

Das Schweißen alter Flusstähle

Eine Option für die Instandsetzung bestehender Tragwerke

Lars Sieber
Holger Flederer
André Kilian

Das Schweißen alter Flusstähle

Eine Option für die Instandsetzung bestehender Tragwerke

Im Zuge der Instandsetzung oder Verstärkung von Bestands-tragwerken aus Flusstahl stellt üblicherweise Schrauben oder Nieten das bevorzugte Fügeverfahren dar. In vielen Fällen ist es jedoch konstruktionsbedingt günstiger, auf Schweißen als Fügeverfahren zurückzugreifen. Aufgrund der speziellen Eigenschaften alter Flusstähle sind bei Schweißungen besondere Problemstellungen zu beachten. Die Schweißbeignung von Flusstählen wird durch ihre inhomogene Gefügestruktur mit stark streuender chemischer Zusammensetzung, Verunreinigungen und Einschlüssen, Seigerungen sowie durch ihre eingeschränkte Werkstoffzähigkeit beeinträchtigt.

Im Rahmen von Forschungsvorhaben an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Dresden wurden schweißtechnisch gesicherte Grundlagen für das Schweißen alter Flusstähle erarbeitet, die sowohl die Erprobung verschiedener Schweißzusatzwerkstoffe und -verfahren als auch die zielgerichtete Steuerung der Verfahrensparameter umfassen. In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Ergebnisse der umfangreichen experimentellen und analytischen Untersuchungen zur Schweißbeignung von alten Flusstählen vorgestellt. Abschließend wird über erste praktische Anwendungen der Erkenntnisse bei der Sanierung zweier Stahlbrücken berichtet.

Stichworte Bauen im Bestand; Instandsetzung; Verstärkung; Altstahl; Flusstahl; Schweißen; Schweißbeignung

Welding old mild steels – an option for the repair of existing structures

When repairing or reinforcing existing structures made of mild steel, bolting or riveting are usually the preferred joining methods. In many cases, however, it is more favourable to use welding as the joining method for design reasons. Due to the special properties of old mild steels, particular problems have to be taken into account when welding. The weldability of mild steels is impaired by their inhomogeneous microstructure with strongly scattering chemical composition, impurities and inclusions, segregations and by their limited material toughness. In the context of research projects at the Dresden University of Applied Sciences, proven principles for welding old mild steels have been developed, which include the testing of various welding filler materials and processes as well as the purposeful control of the process parameters. The following publication presents the results of the extensive experimental and analytical investigations into the weldability of old mild steels. Finally, first practical applications of the findings are reported on the rehabilitation of two steel bridges.

Keywords construction in existing buildings; repair; reinforcement; old steel; mild steel; welding; weldability

1 Einleitung

Obwohl Flusstahlkonstruktionen, die zwischen 1880 und 1940 errichtet wurden, seit mehreren Jahrzehnten in Gebrauch sind, müssen diese nicht zwangsläufig ersetzt werden. Der große Bestand an älteren, grundsätzlich funktionstüchtigen Tragwerken aus Stahl erfordert einhergehend mit dem Anspruch auf nachhaltigen Umgang mit Ressourcen deren Weiterverwendung, sofern der dafür erforderliche Aufwand vertretbar bleibt. Exemplarisch seien drei Bauwerkstypen genannt, die in großer Anzahl in Betrieb sind und aufgrund ihres Alters den Flusstahlkonstruktionen zuzuordnen sind. Etwa ein Viertel des Brückenbestands der Deutsche Bahn AG sind Stahlbrücken. Das Durchschnittsalter der Stahlbrücken liegt bei 85 Jahren [1] – in einer Vielzahl von Bauwerken ist demnach Flusstahl verbaut. Annähernd die Hälfte der stählernen Schleusen- und Wehrverschlüsse in wasserbaulichen Anlagen des Bundes sind mindestens 80 Jahre alt und stammen somit aus den o. g. flusstahlrelevanten Baujahren. Ähnliches gilt vermutlich für mehrere 10000 Stahlgittermaste im deutschen Hochspannungsnetz.

Eine wesentliche Komponente von Erhaltungs-, Sanierungs- und Ertüchtigungskonzepten für derartige, meist genietete Tragwerke aus altem Flusstahl sind effiziente Fügeverfahren. Aktuell werden fast ausschließlich geschraubte Verbindungen mit Passschrauben eingesetzt. Neben dem erheblichen Aufwand für die Herstellung dieser Passverbindungen führt die zusätzliche Lochung vor allem bei zugbeanspruchten Bauteilen zu einer weiteren Schwächung der eigentlich zu verstärkenden Querschnitte.

2 Stand der Technik

Während Puddelstahl (Schweißeisen) im Allgemeinen als nur sehr bedingt schmelzschweißbar eingestuft werden muss [2, 3], ist die Schweißbeignung von altem Flusstahl unter bestimmten Bedingungen möglich. Schweißverbindungen verursachen Kerbeffekte und Eigenspannungen. Damit wächst auch das Risiko eines Sprödbruchs. Im Vergleich zu heutigen Baustählen besitzen alte Flusstähle jedoch eine eingeschränkte Zähigkeit. Um das Risiko eines Sprödbruchs zu minimieren, wird im Allgemeinen

empfohlen [4–8], Schweißverbindungen in Altstahlkonstruktionen möglichst zu vermeiden. Die metallurgischen Eigenschaften der alten Stähle sind in besonderer Weise zu berücksichtigen, wenn dennoch tragende Schweißverbindungen ausgeführt werden sollen [9, 10]. Signifikante Kenngrößen sind der Gehalt von Verunreinigungen in der Seigerungszone und die stickstoffinduzierte Alterung der windgefrischten Stähle (Thomas- und Bessemerstahl). Systematische Untersuchungen der Schweißbarkeit von Flusstählen wurden bereits in [11] durchgeführt. Dabei lag der Fokus auf Kehlnahtverbindungen an der Bauteiloberfläche von unberuhigt vergossenen Stählen. Der Einbrand der Nähte wurde technologisch so begrenzt, dass nur die sehr reine Speckschicht und nicht die Kernseigerungen aufgeschmolzen wurden. Es konnten tragfähige und sprödebruchsichere Schweißverbindungen aus alten Flusstählen realisiert werden [12].

Im Rahmen einzelner dokumentierter Instandsetzungen alter Stahltragwerke [9, 13] wurde darüber hinaus gezeigt, dass auch die Stumpfnahtschweißung alter Flusstähle trotz des Aufschmelzens der verunreinigten Seigerungen möglich ist. Die Schweißreignung aller zu schweißenden Bauteile musste in diesen Fällen jedoch durch umfangreiche Werkstoffuntersuchungen, durch Verfahrensprüfungen sowie Probeschweißungen am Bauwerk geprüft und als Zustimmungen im Einzelfall bestätigt werden. Erfahrungen und systematische Untersuchungen in ausreichendem Umfang, allgemeine Verfahrenszulassungen sowie normative Regelungen zum Schweißen alter Stähle liegen bisher nicht vor.

3 Experimentelle Untersuchungen zur Schweißreignung

3.1 Auswahl des Probenmaterials

Aus zahlreichen Untersuchungen (z. B. [14–16]) ist bereits bekannt, dass die chemischen, metallurgischen und mechanischen Eigenschaften alter Baustähle erheblichen Streuungen unterliegen. Um eine möglichst große Bandbreite von Stählen zu erfassen, sollten Werkstoffproben aus unterschiedlichen Bauwerken und Bauteilen verschiedener Baujahre für die Untersuchungen eingesetzt werden. Die Auswahl der sechs verwendeten Material-

proben (Tab. 1) erfolgte primär anhand der chemischen Zusammensetzung (Tab. 2). Ausgewählt wurden Stähle mit hohen Konzentrationen von Schwefel, Phosphor und Stickstoff, da diese Begleitelemente die Schweißreignung wesentlich beeinträchtigen.

Bis in die 1930er-Jahre stellte man Stähle nahezu ausschließlich unberuhigt vergossenen her, d. h. ohne die Zugabe von Sauerstoff bindenden Elementen wie Silizium oder Aluminium. Wenn die Materialeigenschaften solcher Stähle bestimmt werden, ist zu beachten, dass die chemische Zusammensetzung des Stahlgefüges in den Querschnittsteilen signifikant variieren kann. Im Steg eines I-Profils ist der Anteil von Begleitelementen infolge der Seigerungen z. B. höher als an den Rändern der Flansche (Bild 1). Die Analyse mittels Funken-Optischer Emissionsspektrometrie (OES) sollte deshalb auf dem Querschnitt eines Bauteils erfolgen. Somit werden die Seigerungszone und Speckschichten in die Messungen einbezogen (Bild 1).

