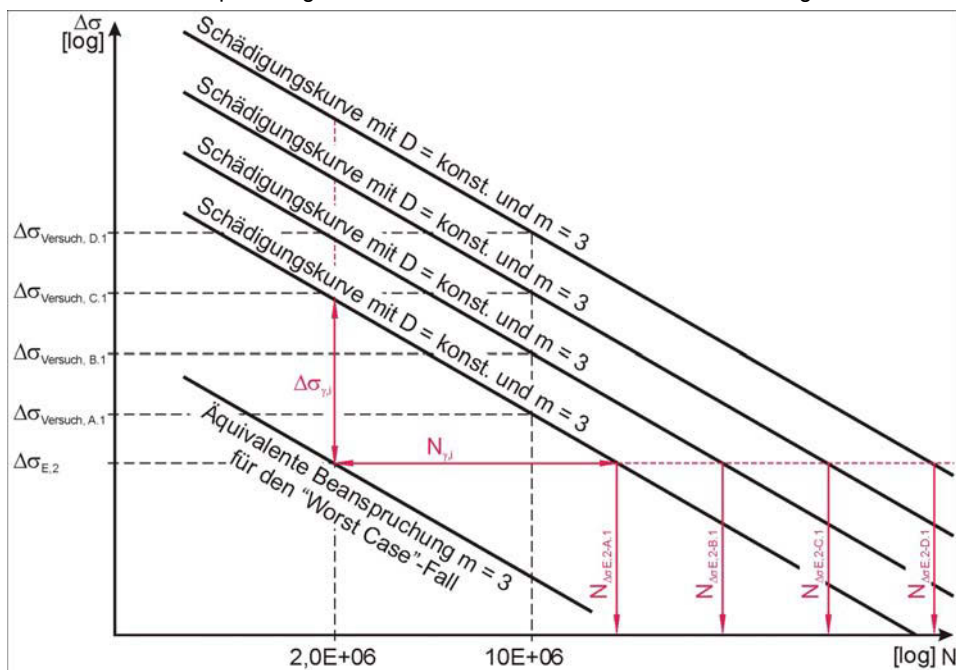


Bild 6–8: schematische Darstellung der Beanspruchung in Anlehnung an die [RIL 804] für bestehende Stahltragwerke in ungünstigster Einwirkungskombination im Vergleich zu den Versuchsserie  $i = A.1$  bis  $D.1$ ; zugehörige Werte siehe Tabelle 6-3

Die Flusstähle der Versuchsserien wurden aus verschiedenen Bauelementen eines Bauwerkes entnommen. Die vorgefundenen Bauteilgrößen ließen die Entnahme aller Proben aus einem Bauteilelement nicht zu. Zwei Stege genieteter Doppel-T-Profile, die aus einer rückgebauten Fachwerkbrücke, vgl. Bild 6–9, entstammen und nachfolgend mit N5 und N6 bezeichnet werden, dienten der Probenentnahme.





*Bild 6–9: Tragwerk aus Flusstahl über den Mittellandkanal*

Dadurch standen genügend Proben zur Verfügung, um die bei Ermüdungsversuchen erforderliche Statistik in der Versuchsauswertung mit berücksichtigen zu können. Weiterhin genügte die Probenanzahl, um für die jeweilige Grundgesamtheit N5 und N6 die im Bild 6–2 dargestellte Versuchsdurchführung 1 erbringen zu können. Durch dieses Vorgehen wird das Mischen unterschiedlicher Grundgesamtheiten ausgeschlossen. Die Versuchsergebnisse gewinnen damit an Aussagekraft.

#### 6.2.5 Versuchsdurchführung

In der BAM stehen für die Durchführung von Dauerschwingversuchen verschiedene Prüfstände zur Verfügung. Zwei Versuchsstände wurden zur Verkürzung der Versuchszeiten simultan betrieben.

Versuchsstand 1: vertikaler Kraftraum mit servohydraulischen 400 kN  
Prüfzylinder, Prüfmaschinenklasse 1  
Hersteller: Firma Schenck  
Regelelektronik: Instron 8500

Im Versuchsstand 1, vgl. Bild 6–10, findet die zyklische Belastung der ungekerbten Proben statt. Infolgedessen wird dem Flusstahl eine Vorgeschichte eingepreßt. Die Einwirkung wird als Einstufenbelastung aufgebracht. Die Schwingenspielzahl ist auf  $10E+06$  Lastwechsel zur Verkürzung der Versuchszeit begrenzt.

Um die Maschinenlaufzeiten nochmals zu minimieren, wurden jeweils zwei Proben parallel im Versuchsstand 1 zyklisch belastet. Hieraus ergab sich die Problematik des Nachweises des vorhandenen Kräfteflusses.

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

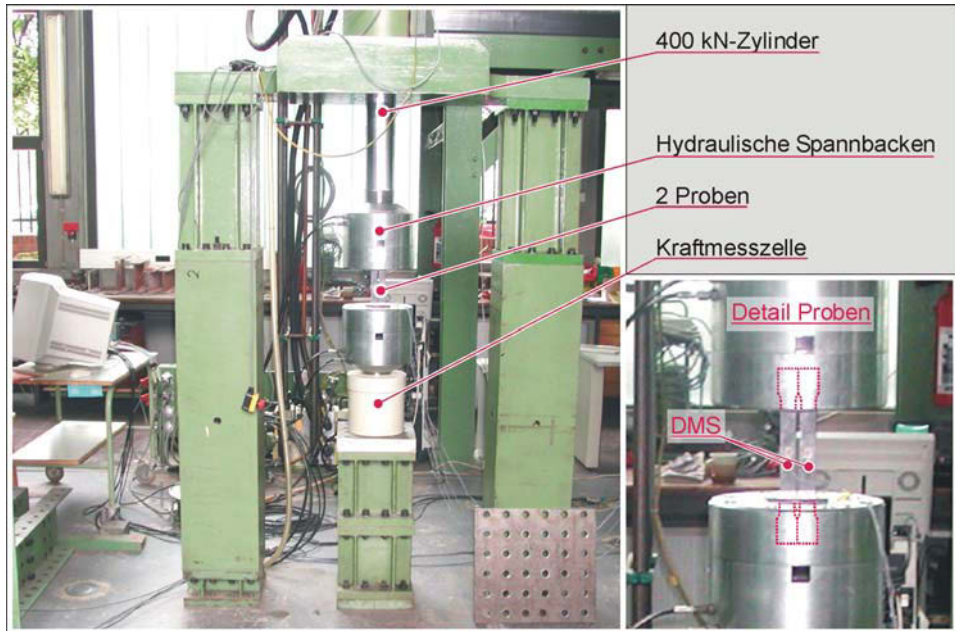


Bild 6-10: Versuchsstand 1 – Einprägen der Vorgeschichte



Bild 6-11: Versuchsstand 2 – zyklische Belastung bis zum Bruch des Repräsentanten der Ertüchtigungsmaßnahme

Da die Einspannvorrichtungen sowie der übrige Versuchsstand selbst relativ steif gegenüber den eingebauten Proben war, ergab sich die berechtigte Frage, inwiefern sich ein identischer Kräftefluss in beiden Proben einstellt.

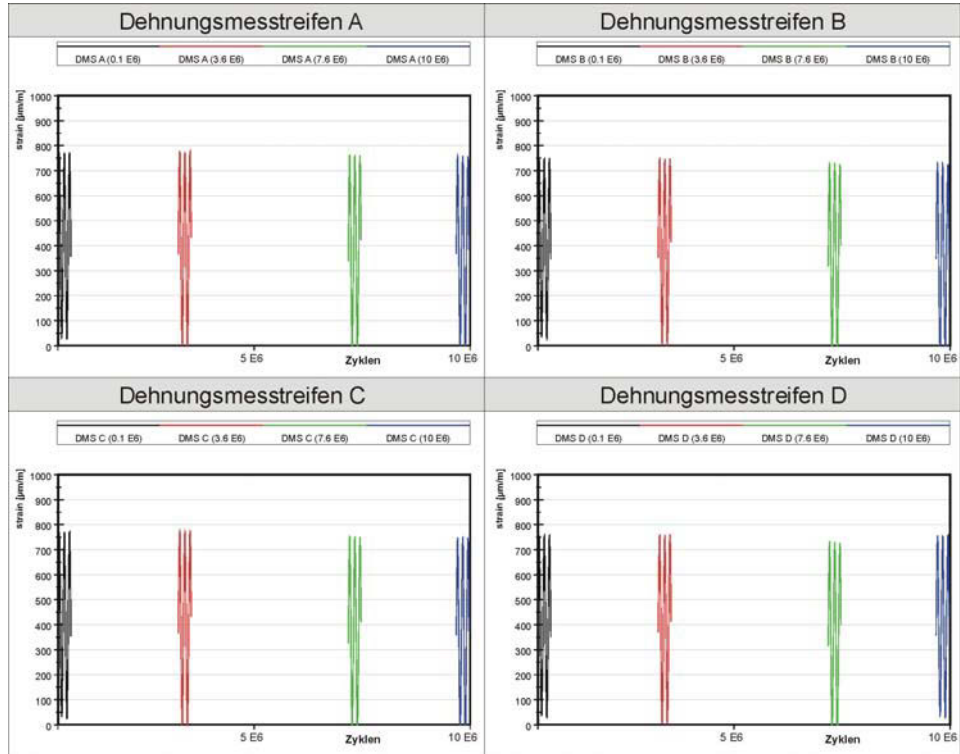


Bild 6–12: Auszug aus den Überwachungsmessungen der parallel belasteten Flachzugproben – DMS A, DMS B zur linken Probe, DMS C, DMS D zur rechten Probe zugehörig – DMS jeweils mittig auf der Vor- und Rückseite der Probe appliziert, vgl. Bild 6–10

Zur Sicherstellung eines gleichmäßigen Kräfteflusses wurden an den jeweils eingebauten Proben DMS appliziert. Hierdurch konnten anhand der Dehnung der Proben die auftretenden Einwirkungen verglichen werden. Wie im Bild 6–12 anhand der Messschriebe zu erkennen ist, stellt sich ein identischer Beanspruchungsverlauf in den Proben ein. Demnach ist ersichtlich, dass unter der Voraussetzung eines zentrischen Einbaus der Proben davon ausgegangen werden kann, dass sich ein gleicher Beanspruchungszustand ergibt.

Versuchsstand 2: KPM (Kleinprüfmaschine) mit servohydraulischem 100 kN  
 Prüfzylinder, Prüfmaschinenklasse 1  
 Hersteller: Firma Schenck  
 Regelelektronik: Schenck S56

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

Der Versuchsstand 2, vgl. Bild 6–11, wird ausschließlich mit gekerbten Proben bestückt, die im Einzelversuch jeweils bis zum Bruch belastet werden.

Hier konnte keine Zeiteinsparung durch Einbau mehrerer Proben erzielt werden. Die sich vor dem Versagen einer einzelnen Probe einstellende Längenausdehnung infolge Risswachstum hätte eine Lastumverteilung auf andere Proben und dementsprechend eine Entlastung der angerissenen Proben zur Folge.

#### 6.2.6 Versuchsergebnisse

Im Bild 6–13 sind die erreichten Schwingspielzahlen aller durchgeführten Versuchsreihen im gekerbten Zustand grafisch dargestellt. Die strich-punktierte horizontale Linie repräsentiert den Mittelwert der erreichten Lastwechsel der Versuchsdurchführung 1, vgl. Bild 6–2. Für das Flusstahlmateriale N5 und N6 wurden im gekerbten Zustand und ohne Vorgeschichte fast identische Mittelwerte an Schwingspielzahlen ermittelt, vgl. Tabelle 6-4. Die Mittelwerte aller weiteren Versuchsreihen sowie die zugehörigen Streubreiten  $T_N$  sind ebenfalls der Tabelle 6-4 zu entnehmen.

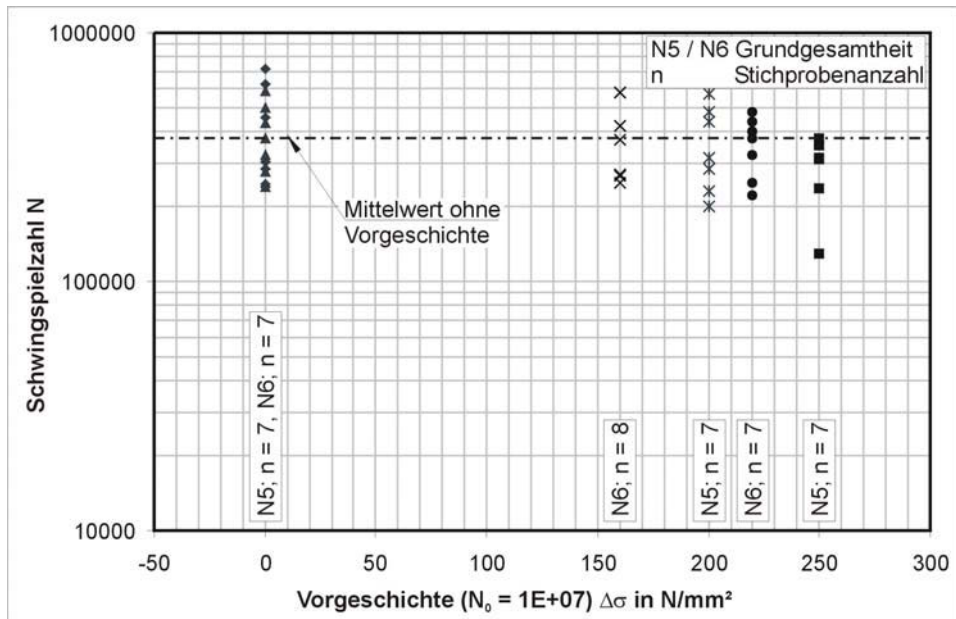


Bild 6–13: Auswertung der Versuchsergebnisse zum Einfluss der Vorgeschichte

Für die statistische Auswertung der Versuchsreihen bestehend aus je  $n$  Einzelversuchen erfolgt eine Sortierung der Bruchlastwechselzahlen. In geordneter Reihenfolge erhält jeder Einzelversuch, bei der höchsten Schwingspielzahl beginnend, eine Ordnungszahl  $j$ .

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

Versuchsserie	Grundgesamtheit	$\Delta\sigma$ in N/mm <sup>2</sup>	$T_N$	m
A.2	N6	160	2,36	375516
B.2	N5	200	3,05	337024
C.2	N6	220	2,16	344017
D.2	N5	250	2,59	281714
R.2	N5	160	3,16	374816
R.2	N6	160	2,27	373530

Tabelle 6-4: Streubreiten  $T_N$  und Mittelwerte  $m$  der erreichten Bruchlastwechselzahlen

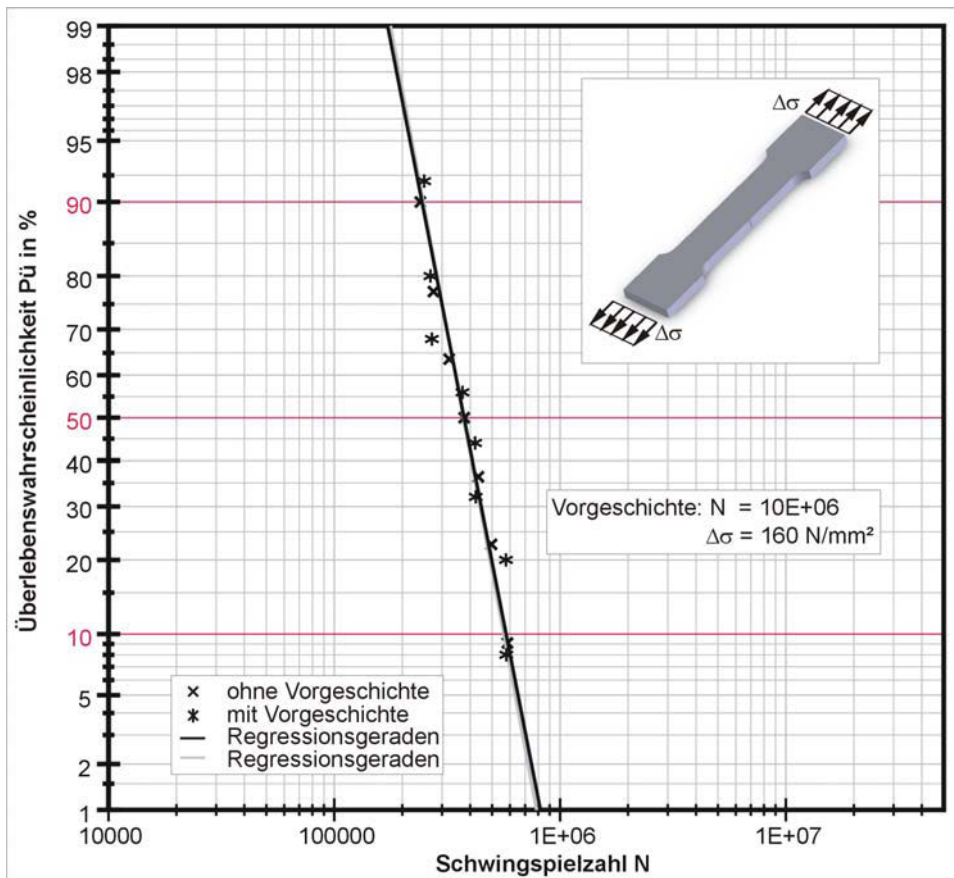


Bild 6-14: Auftragung der Bruchlastwechselzahlen (Vorgeschichte  $N = 10E+06$ ;  $\Delta\sigma = 160 \text{ N/mm}^2$ ) über eine logarithmische Merkmalsteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

Nach Rossow lässt sich für die Auftragung der Versuchsergebnisse im Wahrscheinlichkeitsnetz eine Überlebenswahrscheinlichkeit für jeden Einzelversuch nach der folgenden Gleichung errechnen.

$$P_0 = (3 \cdot j - 1) / (3 \cdot n + 1) \quad (\text{Gl. 6-6})$$

Die Gleichung nach Rossow liefert bei normalverteilter Grundgesamtheit in guter Näherung den wahrscheinlichsten  $P_0$ -Wert für den  $j$ -ten Versuch, vgl. [HAIB 2002].

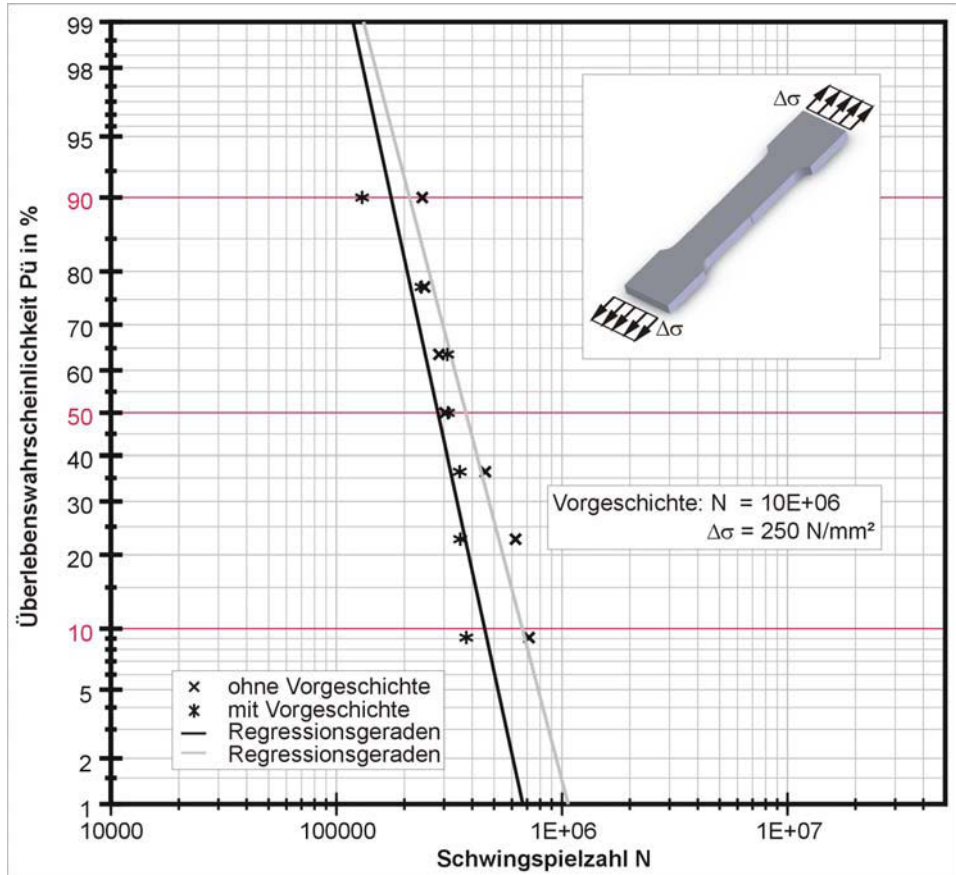


Bild 6–15: Auftragung der Bruchlastwechselzahlen (Vorgeschichte  $N = 10E+06$ ;  $\Delta\sigma = 250 \text{ N/mm}^2$ ) über eine logarithmische Merkmalsteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz

Im Bild 6–14 bis Bild 6–16 sind die Schwingspielzahlen der Versuchsserien über eine logarithmische Merkmalsteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz aufgetragen. Zusätzlich sind die sich aus den Einzelversuchen ergebenden Regressionsgeraden der Versuchsreihen dargestellt. Anhand der Regressionsgeraden wird die Streubreite  $T_N$  abgelesen.

$$T_N = (N_{10\%} / N_{90\%})$$

(Gl. 6-7)

Im Bild 6-14, für die Vorgeschichte  $\Delta\sigma = 160 \text{ N/mm}^2$ ;  $N = 1\text{E}+07$ , und im Bild 6-15, für die Vorgeschichte  $\Delta\sigma = 250 \text{ N/mm}^2$ ;  $N = 1\text{E}+07$ , sind die erreichten Bruchlastwechselzahlen denen der Versuchsdurchführung 1 im Wahrscheinlichkeitsnetz bei Auftragung der Ergebnisse über eine logarithmische Merkmalsteilung vergleichend gegenübergestellt.

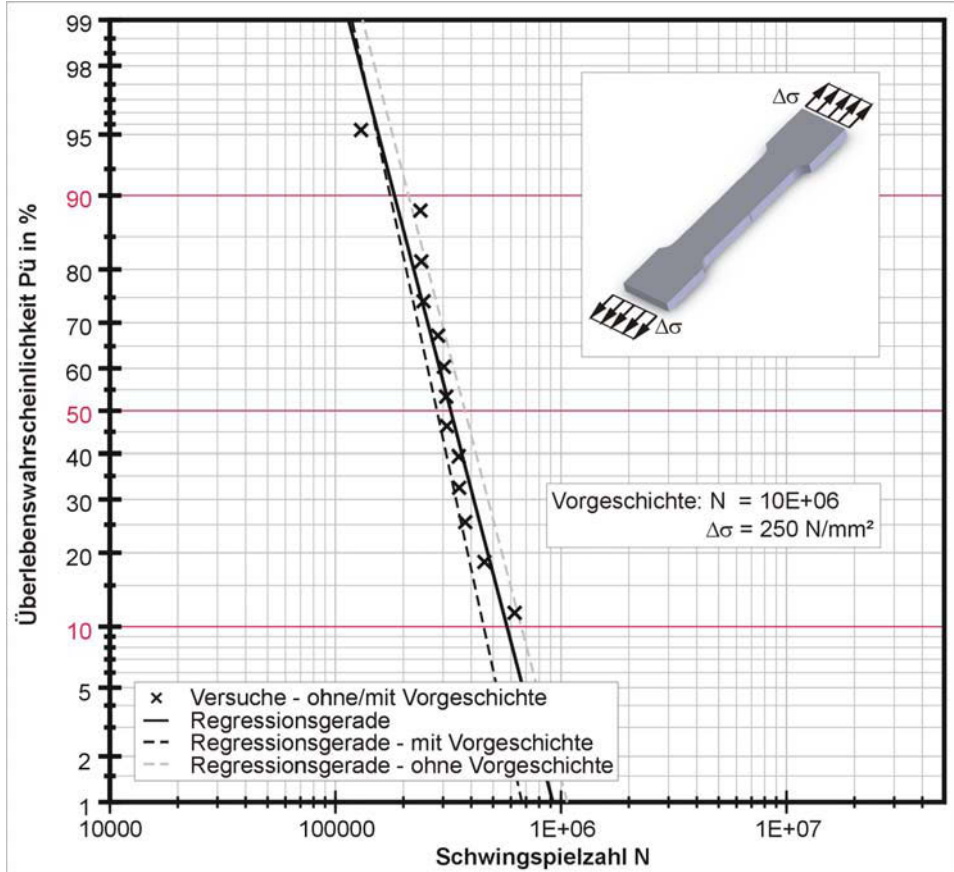


Bild 6-16: Auftragung der Bruchlastwechselzahlen (Vorgeschichte  $N = 10\text{E}+06$ ;  $\Delta\sigma = 250 \text{ N/mm}^2$ ) über eine logarithmische Merkmalsteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz unter einer postulierten Grundgesamtheit aus Versuchen mit und ohne Vorgeschichte

Die mit der Vorgeschichte von  $\Delta\sigma = 160 \text{ N/mm}^2$ ;  $N = 1\text{E}+07$  erreichten Lastwechsel sind näherungsweise identisch mit denen aus den Referenzversuchen, wie Bild 6-14 zeigt. Ein Einfluss der aufgetragenen Vorgeschichte auf die erreichbare Lebensdauer ist nicht ersichtlich.

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.2 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

---

Im Bild 6–15 ist für die Vorgeschichte  $\Delta\sigma = 250 \text{ N/mm}^2$ ;  $N = 1\text{E}+07$  ein Abfall der erreichbaren Lebensdauer erkennbar – die Regressionsgerade der Versuchsserie 4.2 ist nach links zu geringen Lastwechselzahlen verschoben. Um den Rückgang der Lastwechselzahlen dem Einfluss aus der aufgetragenen Vorgeschichte eindeutig zuordnen zu können, wird im Bild 6–16 der Sachverhalt genauer erläutert.

Das Bild 6–16 dient zur Veranschaulichung der Streuungen der einzelnen Versuchsserien – Regressionsgeraden analog zu Bild 6–15 gestrichelt dargestellt – sowie zur Verdeutlichung des Abstandes beider Versuchsserien zueinander. Aufgrund des relativ geringen Abstandes der Regressionsgeraden wurde testweise für beide Versuchsserien eine kollektive Grundgesamtheit unterstellt und erneut die Auswertung durchgeführt. Als Ergebnis dieser Untersuchung ist festzustellen, dass die Neigung der entstandenen Regressionsgeraden zwischen denen der Einzel-Versuchsserien liegt. Zudem zeigt sich durch die Anwendung von Ausreißertests, vgl. [SACH 1968], [MEYN 2003], dass sämtliche Versuchspunkte der aus beiden Versuchsserien gebildeten Grundgesamtheit zugehörig sind. Dies lässt die Vermutung zu, dass die Unterschiede in der Bruchlastwechselzahl nicht zwangsläufig auf die Vorgeschichte, sondern möglicherweise auf die für Lebensdauertests üblichen Streuungen rückführbar sind.

#### 6.2.7 Fazit

Aus den Ergebnissen lässt sich dadurch ableiten, dass die aufgetragenen Vorgeschichten in der Regel keinen signifikanten Einfluss auf die nachträglich erreichbare Lebensdauer ausüben. Die Änderung der Mittelwerte der Lastwechsel ist vergleichsweise vernachlässigbar gegenüber den bei Ermüdungsversuchen üblichen Streuungen.

Damit ist offensichtlich, dass der untersuchte Flusstahl keine inneren Oberflächen aufweist, die maßgeblich die Gesamtlebensdauer des Grundwerkstoffs beeinflussen.

Dies bedeutet als Resümee, dass bei der Durchführung von Betriebsfestigkeitsnachweisen für neu eingebrachte Schweißkerbdetails die Vorgeschichte des Tragwerkes in der Regel vernachlässigt werden kann.



### 6.3 Lebensdauerermittlung an Schweißverbindungen

#### 6.3.1 Vorgehensweise

##### *Wahl einer Ertüchtigungsmaßnahme*

Wie in Kapitel 2 und Kapitel 4 gezeigt, kann aus metallurgischer Sicht aufgrund prinzipiell vorhandener schweißgeeigneter Bereiche in den Querschnitten unberuhigt vergossener Flusstähle ein Aufschmelzen erfolgen.

Für die Reparatur-, Ertüchtigungs- und Sanierungsmaßnahmen an bestehenden Stahlkonstruktionen entstehen hierdurch eine Vielzahl an effizienten Möglichkeiten, Bauteile und Tragwerke zu verstärken. Aus dem in Kap. 5 vorgestellten Spektrum der Reparaturmöglichkeiten wird ein Detail selektiert und nachfolgend getestet, das zum einen eine besonders hohe Kerbschärfe gegenüber anderen Ertüchtigungsdetails besitzt und zum anderen für Ertüchtigungsmaßnahmen prädestiniert ist.

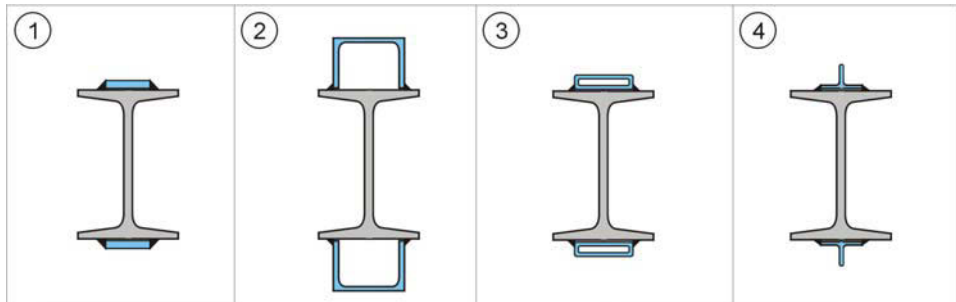


Bild 6–17: Mögliche Ertüchtigungsmaßnahmen durch Aufschweißung von „Laschen“-Verstärkungen (grau – Altstahl; blau – Neustahl)

Unter Einhaltung der genannten Randbedingungen wurde die umlaufend verschweißte Lasche für nähere Untersuchungen gewählt, vgl. Bild 6–17 /1, Bild 6–18 bzw. Bild 6–20 oben.

##### **Repräsentative Laborprobe zur gewählten Ertüchtigungsmaßnahme**

Die im Bild 6–18 angedeutete Ertüchtigungsmaßnahme der Querschnitte stellt eine mögliche Verstärkung dar.