Mit der Einführung der Schweißtechnik im Stahlbau in Deutschland in den 1930er-Jahren erfolgte auch eine Weiterentwicklung der Werkstoffnormen, um die Schweißreignung der Baustähle zu gewährleisten. Neben der ausreichenden Zähigkeit wurde insbesondere der Gehalt an einzelnen Eisenbegleitern geregelt. Tab. 3 enthält die Maximalgehalte dieser Elemente (Stückanalyse) aus vier repräsentativen Werkstoffnormen. Mit der Einführung von DIN 1612:1943 [17] wurden das erste Mal zulässige Gehalte an Eisenbegleitern für schweißgeeignete Baustähle geregelt. Vergleicht man die Grenzwerte mit der chemischen Zusammensetzung der eingesetzten Proben (Tab. 2), ist zu erkennen, dass drei der sechs untersuchten Flusstähle in den 1940er-Jahren noch als schweißgeeignet galten. Hierbei darf nicht unerwähnt bleiben, dass zu dieser Zeit das Lichtbogenschweißen mit umhüllten Stabelektroden das einzige übliche Schweißverfahren im Stahlbau war.

3.2 Voruntersuchungen zur Eignung aktuell verfügbarer Zusatzwerkstoffe

Ein wesentliches Argument für die eingeschränkte Schweißreignung alter Baustähle ist die nach heutigen

Tab. 1 Materialauswahl für die Untersuchungen
Material selection for the investigations

Bezeichnung	Herstellungsjahr	Walzerzeugnis	Bauwerk/Bauteil
MV	1888	Fl. 200×12	Vollwandträger-Deckbrücke/Obergurt
GDD	1889–1899	Fl. 320×11	Vollwandträger-Trogbrücke/Obergurt
HDD	1913–1918	I 26 (= I 260)	Industriehalle/Deckenträger
AV	1878–1879	Bl. 1300×900×14	Fachwerkbrücke/Knotenblech
TFT	1920er	I 47½ (≈ I 475)	Trägerrost-Deckbrücke/Längsträger
TFS	1920er	IP 34 (≈ HEB 340)	Trägerrost-Deckbrücke/Stütze

Tab. 2 Chemische Zusammensetzung des Probenmaterials
Chemical composition of the material samples

Bezeichnung	Ergebnisse der chemischen Analysen [%] (Speckschicht-Seigerungszone bei I-Profilen)							
	C	Si	Mn	P	S	Al	N ₂	O ₂
MV	0,07	0,008	0,51	0,069	0,103	0,002	0,0170	0,0259
GDD	0,08	0,008	0,44	0,074	0,032	0,004	0,0175	0,0322
HDD	0,07–0,12	0,002	0,63–0,85	0,06–0,12	0,07–0,14	0,001	0,0250	0,0155
AV	0,07	0,004	0,42	0,057	0,084	0,003	0,0210	0,0361
TFT	0,04–0,07	0,001	0,43–0,60	0,05–0,15	0,03–0,12	0,001	0,0200	0,0291
TFS	0,04–0,06	0,006	0,46–0,51	0,04–0,09	0,01–0,02	0,002	0,0140	0,0196

Tab. 3 Zulässige Konzentrationen an Eisenbegleitern in schweißgeeigneten Baustählen nach alten Werkstoffnormen
Permissible concentrations of tramp elements in weldable structural steels according to old material standards

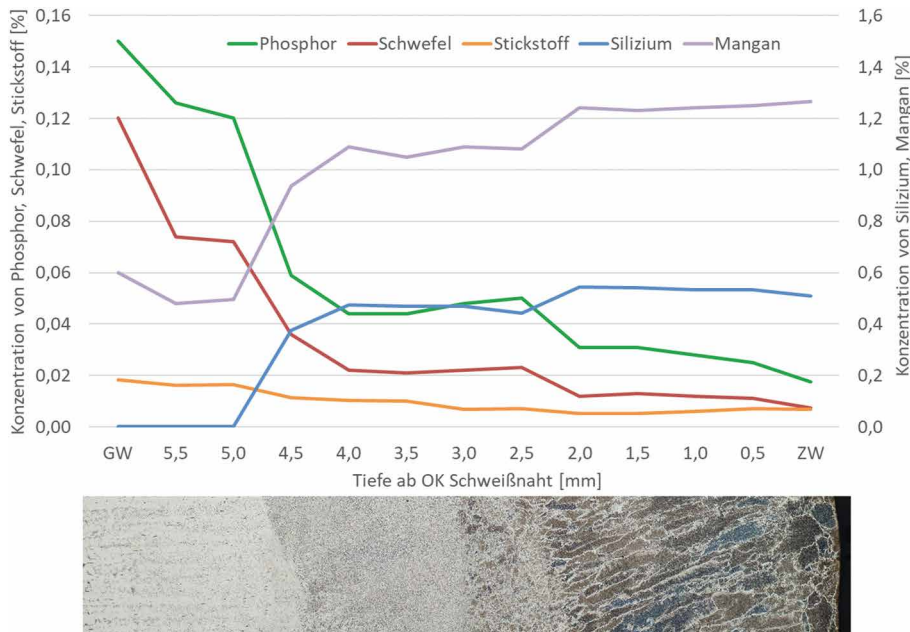
Norm	Stahlart	Maximal zulässiger Gehalt an Eisenbegleitern [%]				
		C	Mn	P	S	N ₂
DIN 1612:1943 [17]	Thomasstahl	0,19	–	0,126	0,084	–
	Siemens-Martin-Stahl	0,24	–	0,098	0,084	–
DIN 17100:1957 [18]	Flussstahl	0,25	–	0,075	0,063	0,011
TGL 7960:1960 [19]	Siemens-Martin-Stahl	0,23	0,65	0,060	0,063	–
DIN EN 10025:1994 [20]	Unberuhigter Stahl	0,21	1,50	0,055	0,055	0,009

Werkstoffnormen zu hohe Konzentration an unerwünschten Eisenbegleitern, insbesondere an Schwefel, Phosphor und Stickstoff. Schwefel verringert generell die Werkstoffzähigkeit und bewirkt eine ausgeprägte Anisotropie der Zähigkeitswerte. Diese Zähigkeitsanisotropie wird durch leicht verformbare MnS-Einschlüsse verursacht, die nach dem Walzvorgang langgestreckt parallel zur Oberfläche vorliegen. Aufgrund der stöchiometrischen Zusammensetzung von Mangansulfiden ist für das chemische Binden des Schwefels durch Mangan ein Mn/S-Verhältnis von mindestens 1,72 erforderlich. Bei Unterschreitung dieses Verhältnisses wird ein zunehmender Anteil des Schwefels als Eisensulfid gebunden. Dies

kann zur Korngrenzenbelegung des Sulfids und damit zum Rotbruch z. B. beim Schweißen führen. Um Heißrisse zu vermeiden und die Manganreduzierung durch Aufnahme in die Eisenmatrix zu kompensieren, sollte das Mn/S-Verhältnis nicht unter 4 betragen [21]. Trotz der erhöhten Schwefelgehalte ist dieser Mindestgehalt an Mangan in allen untersuchten Flusstählen vorhanden (Tab. 2).

Phosphor gilt ebenso als unerwünschter Eisenbegleiter. Er verursacht eine deutliche Verschlechterung der Zähigkeitseigenschaften. Diese Versprödung ist auf eine Abnahme der Kohäsion, d. h. der Korngrenzen-Oberflächen-

**Bild 1** Baumannabdruck der Materialprobe TFS, zugehörige Probe der chemischen Analyse
Sulphur print of the material sample TFS, related sample for chemical analysis



Quelle: HTW Dresden

Bild 2 Verteilung der Eisenbegleiter in einer mehrlagigen Schweißnaht
Distribution of tramp elements in a multipass weld

energie, infolge Phosphoranlagerung zurückzuführen [22]. Mit der Zunahme der Korngrenzenoberfläche, also einer Kornverfeinerung, sollte folglich die versprödende Wirkung des Phosphors abnehmen.

Wie auch Schwefel und Kohlenstoff begünstigt Phosphor die Bildung von Seigerungen in unberuhigt vergossenen Stählen. Muss beim Schweißen die Seigerungszone aufgeschmolzen werden, kann durch den Einsatz basischer Stabelektroden der Phosphoranteil im Schweißgut durch den hohen Calciumgehalt in deren Umhüllung weitgehend verschlackt werden.

Im Gegensatz zu Phosphor verursacht Stickstoff eine zeitabhängige Verfestigung und Versprödung im Stahl, die als Alterung bezeichnet wird. Die Alterungsvorgänge werden durch Ausscheidungen aus übersättigten Mischkristallen verursacht. Dabei handelt es sich um Diffusionsvorgänge, bei denen der überschüssige Stickstoff auf dem Weg zu den Korngrenzen an Gitterbaufehlern eingelagert wird. Während dieser Vorgang unter natürlichen Bedingungen relativ langsam fortschreitet, wird er durch Wärmeeinwirkung, wie z.B. beim Schweißen, deutlich beschleunigt. Insbesondere bei den windgefrischten Konverterstählen (Bessemer- und Thomasstahl) ist dieser Effekt zu berücksichtigen, da bei diesen Stählen die Löslichkeitsgrenze von Stickstoff mit 0,014% häufig überschritten ist [16, 23, 24].

Um die Eignung der gegenwärtig zur Verfügung stehenden Schweißzusatzwerkstoffe sowie deren Fähigkeit zum Verschlacken, Verdünnen oder Abbinden der beschriebenen Eisenbegleiter zu untersuchen, wurden mehrlagige Auftragsschweißungen an der Stirnseite eines Blechs einer stark verunreinigten Probe ausgeführt (Probe TFT). Bild 2 zeigt die dreilagige Schweißnaht sowie das Konzentrationsgefälle der wesentlichen Eisenbegleiter über

die Nahtdicke. Es kamen basisch umhüllte Stabelektroden GARANT (E 42 2 B 42 H10 nach DIN EN ISO 2560 [25]) zum Einsatz. Die Ergebnisse der chemischen Analysen zeigen, dass durch den Zusatzwerkstoff bereits in der ersten Lage die Gehalte an Phosphor, Schwefel und Stickstoff auf ein nach heutiger Werkstoffnorm akzeptables Maß reduziert wurden. Eine negative Beeinflussung des Schweißguts durch die Verunreinigungen ist folglich nicht zu erwarten.

3.3 Herstellung von Schweißproben

Umfangreiche Schweißversuche wurden durchgeführt, um die Schweißseignung aller ausgewählten Flusstähle zu bewerten. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in [11] mit Kehlnähten wurden Stumpfnähte zwischen Blechen aus altem Flusstahl und neuem Baustahl S235 geschweißt. Für die Werkstoffproben aus I-Profilen erfolgte die Entnahme der Probenbleche jeweils aus den Stegen, um die dort stark ausgeprägten Seigerungen zu berücksichtigen.

Die Stumpfnähte wurden zunächst mittels Elektrodenhandschweißen mit basisch umhüllten Stabelektroden hergestellt. Die Flankenvorbereitung in der ersten Versuchsserie erfolgte als X-Naht, um das Nahtvolumen und damit den Verzug der Schweißnaht zu minimieren. Die Nähte wurden wechselseitig in Wannenposition mit Zugraupen geschweißt (Bild 3). Diese Schweißreihenfolge bewirkt das Normalisieren der jeweils unteren Schweißraupen sowie die Verringerung der Eigenspannungen im Nahtbereich. Der Einsatz dünner Stabelektroden ($\varnothing 2,5$ mm) gewährleistet neben einem niedrigen Energieeintrag vor allem einen geringen Einbrand und damit ein flaches Konzentrationsgefälle der Begleitelemente über die Naht.

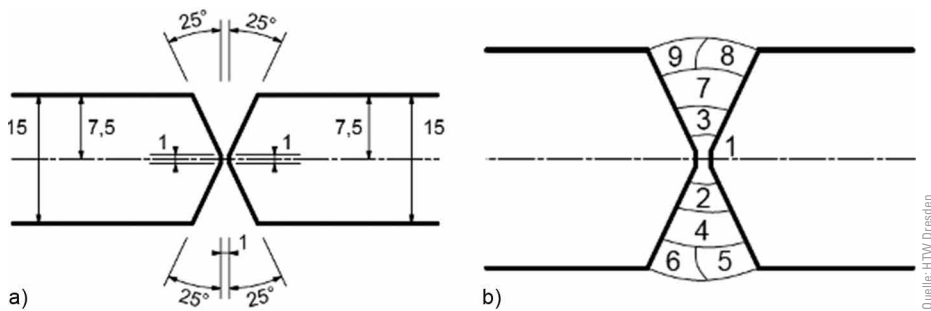


Bild 3 a) Nahtflankenvorbereitung, b) Schweißreihenfolge der mehrlagigen Stumpfnah
a) Joint preparation, b) welding sequence of the multi-pass welded joint

Um den Wärmeeintrag gering zu halten und damit das unerwünschte Kornwachstum in der Wärmeeinflusszone (WEZ) zu vermeiden, verzichtete man auf ein Vorwärmen der zu verschweißenden Bleche und realisierte so Zwischenlagentemperaturen von ca. 150°C. Eine Kalt-rissgefährdung infolge Abschreckhärtung beim Schweißen der relativ dünnen Raupen auf den bis zu 18 mm dicken Blechen lag nicht vor, da der Kohlenstoffgehalt der untersuchten Altstähle deutlich unter 0,2% betrug [22]. Dies gilt generell für die in diesen Untersuchungen adressierten Flusstähle [16].

Da bei der Sanierung und Ertüchtigung bestehender Stahltragwerke konstruktionsbedingt meist nur eine einseitige Nahtvorbereitung möglich oder die Schweißnaht nur von einer Seite zugänglich ist, wurden in einer zweiten Versuchsserie ergänzend K- und HV-Nähte untersucht.

3.4 Prüfung der Schweißnähte

Zu Überprüfung der Güte der ausgeführten Schweißverbindungen erfolgten die Sicht- und Oberflächenrissprüfungen der Nähte, eine Durchstrahlungsprüfung nach DIN EN ISO 17636-1 [26] (Prüfklasse B) und die anschließende Klassifizierung nach DIN EN 10675-1 [27]. Bei den Probenserien GDD, MV sowie TFT traten neben Poren vereinzelt auch Bindefehler auf. In den mehrlagigen Schweißnähten der dickeren Blechproben TFT und TFS wurden wenige Schlackeneinschlüsse nachgewiesen. Beide Schweißnahtfehler sind auf Unregelmäßigkeiten bei der Ausführung der Schweißarbeiten zurückzuführen. Anzahl und Ausdehnung dieser Unregelmäßigkeiten waren jedoch so gering, dass die Schweißnähte aller sechs Altstahlmaterialien den Anforderungen für hohe Ausführungsqualität (Bewertungsklassen 2 und 1 der o. g.



Bild 4 Röntgenaufnahme einer Schweißnaht zur Bewertung innerer Fehler
X-ray of a weld for the evaluation of internal welding defects

Normen) genügen. Nur etwa 10% der Nähte in den Versuchsserien 1 und 2 (in Wannelage geschweißte Stumpfnähte) mussten in die Bewertungsklasse 3 oder schlechter eingestuft werden. In der Röntgenaufnahme in Bild 4 sind die für die Klassifizierung maßgebenden Poren (Positionen 02 und 12) der Probe MV.1.3 zu erkennen.

3.5 Proben für die Untersuchung der Schweißbeugung

Die mechanischen und metallurgischen Eigenschaften der hergestellten Schweißverbindungen wurden durch umfangreiche Werkstoffanalysen erkundet. Die Untersuchungen erfolgten in Anlehnung an eine Schweißverfahrensprüfung nach DIN EN ISO 15614-1 [28]. Die Größe der hergestellten Schweißproben wählte man so, dass aus dem zur Verfügung stehenden Probenmaterial für jede Schweißnaht mindestens die folgenden Prüfkörper entnommen werden konnten:

- zwei Querzugproben nach DIN EN ISO 4136 [29]
- je drei Kerbschlagbiegeproben gemäß DIN EN ISO 9016 [30] mit dem V-Kerb im Bereich der Wärmeeinflusszone des Altstahls und in der Schweißnaht
- zwei Proben für metallografische Untersuchungen nach DIN EN ISO 17639 [31]

Zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der unbeeinflussten Grundwerkstoffe wurden

- zwei Rundzugproben nach DIN 50125 [32] sowie
- sechs Kerbschlagbiegeproben mit V-Kerb nach DIN EN ISO 148-1 [33]

entnommen.

Auf Basis der Ergebnisse der Durchstrahlungsprüfung wurden für alle Schweißproben individuelle Zuschnittpläne zur Herstellung der erforderlichen Prüfkörper erarbeitet (Bild 5). Die fehlerbehafteten Nahtbereiche (meist Poren) sind farbig markiert.