Im Rahmen der Laborversuche wird dieses Kerbdetail unter Ermüdungsbeanspruchung untersucht. Durch den Zwang zur Minimierung des Altstahlverbrauches und der Formung der Probe zur effizienten Anpassung an die vorhandenen Prüfvorrichtungen in der BAM, wird im Versuch ausschließlich der für das Aufbringen der Schweißnaht erforderliche Flansch eines möglichen Komplettprofils abgebildet. Bei Belastung stellt sich jedoch eine Verformung ein, die einen veränderten Spannungszustand im Kerbgrund verursacht, vgl. Bild 6–19, Variante I. Um den realen Spannungszustand im Kerbgrund herzustellen, wurde die im Bild

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.3 Lebensdauerermittlung an Schweißverbindungen

6–19 als Variante II dargestellte Konfiguration der Steifigkeiten verwendet. Die Verformungen und Beanspruchungen entsprechen denen der realen Konstruktion. Die Vorgehensweise zur Abbildung der wesentlichen Einflüsse auf eine prüfbare Laborprobe wurde in [MEHD 2003] gezeigt.

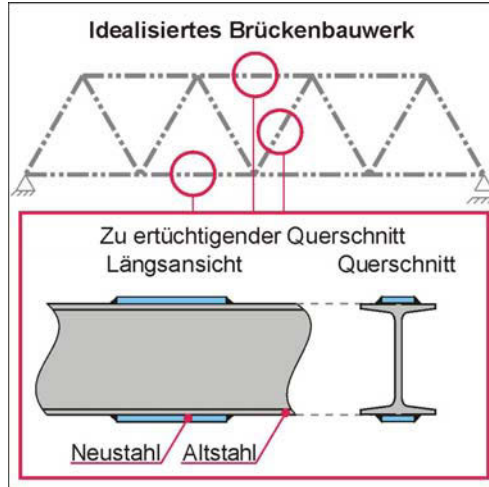


Bild 6–18: Anwendungsmöglichkeiten der Ertüchtigungsmaßnahme

Durch begleitende Vergleichsrechnungen mit dem Finte-Element-Programmpaket ANSYS wurde die Probenform optimiert. Optimierungskriterium ist das Erreichen des identischen Spannungszustandes im Kerbgrund der realen Ertüchtigungsmaßnahme.

Für die Modellierung der Geometrie fanden 10-Knoten Tetraederelemente Verwendung. Die Elementierung im Kerbgrund ist hierbei vom Kerbradius abhängig und wurde in Anlehnung an [SEEG] oder [HAIB 2002] zu

$$L_{\text{Element}} = \rho/6,5 \quad (\text{Gl. 6–8})$$

gewählt. Hierbei ist  $L_{\text{Element}}$  die Elementkantenlänge der Elemente im Kerbgrund und  $\rho$  der Kerbradius, der zu 1 mm ermittelt wurde, vgl. Kap. 6.2.3.3.

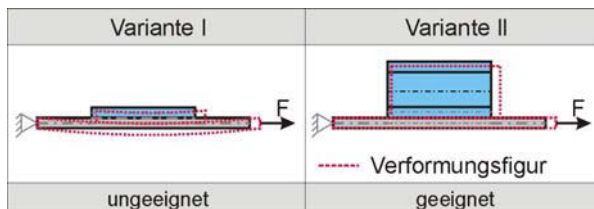


Bild 6–19: Probenfindung

Die Elementkantenlänge im Kerbgrund wie die Elementkantenlänge in der verbleibenden Geometrie ist bei beiden Probenvarianten, Ertüchtigungsmaßnahme/Laborprobe für die Versuchsdurchführung, identisch, vgl. Bild 6–20. Die Einleitung der Belastung erfolgt an den Enden der Geometrien versuchskonzeptkonform. Die Berechnung erfolgt unter Verwendung eines linear elastischen Werkstoffverhaltens.

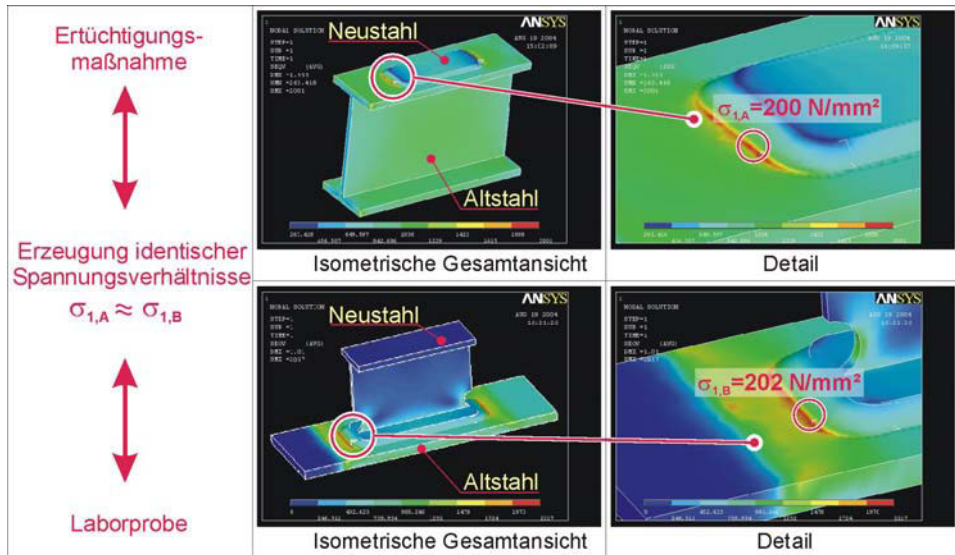


Bild 6–20: Prinzip der Probenfindung und Optimierung

In den FE-Rechnungen zeigt sich erwartungsgemäß, dass sich mit steigender Steifigkeit des Neustahls die lateralen Verformungen des Ersatzbauteils vermindern. Bei weiterer Steigerung der Steifigkeit kann die laterale Verformung neutralisiert und der Spannungszustand dem der Ertüchtigungsmaßnahme angepasst werden. Ein Profil I100 nach [DIN 1024] besitzt die erforderliche Steifigkeit.

Aufgrund des hohen Querschnittsprungs im Übergangsbereich zwischen Schweißung und Neustahl treten hier besonders hohe Spannungsspitzen auf, die die Kerbgrundspannung im Sollbruchquerschnitt übersteigt. Zur Minimierung der ungewollten Spannungsspitze im I100-Querschnitt wurde eine Halblochbohrung vorgesehen, deren Durchmesser in weiteren begleitenden Untersuchungen unter Verwendung der FEM für das anzuschweißende Doppel-T-Profil optimiert wurde. Die Halblochbohrung mit einem Durchmesser  $\varnothing = 10 \text{ mm}$  ist im Bild 6–20 bis Bild 6–25 erkennbar.

#### Altstahlmateriale für Versuche

Für die Durchführung von Ermüdungsfestigkeitsversuchen ist aufgrund der naturgemäß vorhandenen Streuungen eine größere Anzahl an gleichwertigen und reproduzierbaren Proben erforderlich.

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.3 Lebensdauerermittlung an Schweißverbindungen

Für die Anfertigung der Proben wurde darauf Wert gelegt, dass sämtliche Flusstahlprobenteile einer Charge entstammen. Aus einem rückgebauten Stahlbrückentragwerk aus Flusstahl konnten Profile mit Gesamtlängen von bis zu 6 m entnommen werden, vgl. Bild 6–9. Die Probenteile für die Schweißversuche wurden komplett aus einem dieser Profile herausgearbeitet. Hierdurch ist eine weitgehend homogene Grundgesamtheit geschaffen worden, was für die Klärung der grundsätzlichen Fragestellungen sinnvoll ist. Die Entnahme des Altstahlprobenmaterials erfolgt, wie im Bild 6–21 schematisch dargestellt, an L-Profilen, die zuvor die Funktion der Flansche eines genieteten Doppel-T-Profils in der gezeigten Stahlfachwerkbrücke übernehmen.

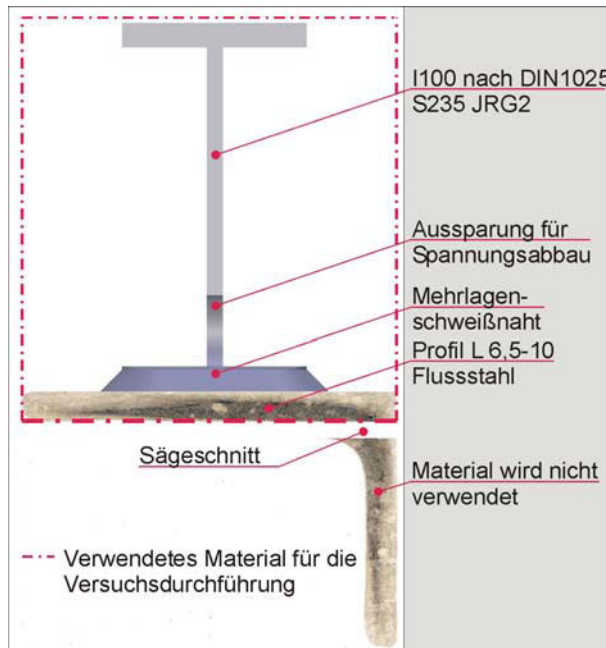


Bild 6–21: Probenmaterial aus Flusstahl-L-Profil

Für die Schweißuntersuchung ist die Oberfläche und der randnahe Bereich des Querschnitts, jedoch nicht zwingend die Profilform von Bedeutung. Daher wird die Schenkelaußenseite des im BAUMANNabdruck gezeigten L-Profils für die anstehenden Schweißungen verwendet, vgl. Bild 6–21. Die Schwefelseigerungen sind durch die Dunkel-färbung der Innenbereiche des Querschnittes sichtbar. Die erforderliche Speckschichtdicke ist an der Schenkelaußenseiten vorhanden, vgl. Kap. 5.

Der kürzere Schenkel des L-Profils wurde entfernt. Der für die Schweißung vorgesehene Schenkel wurde durch zerspanende Bearbeitung an der Schenkelinnenseite in ein Blech mit parallelen Oberflächen überführt. Die strich-punktierte Umrandung im Bild 6–21 umschließt den für die Versuche verwendeten Materialbereich des Altstahlprofils in Kombination mit dem durch die Schweißung zu verbindenden Neustahl.

Das Bild 6–22 stellt noch einmal die komplette Geometrie der Laborprobe dar, wie sie in den nachfolgenden Versuchen für die Ermittlung von Ermüdungsfestigkeiten eingesetzt wird.

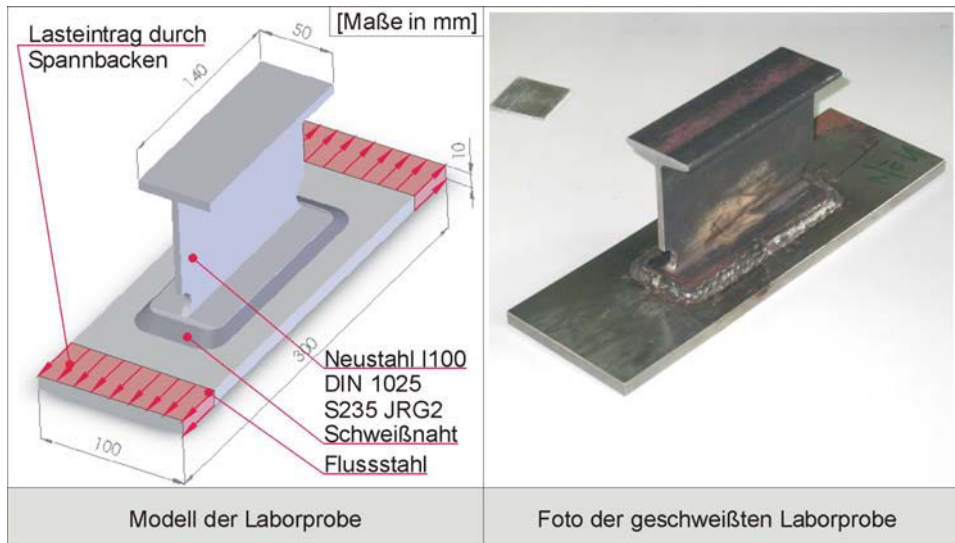


Bild 6–22: Probenform für Ertüchtigungsdetail in Versuchskonfiguration

### 6.3.2 Probenherstellung

#### Fügen der Alt- und Neustahlteile

Die Schweißarbeiten wurden von nur einem Lehrschweißer durchgeführt. Zum Fügen von Alt- und Neustahl erfolgte eine Fixierung durch zwei Heftnähte im kerbunempfindlicheren Bereich der Flankennähte. Nachfolgend entsteht der Lagenaufbau, vgl. Bild 6–23. In jeder Schweißlage wurde mit der Verschweißung der Stirnseiten des Doppel-T-Profiles begonnen. Nach der Vervollständigung einer Schweißnahtlage wurde nach Erreichen der Zwischenlagentemperatur von 100°C die nächste Lage eingebracht. Insgesamt drei Lagen, bestehend aus einer Wurzellage und zwei Decklagen, wurden geschweißt. Die Proben lagerten während der Schweißung äußerlich zwängungsfrei.

Die wesentlichen Schweißparameter sind in der Tabelle 6-5 angegeben. Die Schweißparameter gelten für sämtliche Schweißnahtlagen.

Die mittlere Streckenenergie  $\bar{E}$  beträgt bei

$$\bar{U} = 25\text{V}, I = 105\text{A} \text{ und } \bar{v} = 0,33 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$\bar{E} = \frac{\bar{U} \cdot I}{\bar{v}} = 7,95 \frac{\text{kJ}}{\text{cm}}.$$

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.3 Lebensdauerermittlung an Schweißverbindungen

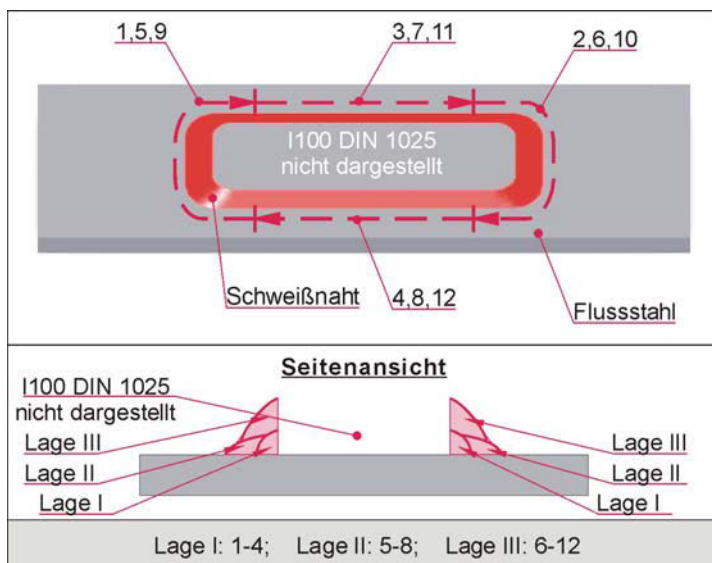


Bild 6–23: schematische Darstellung der Schweißreihenfolge sowie des Lagenaufbaus

Die elektrische Spannung schwankt durch die beim E-Handschweißen üblichen Änderungen der Lichtbogenlänge, insbesondere durch den Kurzschluss beim Zünden des Lichtbogens und beim Beenden der Schweißung. Durch die Handfertigkeit des Schweißers kann die Schwankung des Lichtbogens nach der Zündung minimiert werden. Für die Berechnung der Streckenenergie wird wie in der Schweißtechnik üblich, eine gemittelte elektrische Spannung eingesetzt. Die Schweißgeschwindigkeit ermittelt sich als Quotient aus Gesamtlänge der Schweißlage im Wurzelpunkt und der Gesamtzeit, die sich jeweils aus vier Teilzeiten je Lage ergibt, vgl. Bild 6–23.

Parameter	Erläuterung	nach EN 287-1
Schweißprozess	Lichtbogenhandschweißen	111
Blech		P
Kehlnaht		FW
Werkstoffgruppe	ferritischer Stahl	W01
Zusatzwerkstoff	basischumhüllt (Hersteller Technolit) (Elektrode TS85 $\varnothing = 2,5$ mm)	B
Probenabmessung	10 mm (Flussstahl)	t 10
Schweißposition	Horizontal-Vertikalposition	PB
Nahtausführung	beidseitig	bs
	ohne Schweißbadsicherung	nb

Tabelle 6-5: Schweißparameter in Anlehnung an EN 287-1

Es erfolgte keine thermische Vor- und Nachbehandlung der Schweißnaht. Ebenso wurde die Kerbe nicht mechanisch nachbearbeitet. Dies führt zu erhöhten Kerbschärfen im Vergleich zu nachbehandelten Nähten, die üblicherweise nach den Regelwerken gefordert werden, vgl. beispielsweise [RIL 804] und [RIL 805]. Damit liegen die im Versuch zu ermittelnden Ermüdungsfestigkeiten auf der sicheren Seite. Schweißspritzer wurden im Bereich der späteren Einspannung in die hydraulischen Spannbacken der Prüfvorrichtung vorsichtig entfernt. Der Einfluss der Schweißparameter wird nachfolgend diskutiert.

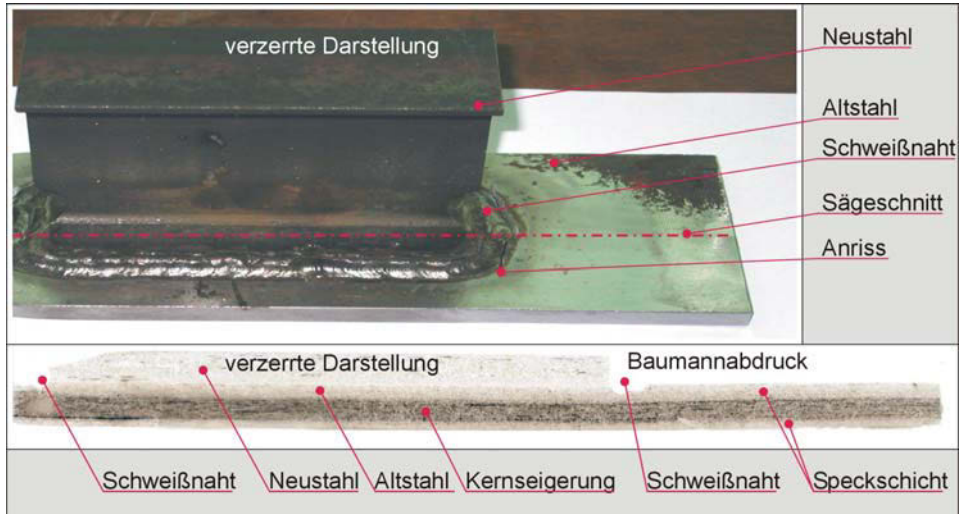


Bild 6–24: BAUMANNabdruck, dargestellt am Längsschnitt einer geschweißten und zyklisch beanspruchten Laborprobe

Im Bild 6–24 ist der BAUMANNabdruck einer geschweißten Laborprobe dargestellt. Anhand der Abbildung ist erkennbar, dass aufgrund der berücksichtigten Schweißparameter nach Kapitel 5 kein Aufschmelzen der Seigerungszone erfolgte. Der Einbrand durch die Schweißung fand ausschließlich in der Speckschicht statt. Die Schweißnähte erfuhren keine Beeinflussung durch Einlagerung weiterer Begleitelemente. Dies ist an der nicht vorhandenen Einfärbung der Schweißnähte zu erkennen.

### 6.3.3 Versuchsdurchführung

#### Versuchsstand

Die komplette Prüfvorrichtung, einschließlich eingebauter Laborprobe, ist im Bild 6–25 zu erkennen. Im unteren Bereich des Bildes Bild 6–25 ist nochmals die ungeschädigte Probe nach dem Fügen von Alt- und Neustahl zu sehen.

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.3 Lebensdauerermittlung an Schweißverbindungen



Bild 6–25: 400 kN - Versuchsstand mit eingebauter Laborprobe

#### **Kerbgrundkonzeptgestütztes Versuchsprogramm**

Für die Durchführung der Ermüdungsversuche steht eine begrenzte Anzahl an Proben zur Verfügung. Ziel ist die Erstellung einer Wöhlerlinie für das ausgewählte Kerbdetail. Die Lage und Neigung der Geraden im Zeitfestigkeitsbereich kann durch zwei Wertepaare beschrieben werden. Diese sollten möglichst weit von einander entfernt liegen. Das erste Wertepaar wird sinnvoll bei einer relativ hohen Spannungsdoppelamplitude und zugehöriger Bruchlastwechselzahl gewählt. Der zweite Punkt sollte sich möglichst nah am Übergang zur Dauerfestigkeit befinden. Der Wert der Dauerfestigkeit lässt sich anhand des Treppenstufenverfahrens genau bestimmen, vgl. [HAIB 2002]. Dieses Versuchsprogramm findet keine Anwendung, da hier eine hohe Anzahl an Proben verbraucht wird.

Stattdessen wird der Wert der Dauerfestigkeit kerbgrundkonzeptgestützt ermittelt. Die wesentlichen Grundlagen des Örtlichen Konzepts wurden aus [NAUB 1999], [GÜNT 2002] und [HOLL 2004] entnommen.

Für die Umrechnung der mitteldehnungsbehafteten Beanspruchung aus der Dehnungswöhlerlinie in die Schädigungskennwert-Wöhlerlinie wurde der Schädigungskennwert  $P_{SWT}$  nach SMITH, WATSON und TOPPER verwendet.



$$P_{\text{SWT}}(N) = \sqrt{\sigma_f'^2 \cdot (2 \cdot N)^{2b} + E \cdot \sigma_f' \cdot \varepsilon_f' \cdot (2 \cdot N)^{b+c}} \quad (\text{Gl. 6-9})$$

Die werkstoffabhängigen Konstanten der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve sowie der Dehnungswöhlerlinie werden mit Hilfe des UNIFORM MATERIAL LAW (UML) nach [SEEG 1996] ermittelt. Für die rechnerische Abschätzung der Anrisslebensdauer wird unterstellt, dass das UML für den untersuchten unberuhigten, ferritisch-perlitischen Flusstahl in erster Näherung angewendet werden kann. Hierunter ist der zyklische Spannungskoeffizient  $\sigma_f'$ , der zyklische Dehnungskoeffizient  $\varepsilon_f'$ , der zyklische Verfestigungskoeffizient  $K'$ , der zyklische Verfestigungsexponent  $n'$ , der E-Modul  $E$  sowie die Schwingfestigkeitsexponenten  $c$  und  $b$  nach COFFIN, MANSON und MORROW zu nennen.

Die Schwingfestigkeitsexponenten  $c$  und  $b$ , die anfänglich nach dem UML gewählt wurden, werden nach einem Verfahren von [WANG 2000] anhand der erzielten Versuchsergebnisse modifiziert, um die errechneten Lastwechselzahlen den tatsächlich erreichten Werten anpassen zu können. Hierbei wurde die Anrisschwingspielzahl durch die Bruchlastwechselzahl ersetzt. Dieses Vorgehen ist gerechtfertigt, wenn es wie hier erfolgt, konsistent auf alle Rechnungen angewendet wird.

### **Wahl der Beanspruchungsniveaus**

Für Ertüchtigungsmaßnahmen wurde in Kap. 3 ein möglichst vollständiges Entlasten der zu verstärkenden Bereiche des Bauwerks gefordert. Ziel ist das Herstellen eines spannungsfreien Zustands im zu verstärkenden Grundwerkstoff. Die Spannungsausnutzung infolge Eigengewicht ist bei Stahlbauwerken gering. Daher kann für den verstärkten Querschnitt in der Regel ein Spannungsverhältnis von  $R = 0,10$  bis  $R = 0,20$  in Ansatz gebracht werden. Für die nachfolgenden Versuche wird das Spannungsverhältnis konservativ zu  $R = 0$  gewählt.

Für das gewählte Lastniveau  $\Delta\sigma = 160 \text{ N/mm}^2$  der ersten Versuchsserie bestehend aus 8 Einzelversuchen wird anhand des Örtlichen Konzeptes für den Zeitfestigkeitsbereich  $N = 1,6\text{E}+04$  Lastwechsel abgeschätzt. Die mit dem UML ermittelte Schädigungskennwert-Wöhlerlinie verläuft durch diesen Punkt, vgl. Bild 6–26 schwarze Kurve. Die erreichte mittlere Bruchlastwechselzahl lag bei etwa  $N = 2,0\text{E}+05$ . Mit diesem Versuchsergebnis (Beanspruchungsniveau; Schwingspielzahl) wird durch Modifikation des Schwingfestigkeitsexponenten  $b$ , unter Beibehaltung der Kompatibilitätsbedingungen

$$n' = b/c \text{ und } K' = \sigma_f' \cdot \varepsilon_f'^{-n'}, \quad (\text{Gl. 6-10}) \text{ und } (\text{Gl. 6-11})$$

$b_0$  und  $c_0$  ermittelt, vgl. [WANG 2000].

Mit dieser Vorgehensweise werden durch  $b_0$  und  $c_0$  neben der Werkstoffcharakteristik auch Bauteileinflüsse und Versuchsrandbedingungen integral erfasst.

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.3 Lebensdauerermittlung an Schweißverbindungen

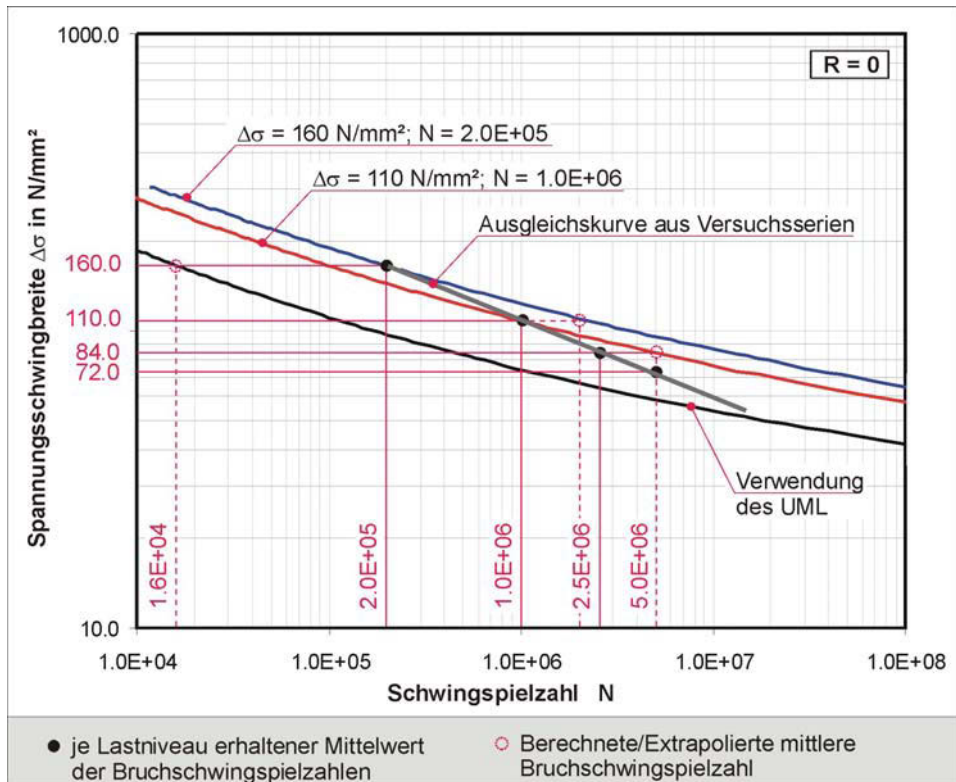


Bild 6–26: Ermittlung der Versuchlastniveaus auf Grundlage der Schädigungskennwert-Wöhlerlinien

Die durch die Modifikation der Schwingfestigkeitsexponenten entstehende Schädigungskennwert-Wöhlerlinie für das Versuchlastniveau  $\Delta\sigma = 160 \text{ N/mm}^2$  ist im Bild 6–26 blau dargestellt. Mit Hilfe der modifizierten Schädigungskennwert-Wöhlerlinie wird für eine mittlere erreichbare Bruchlastwechselzahl von  $N = 2,0\text{E}+06$  das nächste Versuchlastniveau  $\Delta\sigma = 110 \text{ N/mm}^2$  errechnet. Die zuvor prognostizierte Schwingspielzahl wurde von der 2. Versuchsreihe mit  $n = 7$  Einzelversuchen verfehlt, und es zeigte sich ein Mittelwert von etwa  $N = 1,0\text{E}+06$  Lastwechsel.

Um nun das nächste Lastniveau möglichst nahe des Dauerfestigkeitsbereiches zu bestimmen, wird die Schädigungskennwert-Wöhlerlinie ausgehend von  $\Delta\sigma = 110 \text{ N/mm}^2$  und  $N = 1,0\text{E}+06$  Lastwechsel neu modifiziert, vgl. Bild 6–26 rote Kurve. Aufgrund der geringen Streuungen bei  $N = 1,0\text{E}+06$  wurde eine sehr niedrige Dauerfestigkeit vermutet. Ausgehend von der aktuellen Schädigungskennwert-Wöhlerlinie wird ein Versuchlastniveau für eine Bruchlastwechselzahl von  $N = 5,0\text{E}+06$  zu  $\Delta\sigma = 84 \text{ N/mm}^2$  abgeschätzt. Durch die Extrapolation des Lastniveaus vom benachbarten Wertepaar kann der Fehler durch Verwendung der Schädigungskennwert-Wöhlerlinie minimiert werden. Die errechnete Schwingspielzahl von  $N = 5,0\text{E}+06$  wird nicht erreicht.

Durch die Bildung einer Ausgleichskurve, durch die 3 Versuchspunkte verlaufend, ergibt sich eine experimentelle Wöhlerlinie, mit der auf das Lastniveau für  $N = 5,0E+06$  Lastwechsel geschlossen wurde. Die vorgegebenen Lastwechsel wurden erreicht, wobei die Streuungen erheblich zunahmen. Dies lässt das Erreichen der Dauerfestigkeit vermuten.

Die Versuche verliefen über einen längeren Zeitraum und wurden stets parallel ausgewertet. Aufgrund des begrenzten Kontingents an Proben wurde die Anzahl der Proben je Serie in Bezug auf die auftretenden Streuungen angepasst.

### 6.3.4 Versuchsergebnisse

#### 6.3.4.1 Auswertung der Laborergebnisse

Das Bild 6–27 rechts zeigt informativ die Probe nach Erreichen der Bruchlastwechselzahl. Die linke Seite zeigt den im Altstahl planmäßig entstandenen Riss sowie die gut sichtbaren Plastizierungen des ungerissenen Restquerschnitts wenige Lastwechsel vor dem Totalversagen des Bauteils.

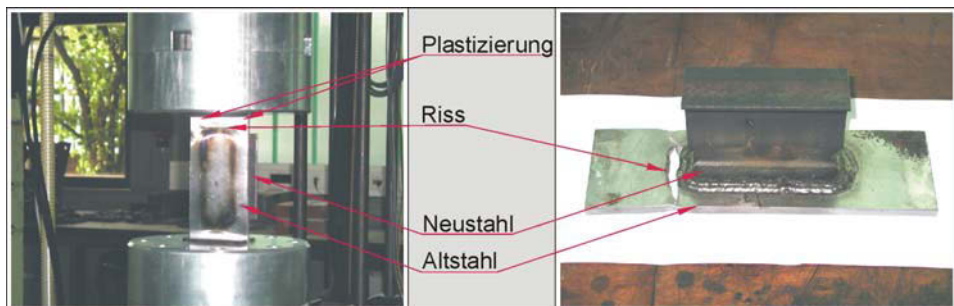


Bild 6–27: Laborprobe kurz vor und nach Erreichen der Bruchlastwechselzahl

Die Auswertung der einzelnen Datensätze erfolgt durch die Auftragung der erreichten Bruchschwingspielzahlen im Wahrscheinlichkeitsnetz.

Durch eine Regressionsrechnung wird den Versuchsergebnissen jeder Serie eine Streugerade zugeordnet. Hierdurch ist die Ermittlung der Streuspanne  $T_N$  möglich, vgl. Tabelle 6-6. Die Streuungen sind trotz geringer Probenanzahl verhältnismäßig klein gegenüber dokumentierten Versuchen aus [OLIV 1982]. Dieses Verhalten lässt auf eine relativ homogene Grundgesamtheit der Proben und auf ein Minimum zufälliger Fehler in der Versuchsdurchführung schließen.

Die Streugeraden der Versuchlastniveaus von  $\Delta\sigma = 160 \text{ N/mm}^2$ ,  $\Delta\sigma = 110 \text{ N/mm}^2$  und  $\Delta\sigma = 84 \text{ N/mm}^2$  liegen näherungsweise parallel zueinander. Erwartungsgemäß lässt sich für die Proben auf dem Niveau  $\Delta\sigma = 72 \text{ N/mm}^2$  keine exakte Streugerade ermitteln. Durch den Übergang vom Zeitfestigkeitsbereich zum Dauerfestigkeitsbereich stellen sich bei diesem

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.3 Lebensdauerermittlung an Schweißverbindungen

Lastniveau naturgemäß erhebliche Streuungen ein. Durch die geringe Anzahl der Proben wurde auf die Ermittlung der zugehörigen Streugeraden verzichtet.

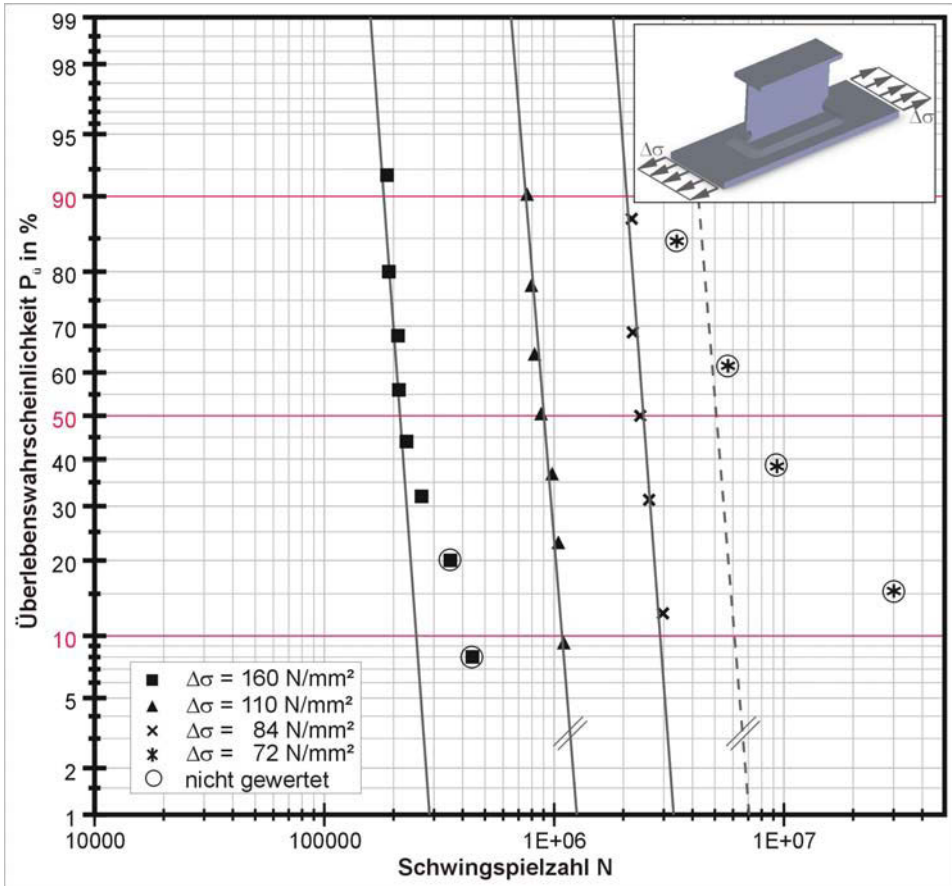


Bild 6–28: Darstellung der Versuchsergebnisse über eine logarithmische Merkmalsteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz

Versuchsserie	Einzelversuche	T <sub>N</sub>
Δσ = 160 N/mm <sup>2</sup>	8	1,39
Δσ = 110 N/mm <sup>2</sup>	7	1,44
Δσ = 84 N/mm <sup>2</sup>	5	1,40
Δσ = 72 N/mm <sup>2</sup>	4	nicht gewertet

Tabelle 6-6: Streuspanne der Versuchsserien

Als grobe Abschätzung für die Dauerfestigkeit wurde in gestrichelter Form die parallel verschobene Streugerade des Versuchslastniveaus  $\Delta\sigma = 110 \text{ N/mm}^2$  durch den Mittelpunkt des Datensatzes geführt.

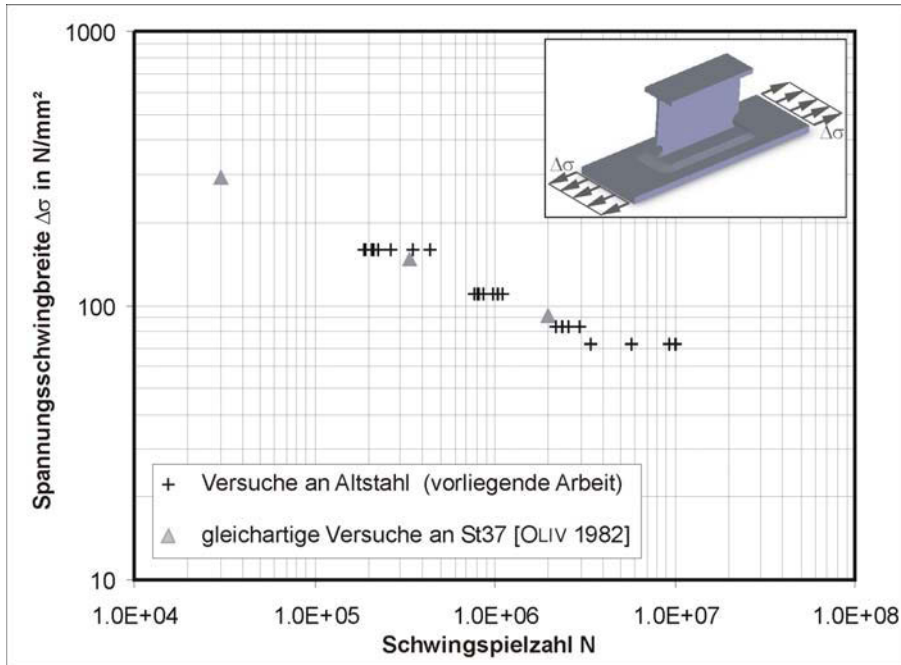


Bild 6–29: Ergebnisdarstellung der Bruchlastwechselzahlen der Laborprobe im Vergleich mit im Schrifttum befindlichen Versuchsergebnissen

Die Auftragung der Versuchsergebnisse in der doppellogarithmischen Merkmalsteilung von Schwingspielzahl und Nennspannungsschwingbreite zeigt das Bild 6–29. Durch die Ergänzung im Bild 6–29 mit Ergebnissen gleichwertiger Versuche aus [OLIV 1982] – die Probekörper besaßen ähnliche Geometrien sowie Blechdicken – zeigt sich andeutungsweise eine gute Übereinstimmung der durchgeführten Altstahlschweißungen mit Versuchen an neuwertigem Baustahl. Dies wird im Bild 6–30 bestätigt, da die Versuchsergebnisse nach [OLIV 1982] auf der Ermüdungsfestigkeitskurve für  $P_0 = 50\%$ , gebildet durch Verbinden der Mittelwerte der ertragenden Schwingspielzahlen auf den Lastniveaus  $\Delta\sigma = 160 \text{ N/mm}^2$  und  $\Delta\sigma = 84 \text{ N/mm}^2$ , liegen. Das Lastniveau  $\Delta\sigma = 110 \text{ N/mm}^2$  dient als Bestätigung der eingezeichneten Ermüdungsfestigkeitsgeraden mit einem Neigungsexponenten von  $m = 3,90$ , da sich der Mittelwert auf dieser Geraden befindet.

Weiterhin sind im Bild 6–30 die Einhüllenden, als Kurve für die Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_0 = 10\%$  und  $P_0 = 90\%$  für Schweißverbindungen aus dem einheitlichen Wöhlerlinienstreuband nach HAIBACH entwickelt, dargestellt, vgl. [OLIV 1982]. Es zeigt sich, dass die Versuchsergebnisse innerhalb des dargestellten Streubandes liegen, vgl. Bild 6–30.

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.3 Lebensdauerermittlung an Schweißverbindungen

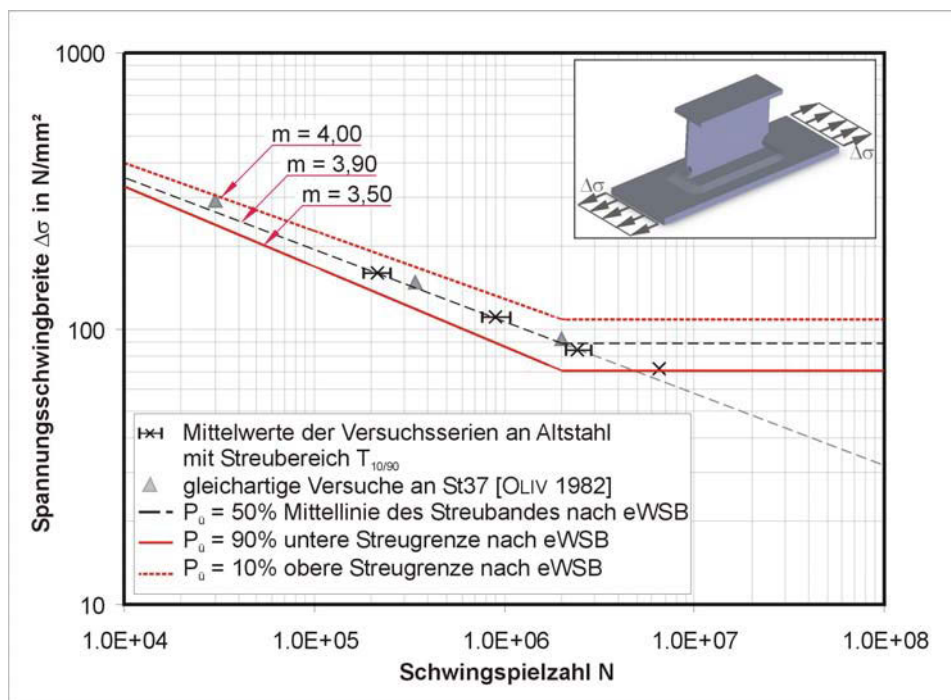


Bild 6–30: Darstellung der Versuchsergebnisse im Kontext mit den sich aus dem einheitlichen Wöhlerlinienstreuband (eWSB) ergebenden Einhüllenden

#### 6.3.4.2 Fraktografische Untersuchungen

In Hinblick auf die Konzentration der im Flussstahl befindlichen chemischen Begleitelemente und deren Einfluss auf die Lebensdauer erscheint eine Zusatzinformation durch die Analyse im Rasterelektronenmikroskop (REM) erforderlich.

Die Bruchflächen der Schweißproben weisen in Abhängigkeit von der Beanspruchung Merkmale auf, die eine Interpretation der Schädigungsvorgänge im Material zulassen. In diesem Abschnitt werden ausgewählte Bruchflächen dargestellt und charakteristische Merkmale der jeweiligen Risstopographie herausgestellt, um den untersuchten Flussstahl hinsichtlich charakteristischer Eigenschaften im Bruchverlauf zu bewerten.

Ausgewählte Bruchflächen wurden mit dem in der BAM befindlichen REM vom Typ „Iamscan S2“ untersucht. Hiermit sind Bildvergrößerungen bis zum 8000-fachen des Ursprungsobjektes möglich. Beim REM wird die Elektronenoptik dazu benutzt, die an der Kathode austretenden Elektronen in einem sehr feinen Leuchtfleck auf der Probenoberfläche – am Rasterpunkt – zu bündeln. Die als Folge der Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit der Probe auftretende Sekundärstrahlung lässt sich den Koordinaten dieses Leuchtflecks

genau zuordnen. Durch Nachweis der gestreuten Elektronen sowie der Röntgenstrahlung und ihre Analyse mit Detektoren und zugehöriger Elektronik kann eine "Landkarte" der Leuchtflecke und ihrer Strahlungscharakteristika hergestellt werden. Dies stellt das Bild einer REM-Aufnahme dar, vgl. [WOLF 2001]. Wegen der hohen Tiefenschärfe im Vergleich zum Lichtmikroskop sind im REM Erhebungen und Vertiefungen der Oberfläche sehr gut erkennbar.

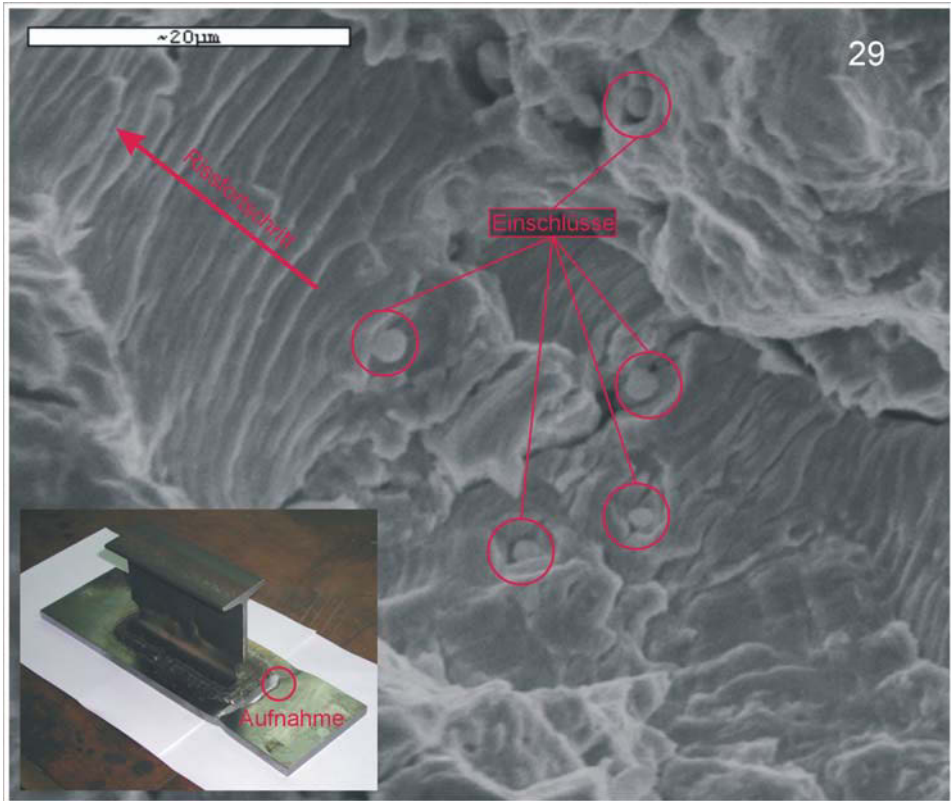


Bild 6–31: typische Schwingstreifen auf der Bruchoberfläche

Im Bild 6–31 und Bild 6–32 sind Aufnahmen von der Bruchoberfläche der Schweißprobe abgebildet. Der Rissfortschritt ist im Bild 6–31 anhand der Schwingstreifen zu erkennen. Weiterhin sind in dieser Abbildung Einschlüsse zu sehen, die auf intermetallische Verbindungen, Sulfide und Karbide schließen lassen. Im Vergleich zu Aufnahmen heutiger Baustähle fallen die verhältnismäßig vielen Einschlüsse auf. Diese im Werkstoff vorhandenen Teilchen besitzen andere elastische und plastische Eigenschaften als die restliche Matrix. Durch das Ablösen dieser Teilchen von der Matrix oder durch frühzeitiges Brechen wird hiermit die Initialphase zur Bildung von Hohlräumen erzeugt, vgl. [BERG 1989].

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.3 Lebensdauerermittlung an Schweißverbindungen

Das Endresultat der unter vorhandener Spannung gewachsenen Hohlräume ist im Bild 6–32 anhand der dargestellten Grübchen oder Waben zu sehen.

Diese Form des Bruchaussehens lässt auf einen typischen Gleitbruch oder duktilen Bruch, wie es bei modernen Baustählen ähnlicher Festigkeit ähnlich beobachtet werden kann, schließen.

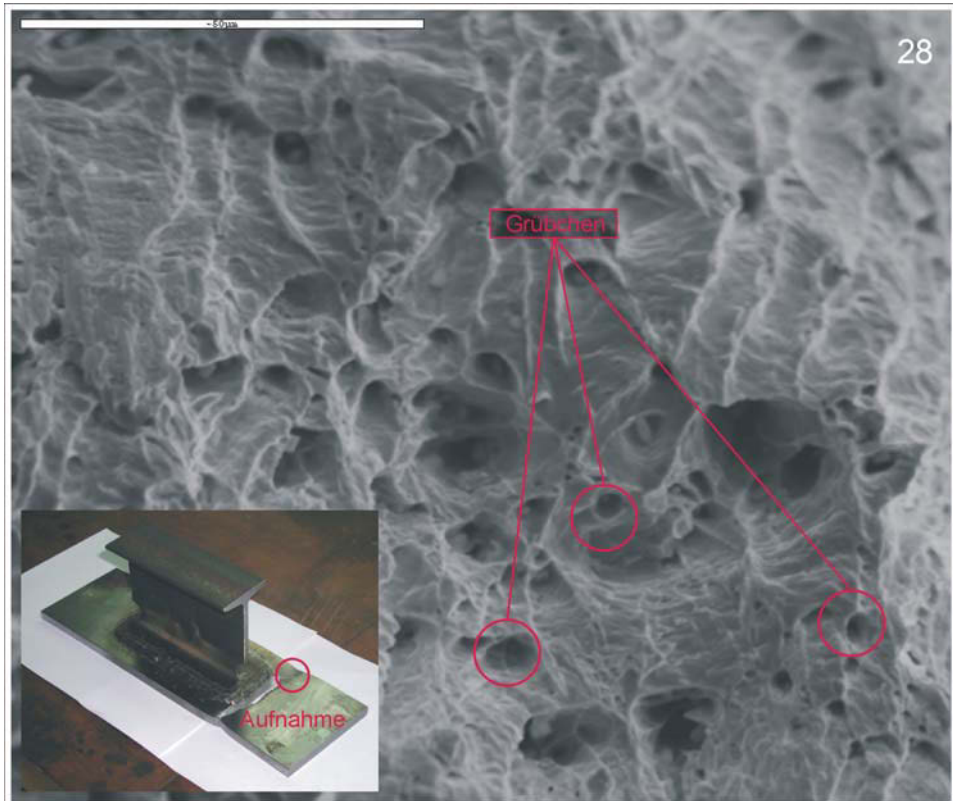


Bild 6–32: Gleitbruch – typische Grübchen sind erkennbar

#### 6.3.5 Übertragbarkeit auf größere Bauteile

Mit Zunahme der Größe der Bauteilprobe nimmt bei ermüdungsbeanspruchten Bauteilen erfahrungsgemäß die erreichbare Schwingfestigkeit ab, vgl. [GUDE 1999]. Dieses Verhalten ist auf die Grundmechanismen der geometrischen, statistischen, technologischen und oberflächentechnischen Größeneinflüsse zurückzuführen.

Auf die Übertragung der hier ermittelten Versuchsergebnisse auf größere Bauteile wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und auf [GUDE 1999] verwiesen.



#### 6.3.6 Fazit

Folgende Aussagen können aufgrund der Versuchsergebnisse in Hinblick auf die Schweißung an diesem Flusstahl getroffen werden:

- Die Speckschichten der Flusstähle sind prinzipiell für die Schweißung geeignet.
- Wie an diesem Flusstahl beispielhaft gezeigt, sind bei Anwendung der festgesetzten Schweißparameter qualitativ hochwertige Verbindungen, anhand der erzielten Ermüdungsfestigkeiten ersichtlich, zwischen Alt- und Neustahl erreichbar.
- Die erreichten Lebensdauern ähneln denen eines modernen Baustahls St37. Es ist keine verminderte Ermüdungsfestigkeit feststellbar.
- Die Vorgeschichte des Altstahl hatte keinen Einfluss auf die Lebensdauer der hergestellten Schweißverbindung.

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.4 Lebensdauerermittlung an gealterten Schweißverbindungen

#### 6.4 Lebensdauerermittlung an gealterten Schweißverbindungen

##### 6.4.1 Vorgehensweise und Versuchsdurchführung

Wie in Kapitel 2 dargelegt, handelt es sich bei dem hier untersuchten Flusstahl infolge der erhöhten Konzentrationen an Stickstoff um einen Werkstoff mit zeitabhängigen Eigenschaften.

In Anlehnung an die Versuche in [BAEH 1992] sowie infolge der Notwendigkeit zur detaillierteren Untersuchung dieses Sachverhaltes, insbesondere in Hinblick auf die erneute Wärmeeinbringung beim Schweißen und der damit verbundenen Beeinflussung der werkstofflichen Eigenschaften, wurden die nachfolgenden Versuche durchgeführt. Ziel ist die Bewertung der erreichbaren Ermüdungsfestigkeiten geschweißter Laborproben im gealterten Zustand.

In einem ersten Schritt werden Zugversuche gemäß [BAEH 1992] an geglühten und ausgelagerten Rundzugproben durchgeführt. Es wird die Zeit  $t$  ermittelt, die zur höchsten Alterung – Versprödung – führt. Hierbei wird die Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Sprödigkeit ausgenutzt. Die Zeit  $t$  wird für die Auslagerung der geschweißten Laborproben übernommen.



Bild 6–33: Vorgehen zur Ermittlung des Zeitpunktes der höchsten Sprödigkeit

Der zur Bestimmung der Zeit  $t$  angewendete Versuchsablauf ist im Bild 6–33 dargestellt. Der zur Anfertigung der Zugproben verwendete Flusstahl entstammt dem Material, das für die

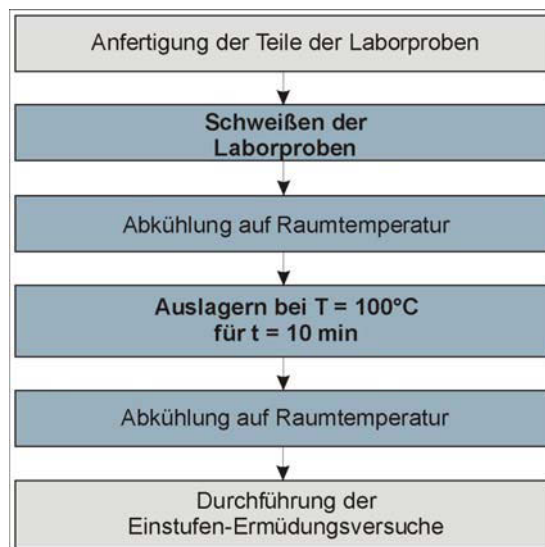
geschweißten Laborproben Verwendung fand. Die chemische Zusammensetzung ist der Tabelle 11-4 zu entnehmen.

Durch das Glühen der Rundzugproben wird der Alterungseinfluss rückgängig gemacht, vgl. Kapitel 2.4.3.

Durch das anschließende Auslagern bei einer Temperatur von  $T = 100^{\circ}\text{C}$  erfolgt eine beschleunigte Alterung infolge verbessertem Diffusionsvermögen. Bei unterschiedlichen Auslagerungszeiten, vgl. Bild 6–35, werden Rundzugproben dem Ofen entnommen und auf Raumtemperatur an der Luft abgekühlt. Anschließend erfolgt der Einbau in die Prüfmaschine zur Durchführung des Zugversuches. Die Zugversuche erfolgten nach [DIN10002].

Nachfolgend werden Ermüdungsversuche an geschweißten Laborproben zur Untersuchung des Alterungseinflusses vollzogen. Die Abmessungen sowie die Beanspruchungen der geschweißten Laborproben sind identisch mit den im Kap. 6.3. verwendeten Proben.

Das Procedere, das im Bild 6–33 zur Beurteilung des Alterungseinflusses Anwendung fand, wird analog auf die Wärmezustände beim Erstellen der geschweißten Laborproben übertragen, vgl. Bild 6–34.



*Bild 6–34: Vorgehen zur Induzierung der Sprödigkeit für die Durchführung der Ermüdungsfestigkeitsversuche*

Durch das Schweißen am Grundwerkstoff aus Flussstahl wird im schweißnahtnahen Bereich infolge der dort vorhandenen hohen Temperaturen ebenfalls ein Glühen durchgeführt.

Es ist davon auszugehen, dass in diesem zumeist kerbempfindlichen Bereich die Alterung rückgängig gemacht wird. Damit ist festzustellen, dass nicht alle Bereiche des Grundwerkstoffs die gleiche Wärmebehandlung erfahren. Große Gebiete des Grundwerkstoffs werden nicht auf Temperaturen erwärmt, die ein „Glühen“ ermöglichen. Für diese Bereiche

## **6 Experimentelle Verifikation**

### **6.4 Lebensdauerermittlung an gealterten Schweißverbindungen**

---

ist lediglich mit einer erweiterten OSTWALDreifung zu rechnen, die eine weitere Zunahme der Zähigkeit zur Folge hat, wenn der Flusstahl bereits den Hochpunkt der Sprödigkeit durchlaufen hat. Davon ist nach [BAEH 1992] auszugehen.

Die Auslagerung bei  $T = 100^{\circ}\text{C}$  erfolgt in Anlehnung an die mit Zugproben durchgeführten Vorversuche für eine Zeit  $t = 10 \text{ min}$ , vgl. 6.4.2.

Nach dem Schweißen und dem Auslagern der geschweißten Laborproben bis zur Zeit  $t$  erfolgt anschließend der Ermüdungsversuch mit zyklischer Einstufenbeanspruchung bis zum Bruch.

#### **6.4.2 Versuchsergebnisse und Fazit**

##### ***Zugversuche***

Die in Wegregelung erzeugten Arbeitslinien sind im Bild 6–35 grafisch dargestellt. Es zeigt sich im Bild 6–36 der Einfluss der Auslagerungszeit auf die erreichte Zugfestigkeit. Weiterhin ist erkennbar, dass die Versuche nach [BAEH 1992] und die eigenen Versuche zur Erreichung der maximalen Zugfestigkeit eine ähnliche Auslagerungszeit ergeben. Der Wert der maximalen Zugfestigkeit unterscheidet sich jedoch zu den Versuchen nach [BAEH 1992] und ist auf die unterschiedlichen untersuchten Flusstähle zurückzuführen.

Die Auswertung der Ergebnisse ergibt bei einer Auslagerungstemperatur  $T = 100^{\circ}\text{C}$  eine Auslagerungszeit  $t \approx 10 \text{ min}$ , um die maximale Zugfestigkeit zu erreichen. Durch die Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Sprödigkeit ist damit der Zeitpunkt der höchsten Sprödigkeit gefunden, vgl. [BAEH 1992].

Für die Durchführung der Ermüdungsversuche an gealterten, geschweißten Proben wird die Zeit  $t = 10 \text{ min}$  als Ergebnis dieser Untersuchung verwendet.

##### ***Ermüdungsversuche***

Die im Einstufenversuch ermittelten Schwingspiele bis zum Bruch sind im Bild 6–37 vergleichend den Ergebnissen der nichtgealterten Laborproben nach Kapitel 6.3 gegenübergestellt. Durch Anwendung der identischen Beanspruchungsniveaus lassen sich die Bruchlastwechselzahlen bei gleicher Bauteilgeometrie vergleichen.

Bei sämtlichen Beanspruchungsniveaus ist eine Zunahme der erreichten Bruchlastwechselzahlen erkennbar. Die Streuungen der Versuchsergebnisse ähneln denen der Versuche ohne Berücksichtigung der Alterung.

Es ist erkennbar, dass die Alterung keinen negativen Einfluss auf die erreichbare Lastwechselzahl hat.

Die Höhe der äußeren Beanspruchung ist bei beiden Versuchsserien identisch. Die gealterten Proben weisen jedoch eine erhöhte Zugfestigkeit auf. Bei identischer äußerer Belastung sinkt möglicherweise der ermüdungsverursachende plastische Anteil infolge des erhöhten, ertragbaren elastischen Spannungsanteils.