3.6 Metallografische Untersuchungen

Sowohl das Gefüge der hergestellten Schweißnähte als auch die Veränderungen der Gefügestruktur der Grund-

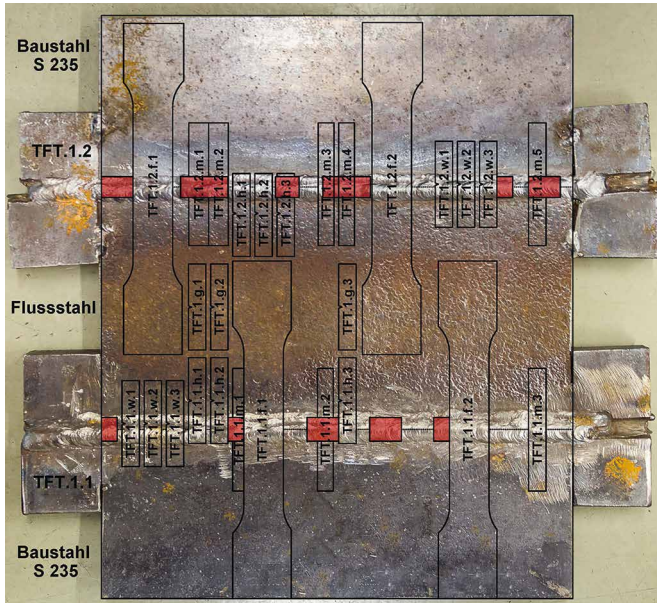


Bild 5 Repräsentativer Zuschnittplan der Probe TFT.1 mit zwei Stumpfnähten
Typical cutting plan of the sample TFT.1 with two butt welds

werkstoffe wurden an allen Schweißproben durch metallografische Untersuchungen analysiert. Bild 6 zeigt exemplarisch den Mikroschliff einer Probe des Materials AV. Auf der linken Seite der Schweißnaht befindet sich der alte Flussstahl, auf der rechten Seite der neue Baustahl S235. Eine Ätzung mit 3%iger alkoholischer Salpetersäure (Nital) macht die Kornstruktur und die Wärmeinflusszonen sichtbar. Aufgrund des geringen Kohlenstoffgehalts des Flussstahls ist die WEZ hier nur schwach zu erkennen – der Stahl besitzt folglich ein überwiegend ferritisches Gefüge mit den typischen zeiligen Einschlüssen (Bild 7a). Im Vergleich dazu ist in Bild 7b das zeilige ferritisch-perlitische Gefüge des neuen Baustahls zu erkennen. Er weist erwartungsgemäß ein feinkörnigeres Gefüge auf. Aufgrund seiner höheren Reinheit liegen keine metallurgischen Ungängen vor. Ein Versagen in der mechanischen Prüfung ist folglich auf dieser Seite der Schweißnaht nicht zu erwarten.

Die Veränderungen der Kornstruktur in der WEZ infolge der eingebrachten Wärme wurden durch Korngrößenbestimmung nach DIN EN ISO 643 [34] quantifiziert. Bild 8

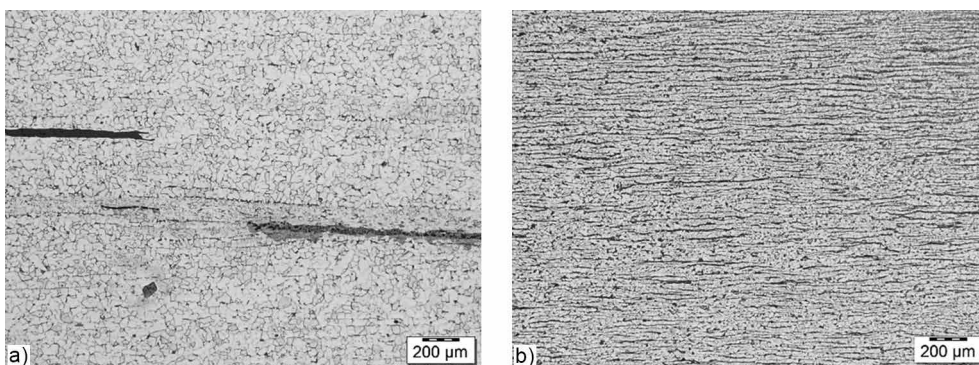


Bild 7 Mikrogefüge a) des alten Flussstahls, b) des neuen Baustahls
Grain texture a) of the old mild steel, b) of the new steel

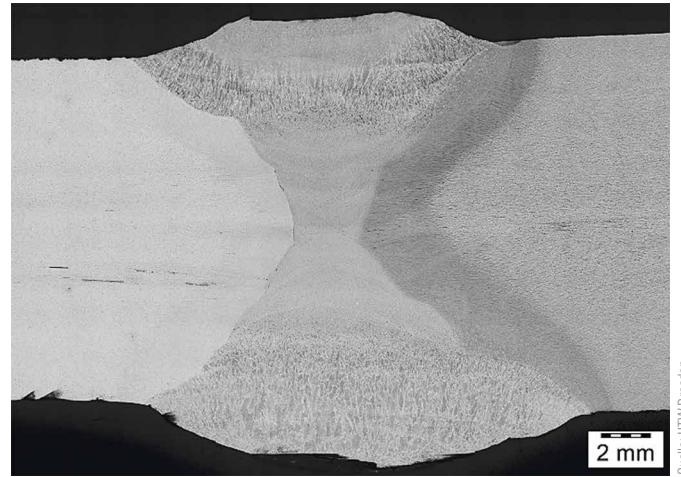


Bild 6 Geätzter Makroschliff einer Schweißprobe des Materials AV
Etched macrosection of a welding sample of the material AV

zeigt repräsentative Kornverteilungen in der WEZ dreier Schweißproben der Materialien TFT (a), AV (b) und MV (c). Deutlich sichtbar ist die Verringerung der Korngröße vom Grundwerkstoff bis zur Schweißnaht. Die Verringerung der Korngröße ist auch an der Anzahl der Ferritkörner N im Prüfraster und der steigenden Korngrößenzahl G deutlich zu erkennen. Eine ausgeprägte Grobkornbildung nahe der Schmelzlinie stellte sich nicht ein.

Die chemische Zusammensetzung des Stahls, der Wärmeeintrag sowie eine mögliche Vorwärmtemperatur beeinflussen maßgeblich die Korngröße in der WEZ einer Baustahlschweißung. Grobkörniges Gefüge verursacht eine Reihe wesentlicher nachteiliger Stahleigenschaften. Gemäß der Hall-Petch-Beziehung [22] nehmen die Festigkeit und die Zähigkeit mit steigender Korngröße ab. Außerdem wächst die Neigung zu Wiederaufschmelzrisen, da sich durch die geringere Korngrenzfläche deren Belagungsdichte mit Verunreinigungen erhöht.

Stark güteverbessernd wirkt sich die Mehrlagentechnik aus (Zugraupen- oder Pendellagentechnik), die bei den hier untersuchten Schweißverbindungen eingesetzt wurde. Im Gegensatz zur Einlagentechnik erfahren weite Teile des Gefüges der jeweils darunterliegenden Lage(n) des Schweißguts sowie das der Grobkornzone in der WEZ durch die doppelte Umkristallisation beim Erwär-

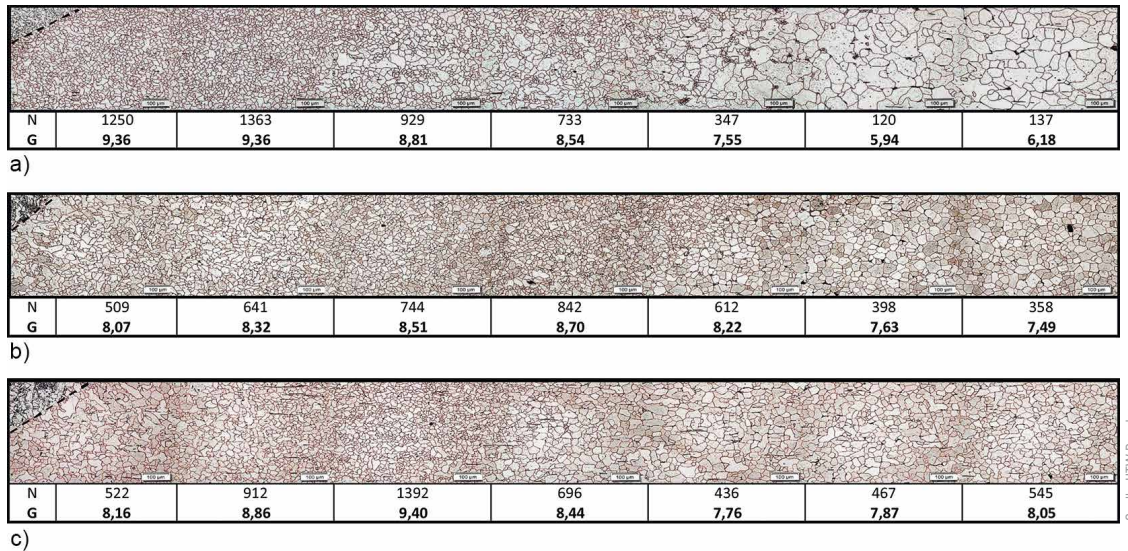


Bild 8 Typische Korngrößenverläufe in der WEZ von Schmelzlinie (links) bis Grundgefüge (rechts)
 Typical grain size in the HAZ over fusion line (left) to basic structure (right)

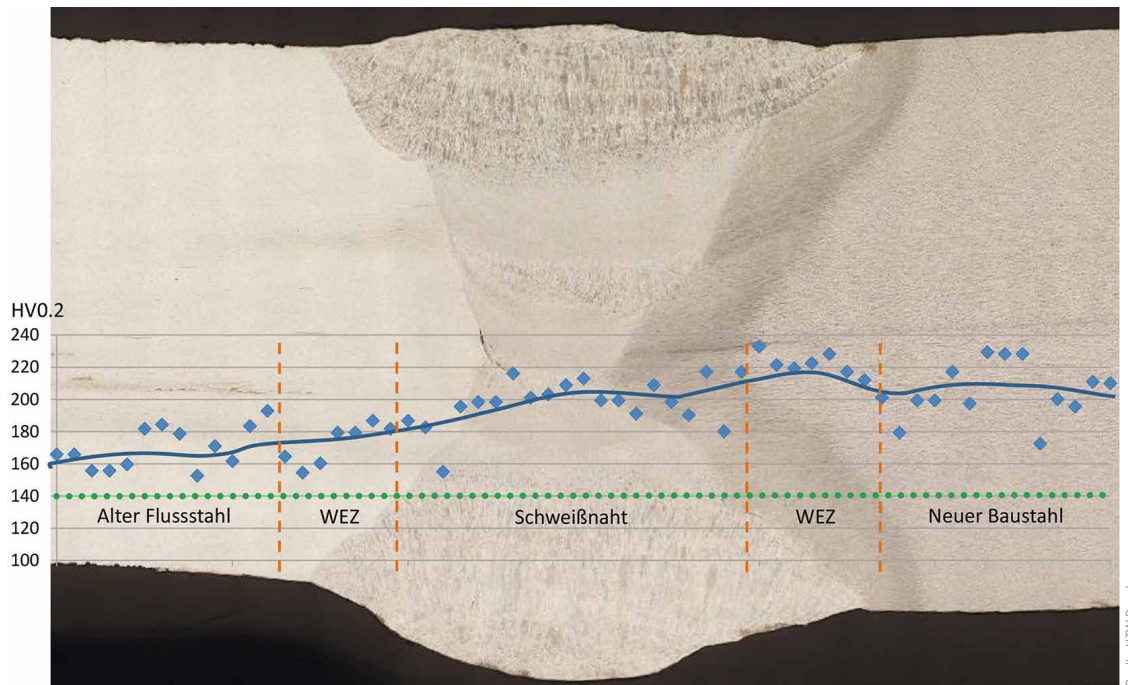


Bild 9 Querschnitt der Probe AV1.2 mit Ergebnissen von Mikrohärtemessungen (entlang grüner Linie)
 Cross section of sample AV1.2 with hardness test results (along green line)

men und Abkühlen ($\alpha \leftrightarrow \gamma$) eine ausgeprägte Verfeinerung. Der gleiche Effekt wird auch beim Normalglühen zur Herstellung feinkörniger Stähle genutzt. Die deutlich geringere Wärmezufuhr der einzelnen Lagen verringert die Breite der WEZ und die Korngröße in der Grobkornzone gegenüber der Einlagentechnik deutlich. Die Abkühlgeschwindigkeit verringert sich durch den „Vorwärmeeffekt“ der einzelnen Lagen. Sie ist jedoch deutlich größer als bei einlagig hergestellten Stumpfnähten und verhindert damit ein übermäßiges Kornwachstum nach der γ - α -Umwandlung. Als Folge ergibt sich eine kontinuierliche Reduktion der Korngröße des Grundwerkstoffs bis zur Schmelzlinie. Die mittlere Korngrößenzahl G in der WEZ von 8 bis 9 (Bild 8) entspricht etwa der des angeschweißten neuen Baustahls.

Die beschriebenen Bildreihenanalysen wurden jeweils in Höhe der Deckschicht durchgeführt, um die günstige mehrfache Gefügeumwandlung in der WEZ durch wiederholte Erwärmung auszuschließen. Außerdem ist die Werkstoffgüte in diesem Bereich maximaler geometrischer Kerbwirkung durch die Schweißnaht von primärem Interesse. Ergänzende Untersuchungen in tieferen Lagen haben gezeigt, dass durch das mehrfache „Umkörnen“ an der Flanke der mehrlagigen Naht die Grobkornzone vollständig beseitigt werden kann. Damit verbunden sind festigkeits- und zähigkeitssteigernde Effekte in der WEZ des Altstahls zu erwarten. Durch Mikrohärtmessungen an Querschnitten mehrerer Schweißproben wurde der erwartete Festigkeitszuwachs vom Altstahl zum Neustahl über die Schweißnaht hinweg nachgewiesen (Bild 9).

3.7 Querzugversuche

Die Ermittlung der Festigkeit der Schweißverbindungen erfolgte an quer zur Schweißnaht angeordneten Flachzugproben (s. Bild 5). Die taillierte Probengeometrie wurde mittels Wasserstrahlschneiden hergestellt, um Werkstoffveränderungen z. B. durch Brennschneiden zu vermeiden. Nahtüberhöhungen wurden gemäß DIN EN ISO 4136 beidseitig spannend abgetragen. Dickenunterschiede zwischen Alt- und Neustahlseite und vereinzelt aufgetretener Winkelverzug wurden durch beidseitiges Überfräsen der Zugproben ausgeglichen.

Alle Zugproben versagten im Bereich des Grundwerkstoffs des Altstahls (Bild 10). Signifikante Schwächungen der Naht durch die Verunreinigungen im Erstarrungsgefüge der Naht oder in der WEZ traten folglich nicht auf. In Anbetracht der Erkenntnisse zum Mikrogefüge und zur Härte (s. Abschn. 3.6) erscheint das Verhalten plausibel, da sowohl die Festigkeit der Schweißnaht als auch die Korngröße im Bereich der WEZ deren Tragfähigkeit steigern.

Die in den Zugversuchen bestimmten Mittelwerte der Streckgrenze von 278 N/mm^2 und der Zugfestigkeit von 428 N/mm^2 liegen nur geringfügig über den in [16, 35] angegebenen Mittelwerten alter Flusstähle.

Neben der geometrischen Kerbe aus der Schweißnahtgeometrie verursacht auch der Festigkeitsmismatch zwischen Naht- und Grundwerkstoff eine Dehnungskonzentration im niederfesten Altstahl [36], der aufgrund der niedrigeren Streckgrenze eher zu fließen beginnt. Der Festigkeitsunterschied wirkt sich ungünstig aus, wenn bei Werkstoffübergängen, z. B. an Stumpfnähten mit K- oder HV-Nahtvorbereitung, die Schweißnaht oder die WEZ niedrigerfest ist als der Grundwerkstoff. In solchen Fällen stellen sich die Lokalisation von plastischen Dehnungen und ein früheres Versagen ein. Um den Einfluss dieses Effekts auf das Bruchverhalten der geschweißten Altstahlverbindungen zu überprüfen, wurden Schweißproben mit den o. g. Stumpfnähten unter Einsatz des Werkstoffs TFT hergestellt. Dieser Altstahl zeigte bei den Kerbschlaguntersuchungen (s. Abschn. 3.8) die geringste Zähigkeit bzw. höchste Übergangstemperatur T_{27J} . An den daraus gewonnenen ungekerbten Querzugproben



Bild 10 Querzugproben aus verschiedenen Schweißproben (Altstahl links, Neustahl rechts)
Transverse tensile specimen of different welded samples (old steel left, new steel right)



Bild 11 Tiefemperatur-Zugversuch an einer Querzugprobe einer Schweißung des Materials TFT
Transverse tensile test at low temperature at a welded specimen of material TFT

wurden Zugversuche bei tiefen Temperaturen von bis zu -30°C durchgeführt. Trotz der ungünstigen Randbedingungen trat kein sprödes Versagen auf. Alle Proben versagten ausgeprägt duktil im Altstahl mit großem Abstand zur Schweißnaht (Bild 11), was auf die zähigkeitssteigernde Kornverfeinerung in der WEZ zurückzuführen ist.