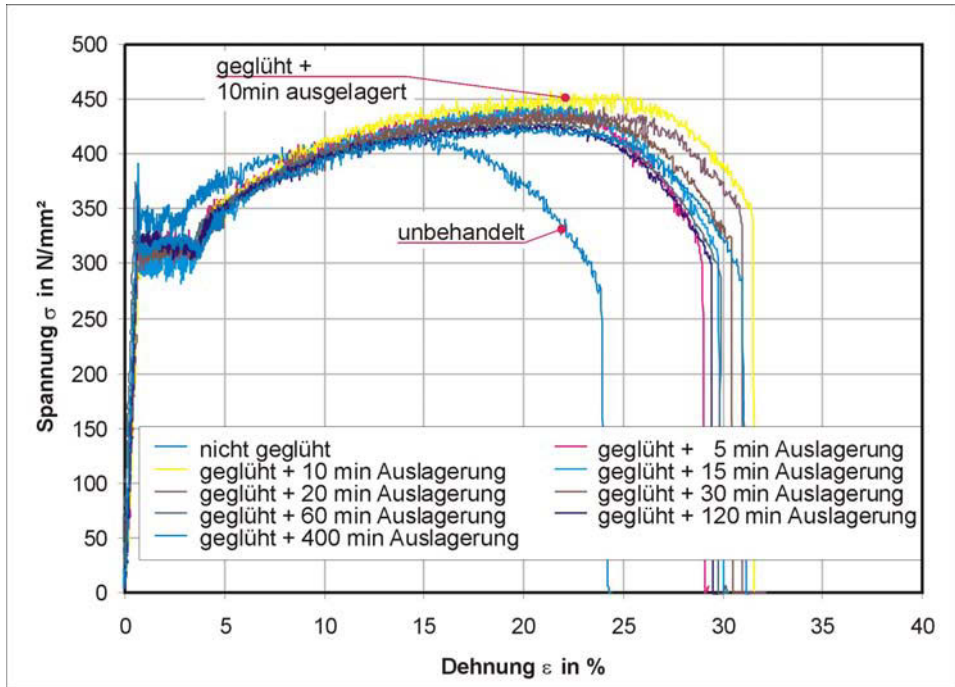


Bild 6–35: Arbeitslinien der Flussstahlzugversuche

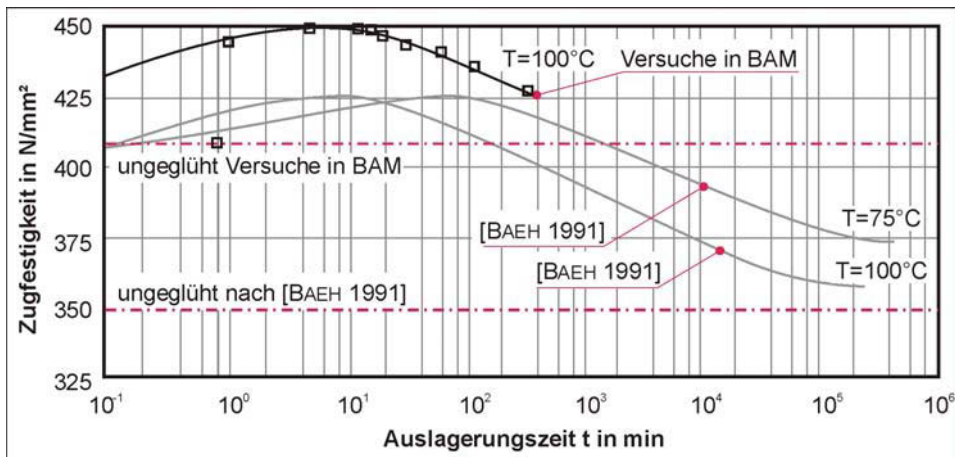


Bild 6–36: Versuchsergebnisse nach Bild 6–35 im Vergleich zu [BAEH 1992]

Diesen Zusammenhang sollten weiterführenden Arbeiten noch einmal aufgreifen, um anhand von Parameterstudien die Phänomenologie, insbesondere das Verhalten bei unterschiedlichen Konzentrationen an Stickstoff im Grundwerkstoff, deuten zu können. In einer weiteren Parameterstudie sollte der Einfluss der im Bereich des Kerbgrunds auftretenden

## 6 Experimentelle Verifikation

### 6.4 Lebensdauerermittlung an gealterten Schweißverbindungen

Mikrostützwirkung untersucht werden, vgl. [HAIB 2002], da dieser eventuell ebenfalls in Abhängigkeit der Werkstoffkennwerte die ermüdungsrelevante Beanspruchung verändert.

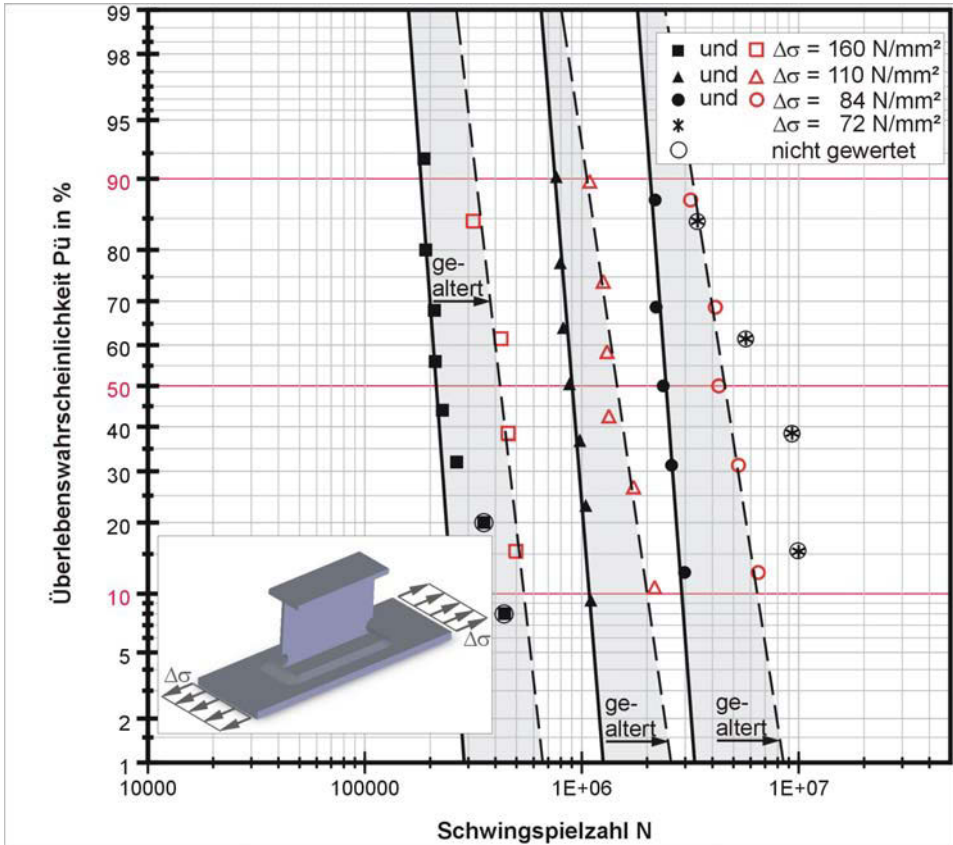


Bild 6–37: Bruchlastwechselzahlen der Laborprobe – ohne und mit Alterung vergleichend gegenübergestellt; gefüllte Symbole repräsentieren die Versuche ohne Berücksichtigung der Alterung, umrissene Symbole stellen die Ermüdungsversuche an den gealterten Bauteilproben dar

### 7 Zusammenfassung und Ausblick

#### *Zusammenfassung*

Im einleitenden Kapitel wurde die Notwendigkeit von Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an bestehenden Stahltragwerken verdeutlicht. Hierbei kommt der Fragestellung nach einer geeigneten Methode zum kraftschlüssigen Verbinden zwischen Alt- und Neustahl eine besondere Bedeutung zu. Ziel dieser Arbeit war insbesondere die Untersuchung der Möglichkeit des Fügens mittels Schweißen.

In Vorbereitung hierauf erfolgte im Kapitel 2 eine klassifizierte Betrachtung der in der Zeit von 1860 bis 1940 verbauten Stähle hinsichtlich prinzipieller Schweißeignung. Für den Puddelstahl, der vorwiegend bis 1900 in den Bauwerken eingesetzt wurde, konnte aufgrund der unregelmäßig verteilten lamellaren Schlackeneinschlüsse keine prinzipielle Schweißeignung ausgesprochen werden. Dennoch finden sich vereinzelt in der Baupraxis Reparaturschweißungen an Puddelstahlkonstruktionen.

Dagegen weist der Flussstahl in ausgewählten Bereichen des Profilquerschnittes, den sogenannten Speckschichten, eine prinzipielle Schweißeignung auf. Die Speckschichtdicken sind Streuungen unterworfen. Um trotzdem Aussagen über deren geometrische Ausdehnung treffen zu können, wurden Streuung verursachende Einflussfaktoren – insbesondere die Stahl- und die Halbzeugherstellung – untersucht. In dieser Arbeit wurden anhand von Messungen an Querschnitten Speckschichtdicken und deren Streuungen ermittelt.

Der höherfeste Siliziumstahl war nicht Bestandteil der Untersuchung, da hier aufgrund der einschlägig bekannten Schadensfälle, welche auf geringe Duktilität zurückzuführen sind, grundsätzlich keine Schweißeignung gegeben ist.

Die chemische Konzentration des Elementes Stickstoff ist im gesamten Profilquerschnitt konstant. Stickstoff verursacht eine transiente Versprödung des Werkstoffs. Im Kapitel 4 wurde daher der Spröbruchnachweis auf bruchmechanischer Basis in Anlehnung an [DAST 009] entwickelt. Mit den aus dem Schrifttum entnommenen Materialzähigkeiten konnte für Blechdicken bis 11 mm ein vereinfachter Nachweis gegen Spröbruch erbracht werden. In der Praxis sind ähnliche Blechdicken verbaut. Für größere Blechdicken bis ca. 18 mm kann in der Regel ein genauere Nachweis den vereinfachten Nachweis ersetzen.

Im Kapitel 2 wurden weiterhin Mittelwerte und Standardabweichungen für die chemische Konzentration der Begleitelemente sowie der mechanisch-technologischen Eigenschaften als Zusammenfassung aus dem Schrifttum und der in der BAM durchgeführten Versuche dokumentiert, um hieraus Rückschlüsse auf die jeweiligen Eigenschaften und deren Streuungen ziehen zu können.

Aufgrund der festgestellten, prinzipiellen Schweißeignung des Flussstahls wurden im Kapitel 3 in Hinblick auf die Sanierung und Ertüchtigung die besondere Eignung des Fügens durch Schweißen gegenüber anderen Fügeverfahren hervorgehoben.

Infolge der Speckschichtdicken war eine Anpassung des gewählten Lichtbogenhandschweißverfahrens in Hinblick auf die Einbrandtiefe erforderlich. Im Laborversuch wurden in

Abhängigkeit von der eingebrachten Streckenenergie die zugehörigen Einbrandtiefen ermittelt. Durch die vergleichende Gegenüberstellung von vorhandenen Speckschichtdicken und Einbrandtiefen wurde der maximale Energieeintrag unter besonderer Berücksichtigung einer praxisgerechten Umsetzung definiert. Die zur Durchführung einer „altstahlgerechten“ Schweißung zu verwendenden Schweißparameter wurden dafür experimentell ermittelt, vgl. Kapitel 5.

Zur Untersuchung der Eignung einer solchen Schweißverbindung für nicht ruhende Beanspruchung wurden Ermüdungsversuche an geschweißten Flusstahlproben durchgeführt und in Kapitel 6 dargestellt. Die ermittelten Bruchlastwechselzahlen waren bei gleicher Kerbgrundbeanspruchung und Bauteilform denen heutiger Baustähle ähnlich. Damit wurde gezeigt, dass eine erfolgreiche Schweißung an Flusstählen prinzipiell möglich ist.

Zur Quantifizierung der Vorgeschichteinflüsse auf die Lebensdauer wurden weitere Versuche durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass die Vorgeschichte keinen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer der verstärkten Konstruktion ausübt.

Weiterhin wurde der im Kapitel 2 diskutierte Einfluss der Alterung infolge Stickstoff auf die erreichbare Lebensdauer untersucht. Als Ergebnis der Untersuchungen ergab im Vergleich zu ungealterten geschweißten Proben keine Minderung der erreichbaren Ermüdungsfestigkeit.

### **Ausblick**

Der Anteil der Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an der Gesamtanzahl der Planungsaufgaben im Bauwesen wird in den nächsten Jahren zwangsläufig steigen, da eine stetig größer werdende Menge an Bausubstanz zu pflegen, umzunutzen und zu ertüchtigen ist.

In diesem Zusammenhang wurde mit dieser Arbeit insbesondere für Stahltragwerke aus der Zeit von 1900 bis 1940 ein Beitrag zur Verbesserung der Effizienz dieser Maßnahmen geleistet.

Die Arbeit versteht sich als Ausgangspunkt für weiterführende Untersuchungen. Es zeigte sich, dass die Materialeigenschaften Streuungen unterworfen sind. Zur Erhöhung der statistischen Aussagekraft sollten weitere Versuche an diesem Material durchgeführt werden. Gleiches gilt etwa für die Lichtbogenhandschweißungen. Auch hier sollten weiterführende Untersuchungen angestellt werden, um die bis jetzt nicht berücksichtigten, Streuung verursachenden Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Handfertigkeit verschiedener Schweißer, bewerten zu können. Ebenso müssen in nachfolgenden Arbeiten die Einflüsse weiterer praxisrelevanter Kerbdetails untersucht werden.

Ferner erscheint die Erarbeitung von Richtlinien als wesentlich, um die Beteiligten für die Problematik des Schweißens an Flusstählen zu sensibilisieren. Ein erster Ansatz für ein mögliches Vorgehen bei der Planung selbst ist im Bild 7–1 dargestellt, bedarf jedoch der Bearbeitung und Anpassung in weiterführenden Beiträgen zu dieser Thematik.



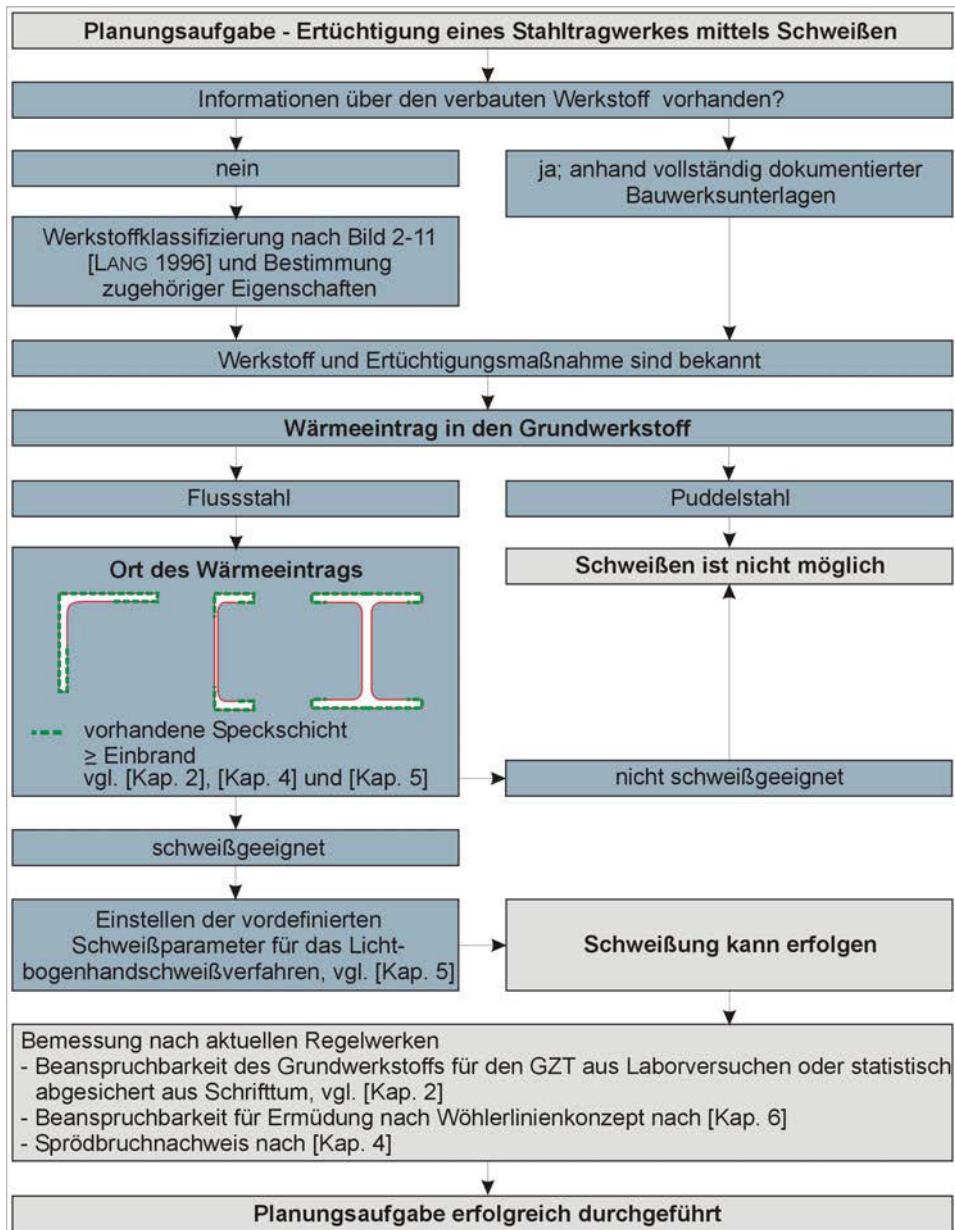


Bild 7–1: mögliches Vorgehen bei der Planungsaufgabe zur Ertüchtigung eines Baustahls aus der Zeit von 1860 bis 1940 mittels Schweißen

## 8 Literatur

### *Literatur*

- [AICH 2002] **AICHELE, G.. 2002.** Blaswirkung beim Lichtbogenschweißen, nur noch ein alter Hut?. Der Praktiker. S. 393-398.
- [ALBR 1994] **ALBRECHT, GERT; LAUKEL, S.. 1994.** Lahnbrücke Lahnstein – Nachrechnung und Sicherheitsanalyse. Stahlbau.
- [ANYS 1999] **ANSYS USER'S MANUAL. 1999.** CadFEM GmbH. München.
- [ANTH 1993] **ANTHES, RAINER J.; KÖTTGEN, VOLKER B.; SEEGER, TIM. 1993.** Kerbformzahlen von Stumpfstößen und Doppel-T-Stößen. Schweißen & Schneiden. S. 1-4.
- [ANTH 1994] **ANTHES, RAINER J.; KÖTTGEN, VOLKER B.; SEEGER, TIM. 1994.** Einfluß der Nahtgeometrie auf die Dauerfestigkeit von Stumpf- und Doppel-T-Stößen. Schweißen & Schneiden. S. 433-436.
- [ARYU 1998] **ARYUS, A. H.. 1998.** Auffrischen von schweißtechnischem Wissen. Der Praktiker. S. 265-268.
- [AURI 1994] **AURICH, D. 1994.** Kann man den Ermüdungsgrad von Bauteilen zerstörungsfrei ermitteln. Materialprüfung. S. 160.
- [BAEH 1992] **BAEHRE, R.; KÄPPLEIN, R.. 1992.** Zeitabhängige Änderungen von Werkstoffeigenschaften bei alten Baustählen. Werkstoffeigenschaften alter Baustähle. SFB 315 Karlsruhe.
- [BACK 2001] **BACKGROUND DOCUMENT TO THE ECCS-STARTER DRAFT FOR prEN 1993-1.10. 2001.** Eurocode 3: Design of steel structures. Chapter: Choice of fracture toughness to avoid brittle fracture.
- [BARG 1983] **BARGEL, HANS JÜRGEN; SCHULTZE GÜNTER. 1983.** Werkstoffkunde. Düsseldorf. VDI-Verlag.
- [BARG 1993] **BARGMANN, HORST. 1993.** Historische Bautabellen. Normen und Konstruktionshinweise 1870 bis 1960. Düsseldorf. Werner-Verlag GmbH.

- 
- [BARS 1987] **BARSOM, JOHN M.; ROLFE, STANLEY T.. 1987.** Fracture and Fatigue Control in Structures. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.
- [BEUT 1901] **BEUTER. 1901.** Dichten des Stahls. Stahl und Eisen. S. 857-865.
- [BERG 1989] **BERGMANN, WOLFGANG. 1989.** Werkstofftechnik. Teil 1: Grundlagen. Carl Hanser Verlag. München. Wien.
- [BRAN 2004] **BRANDES, KLAUS. 2004.** Erfahrungsaustausch zum Thema Altstahl.
- [BRÜH 1989] **BRÜHWILLER, E.; HIRT, M. A.. 1989.** Bewertung der Spontanbruchgefahr angerissener Brückenbauteile aus Schweißseisen. Stahlbau. S. 9-16.
- [BUCA 1998] **BUCAK, ÖMER; MANG, FRIEDRICH. 1998.** Erfahrungen mit alten Stahlkonstruktionen. Stahlbau 67. Heft 1. S. 46-60.
- [BURG 1983] **BURGHARDT, HELMUT; NEUHOF, GERD. 1983.** Stahlerzeugung. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig.
- [DAST 009] **DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBAU. 2005.** DAST-Richtlinie 009. Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten. Deutscher Stahlbau-Verband DSTV. Düsseldorf.
- [DAEL 1902] **DAELEN, R., M.. 1902.** Die Fortschritte in den deutschen Stahl- und Walzwerken seit 1880. Stahl und Eisen. S. 984-988.
- [DEFE 1961] **DE FERRI. 1961.** Metallographia. Band 3. Berger-Levrault – Paris – Nancy.
- [ECKS 1971] **ECKSTEIN, H. J.. 1971.** Wärmebehandlung von Stahl. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig.
- [EDEL 1991] **EDEL, KARL-OTTO. 1991.** Bruchmechanische Analyse der Restnutzungsdauer der Hauptträger der Autobahnbrücken A1/Bw13 und A1/Bw15 bei Rüdersdorf. Gutachten. nicht veröffentlicht.
- [EDEL 1992] **EDEL, KARL-OTTO. 1992.** Bruchmechanische Untersuchungen an der 55 Jahre alten Strelasundbrücke. Gutachten. nicht veröffentlicht.
- [FALK 1910] **FALK, ADOLF. 1910.** Die Breitung des Eisens in Glattwalzen. Stahl und Eisen. S. 1986-1993.

- [FALK 1912A] FALK, ADOLF. 1912. Die Theorie der Materialwanderung beim Walzen und Schmieden. Teil 1. Stahl und Eisen. S. 816-822.
- [FALK 1912B] FALK, ADOLF. 1912. Die Theorie der Materialwanderung beim Walzen und Schmieden. Teil 2. Stahl und Eisen. S. 863-867.
- [FISC 1995] FISCHER, LUTZ. 1995. Bestimmung des 5 %-Quantils im Zuge der Bauwerksprüfung. Bautechnik. Ernst & Sohn. S. 712 – 722.
- [FKM 2002] FKM-Richtlinie. 2002. Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen.
- [GEIß 1999] GEIBLER, K.; QUOOS, V.. 1999. Zu den Ermüdungsnachweisen für bestehende stählerne Brücken. Ehrenkolloquium Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Graße zum 60. Geburtstag. Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe. Heft 8. S. 81-92.
- [GEIß 1995] GEIBLER, KARSTEN. 1995. Beitrag zur probabilistischen Berechnung der Restnutzungsdauer stählerner Brücken. Dissertation. TU Dresden. Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe. Heft 2. Dresden.
- [GLAE 2005] GLAESKE, HERBERT. 2005. Informationsaustausch zum Thema Stickstoff-Eisen. Diskussionsforum. Internet. Lober-net.de.
- [GOER 1906] GOERENS, P.. 1906. Über die Konstitution des Roheisens. Stahl und Eisen. S. 397-400.
- [GRAß 2002A] GRAßE, W.; SCHMACHTENBERG, R.; GEIBLER, K.. 2002. Zur Nachrechnung, Restnutzungsdauerberechnung und Ertüchtigungsuntersuchung der Eisenbahnhochbrücke über den Nord-Ostsee-Kanal in Rendsburg. Stahlbau. S. 641-652.
- [GRAß 2002B] GRAßE, W.. 2002. DIN Fachbericht 103: Bemessung von Stahlbrücken. Unterlagen zur Schulungsveranstaltung Einführung der DIN-Fachberichte. TU Dresden.
- [GRAß 1999] GRAßE, W.. 1999. Untersuchungen zur Restnutzungsdauer der Elbebrücke "Blaues Wunder" in Dresden. Vortrag. Für das 4. Internationale Stahlbrücken-Symposium der Europäischen Konvention für Stahlbau. Leipzig. Berichtband Nr. 108. S. 119-132.

- 
- [**GRAß 1997**] **GRAß, W.. 1997.** Untersuchungen zur Restnutzungsdauer der Elbebrücke Loschwitz-Blasewitz in Dresden - Blaues Wunder. Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe der TU Dresden. Heft 7. S.29 – 43.
- [**GUDE 1999**] **GUDEHUS, H.; ZENNER, H.. 1999.** Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung. Verlag Stahleisen GmbH. Düsseldorf.
- [**HAIB 2002**] **HAIBACH, ERWIN. 2002.** Betriebsfestigkeit. Springer Verlag.
- [**HANS 1936**] **HANSEN, M.. 1936.** Der Aufbau der Zweistofflegierungen. Springer Verlag.
- [**HELM 1997**] **HELMERICH, ROSEMARIE; BRANDES, KLAUS. 1997.** Full scale laboratory fatigue tests on riveted steel bridges. Workshop Lausanne.
- [**HERT 2000**] **HERTER, JÜRGEN; BRANDES, KLAUS; HELMERICH, ROSEMARIE. 2000.** Tragsicherheit und Restlebensdauer von genieteten Stahlbrücken. BAM Berlin.
- [**HEYN 1906**] **HEYN, E.. 1906.** Über die Nutzenanwendung der Metallographie in der Eisenindustrie. Stahl und Eisen. S. 580-597.
- [**HEYN 1912**] **HEYN, E.; BAUER, O.. 1912.** Beitrag zur Frage der Seigerungen in Flusseisen. Stahl und Eisen. S. 402-403.
- [**HÜNE 1987**] **HÜNERSEN, G..1987.** Nachweisführungen für Stahltragglieder beim Schweißen unter Last. Dissertation. B-TH Leipzig.
- [**HOB 1993**] **HOBACHER. 1993.** Stress Intensity Factors of Welding Joints, Engineering Fracture Mechanics. S. 173-182.
- [**KIES 1914**] **KIESSELBACH. 1914.** Walzwerkkommission des Vereins deutscher Eisenhüttenleute: Verdrängtes Volumen und Walzbarkeit. Stahl und Eisen. S. 1575-1578.
- [**KRZY 1968**] **KRZYMINSKI, H.. 1968.** Aushärtungsvorgänge in der Diffusionszone nitrierter unlegierter Stähle und deren Einfluss auf Festigkeit und Zähigkeit. Härtereitechnische Mitteilungen 23. Heft 3. S. 198-207.
- [**KUBA 1968**] **KUBALEK, E.. 1968.** Isothermisches Zeit-Temperatur-Entmischungsschaubild als Grundlagenforschung zur Erklärung der Entmischungsvorgänge im System Eisen-Stickstoff. Härtereitechnische Mitteilungen. Heft 3. S. 177-197.

- [KÜHN 2005] **KÜHN, BERTRAM. 2005.** Beitrag zur Vereinheitlichung der europäischen Regelungen zur Vermeidung von Sprödbbruch. Dissertation. Lehrstuhl für Stahlbau. RWTH Aachen.
- [KÜHN 1953] **KÜHNEL, REINHOLD. 1953.** Der Riß in der Brücke. VDI-Nachrichten. S. 10.
- [KUSC 2003] **KUSCHER, GERD. 2003.** unveröffentlichte Gutachten zur Schweißung an Altstählen. SLV Hannover.
- [LANG 1996] **LANGENBERG, PETER. 1996.** Bruchmechanische Sicherheitsanalyse anrißgefährdeter Bauteile im Stahlbau. Dissertation. RWTH Aachen.
- [LIB 1922] **LIB. G.. 1922.** Die Nutzbarkeit des Walzvorganges. Stahl und Eisen. S. 689-697.
- [LÜRM 1909] **LÜRMAN, F. W.. 1909.** Die Entwicklung der Roheisenherstellung mit Koks in Deutschland. Stahl und Eisen. S. 89-97.
- [LYMA 1973] **LYMAN, TAYLOR. 1973.** Metals Handbook. Vol. 8. Metallography, Structures and Phase Diagrams. American Society for Metals. Metals Park. Ohio.
- [MANG 1985] **MANG, FRIEDRICH; STEIDL, GERHARD; BUCAK, ÖMER. 1985.** Altstahl im Bauwesen. Schweißen und Schneiden 37. S. 10-14.
- [MANG 1996] **MANG, FRIEDRICH; BUCAK, ÖMER. 1996.** Tauglichkeit und Lebensdauer von bestehenden Stahlbauwerken. Stahlbau Handbuch. Köln.
- [MEHD 2003] **MEHDIANPOUR, MILAD. 2003.** Lebensdauervorhersage von ermüdungsbeanspruchten Stahltragwerken mit Hilfe von Monitoring und begleitenden Versuchen. Dissertation. TU Braunschweig.
- [MEYN 2003] **MEYNA, ARNO; PAULI, BERNHARD. 2003.** Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik. Carl Hanser Verlag. München.
- [MÖLL 1997] **MÖLL, REINER. 1997.** Altstahlschweißen und Nieten im Zuge der Grunderneuerung des Eisernen Steges in Frankfurt am Main. Stahlbau 66. S. 1-11.
- [MÖLL 2000] **MÖLL, REINER. 2000.** Grundhafte Erneuerung des großen Palmenhauses im Palmengarten in Frankfurt am Main. Stahlbau 69. S. 741-755.