3.8 Einfluss der Schweißung auf die Werkstoffzähigkeit

Zunächst wurden für die unbeeinflussten Grundmaterialien die Übergangstemperaturen T_{27J} in Kerbschlagbiegeversuchen bestimmt, um die Zähigkeit des Materials im Bereich der Schweißverbindung zu beurteilen. In vergleichbaren Untersuchungen [37] liegt die Übergangstemperatur von alten Flusstählen etwa im Bereich von 0 bis $+40^\circ\text{C}$. Zur Bestimmung der Übergangstemperatur der Materialien wurden zwei Sätze Kerbschlagproben (je 3 Stk.) in diesem Temperaturbereich beprobt. Die ersten drei Kerbschlagbiegetests erfolgten bei Raumtemperatur (etwa 20°C). Sofern der Mittelwert der Kerbschlagarbeit dieser drei Tests mehr als 27 J betrug, erfolgte die Analyse der drei folgenden Proben unterhalb von 20°C , anderenfalls oberhalb. Die Übergangstemperatur T_{27J} des jeweiligen Altstahls wurde durch Interpolation zwischen den Mittelwerten bestimmt. Mit Ergebnissen zwischen -3°C und $+45^\circ\text{C}$ repräsentieren die untersuchten Werkstoffe das typische Spektrum alter Flusstähle.

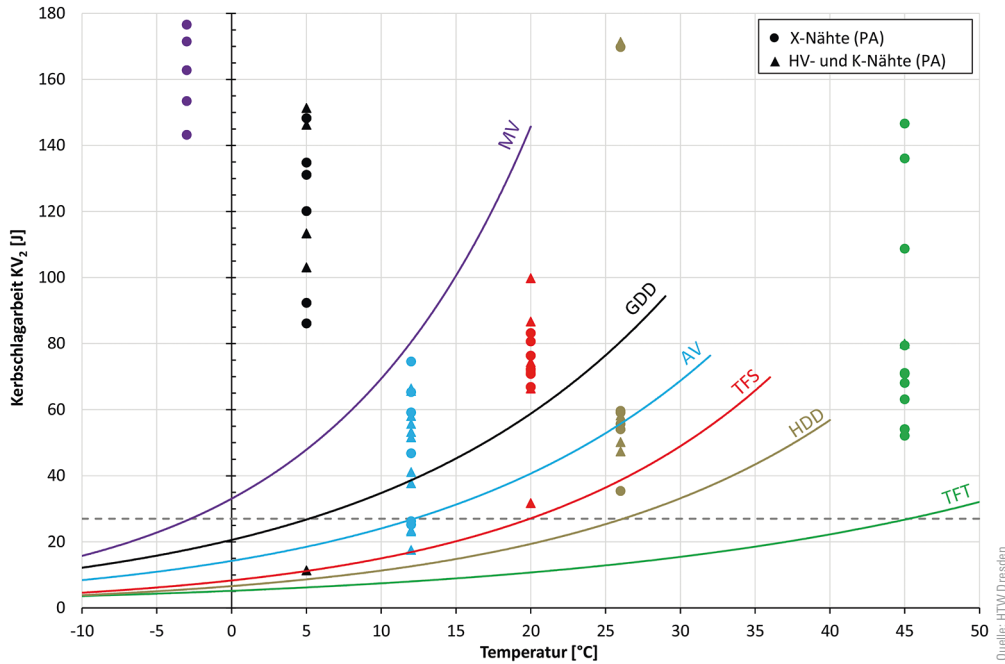


Bild 12 Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche (Kurven = Grundmaterial, Punkte = WEZ)
Results of the Charpy impact tests (curves = base material, points = HAZ)

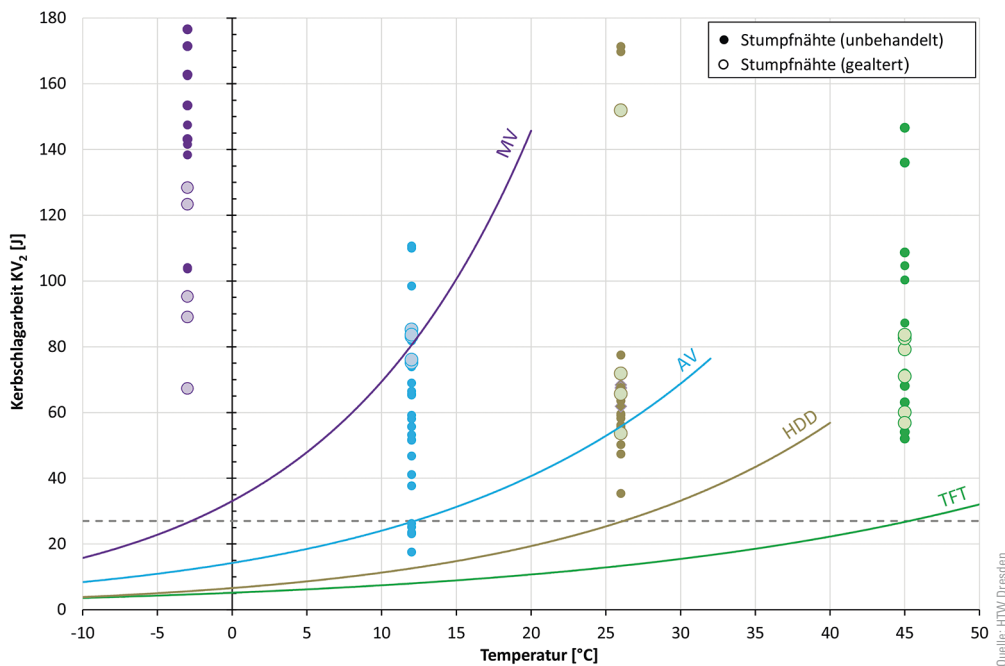


Bild 13 Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche an künstlich gealterten Proben
Results of the Charpy impact tests on artificially aged samples

Anschließend wurde bei diesen Temperaturen die Kerbschlagarbeit der Proben aus den zugehörigen WEZ ermittelt. Die Versuche lieferten teils ähnliche, meist aber deutlich höhere Zähigkeitswerte als im unbeeinflussten Grundmaterial (Bild 12). Damit bestätigen die Versuchsergebnisse die Erkenntnisse zur Verbesserung der Werkstoffgüte aus den metallografischen Untersuchungen (s. Abschn. 3.6).

Bei den Untersuchungen von Reparaturschweißungen an alten Baustählen in [38] waren ähnliche Güteverbesserungen wie in den oben beschriebenen Analysen festzu-

stellen. Unter vergleichbaren schweißtechnologischen Randbedingungen traten Erhöhungen der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften in der WEZ ein. Begründet wurde dieser Effekt mit dem Normalisieren des Altstahlfüges durch die Prozesswärme. Damit einhergehend werden in den über 620°C erwärmten Zonen der WEZ die durch Entmischungsvorgänge entstandenen Eisenitrid-Ausscheidungen aufgelöst [8] und somit auch die Alterungsversprödung rückgängig gemacht. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Alterungsprozess aufgrund der erhöhten Stickstoffgehalte in den alten Konverterstählen nach dem Schweißen erneut einsetzt, sodass auf

Dauer mit einer Verschlechterung der Zähigkeit zu rechnen ist.

Um den Einfluss einer wiederholten Alterung auf die Duktilität der Schweißverbindungen an alten Flusstählen zu beurteilen, erfolgten zusätzliche Untersuchungen an künstlich gealterten Proben. Dafür wurden mehrere Schweißproben unterschiedlicher Werkstoffe für 1 h bei 250°C ausgelagert und anschließend Kerbschlagproben mit Kerblage in der Altstahl-WEZ entnommen. Diese Wärmebehandlung begünstigt die Entmischungsvorgänge in den mit Stickstoff übersättigten Mischkristallen und beschleunigt den Alterungsprozess der Stähle. Aus den Untersuchungen in [8] ist jedoch bekannt, dass diese Methode zu einer stärkeren Versprödung führt, als sie unter natürlichen Bedingungen eintritt.

Die Ergebnisse der Kerbschlagversuche an den gealterten Proben sind in Bild 13 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Zähigkeit der WEZ infolge Alterung um bis zu 37% gegenüber den unbehandelten Schweißnähten zurückgeht, aber immer noch deutlich über denen des unbeeinflussten Grundwerkstoffs liegt.

3.9 Eignung alter Flusstähle zum Schweißen in Zwangslagen

Ausgehend von den sehr konservativen Einschätzungen der Schweißeignung alter Flusstähle (s. Abschn. 2) wurden zu Beginn der beschriebenen Untersuchungen sehr günstige Randbedingungen (X-Nähte, Wannelage, dünne Elektroden) für das Schweißen gewählt. Schweißdetails in realen Sanierungsaufgaben erfordern häufig das Schweißen in Zwangslagen, wie z. B. die Herstellung von steigenden Nähten. Aus diesem Grund und angesichts der sehr guten Ergebnisse wurden in einer weiteren Untersuchungsstufe Proben mit steigenden Stumpfnähten (X-Nahtform) hergestellt und analysiert.

Technologisch bedingt sind steigende Nähte mit geringer Stromstärke zu schweißen, um das schnelle Erstarren des zusätzlich durch die Schlacke gestützten Schweißguts zu erreichen. Dies kann vereinzelt zum Einschluss von (Schlauch-)Poren führen, z. B. beim Überschweißen von Hohlräumen oder ausgasenden Einschlüssen [39]. Es ist daher zu empfehlen, solche Nähte insbesondere bei stark verunreinigten Flusstählen auf Porenfreiheit zu überprüfen und ggf. nachzubessern.

Im Gegensatz zu Nähten in Wannelage müssen steigende Nähte in Pendellagentchnik statt mit Zugraupen geschweißt werden. Dies führt zu einer deutlich höheren Wärmeeinbringung und damit verbunden zu einer langsameren Abkühlung (s. Abschn. 3.6). Um die Versuchsbedingungen weiter zu verschärfen, wurden für die Zwischen- und Decklagen basische Elektroden mit 3,25 mm Kerndrahtdurchmesser eingesetzt und damit die eingetragene Wärmemenge zusätzlich erhöht. Dadurch war die Streckenenergie pro Schweißlage gegen-

über den ersten Schweißproben in Wannelageposition etwa dreimal so groß.

Die metallografischen Untersuchungen dieser Schweißnähte zeigten, dass durch den höheren Wärmeeintrag eine Grobkornzone in der WEZ entstand. Deshalb sanken die im Kerbschlagbiegeversuch analysierten mittleren Werkstoffzähigkeiten dieser Bereiche. Sie lagen aber immer noch höher als im unbeeinflussten Grundwerkstoff. Auch in den Querschnittversuchen versagten die Proben unverändert im Altstahl, fernab der Schweißnaht.

4 Eignung anderer Schweißverfahren und -zusatzwerkstoffe zum Schweißen alter Flusstähle

Zum Schweißen von reineren Flusstählen (geringerer Phosphor- und Schwefelgehalt) sind auch rutilbasisch umhüllte Elektroden (z. B. Kjellberg GARANT BR, OPTIMAL o. Ä.) einsetzbar. In Schweißversuchen wurden damit ähnlich gute Werkstoffeigenschaften realisiert, da diese wie die basischen Elektroden am „kühleren“ Pluspol verschweißt werden können und dadurch der Wärmeeintrag in den Altstahl begrenzt wird. Neben einer leichteren Verarbeitbarkeit sind mit diesen Elektroden feinschuppigere Nähte mit kerbarmem Übergang herstellbar. Beim Schweißen in Zwangslagen ist besonderes Augenmerk auf die Vermeidung von Poren und Schlackeneinschlüssen zu legen.

Ein wesentlicher Vorteil des Einsatzes basisch umhüllter Stabelektroden ist neben dem sehr duktilen Schweißgut die Fähigkeit der Umhüllung, schädliche Eisenbegleiter zu binden und zu verschlacken. Müssen größere Nahtvolumina bzw. längere Nähte geschweißt werden, lassen sich ähnlich günstige Güterwerte auch mit dem Metalllichtbogenschweißen unter Einsatz von basischem Fülldraht erreichen. Dies wurde in ersten Testschweißungen an Flusstahl nachgewiesen. Da basischer Fülldraht T46 4 B M 3 H5 nach DIN EN ISO 17632 (hier DT-BF 31 der Fa. DRATEC) nur in Wannelage verschweißbar ist, wurden zum Vergleich Probeschweißungen mit einem rutilen Fülldraht T46 P C/M 1 H5 (hier Fluxofil 14HD der Fa. Oerlikon) hergestellt. Dieser Fülldraht ist für das Schweißen in Zwangslagen ebenso wie für den Einsatz unter Baustellenbedingungen geeignet.

Aufgrund der höheren Streckenenergie beim Fülldrahtschweißen ist der Wärmeeintrag bereits in Position PA (Wannelage) trotz Zugraupentechnik so hoch wie bei steigend geschweißten Nähten mit basisch umhüllten Stabelektroden. Dies führt zu einer beginnenden Grobkornbildung und sinkender Zähigkeit in der WEZ (s. Abschn. 3.9). Dieser Effekt konnte auch an allen mit Fülldraht geschweißten Nähten unabhängig vom verwendeten Zusatzwerkstoff nachgewiesen werden. Beim Schweißen in Zwangslage (z. B. steigende Naht, Position PF) sinkt technologisch bedingt die Schweißgeschwindigkeit in den Zwischen- und Decklagen, wodurch sich der Wärmeeintrag deutlich erhöht. Dies führt zu einer ausgeprägten Grobkornzone in den WEZ verbunden mit einer deutli-

chen Reduzierung der Werkstoffzähigkeit des Altstahls. Das Fülldrahtschweißen ist folglich nur für lange dünne Nähte und Ausführung in Wannenlage oder das „Speckschicht-Schweißen“ [11] geeignet.

5 Zusammenfassung

Die im vorgestellten Forschungshaben erzielten Ergebnisse zeigen, dass für die untersuchten Werkstoffe die bereits in der Fachliteratur für Einzelfälle dokumentierten Möglichkeiten zum Verschweißen von Altstählen offensichtlich mit geeigneten Maßnahmen nutzbar sind. Die allgemein vorherrschende Meinung, das Schmelzschweißen für diese Werkstoffe generell abzulehnen, wird von den Ergebnissen des Projekts nicht bestätigt.

Als Fügepartner für Reparatur- oder Verstärkungsmaßnahmen genügt ein normaler S235J2. Dieser ist den üblichen alten Flusstählen in Schweißseignung und Zähigkeit überlegen. Werden die folgenden Empfehlungen zum Schweißen eingehalten, stellen die Schweißnaht bzw. die WEZ keinen Schwachpunkt dar und die typischerweise geringere Festigkeit des Altstahls ist bei der Bemessung der Gesamtkonstruktion maßgebend.

Für Tragkonstruktionen mit ermüdungsrelevanten Beanspruchungen stehen systematische Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit aus. Es ist naheliegend, dass sich die eingehend beschriebenen günstigen Einflüsse auf die Gefügestruktur im Bereich der Schweißnaht und WEZ ebenfalls nicht ungünstiger als für normalen Baustahl auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken. Im Resultat von Ermüdungsversuchen an Flusstahlschweißungen aus dem Jahr 2016 [38] wird festgestellt: „Das Schweißen an Altmaterial hat keinen signifikanten negativen Einfluss auf die Dauerfestigkeit von Altstahlkonstruktionen. Entscheidend ist die geometrische Kerbe im Bauteil – die Kerbe macht den Bruch.“ Das Probenmaterial stammte aus vier unterschiedlichen Bauteilen, die allerdings nicht durchgehend ausreichende Probenanzahlen zuließen.

5.1 Empfohlene Werkstoffanalysen zur Bewertung der Schweißseignung

Trotz der überwiegend positiven Ergebnisse der beschriebenen Untersuchungen kann keine uneingeschränkte Schweißseignung für alte Flusstähle attestiert werden. Die untersuchten Werkstoffe repräsentieren auch in Anbetracht ihrer ungünstigen chemischen Zusammensetzungen nicht die Gesamtheit der Flusstähle aus einem Herstellungszeitraum von über 60 Jahren.

Zur Beurteilung der Schweißseignung eines Bauteils aus altem Flusstahl sind nach Ansicht der Autoren die folgenden Untersuchungen notwendig:

1. Durchführung einer chemischen Analyse (mindestens 5er-Analyse, C, Si, Mn, P und S). Sie muss auf dem

Tab. 4 Grenzwerte für schweißgeeignete Flusstähle
Limit values for weldable mild steels

C [%]	P [%]	S [%]
0,25	0,08	0,06

Querschnitt der Probe erfolgen (nicht auf der Bauteiloberfläche), um die Seigerungen der meist unberuhigt vergossenen Stähle zu erfassen. Es ist zwingend erforderlich, ebenfalls den Stickstoffgehalt zu bestimmen, z. B. mittels Trägergas-Heißextraktion. Für schweißgeeignete Flusstähle werden Grenzwerte laut Tab. 4 empfohlen.

Bei Überschreitung der Grenzwerte kann die Schweißseignung durch eine in dieser Thematik erfahrene Fachstelle geprüft werden. Die Erfahrungen aus den in Abschn. 3 vorgestellten Untersuchungen ermöglichen u. U. auch in solchen Fällen das Schweißen.