- 
- [NAUB 1999] NAUBEREIT, HARRY; WEIHERT, JAN. 1999. Einführung in die Ermüdungsfestigkeit. Carls Hanser Verlag. München.
- [NEUH 2005] NEUHAUS, MATHIAS. 2005. Zum Einfluss der Schrumpfbehinderung auf das thermoplastische Verhalten geschweißter Bauteile. Dissertation. Shaker Verlag. Aachen.
- [NISH 1967] NISHIDA, M.. 1967. Stress concentration. Tokyo Morikita Pub. Co..
- [OLIV 1982] OLIVIER, R.; RITTER, W.. 1982. Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen – Teil 4: Längssteife. Düsseldorf. Deutscher Verlag für Schweißtechnik GmbH.
- [OSAN 1908] OSANN, B.. 1908. Das Harnetverfahren im Martinbetriebe der Gewerkschaft „Deutscher Kaiser“ in Bruckhausen. Stahl und Eisen. S. 1601-1614.
- [PARI 1961] PARIS, P. C.; GOMEZ, M. P.; ANDERSON, W. F.. 1961. A Rational Theory in Fatigue. The Trend in Engineering 13.
- [PETE 1974] PETERSEN, GERHARD; SCHMIDT, HELMUT. 1974. Wiederherstellung der Tragfähigkeit von gerissenen gusseisernen Tübbings nach dem Metallock-Verfahren. Straße Brücke Tunnel. Seite 253 – 258. Verlag Ernst & Sohn KG. Berlin.
- [RADA 1968] RADAJ, D.. 1968. Beitrag zum Berechnen der Spannungskonzentrationen bei Schweißverbindungen. Tragfähigkeitsermittlung bei Schweißverbindungen. DVS-Verlag. Düsseldorf.
- [RADA 2000] RADAJ, D.; SONSINO, C. M.. 2000. Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten. DVS-Verlag. Düsseldorf.
- [RAIN 1978] RAINER, G.. 1978. Errechnen von Spannungen in Schweißverbindungen mit der Methode der Finiten Elemente. Dissertation. TH Darmstadt.
- [RAJU 1983] RAJU, I. S.; NEWMANN, J. C.. 1983. Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies. Fracture Mechanics. Fourteenth Symposium-Volume 1

- [REIC 2000] REICHE, ANDRÉ. 2000. Forschungsbericht. Untersuchung der Möglichkeit zur Baukostenreduzierung durch eine datenbankgestützte, statistisch gesicherte Zustandbewertung von metallischen Tragwerkskomponenten bei der Modernisierung von Altbauten in den neuen Bundesländern. Leipzig. MFPA Leipzig.
- [RICH 1973] RICHTER, FRIEDHELM. 1973. Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von 52 Eisenwerkstoffen. Stahleisen – Sonderberichte. Heft 8. Mitteilung aus dem Forschungsgebiet der Mannesmann AG. Verlag Stahleisen. Düsseldorf.
- [RICH 1983] RICHTER, FRIEDHELM. 1983. Physikalische Eigenschaften von Stählen und ihrer Temperaturabhängigkeit. Stahleisen – Sonderberichte. Heft 10. Mitteilung aus dem Forschungsgebiet der Mannesmann AG. Verlag Stahleisen. Düsseldorf.
- [RIEM 1903] RIEMER, J.. 1903. Ein neues Verfahren zum Verdichten von Stahlblöcken im flüssigen Zustande. Stahl und Eisen. S. 1196-1203.
- [RUGE 1991] RUGE, JÜRGEN. 1991. Handbuch der Schweißtechnik. Band 1. Werkstoffe. Springer Verlag. Berlin. Heiderberg. New York.
- [SACH 1968] SACHS, LOTHAR. 1968. Statistische Auswertungsmethoden. Springer Verlag. Berlin. Heidelberg.
- [SAIN 1870] SAINT VENANT. 1870. Differentialgleichungen der Plastikodynamik. Comptes rendus.
- [SCHA 1908] SCHAPER, G.. 1908. Eiserne Brücken. Berlin. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn.
- [SCHÖL 1904] SCHÖLER, RICHARD. 1904. Die Eisenkonstruktionen des Hochbaues. Leipzig. Verlag von Bernhardt Friedrich Voigt. Reprint.
- [SCHU 2004] SCHULZE, GÜNTHER. 2004. Die Metallurgie des Schweißens. Springer Verlag. Berlin. Heidelberg. New York.
- [SEDL 1992] SEDLACEK, G.; HENSEN, W.; BILD, J.; DAHL, W.; LANGENBERG, P.. 1992. Verfahren zur Ermittlung der Sicherheit von alten Stahlbrücken unter Verwendung neuester Erkenntnisse der Werkstofftechnik. Bauingenieur. S. 129-136.



- 
- [SEDL 2003] **SEDLACEK, G.; HÖHLER, S.; KÜHN, B.; LANGENBERG, P.. 2003.**  
Bruchmechanische Methoden im Sicherheitssystem des Stahlbaus. Stahlbau.  
S. 664-678.
- [SEEG] **Seeger, T.; Zacher, P..** Jahr unbekannt. Lebensdauervorhersage zwischen  
Traglast und Dauerfestigkeit am Beispiel ausgeklinkter Träger. Darmstadt.
- [SIEB 1955] **SIEBEL, E; STIELER, M.. 1955.** Ungleichförmige Spannungsverteilung bei  
schwingender Beanspruchung. Zeitschrift des VDI. VDI-Verlag. S. 121-126.
- [STEI 1972] **STEIDL, GERHARD. 1972.** Schweißverhalten von Baustählen aus der Zeit von  
1885 – 1940. Schweißen und Schneiden 24. S. 85-87.
- [STÖT 1997] **STÖTZEL, GERO. 1997.** Verfahren zur Beurteilung der Sicherheit bei  
Weiterverwendung alter Stahlbrücken. Dissertation. RWTH Aachen.
- [TEWE 1948] **TEWES, KARL. 1948.** Stahl und Eisen beim Schweißen. Vulkan-Verlag Dr. W.  
Classen, Essen.
- [THUM 1932] **THUM, A.; BUCHMANN, W.. 1932.** Dauerfestigkeit und Konstruktion. VDI-Verlag.  
Berlin.
- [TRES 1865] **TRESCA, H.. 1865.** Mémoires sur l'écoulement des corps solides. Noblet et  
Baudry. Extrait des Annales du conservatoire des Arts et Métiers. Paris.
- [VDE 1929] **VDE – VEREIN DEUTSCHER EISENHÜTTENLEUTE. 1929.** Handbuch des  
Eisenhüttenwesens. Walzwerkswesen. Band 1 und Band 2. Düsseldorf,  
Berlin.
- [VDI 1926] **VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. 1926.** Schweißtechnik – Vorträge und  
Erörterungen der Fachsitzung für Schweißtechnik auf der 65.  
Hauptversammlung des Vereins Deutscher Ingenieure vom 12. bis 14. Juni  
1926 in Hamburg. VDI Verlag GmbH, Berlin.
- [WANG 2000] **WANG, QIMING; KOTTE, KARL LUDWIG; EULITZ, KLAUS-GEORG. 2000.**  
Lebensdauer abschätzen. Materialprüfung. S. 334-338.
- [WEIß 1911] **Weißberg, Bruno. 1911.** Walzbetrieb und Kalibrierung in graphischer  
Darstellung. Stahl und Eisen. S. 1653-1662.

- [WERN 1992] **WERNER, FRANK; SEIDEL, JOACHIM. 1992.** Der Eisenbau. Berlin. Verlag für Bauwesen.
- [WIEN 1996] **WIENERT, H.. 1996.** Innovationen bei der Erzeugung von Stahl im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts. Stahl und Eisen. S. 151-152.
- [WIES 2003] **WIESE, JÜRGEN. 2003.** Kolbenstangenbruch an der Maschine des Raddampfers KAISER WILHELM in LAUENBURG. Journal Dampf & Heißluft. Seite 38-44. Neckar-Verlag GmbH. Villingen-Schwenningen.
- [WITTE 1991] **WITTEMANN, KLAUS; BAEHRE, ROLF. 1991.** Bruchmechanische Untersuchung an Baustahl des 19. Jahrhunderts. SFB 315. Jahrbuch 1991. Uni Karlsruhe. Verlag für Architektur und Technik. Ernst & Sohn Verlag. Berlin.
- [WOLF 2001] **WOLFRAM, KNUT. 2001.** Zum Einfluss von Druckspannungen auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlbauteilen. Dissertation. TU Dresden.

### *Normen, Richtlinien und Lieferbedingungen für Stahl*

- [NORM 1893] **NORMALBEDINGUNGEN FÜR DIE LIEFERUNG VON EISENKONSTRUKTIONEN FÜR BRÜCKEN- UND HOCHBAU. 1893.** Verband deutscher Architekten- und Ingenieurvereine; Verein deutscher Ingenieure; Verein deutscher Eisenhüttenleute. Hamburg. Otto Meissner.
- [VORS 1889] **VORSCHRIFTEN FÜR DIE LIEFERUNG VON EISEN UND STAHL. 1889.** Verein deutscher Eisenhüttenleute. Düsseldorf. Commissionsverlag von August Bagel.
- [BEST 1910] **BESTIMMUNGEN ÜBER DIE BEI HOCHBAUTEN ANZUNEHMENDEN BELASTUNGEN UND DIE BEANSPRUCHUNGEN DER BAUSTOFFE. 1910.** Amtliche Ausgabe. Berlin. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn.
- [BESO 1912] **BESONDERE VERTRAGSBEDINGUNGEN FÜR DIE ANFERTIGUNG, ANLIEFERUNG UND AUFSTELLUNG VON EISENBAUWERKEN. 1912.** Erlass vom 14. Juni 1912. Berlin. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn.
- [DR 1925] **DEUTSCHE REICHSBAHN-GESELLSCHAFT. 1925.** Vorschriften für Eisenbahnbauwerke. Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken.
- [DR 1934] **DEUTSCHE REICHSBAHN. 1934.** Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken.

- 
- [TGL 13451] TGL 13451. STAHLBAU. ALTSTAHL FÜR STAHLTRAGWERKE IM HOCHBAU. 1964.
- [RIL 804] RICHTLINIE 804. EISENBAHNBRÜCKEN. 2003. Deutsche Bahn AG.
- [RIL 805] RICHTLINIE 805. TRAGSICHERHEIT BESTEHENDER EISENBAHNBRÜCKEN. 2002. Deutsche Bahn AG.
- [MLK E4] VEB MLK. STAHLHOCHBAU – RICHTLINIEN FÜR PROJEKTIERUNG UND KONSTRUKTION. 1988. Rekonstruktion von Stahlbauten – E4. Leipzig.
- [DIN 287] DIN EN 287-1. PRÜFUNG VON SCHWEIßERN – SCHMELZSCHWEIßEN – TEIL 1: STÄHLE. 1992. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- [DIN 499] DIN EN 499. SCHWEIßZUSÄTZE – UMHÜLLTE STABELEKTRODEN ZUM LICHTBOGENHANDSCHWEIßEN VON UNLEGIERTEN STÄHLEN UND FEINKORNBAUSTÄHLEN – EINTEILUNG. 1994. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- [DIN 857] DIN ISO 857-1. SCHWEIßEN UND VERWANDTE PROZESSE. TEIL 1: METALLSCHWEIßPROZESSE. 2002. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- [DIN 1011] DIN EN 1011-1. SCHWEIßEN – EMPFEHLUNGEN ZUM SCHWEIßEN METALLISCHER WERKSTOFFE – TEIL 1: ALLGEMEINE ANLEITUNGEN FÜR DAS LICHTBOGENSCHWEIßEN. 1998. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- [DIN 1050] DIN 1050. STAHL IM HOCHBAU. BEIBLATT 2. ALTSTAHL IM HOCHBAU. 1948. FHP. 2. Potsdamer Bauseminar „Bauwerkserhaltung“ 11/97.
- [DIN 4100] DIN 4100. VORSCHRIFTEN FÜR GESCHWEIßTE STAHLBAUTEN. 1931. Fachausschuß für Schweißtechnik beim Verein deutscher Ingenieure. Ausschuß für einheitliche technische Baupolizeibestimmungen. Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft.
- [DIN 6947] DIN EN ISO 6947. SCHWEIßNÄHTE. ARBEITSPOSITIONEN. 1997. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- [DIN 10002] DIN EN 10002. ZUGVERSUCH. 1991. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- [DIN 10025] DIN EN 10025. WARMGEWALLZTE ERZEUGNISSE AUS UNLEGIERTEN BAUSTÄHLEN. TECHNISCHE LIEFERBEDINGUNGEN. 1994. Beuth Verlag GmbH. Berlin.

- [DIN 18800] **DIN 18800. STAHLBAUTEN. TEILE 1 BIS 4. 1990.** Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- [DIN 17100] **DIN 17100. ALLGEMEINE BAUSTÄHLE. GÜTENORM. 1980.** Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- [DIN 25817] **DIN EN 25817. LICHTBOGENSCHWEIßVERBINDUNGEN AN STAHL – RICHTLINIE FÜR DIE BEWERTUNGSGRUPPEN VON UNREGELMÄßIGKEITEN. 1992.** Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- [DIN 50125] **DIN 50125. PRÜFUNG METALLISCHER WERKSTOFFE – ZUGPROBEN. 2004.** Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- [ENV 1993] **DIN ENV 1993. EUROCODE 3: BEMESSUNG UND KONSTRUKTION VON STAHLBAUTEN. TEIL 1-1: ALLGEMEINE BEMESSUNGSREGELN, BEMESSUNGSREGELN FÜR DEN HOCHBAU. 1992.** Beuth Verlag GmbH. Berlin.

## 9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

### 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

#### 9.1.1 Statistische Auswertung der Speckschichtdicken von Flusstählen

Die Darstellung der Messwerte erfolgt bei logarithmischer Merkmalsteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz. Rot sind die Hilfslinien der Überschreitungshäufigkeiten 90 % und 95 % hervorgehoben. In Bild 9–1 ist eine Orientierungshilfe zur Verdeutlichung der aufgetragenen Messwerte angeben. Diese gilt für alle Bilder des Anhangs-A1.

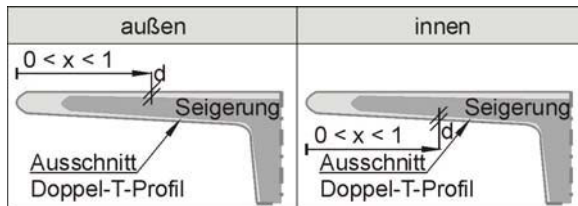


Bild 9–1: Orientierungshilfe für die nachfolgende Bilder

## 9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

### 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

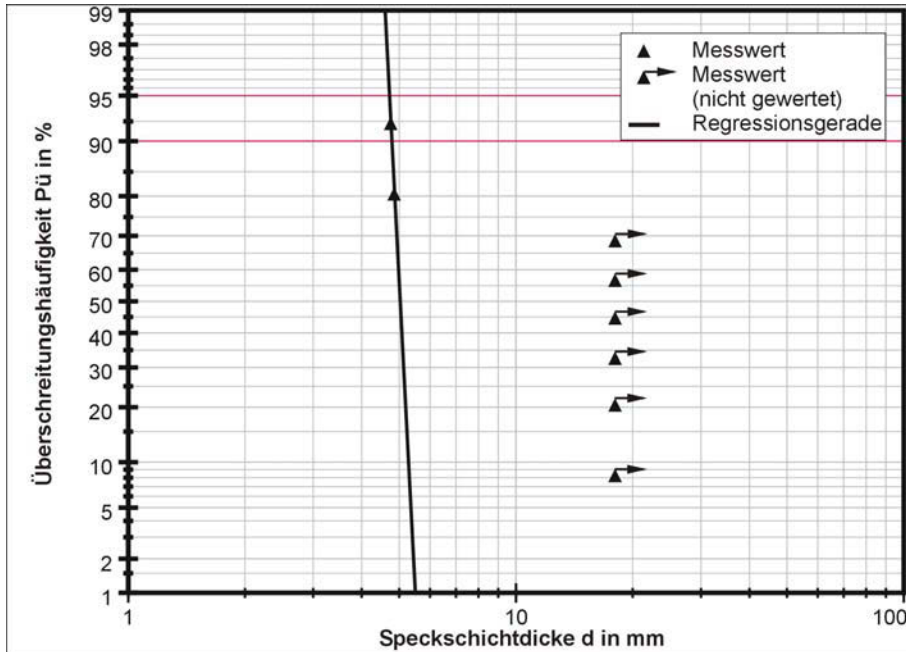


Bild 9–2: NP24  $x = 0,16$  innen

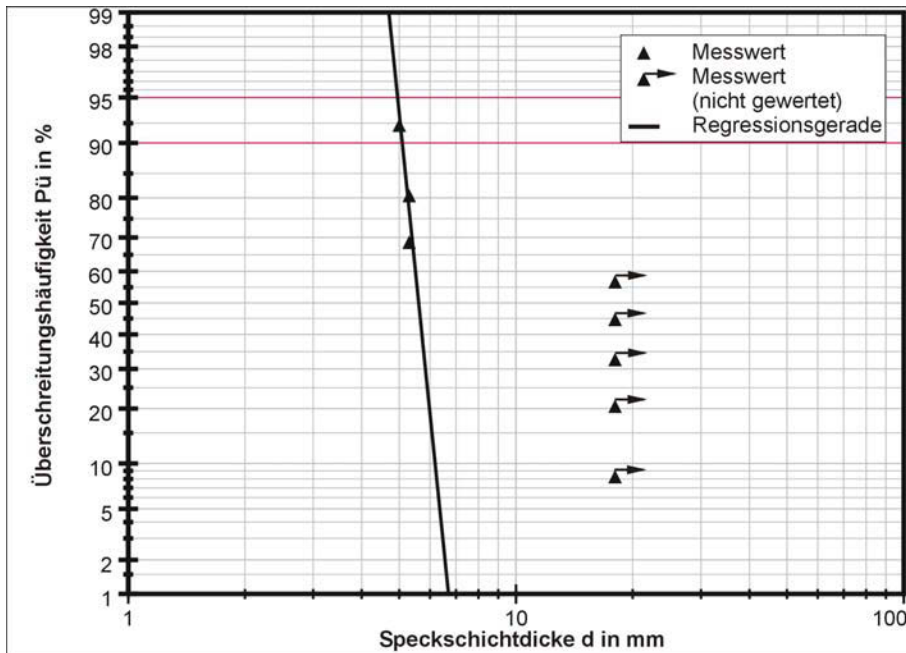


Bild 9–3: NP24  $x = 0,33$  innen

9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang  
 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

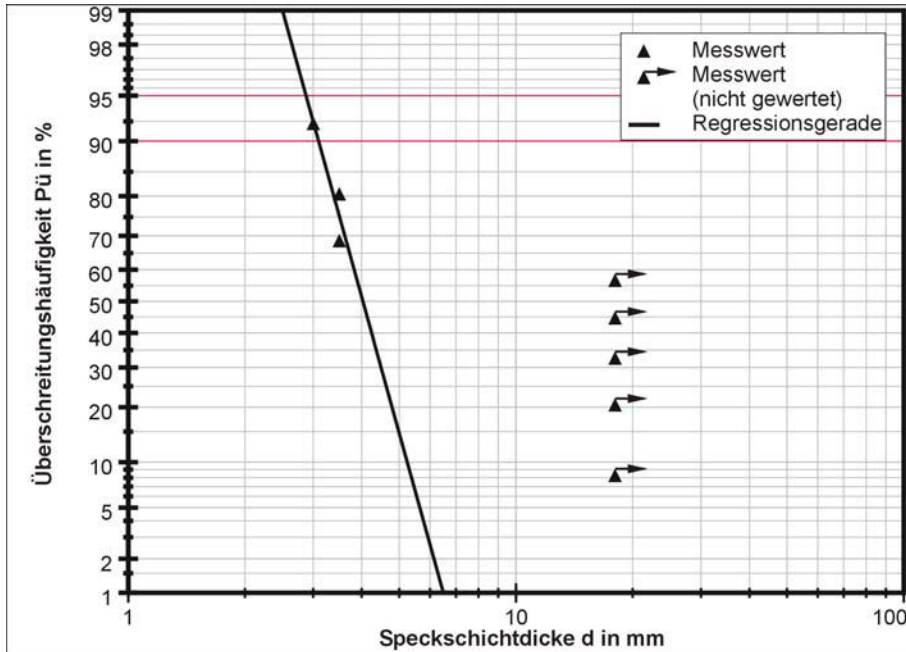


Bild 9–4: NP24  $x=0,5$  innen

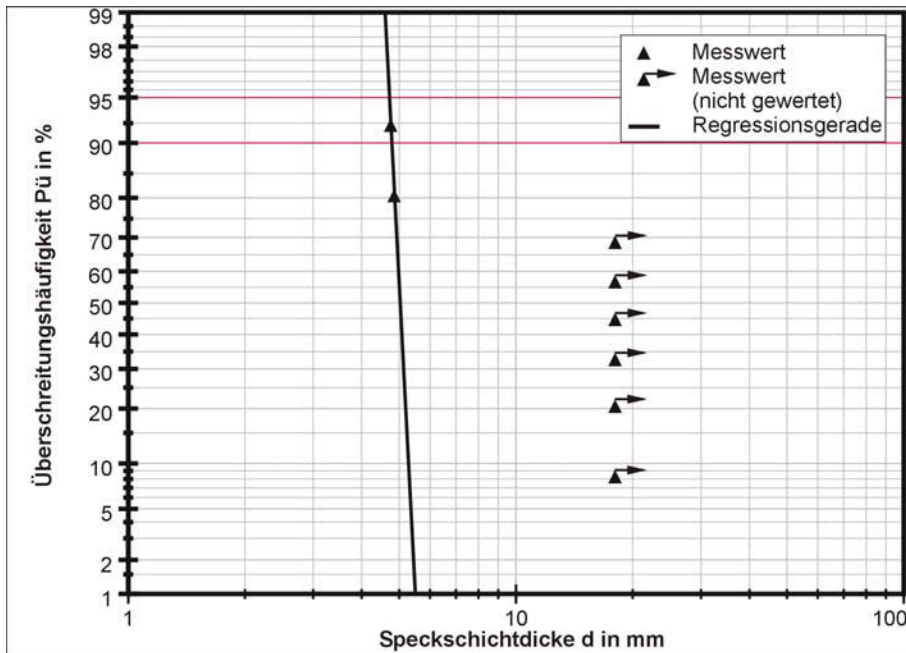


Bild 9–5: NP24  $x = 0,16$  außen

## 9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

### 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

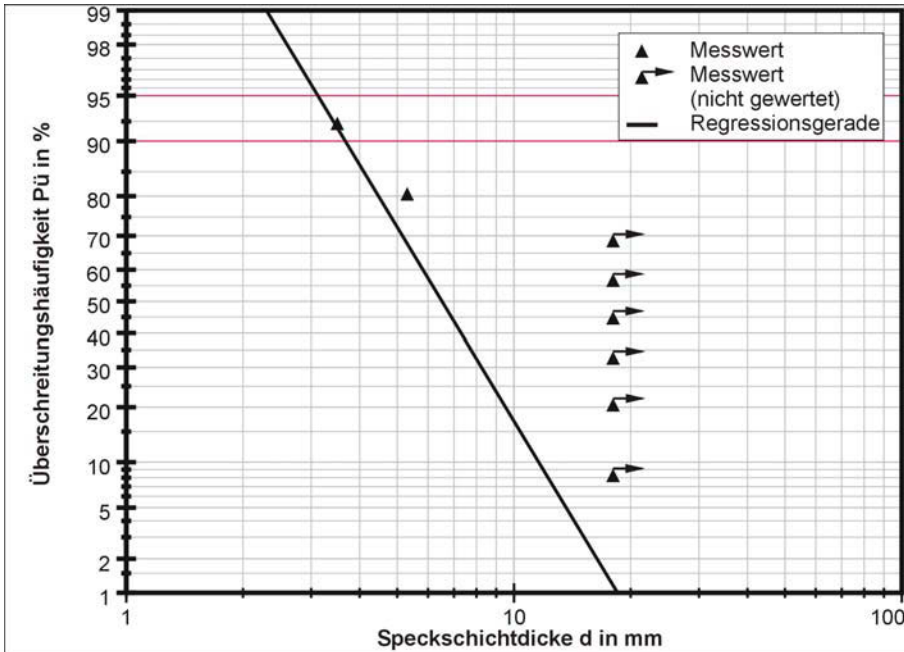


Bild 9–6: NP 24 x = 0,33 außen

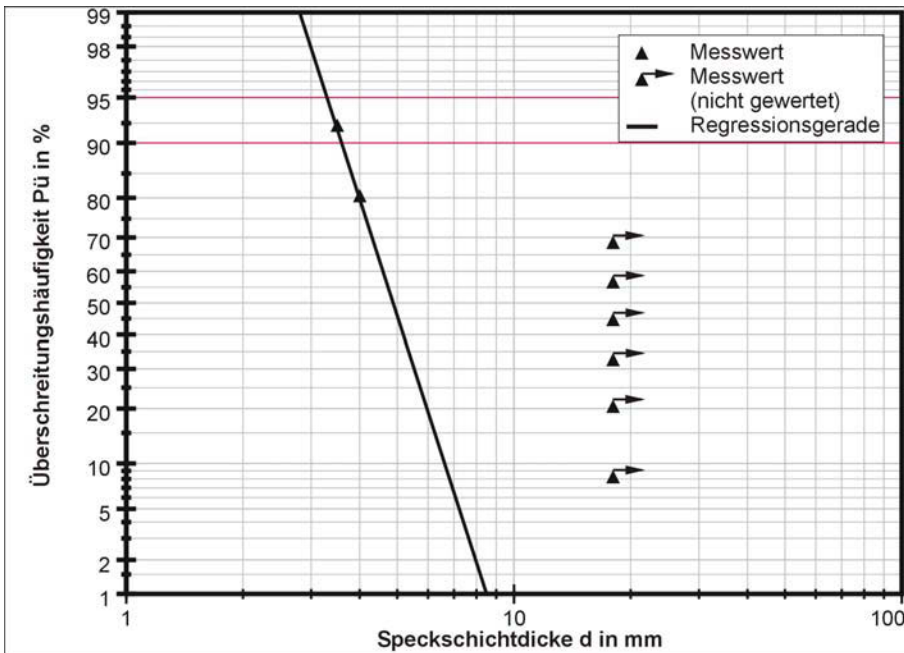


Bild 9–7: NP24 x=0,5 außen



9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang  
 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

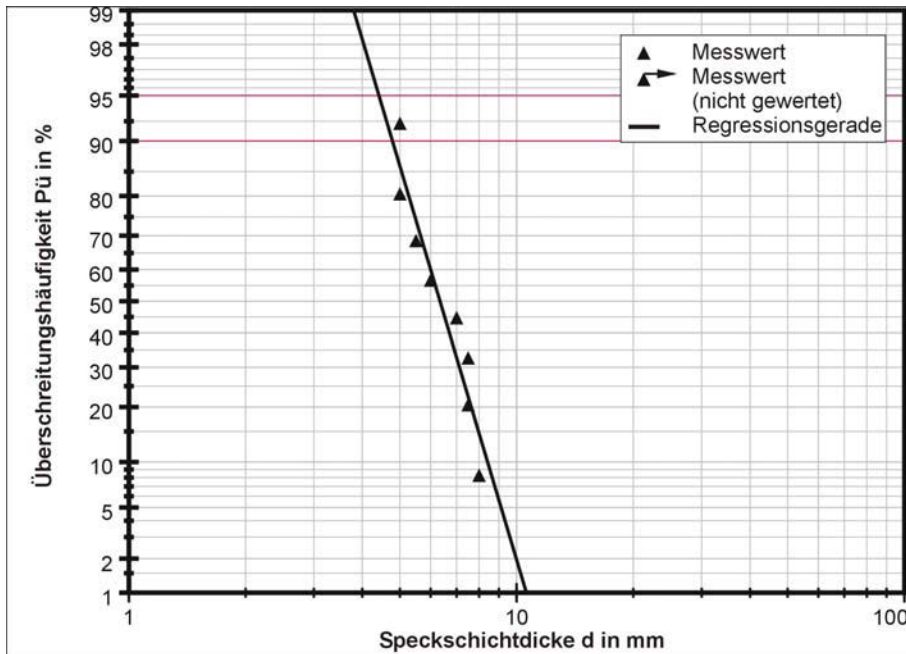


Bild 9–8: NP24 x=0,75 außen

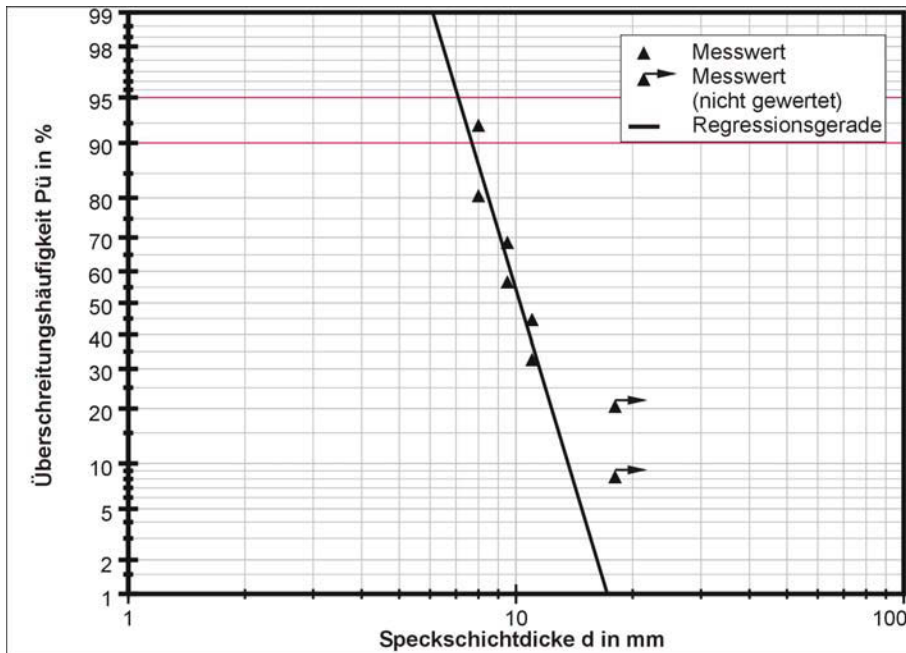


Bild 9–9: NP24 x=1 außen

## 9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

### 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

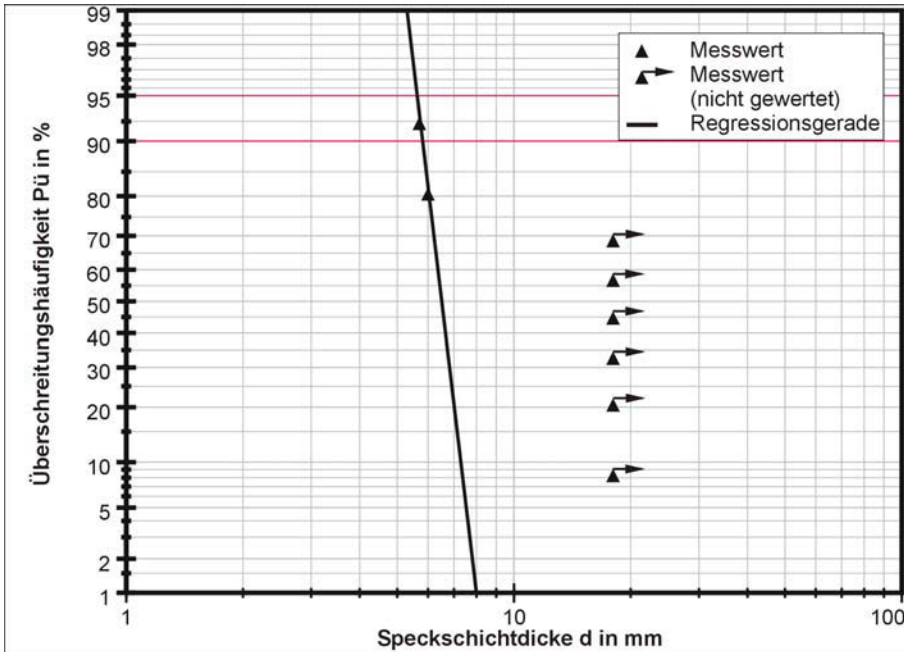


Bild 9–10: NP28  $x = 0,16$  innen

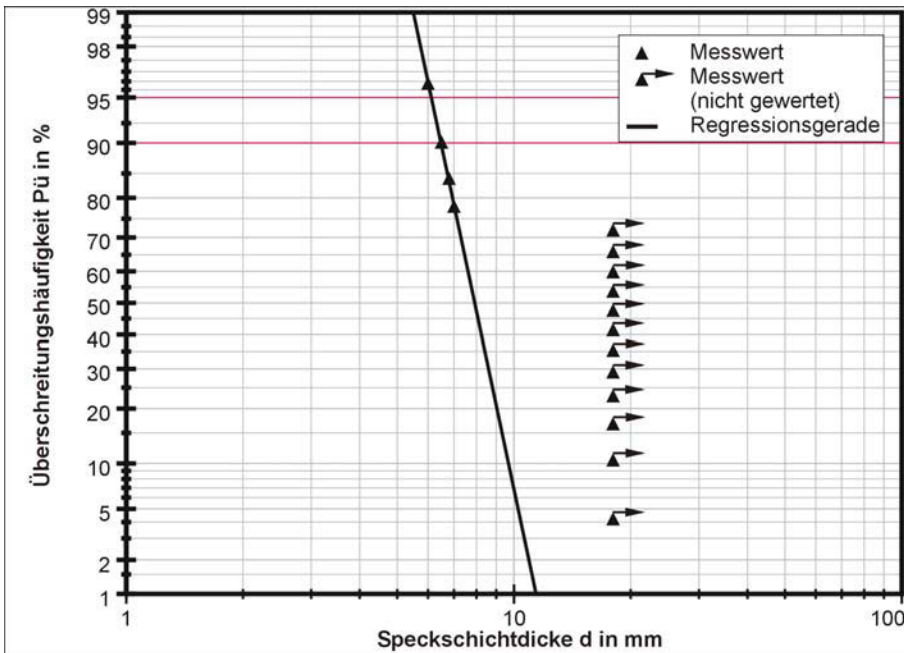


Bild 9–11: NP28  $x = 0,33$  innen

9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang  
 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

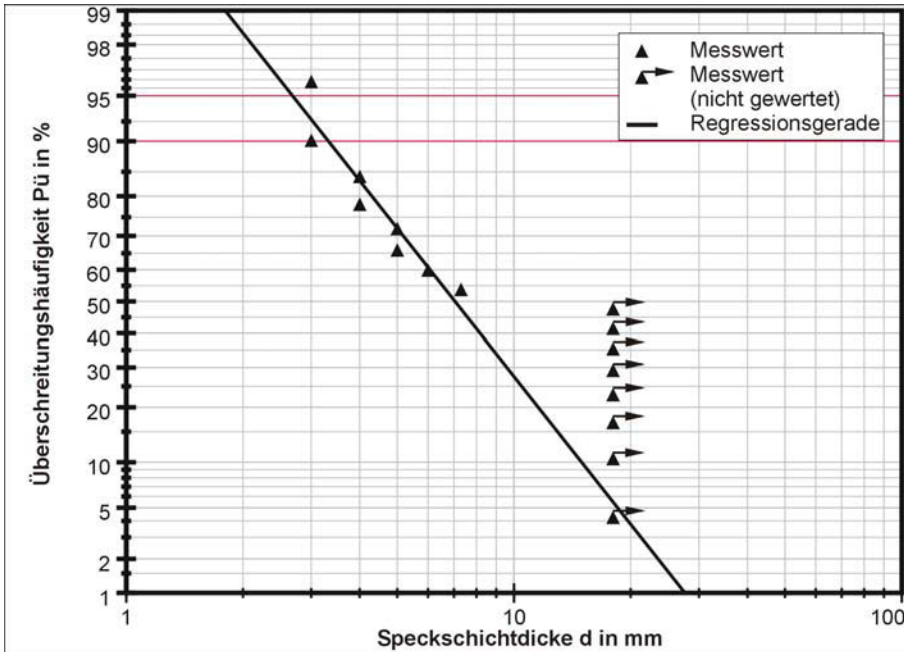


Bild 9–12: NP28 x=0,5 innen

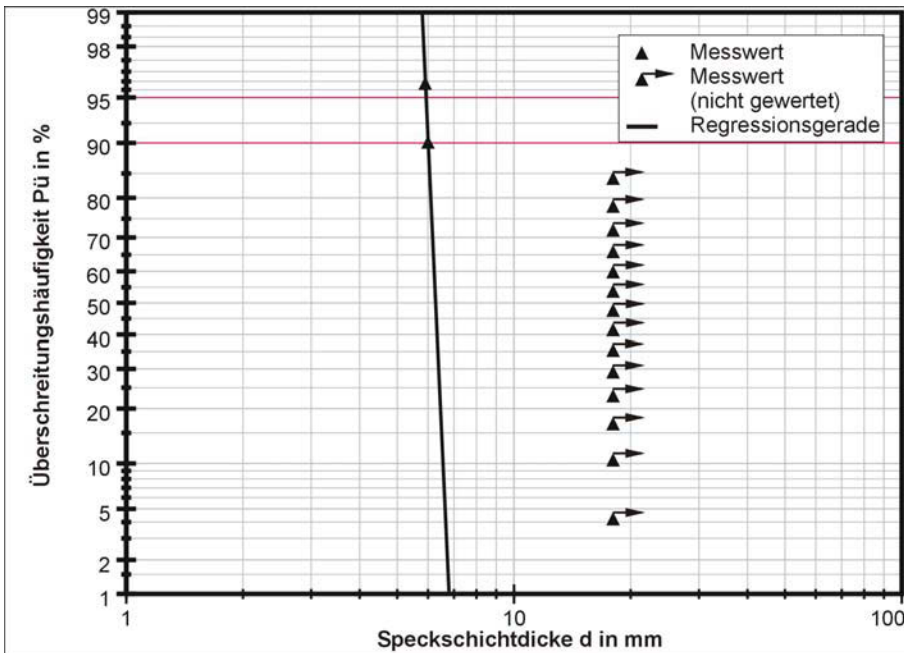


Bild 9–13: NP28 x = 0,16 außen

## 9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

### 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

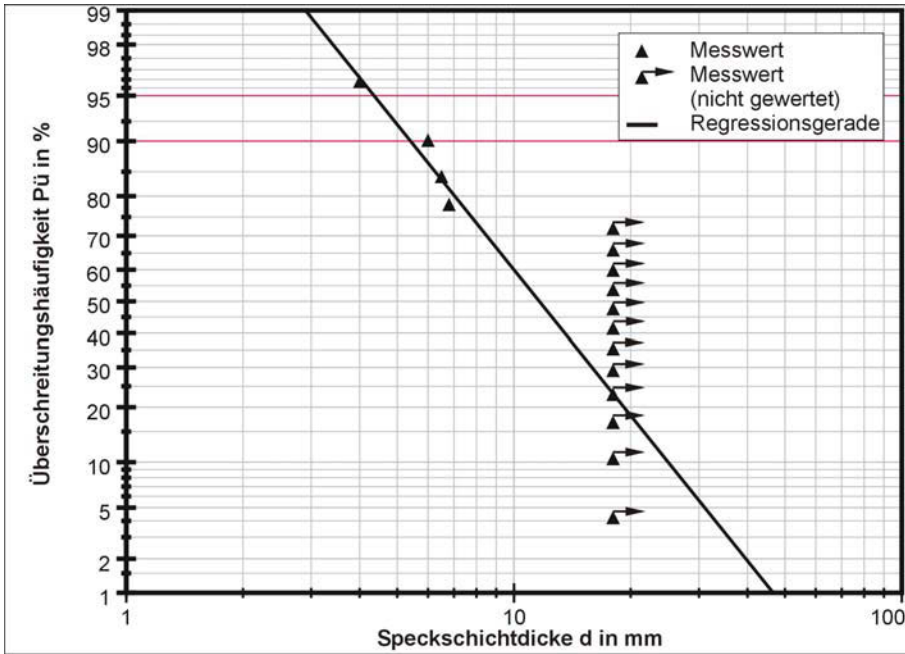


Bild 9–14: NP28  $x = 0,33$  außen

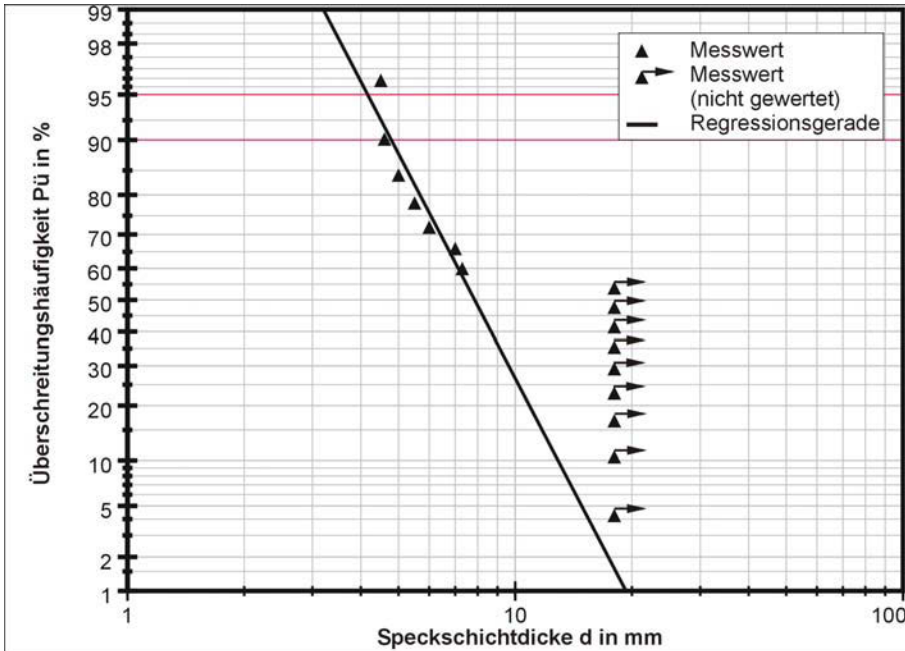


Bild 9–15: NP28  $x = 0,5$  außen

9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang  
 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

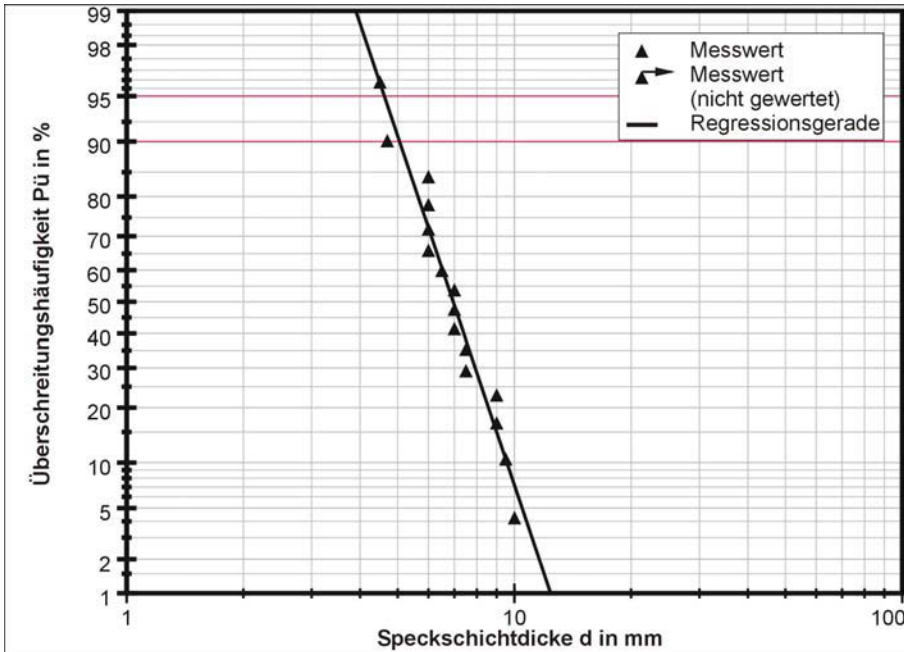


Bild 9–16: NP28  $x=0,75$  außen

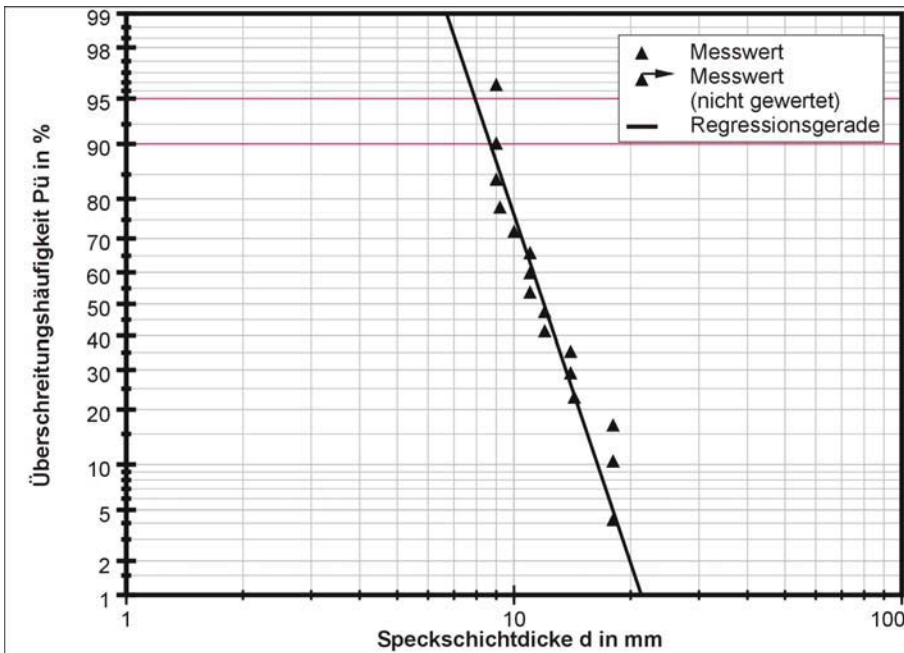


Bild 9–17: NP28  $x=1$  außen

## 9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

### 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

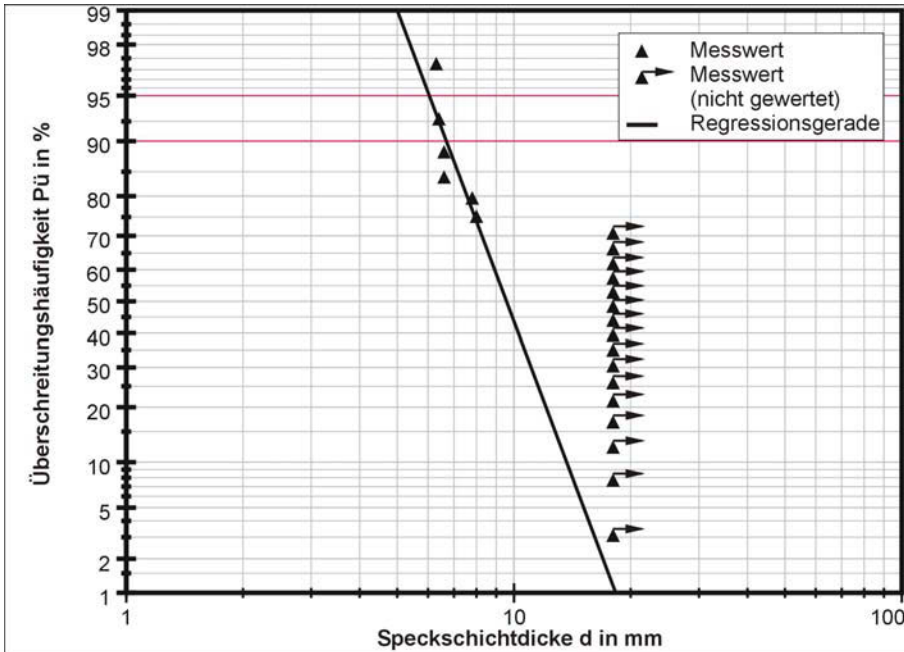


Bild 9–18: NP32  $x = 0,16$  innen

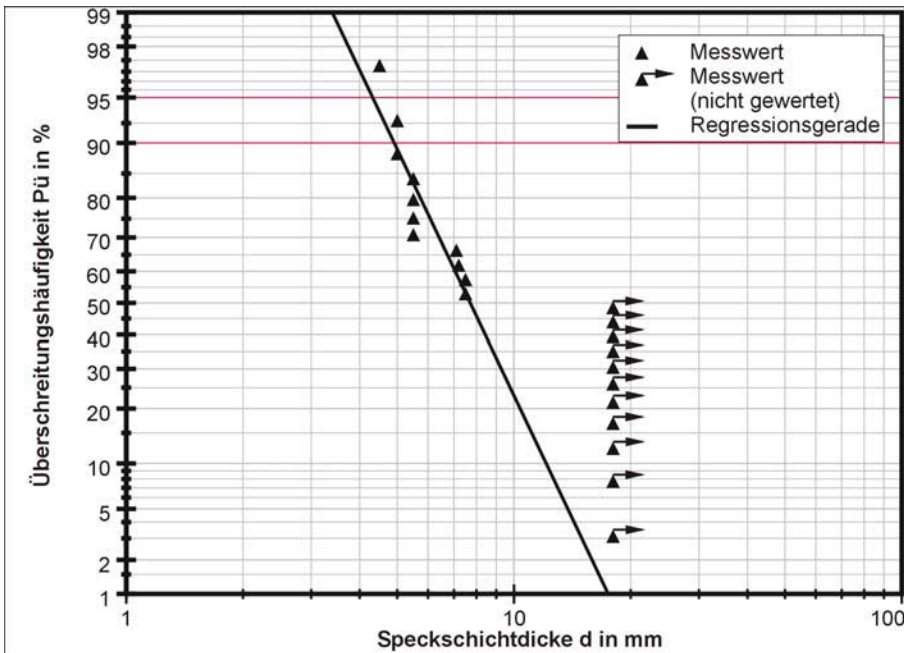


Bild 9–19: NP32  $x = 0,33$  innen

9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang  
 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

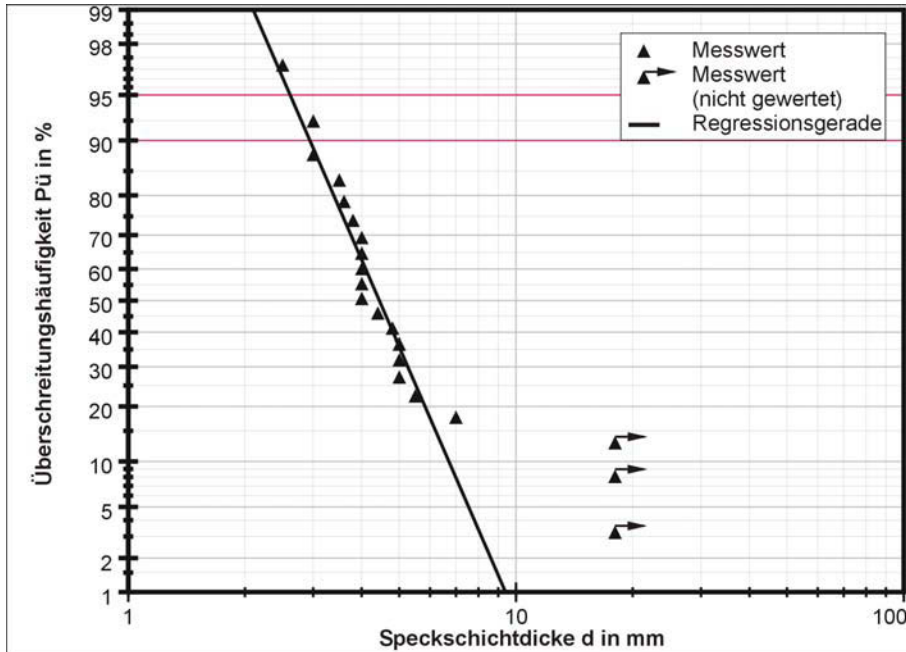


Bild 9–20: NP32  $x=0,5$  innen

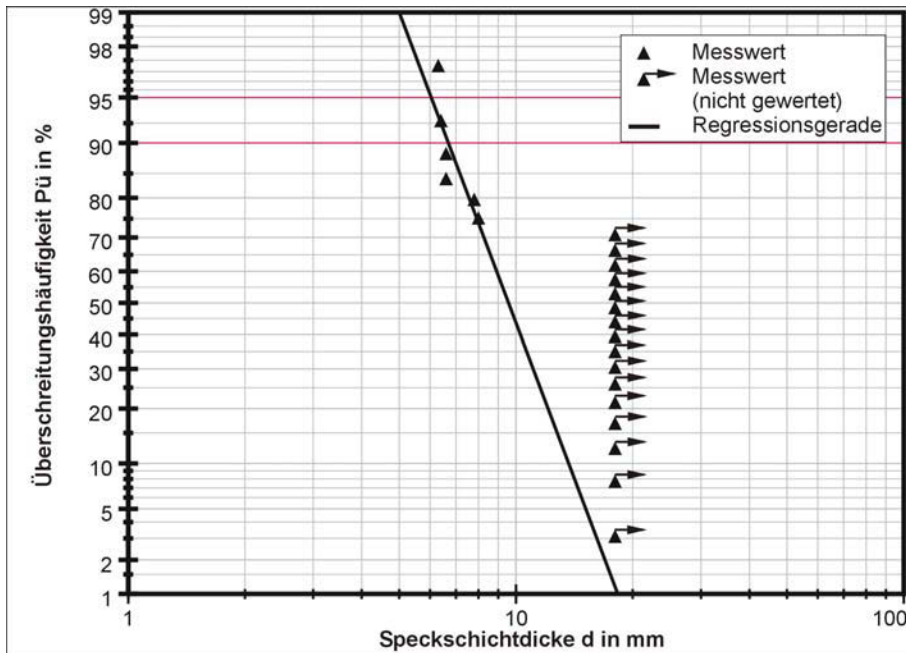


Bild 9–21: NP32  $x = 0,16$  außen

## 9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

### 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

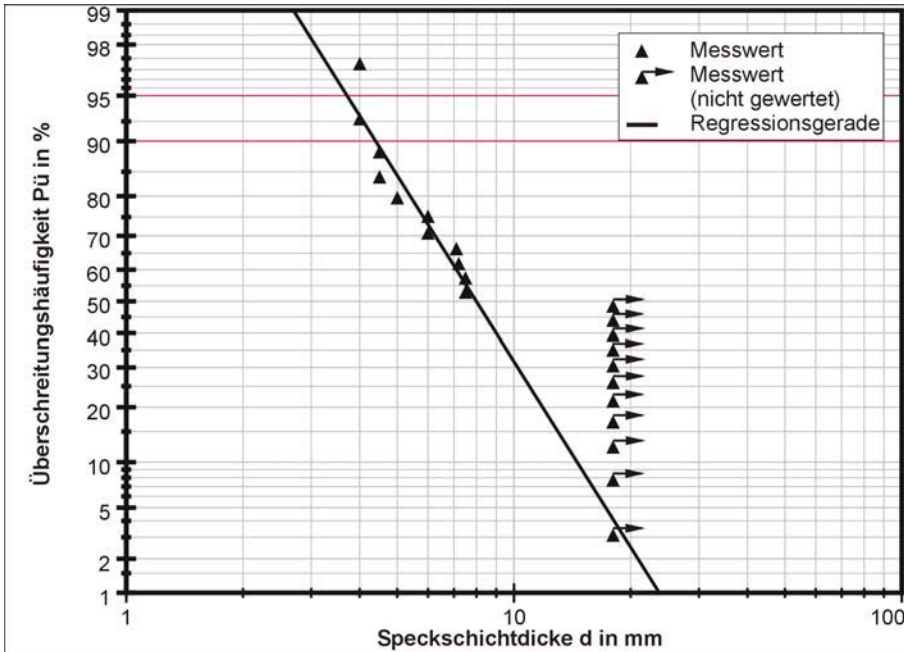


Bild 9–22: NP32  $x = 0,33$  außen

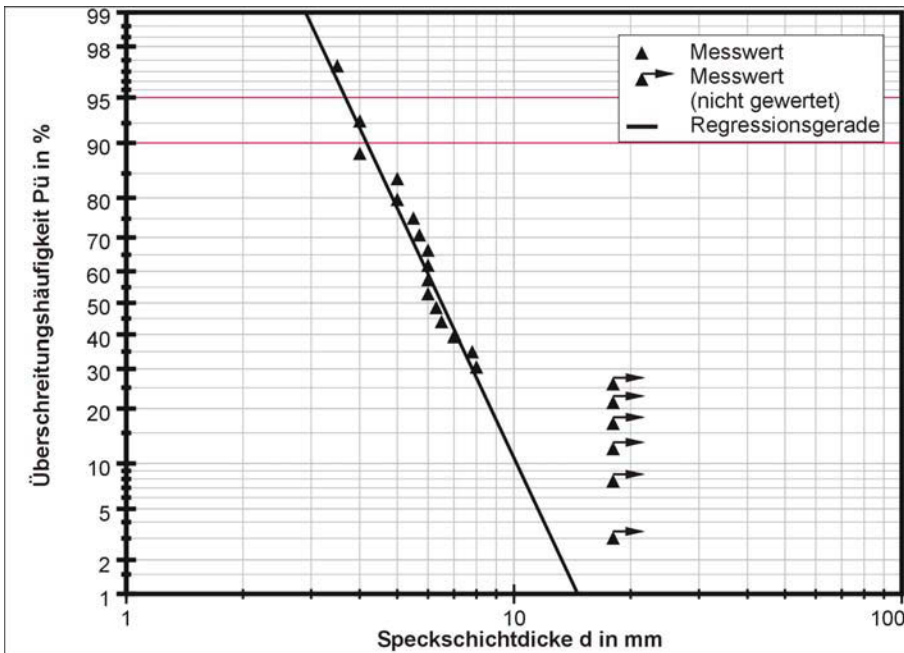


Bild 9–23: NP32  $x=0,5$  außen



9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang  
 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

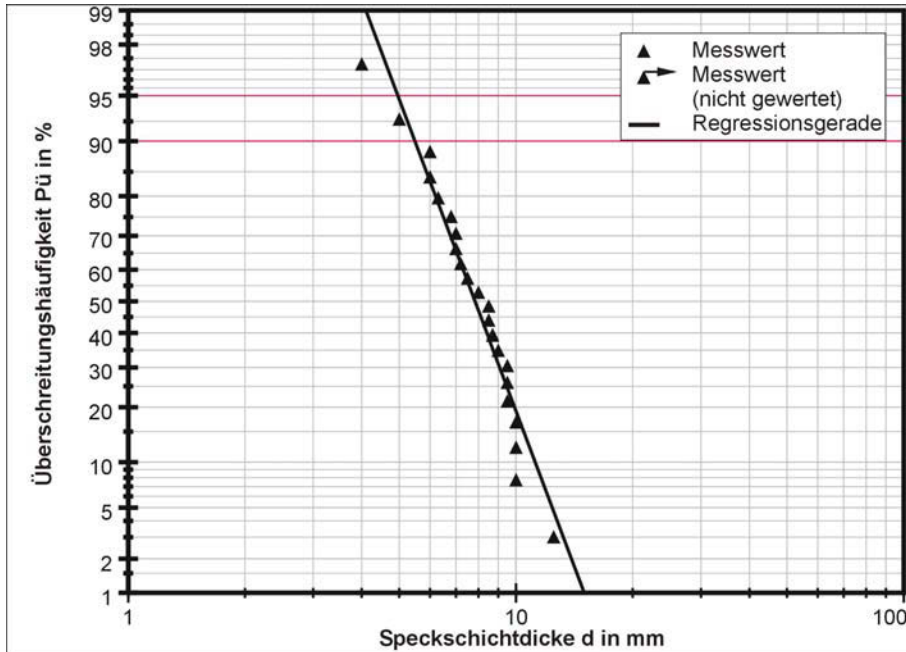


Bild 9–24: NP32  $x=0,75$  außen

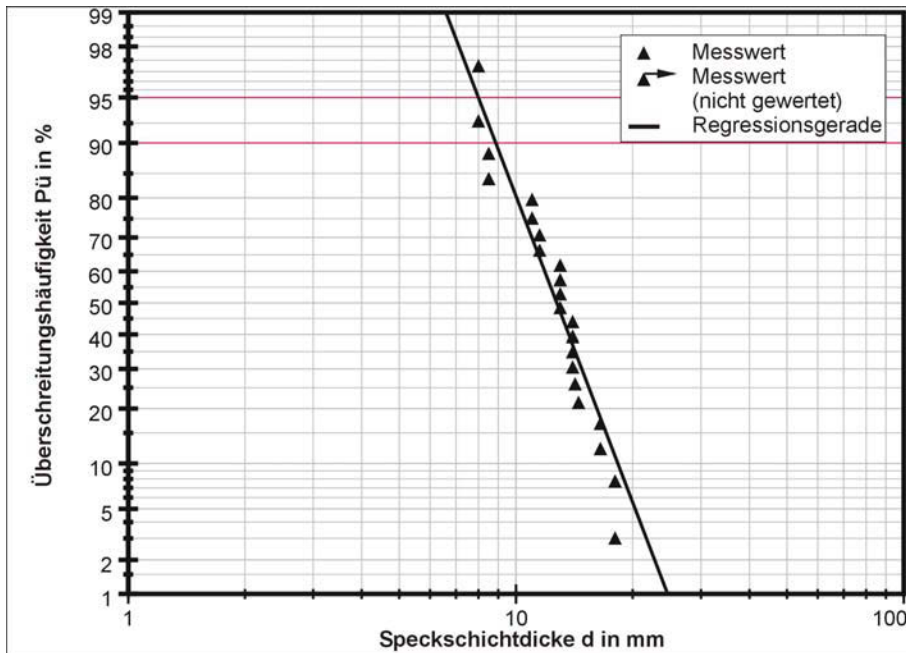


Bild 9–25: NP32  $x=1$  außen

## 9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

### 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

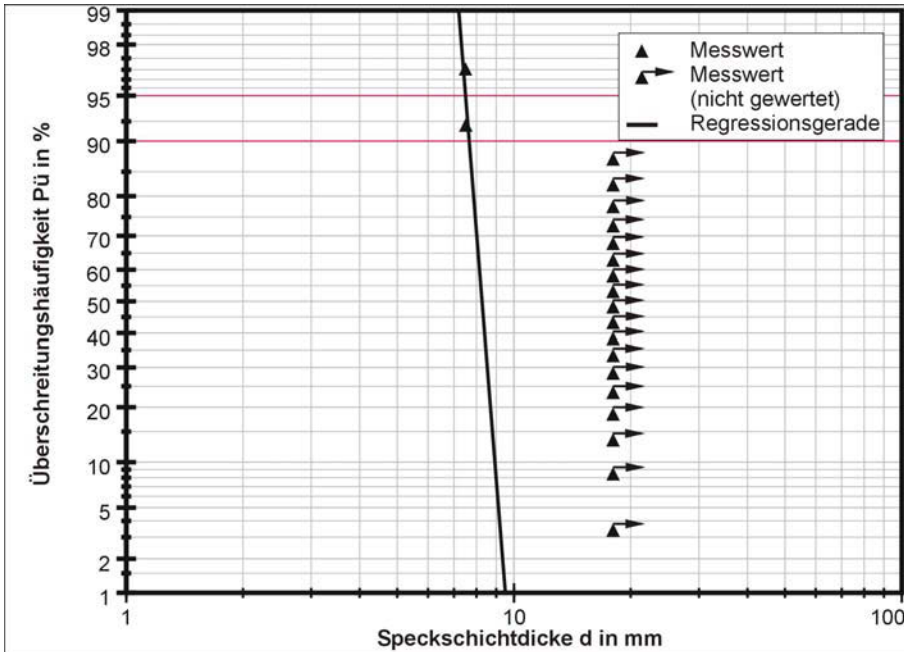


Bild 9–26: NP34  $x = 0,16$  innen

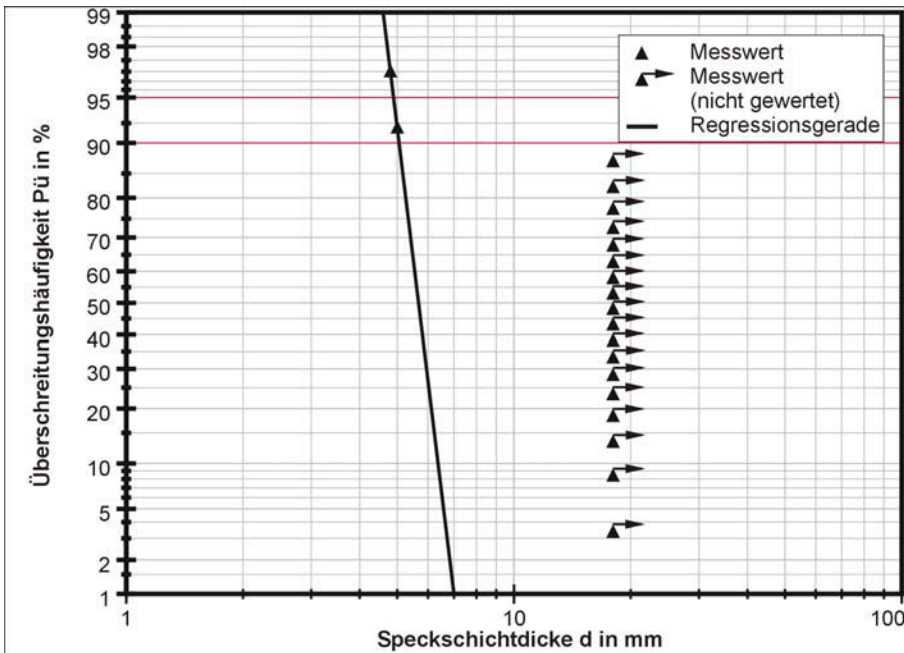


Bild 9–27: NP34  $x = 0,33$  innen

9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang  
 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

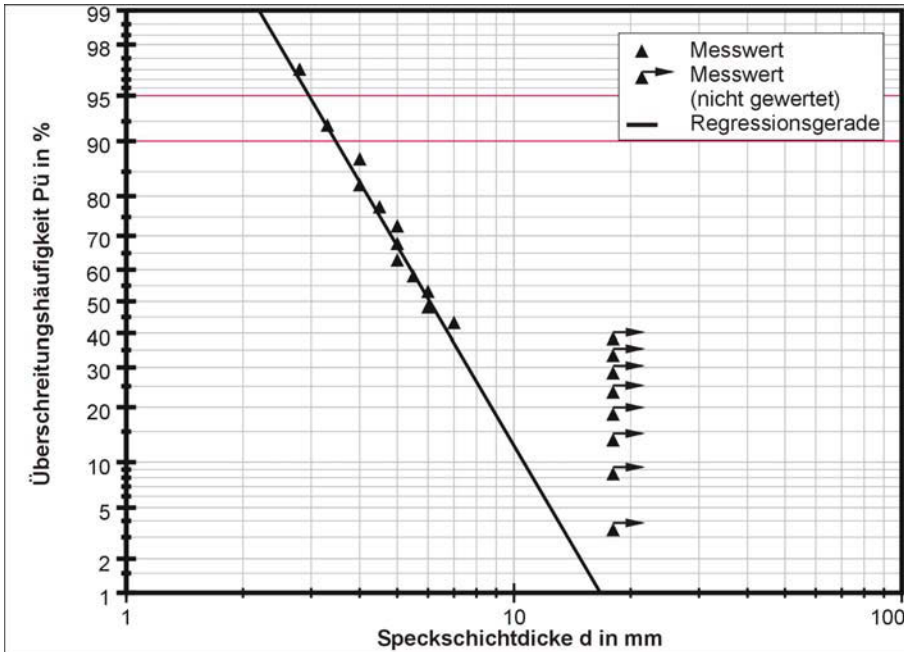


Bild 9–28: NP34  $x=0,5$  innen

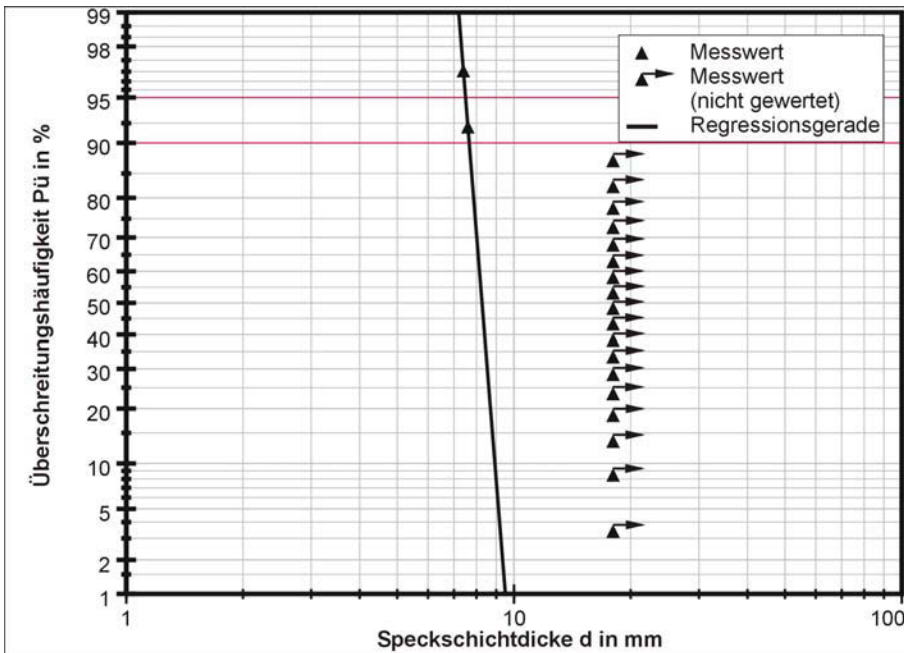


Bild 9–29: NP34  $x = 0,16$  außen

## 9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

### 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

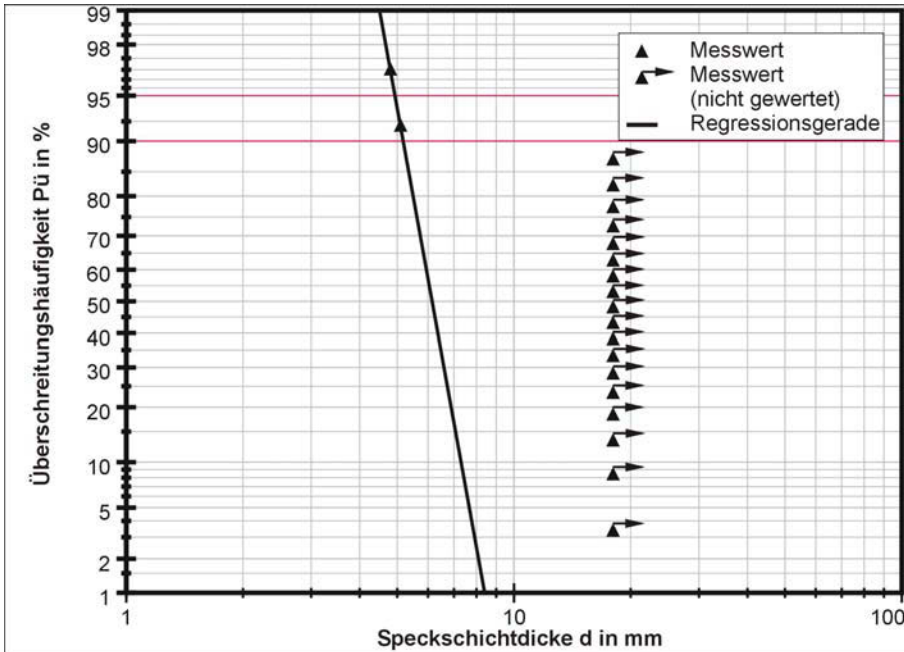


Bild 9–30: NP34  $x = 0,33$  außen

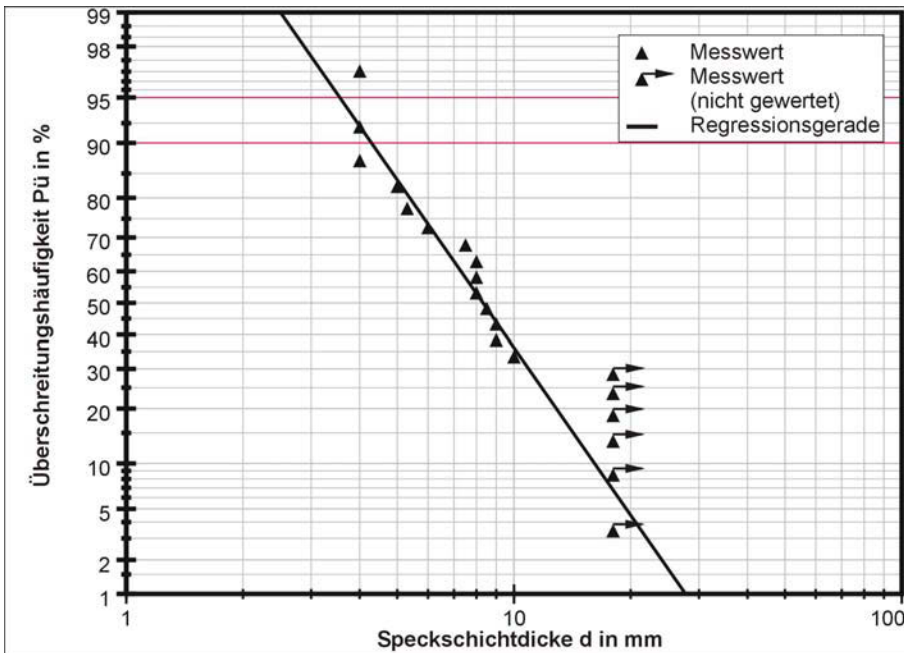


Bild 9–31: NP34  $x=0,5$  außen

9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang  
 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

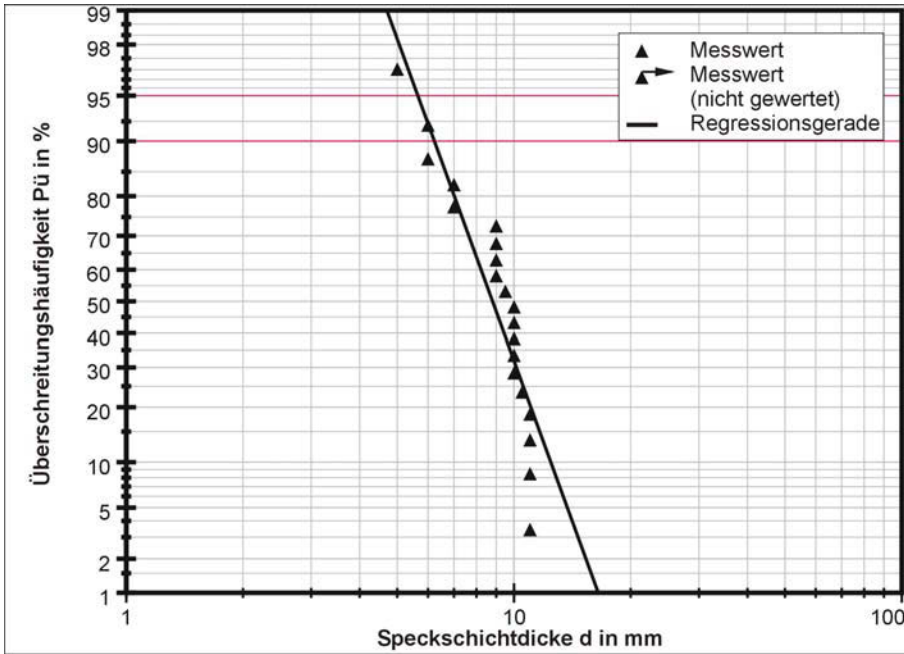


Bild 9–32: NP34  $x=0,75$  außen

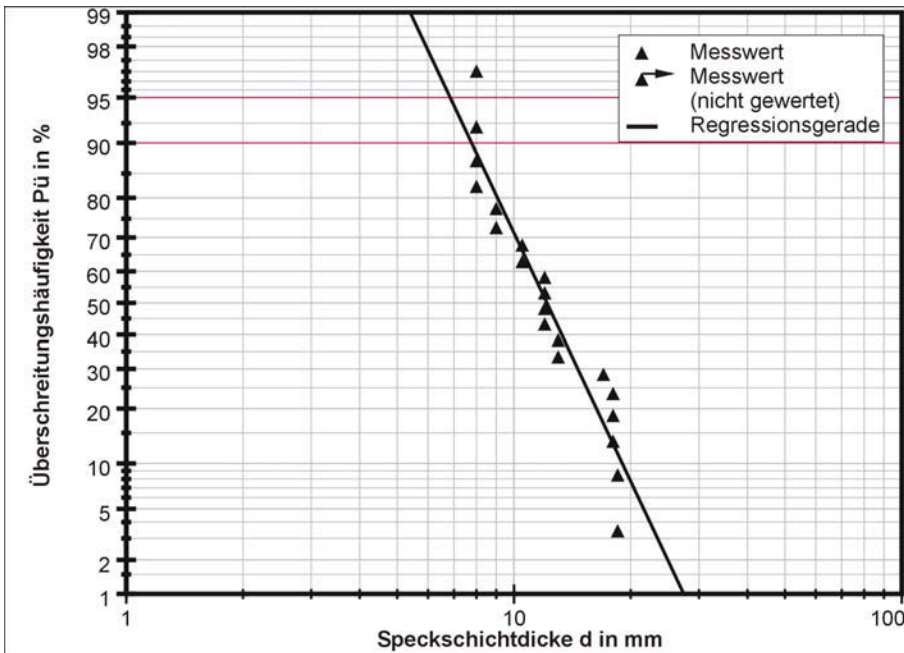


Bild 9–33: NP34  $x=1$  außen

## 9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

### 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

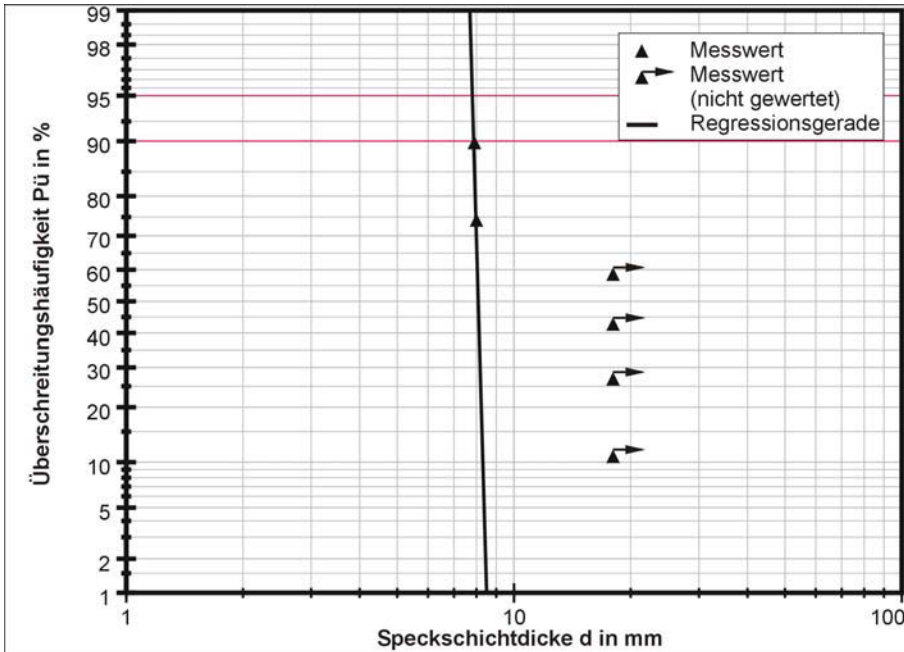


Bild 9–34: NP36  $x = 0,16$  innen

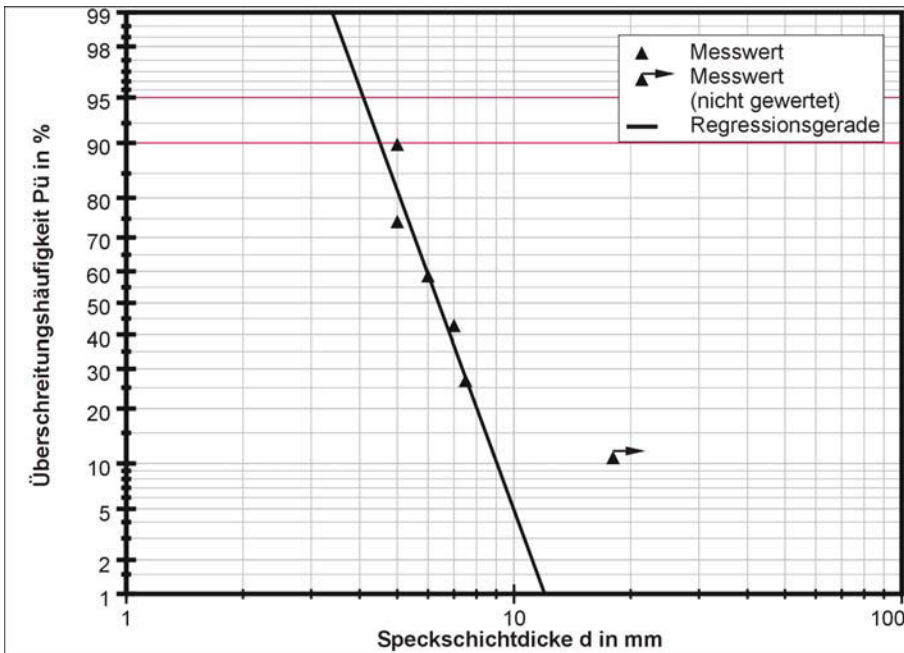


Bild 9–35: NP36  $x = 0,33$  innen

9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang  
 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

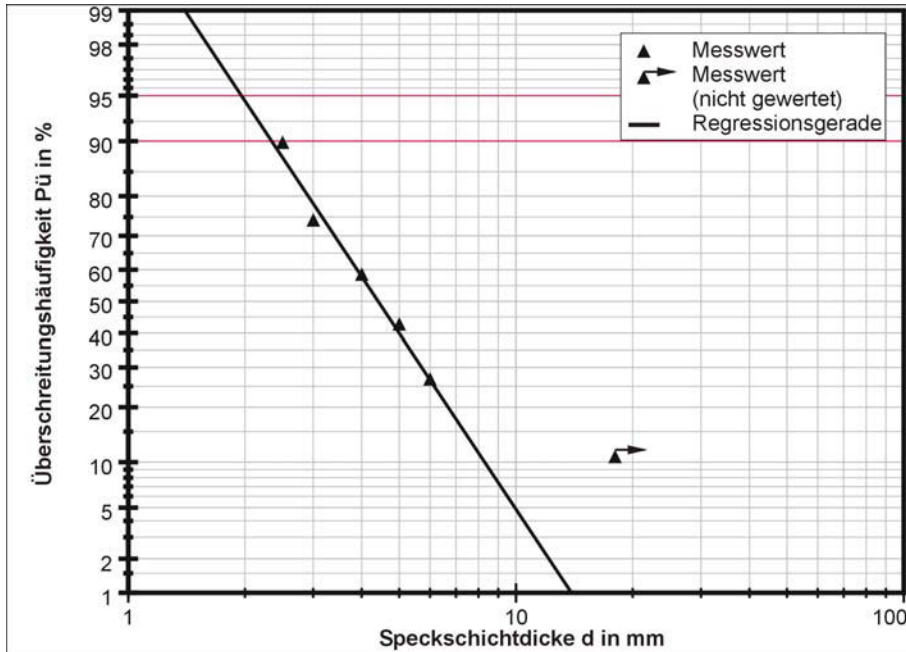


Bild 9–36: NP36 x=0,5 innen

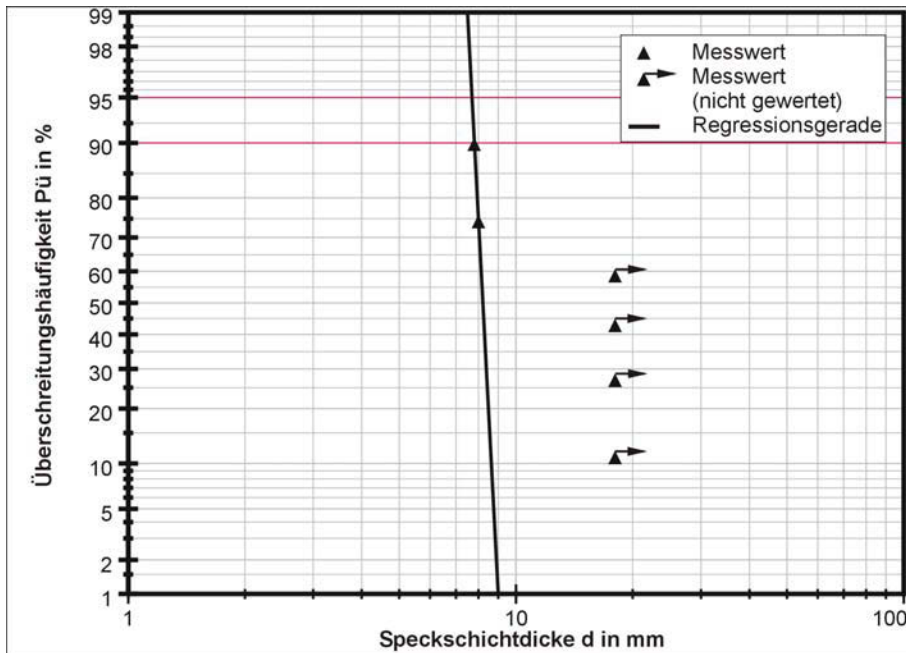


Bild 9–37: NP36 x = 0,16 außen

## 9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang

### 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

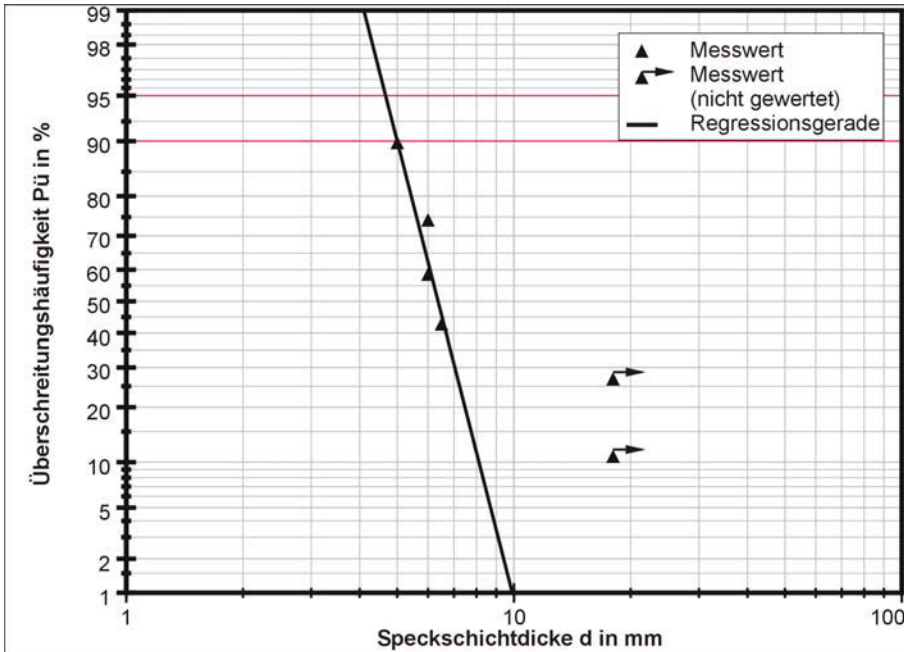


Bild 9–38: NP36  $x = 0,33$  außen

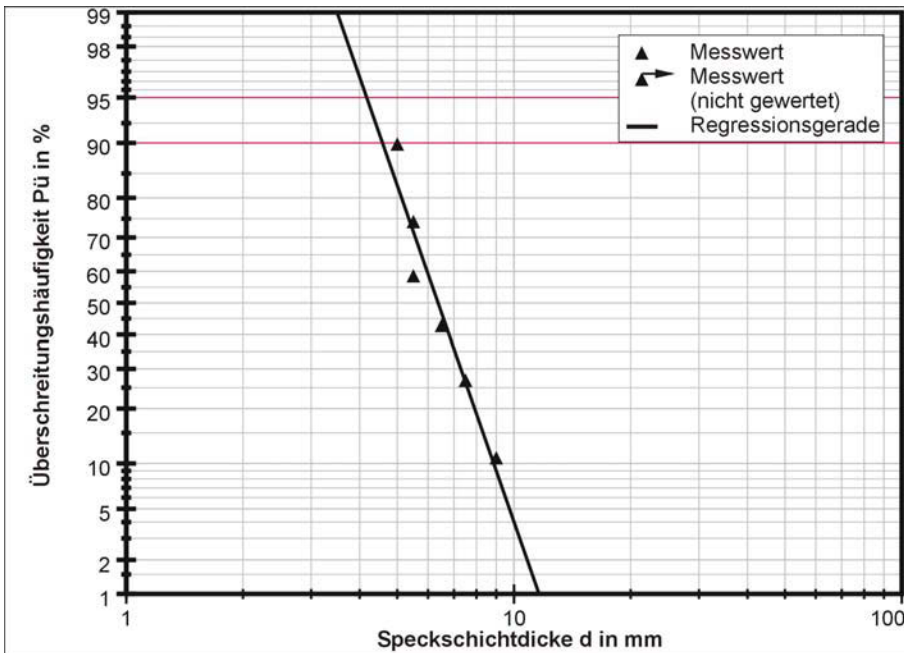


Bild 9–39: NP36  $x=0,5$  außen



9 Untersuchungen an Flusstahl – Anhang  
 9.1 Speckschichtdickenbestimmung an Flusstählen

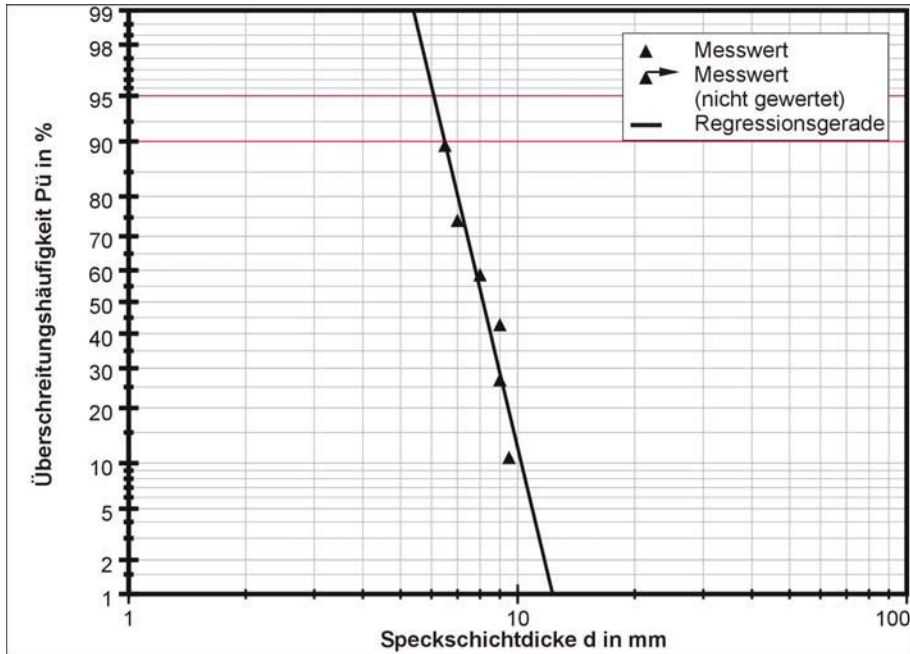


Bild 9–40: NP36 x=0,75 außen

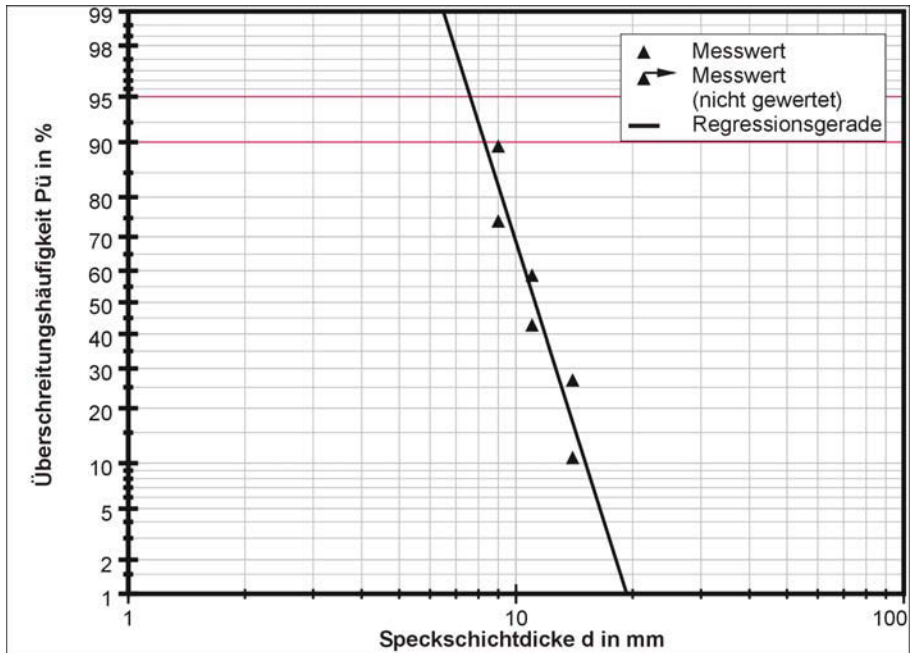


Bild 9–41: NP36 x=1 außen

## 10 Fügen durch Schweißen – Anhang

### 10.1 Experimentelle Ermittlung von Einbrandtiefen

---

## 10 Fügen durch Schweißen – Anhang

### 10.1 Experimentelle Ermittlung von Einbrandtiefen

#### 10.1.1 Messwerte der Einbrandtiefen

In den nachfolgenden Bildern werden die im Laborversuch ermittelten Einbrandtiefen anhand des angefertigten Schiffs dargestellt.

Für alle folgenden Bilder des Anhangs gilt:

- d ... Stabelektrorendurchmesser
- I ... mittlere Stromstärke
- U ... mittlere elektrische Spannung
- v ... mittlere Geschwindigkeit

$D_{WEZ}$  ... Tiefe der WEZ, einschließlich Einbrand, gemessen ab Oberfläche des Bleches

$D_{Einbr.}$  ... Tiefe des Einbrandes, gemessen ab Oberfläche des Blechs

**10 Fügen durch Schweißen – Anhang**  
10.1 Experimentelle Ermittlung von Einbrandtiefen

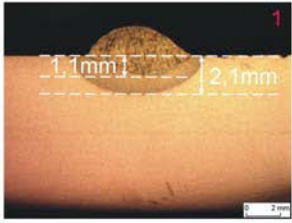
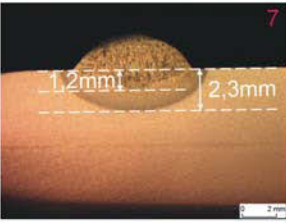
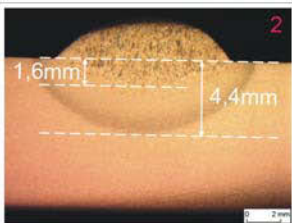
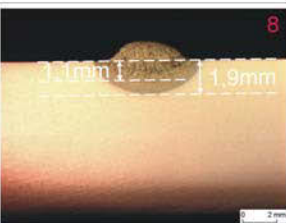
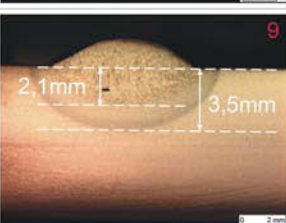

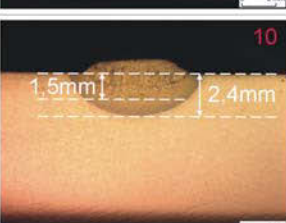
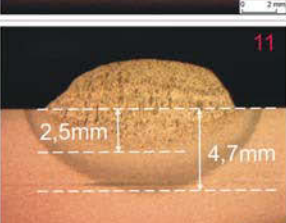
	<p><math>d = 2,5\text{mm}</math>  <math>I = 104,5\text{ A}</math>  <math>U = 23,8\text{ V}</math>  <math>v = 0,35\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,1\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,1\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 2,5\text{mm}</math>  <math>I = 93,7\text{ A}</math>  <math>U = 22,0\text{ V}</math>  <math>v = 0,25\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,3\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,2\text{mm}</math></p>	
	<p><math>d = 2,5\text{mm}</math>  <math>I = 104,4\text{ A}</math>  <math>U = 23,6\text{ V}</math>  <math>v = 0,17\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 4,4\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,6\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 2,5\text{mm}</math>  <math>I = 93,7\text{ A}</math>  <math>U = 22,1\text{ V}</math>  <math>v = 0,59\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 1,9\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,1\text{mm}</math></p>	
	<p><math>d = 2,5\text{mm}</math>  <math>I = 104,2\text{ A}</math>  <math>U = 24,3\text{ V}</math>  <math>v = 0,15\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 4,6\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,6\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 2,5\text{mm}</math>  <math>I = 118,3\text{ A}</math>  <math>U = 25,4\text{ V}</math>  <math>v = 0,34\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 3,5\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 2,1\text{mm}</math></p>	
	<p><math>d = 2,5\text{mm}</math>  <math>I = 104,1\text{ A}</math>  <math>U = 23,7\text{ V}</math>  <math>v = 0,53\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 1,9\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,0\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 2,5\text{mm}</math>  <math>I = 118,3\text{ A}</math>  <math>U = 24,0\text{ V}</math>  <math>v = 0,63\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,4\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,5\text{mm}</math></p>	
	<p><math>d = 2,5\text{mm}</math>  <math>I = 104,3\text{ A}</math>  <math>U = 23,3\text{ V}</math>  <math>v = 0,67\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 1,8\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,3\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 2,5\text{mm}</math>  <math>I = 118,3\text{ A}</math>  <math>U = 25,4\text{ V}</math>  <math>v = 0,17\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 4,7\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 2,5\text{mm}</math></p>	
	<p><math>d = 2,5\text{mm}</math>  <math>I = 93,6\text{ A}</math>  <math>U = 22,9\text{ V}</math>  <math>v = 0,23\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 3,0\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,0\text{mm}</math></p>		

Bild 10–1: Einbrandtiefenbestimmung – Blechdicke = 10 mm, Schweißposition PA

## 10 Fügen durch Schweißen – Anhang

### 10.1 Experimentelle Ermittlung von Einbrandtiefen

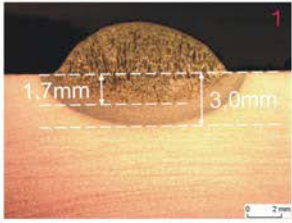
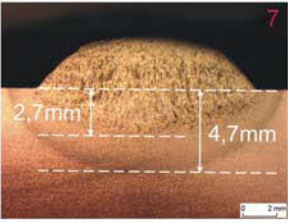
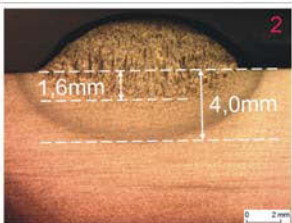
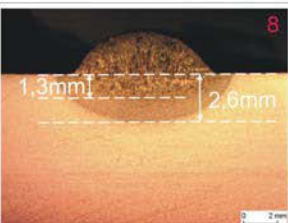

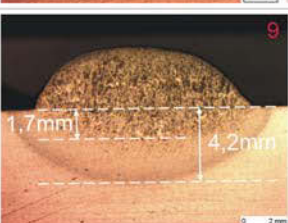


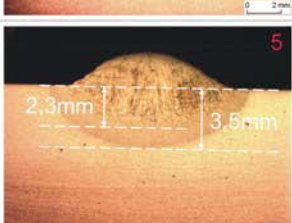
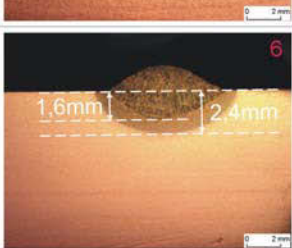
	<p><b>1</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 132,2\text{ A}</math>  <math>U = 23,1\text{ V}</math>  <math>v = 0,24\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 3,0\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,7\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 151,4\text{ A}</math>  <math>U = 24,3\text{ V}</math>  <math>v = 0,19\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 4,7\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 2,7\text{mm}</math></p>	
	<p><b>2</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 132,3\text{ A}</math>  <math>U = 22,3\text{ V}</math>  <math>v = 0,17\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 4,0\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,6\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 112,5\text{ A}</math>  <math>U = 23,7\text{ V}</math>  <math>v = 0,24\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,6\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,3\text{mm}</math></p>	
	<p><b>3</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 132,3\text{ A}</math>  <math>U = 22,3\text{ V}</math>  <math>v = 0,52\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,2\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,3\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 118,3\text{ A}</math>  <math>U = 22,9\text{ V}</math>  <math>v = 0,15\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 4,2\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,7\text{mm}</math></p>	
	<p><b>4</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 132,2\text{ A}</math>  <math>U = 23,7\text{ V}</math>  <math>v = 0,39\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,7\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,3\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 112,4\text{ A}</math>  <math>U = 22,8\text{ V}</math>  <math>v = 0,73\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 1,7\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,0\text{mm}</math></p>	
	<p><b>5</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 151,2\text{ A}</math>  <math>U = 24,8\text{ V}</math>  <math>v = 0,29\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 3,5\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 2,3\text{mm}</math></p>		
	<p><b>6</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 151,4\text{ A}</math>  <math>U = 24,7\text{ V}</math>  <math>v = 0,61\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,4\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,6\text{mm}</math></p>		

Bild 10–2: Einbrandtiefenbestimmung – Blechdicke = 10 mm, Schweißposition PA

10 Fügen durch Schweißen – Anhang  
10.1 Experimentelle Ermittlung von Einbrandtiefen

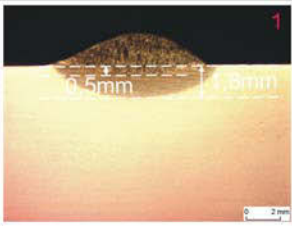
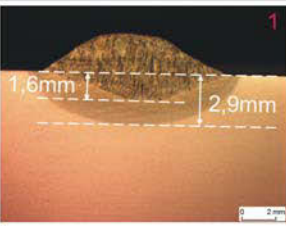
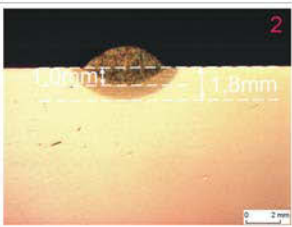
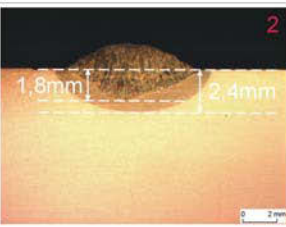
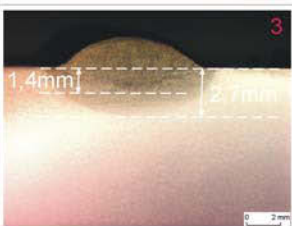


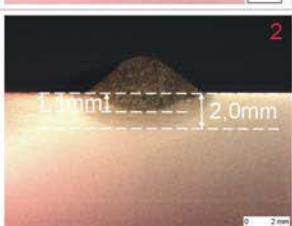
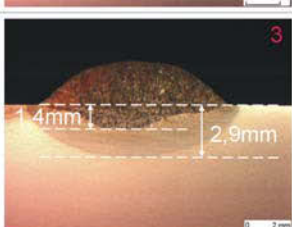
	<p><b>d = 2,5mm</b> I = 106,9 A U = 25,1 V v = 0,38 cm/s</p> <p><b>D<sub>WEZ</sub> = 1,8mm</b> <b>D<sub>Einbr.</sub> = 0,5mm</b></p>	<p><b>d = 4,00mm</b> I = 166,7 A U = 22,6 V v = 0,29 cm/s</p> <p><b>D<sub>WEZ</sub> = 2,9mm</b> <b>D<sub>Einbr.</sub> = 1,6mm</b></p>	
	<p><b>d = 2,5mm</b> I = 106,9 A U = 25,1 V v = 0,77 cm/s</p> <p><b>D<sub>WEZ</sub> = 1,8mm</b> <b>D<sub>Einbr.</sub> = 1,0mm</b></p>	<p><b>d = 4,00mm</b> I = 167,0 A U = 22,1 V v = 0,66 cm/s</p> <p><b>D<sub>WEZ</sub> = 2,4mm</b> <b>D<sub>Einbr.</sub> = 1,8mm</b></p>	
	<p><b>d = 2,5mm</b> I = 107,1 A U = 22,9 V v = 0,28 cm/s</p> <p><b>D<sub>WEZ</sub> = 2,7mm</b> <b>D<sub>Einbr.</sub> = 1,4mm</b></p>	<p><b>d = 4,00mm</b> I = 166,8 A U = 22,4 V v = 0,23 cm/s</p> <p><b>D<sub>WEZ</sub> = 3,5mm</b> <b>D<sub>Einbr.</sub> = 1,7mm</b></p>	
	<p><b>d = 3,25mm</b> I = 132,0 A U = 22,9 V v = 0,38 cm/s</p> <p><b>D<sub>WEZ</sub> = 2,4mm</b> <b>D<sub>Einbr.</sub> = 1,1mm</b></p>		
	<p><b>d = 3,25mm</b> I = 131,9 A U = 22,9 V v = 0,65 cm/s</p> <p><b>D<sub>WEZ</sub> = 2,0mm</b> <b>D<sub>Einbr.</sub> = 1,1mm</b></p>		
	<p><b>d = 3,25mm</b> I = 131,9 A U = 23,7 V v = 0,23 cm/s</p> <p><b>D<sub>WEZ</sub> = 2,9mm</b> <b>D<sub>Einbr.</sub> = 1,4mm</b></p>		

Bild 10–3: Einbrandtiefenbestimmung – Blechdicke = 30 mm, Schweißposition PA

## 10 Fügen durch Schweißen – Anhang

### 10.1 Experimentelle Ermittlung von Einbrandtiefen

	<p><b>1</b></p> <p><math>d = 2,5\text{ mm}</math>  <math>I = 113,1\text{ A}</math>  <math>U = 23,5\text{ V}</math>  <math>v = 0,23\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,1\text{ mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,0\text{ mm}</math></p>	<p><math>d = 2,5\text{ mm}</math>  <math>I = 104,0\text{ A}</math>  <math>U = 26,0\text{ V}</math>  <math>v = 0,30\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 1,9\text{ mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,0\text{ mm}</math></p>	
	<p><b>2</b></p> <p><math>d = 2,5\text{ mm}</math>  <math>I = 113,1\text{ A}</math>  <math>U = 28,0\text{ V}</math>  <math>v = 0,45\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,1\text{ mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,4\text{ mm}</math></p>	<p><math>d = 2,5\text{ mm}</math>  <math>I = 103,9\text{ A}</math>  <math>U = 25,4\text{ V}</math>  <math>v = 0,44\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 1,9\text{ mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,2\text{ mm}</math></p>	
	<p><b>3</b></p> <p><math>d = 2,5\text{ mm}</math>  <math>I = 112,9\text{ A}</math>  <math>U = 26,0\text{ V}</math>  <math>v = 0,17\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,5\text{ mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,3\text{ mm}</math></p>	<p><math>d = 2,5\text{ mm}</math>  <math>I = 103,9\text{ A}</math>  <math>U = 24,3\text{ V}</math>  <math>v = 0,19\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,6\text{ mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,2\text{ mm}</math></p>	
	<p><b>4</b></p> <p><math>d = 2,5\text{ mm}</math>  <math>I = 121,9\text{ A}</math>  <math>U = 29,1\text{ V}</math>  <math>v = 0,33\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,5\text{ mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,4\text{ mm}</math></p>		
	<p><b>5</b></p> <p><math>d = 2,5\text{ mm}</math>  <math>I = 121,9\text{ A}</math>  <math>U = 29,1\text{ V}</math>  <math>v = 0,45\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,6\text{ mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,5\text{ mm}</math></p>		
	<p><b>6</b></p> <p><math>d = 2,5\text{ mm}</math>  <math>I = 121,9\text{ A}</math>  <math>U = 29,6\text{ V}</math>  <math>v = 0,20\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,9\text{ mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,8\text{ mm}</math></p>		

Bild 10–4: Einbrandtiefenbestimmung – Blechdicke = 10 mm, Schweißposition PB

**10 Fügen durch Schweißen – Anhang**  
 10.1 Experimentelle Ermittlung von Einbrandtiefen

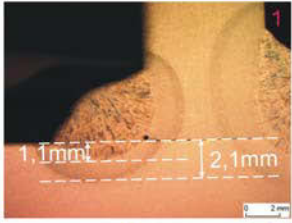
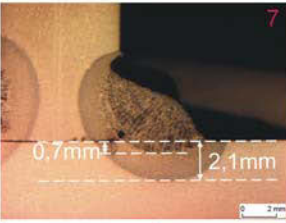
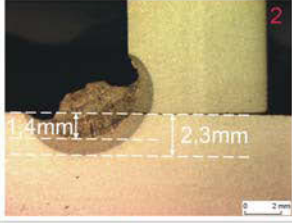
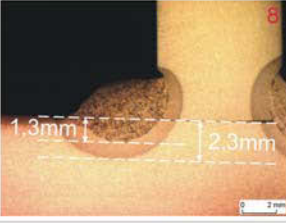
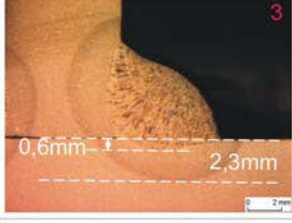
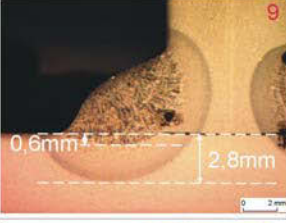
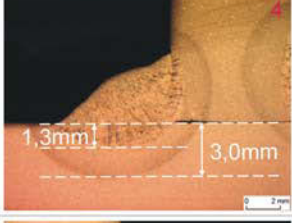
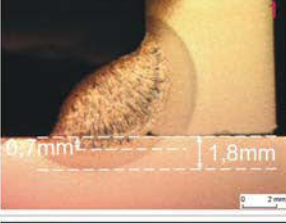
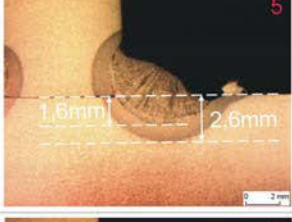
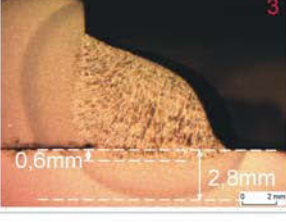

	<p><b>1</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 137,5\text{ A}</math>  <math>U = 24,2\text{ V}</math>  <math>v = 0,23\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,1\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,1\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 126,8\text{ A}</math>  <math>U = 23,6\text{ V}</math>  <math>v = 0,26\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,1\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 0,7\text{mm}</math></p>	
	<p><b>2</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 137,5\text{ A}</math>  <math>U = 25,8\text{ V}</math>  <math>v = 0,60\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,3\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,4\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 124,3\text{ A}</math>  <math>U = 25,1\text{ V}</math>  <math>v = 0,44\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,3\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,3\text{mm}</math></p>	
	<p><b>3</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 137,4\text{ A}</math>  <math>U = 23,4\text{ V}</math>  <math>v = 0,17\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,3\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 0,6\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 125,3\text{ A}</math>  <math>U = 24,4\text{ V}</math>  <math>v = 0,21\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,8\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 0,6\text{mm}</math></p>	
	<p><b>4</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 146,2\text{ A}</math>  <math>U = 25,4\text{ V}</math>  <math>v = 0,22\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 3,0\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,3\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 4,0\text{mm}</math>  <math>I = 167,0\text{ A}</math>  <math>U = 24,0\text{ V}</math>  <math>v = 0,27\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 1,8\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 0,7\text{mm}</math></p>	
	<p><b>5</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 146,2\text{ A}</math>  <math>U = 26,0\text{ V}</math>  <math>v = 0,55\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,6\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,6\text{mm}</math></p>	<p><math>d = 4,0\text{mm}</math>  <math>I = 167,0\text{ A}</math>  <math>U = 25,8\text{ V}</math>  <math>v = 0,21\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 2,8\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 0,6\text{mm}</math></p>	
	<p><b>6</b></p> <p><math>d = 3,25\text{mm}</math>  <math>I = 146,2\text{ A}</math>  <math>U = 24,0\text{ V}</math>  <math>v = 0,16\text{ cm/s}</math></p> <p><math>D_{\text{WEZ}} = 3,6\text{mm}</math>  <math>D_{\text{Einbr.}} = 1,2\text{mm}</math></p>		

Bild 10–5: Einbrandtiefenbestimmung – Blechdicke = 10 mm, Schweißposition PB

## 11 Experimentelle Verifikation – Anhang

### 11.1 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

## 11 Experimentelle Verifikation – Anhang

### 11.1 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

#### 11.1.1 Mechanisch-Technologische Eigenschaften des verwendeten Flusstahls

##### Arbeitslinie

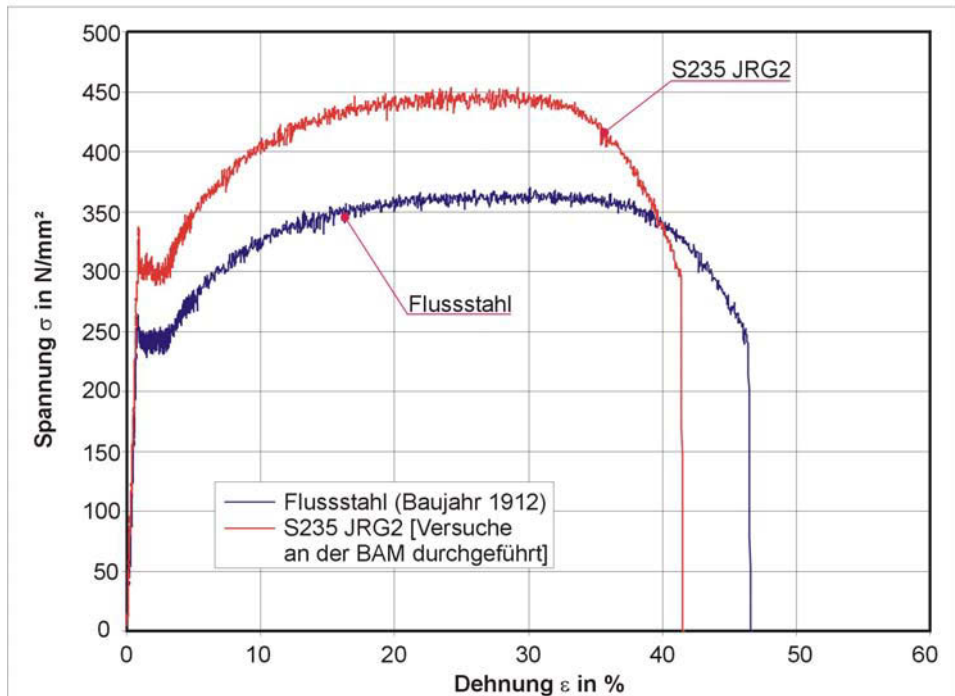


Bild 11–1: Arbeitslinie des untersuchten Flusstahles im Vergleich zu einem Baustahl S235 JRG2

##### Mechanische Eigenschaften

(Angabe der Mittelwerte, Streuungen sehr gering)

E-Modul:  $E = 206544 \text{ N/mm}^2$

Streckgrenze:  $R_{eL} = 232,6 \text{ N/mm}^2$

$R_{eH} = 254,6 \text{ N/mm}^2$

Zugfestigkeit  $R_m = 360,1 \text{ N/mm}^2$



### 11.1.2 Chemische Zusammensetzung des verwendeten Flusstahls

Kohlenstoff in Gew.-%	Silizium in Gew.-%	Phosphor in Gew.-%	Schwefel in Gew.-%	Stickstoff in Gew.-%	Mangan in Gew.-%
0,0473	<0,010	0,0393	0,0512	0,0145	0,284

*Tabelle 11-1: chemische Analyse des verwendeten Flusstahls*

Die in Bild 11–1 dargestellte Arbeitslinie weist im Vergleich zum S235 JR G2 eine verminderte Streckgrenze und Zugfestigkeit bei erhöhter Bruchdehnung auf.

## 11 Experimentelle Verifikation – Anhang

### 11.1 Einfluss der Vorgeschichte auf die Reparaturschweißung

#### 11.1.3 Versuchsergebnisse

GW-Bez.	lfd.Nr.	ungekerbt		gekerbt		GW-Bez.	lfd.Nr.	ungekerbt		gekerbt			
		$\Delta\sigma$ in N/mm <sup>2</sup>	N	$\Delta\sigma$ in N/mm <sup>2</sup>	N			$\Delta\sigma$ in N/mm <sup>2</sup>	N	$\Delta\sigma$ in N/mm <sup>2</sup>	N		
N5	1	160	1.0E+07	-	-	N6	1	200	3.0E+06	-	-		
	2	160	1.0E+07	-	-		2	200	1.0E+07	160	312299		
	3	-	-	160	743232		3	200	1.0E+07	160	438069		
	4			160	750620		4	200	1.0E+07	160	284597		
	5			160	457688		5	200	1.0E+07	160	200535		
	6			160	622936		6	200	1.0E+07	160	479058		
	7			-	-		160	714382	7	200	1.0E+07	160	570125
	8			-	-		160	285036	8	200	1.0E+07	160	231598
	9			250	1.0E+07		160	310178	9	160	1.0E+07	160	575642
	10			250	1.0E+07		160	352160	10	160	1.0E+07	160	266701
	11	250	1.0E+07	160	376639		11	160	1.6E+07	160	423276		
	12	250	1.0E+07	160	312299		12	160	2.0E+07	160	270675		
	13	250	1.0E+07	160	129986		13	-	-	160	434477		
	14	250	1.0E+07	160	238220		14	-	-	160	584885		
	15	250	1.0E+07	160	353942		15	160	1.0E+07	160	250144		
	16	-	-	160	302751		16	160	1.0E+07	160	578073		
	17	-	-	160	240392		17	160	1.0E+07	160	420495		
	18	-	-	160	245966		18	160	1.0E+07	160	369696		
	19	-	-	160	386430		19	-	-	160	274873		
	20	220	1.0E+07	160	400258		20	-	-	160	240615		
	21	220	1.0E+07	160	480998		21	-	-	160	322891		
	22	220	1.0E+07	160	250156		22	-	-	160	497167		
	23	220	1.0E+07	160	222358		23	-	-	160	376034		
	24	220	1.0E+07	160	322891		24	-	-	-	-		
	25	220	1.0E+07	160	438562		25	-	-	-	-		
	26	220	1.0E+07	160	376034		26	-	-	-	-		

Tabelle 11-2: Lastwechselzahlen aus Versuchen zur Untersuchung der Einflüsse aus Vorgeschichte

## **11.2 Lebensdauerermittlung an Schweißverbindungen**

### **11.2.1 Chemische Zusammensetzung des verwendeten Flusstahls**

Die chemische Zusammensetzung der Speckschicht und Seigerungen ist Tabelle 11-3 und Tabelle 11-4 zu entnehmen.

Kohlenstoff in Gew.-%	Silizium in Gew.-%	Phosphor in Gew.-%	Schwefel in Gew.-%	Stickstoff in Gew.-%	Mangan in Gew.-%
0,025	0,0006	0,037	0,039	0,016	0,36

*Tabelle 11-3: chemische Eigenschaften des Flusstahls – Speckschicht*

Kohlenstoff in Gew.-%	Silizium in Gew.-%	Phosphor in Gew.-%	Schwefel in Gew.-%	Stickstoff in Gew.-%	Mangan in Gew.-%
0,047	0,0006	0,068	0,102	0,015	0,31

*Tabelle 11-4: chemische Eigenschaften des Flusstahls – Seigerung*

## 11 Experimentelle Verifikation – Anhang

### 11.2 Lebensdauerermittlung an Schweißverbindungen

#### 11.2.2 Versuchsergebnisse der geschweißten Laborproben

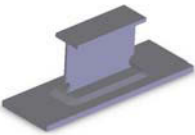
Proben-Nr.:	Probenform	$\sigma_m$	$\sigma_a$	N	Bruchausgang/ Bemerkung
		in N/mm <sup>2</sup>			
A		80	160	353369	Quer zur Krafrichtung in WEZ
B		80	160	227606	
1		40	80	1.00E+07	
2		80	160	209196	
3		80	160	440386	
4		80	160	187359	
5		80	160	190663	
6		80	160	211116	
7		80	160	264770	
8		55	110	762396	
9		55	110	876765	
10		55	110	1100311	
11		55	110	1042308	
12		55	110	821295	
13		55	110	796200	
14		55	110	978287	
15		42	84	2199345	
16		42	84	2370716	
17		42	84	2176828	
18		42	84	2591375	
19		42	84	2176521	
20		36	72	3417550	
21	36	72	5707581		
22	36	72	9317217		

Tabelle 11-5: Bruchlastwechselzahlen der zyklisch beanspruchten, geschweißten Laborproben

11.2.3 Versuchsergebnisse der geschweißten, gealterten Laborproben

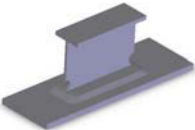
Proben-Nr.:	Probenform	$\sigma_m$	$\sigma_a$	N	Bruchausgang/ Bemerkung
		in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>		
1		55	110	2167115	Quer zur Krafrichtung in WEZ
2		55	110	1332709	
3		55	110	1254318	
4		55	110	1.31E+06	
5		55	110	1188615	
6		55	110	1731052	
7		36	72	1.00E+07	
8		80	160	457655	
9		80	160	424531	
10		80	160	315967	
11		80	160	496701	
12		42	84	3175170	
13		42	84	5274816	
14		42	84	5180130	
15		42	84	6504466	
16		42	84	4128457	

Tabelle 11-6: Bruchlastwechselzahlen der zyklisch beanspruchten, geschweißten Laborproben - gealtert