2. Anfertigen eines ungeätzten Längsschliffs (längs der Profil- bzw. Walzrichtung), um die Schlackenausbildung und Schlackenhäufigkeit zu untersuchen. Diese verursacht beim Schweißen in Zwangslagen u. U. die Entstehung von Poren. Darüber hinaus beeinflusst sie bei Kehlnahtschweißungen an der Bauteiloberfläche eine mögliche Reduzierung der Tragfähigkeit in Dickenrichtung (terrassenbruchartiges Versagen).
3. Anfertigen eines Baumannabdrucks am Querschliff (quer zur Profil- bzw. Walzrichtung) zur Bestimmung der Seigerungszone und Dicke der Speckschichten. Diese Untersuchungen sind insbesondere für die Herstellung von Kehlnähten an der Bauteiloberfläche („Speckschicht-Schweißen“ [11]) von Bedeutung. Die Begrenzung der Einbrandtiefe muss durch Probenschweißungen und eine daraus abgeleitete Schweißanweisung (WPS) abgesichert werden.

Für diese Untersuchungen ist eine Werkstoffprobe z. B. mittels Kernlochbohrung (Probendurchmesser ca. 20 mm) zu entnehmen. Es ist darauf zu achten, dass die Längs- bzw. Walzrichtung des Bauteils auf der Probe gekennzeichnet wird. Die Probenentnahme muss grundsätzlich an dem Bauteil und in dem Querschnittsbereich (z. B. Randbereich des Flansches) erfolgen, an dem geschweißt werden soll. Ist die Schweißaufgabe noch nicht konkret bekannt, muss die Probe immer im „schweißkritischsten“ Teil des Querschnitts (z. B. bei I- und U-Profilen im Steg) entnommen werden, da Flusstähle bis in die 1930er-Jahre fast ausschließlich unberuhigt vergossen hergestellt wurden.

Unabhängig von den Ergebnissen der genannten Werkstoffuntersuchungen ist zu empfehlen, der geplanten Schweißaufgabe entsprechend eine Verfahrensprüfung am zu schweißenden Altstahlmaterial durchzuführen (z. B. Abschn. 6.1). Dies gilt besonders für ausführende Fachbetriebe, die nicht über ausreichende Erfahrungen beim Schweißen alter Stähle verfügen. Es sollte eine erfahrene Fachstelle hinzugezogen werden, um die Untersuchungen auf Schweißseignung abzusichern und gemein-

sam eine hierauf abgestimmte Schweißanweisung (WPS) zu erarbeiten.

5.2 Empfehlungen zur Vorbereitung und Ausführung der Schweißarbeiten

Abhängig von der jeweiligen Schweißaufgabe sollten die folgenden Empfehlungen beim Schweißen alter Flussstähle beachtet werden:

- Entfernen von Altbeschichtungen und ggf. vorhandenen Korrosionsprodukten (Rost) im Schweißnahtbereich.
- Vorwärmen des Nahtbereichs vor dem Schweißen auf ca. 80°C, z. B. mit einem Autogenbrenner mit Brausekopf. Sollten nach der Entrostung noch vereinzelte Rostmulden zurückbleiben, ist hierdurch gewährleistet, dass die Feuchtigkeit aus diesen Bereichen heraustrgetrocknet und damit eine Wasserstoffversprödung der Schweißnaht vermieden wird.
- Zum Schweißen sind grundsätzlich rückgetrocknete, basisch umhüllte Stabelektroden mit einem Kerndrahtdurchmesser von max. 3,25 mm (2,5 mm beim Schweißen in Zwangslage) zu verwenden. Basisch umhüllte Elektroden werden empfohlen, damit beim Schweißen in den Speckschichten nur ein geringer Einbrand zustande kommt. Beim Schweißen in den Seigerungen binden diese Elektroden am besten schädliche Eisenbegleiter und führen sie in die Schlacke ab.
- Schweißnähte sind grundsätzlich in Mehrlagentechnik (mit Zug- oder ggf. Pendelraupen) herzustellen, um die Eigenspannungen im Nahtbereich zu minimieren und eine Kornverfeinerung in den WEZ zu erreichen. Die Streckenenergie der Einzellagen ist auf etwa

25 kJ/cm Nahtlänge zu begrenzen, um eine Grobkornbildung in den WEZ weitestgehend zu vermeiden.

- Stumpfnähte sind grundsätzlich als durchgeschweißte Nähte auszuführen. Beidseitig geschweißte Nähte (z. B. X-Naht) sind einseitig geschweißten vorzuziehen, sofern die Zugänglichkeit gegeben ist. Wird die Stumpfnah einseitig ausgeführt (z. B. V-Naht in Wannenlage), ist die Wurzellage möglichst auszuschleifen und gegenzuschweißen. Ist die Gegenseite nicht zugänglich (z. B. Obergurtlamelle auf Gurtwinkeln), kann die Wurzel durch eine Schweißbadsicherung geformt und das Anschmelzen der darunterliegenden Bauteile vermieden werden.
- Die Nahtvorbereitung erfolgt vorzugsweise symmetrisch an beiden Fügepartnern, aber mindestens auf Seite des Altstahls, um einen sanften Werkstoffübergang zu gewährleisten.
- Wie allgemein bekannt kein Schweißen im Bereich von Kaltumformungen. Durch Rekristallisation kaltverformter Fügeile im Temperaturbereich um 650°C kommt es bei den meist hoch stickstoffhaltigen Altstählen zu unerwünschten Alterungserscheinungen durch das Ausscheiden von Eisennitriden. Dies ist besonders im Bereich von Nietlöchern, Blechkanten und Profilen relevant, da diese häufig durch Stanzen und Scheren hergestellt wurden [37].

6 Ausführungsbeispiele

6.1 Sanierung der Buckelbleche einer genieteten Straßenbrücke

Bei der Sanierung der Straßenbrücke im Alberthafen Dresden (Baujahr 1894) wurden nach dem Ausbau des Fahrbahnbelags und der Abdichtung teils erhebliche Kor-



Bild 14 a) Brücke mit geschädigten Buckelblechen, b) neu eingeschweißte Tropftüllen
a) Bridge with corroded buckled plates, b) newly welded drainage pipes

Quelle: HTW Dresden



Bild 15 a) Geschädigter Randträger nach Anprall, b) Reparatur durch Einschweißen eines neuen Trägerstücks
 a) Damaged edge beam after impact, b) repair by welding in a new beam piece

rosionsschäden an den darunter befindlichen Buckelblechen festgestellt. Neben einer flächigen Rostvernarbung waren vor allem die Entwässerungsöffnungen in den Tiefpunkten der Buckelbleche betroffen. Der Sanierungsentwurf sah vor, die Öffnungen zu erweitern und Tropftüllen aus Stahlrundrohr für einen kontrollierten Wasserablauf einzubauen. Nach dem Strahlen der korrosionsschädigten Bauteile wurde sichtbar, dass nahezu die Hälfte der Buckelbleche an den Öffnungen für einen direkten Anschluss der Rohrstücke zu stark geschädigt war. Hier wurden ca. 40 cm × 40 cm große Stücke entfernt und durch neue, vorgekrümmte Bleche inkl. Tropftüllen ersetzt.

Da die Brücke zukünftig nur noch als Geh- und Radwegbrücke genutzt werden soll, erfolgte die Demontage des einseitig vorhandenen Gehwegs. Die Buckelbleche der demontierten Konstruktion standen damit für Untersuchungen der Schweißeignung zur Verfügung. Es wurden mehrere Probeschweißungen für die zwei beschriebenen Sanierungsvarianten hergestellt und mechanisch sowie metallografisch untersucht (Bild 14). Im Ergebnis der Untersuchungen wurden tragfähige und fehlerfreie Schweißnähte attestiert sowie in Anbetracht der nur durchschnittlichen Gehalte an Eisenbegleitern die Schweißeignung der alten Buckelbleche bestätigt.

6.2 Sanierung eines Anprallschadens an einer Eisenbahnüberführung in WIB-Bauweise

Der Anprall eines Transportfahrzeugs an die Eisenbahnüberführung Ritschenhausen beschädigte den Randträger

des WIB-Überbaus. Da die Stahlträger dieses historischen Überbaus (Baujahr 1910) nicht wie heute üblich vollständig einbetoniert, sondern lediglich mit Kammerbeton versehen waren, wurde ein ca. 1 m langes Stück des Untergurts aus dem Träger herausgerissen (Bild 15). Der Reparaturentwurf sah vor, den abgerissenen Untergurt durch einen coupierten Stahlträger ähnlicher Abmessungen zu ersetzen. Der Anschluss mittels geschraubter Laschen war wegen eines störenden Stahlbetonquerträgers nicht möglich (Bild 15). Nach der chemischen und metallografischen Analyse des Altstahlmaterials wurde deshalb entschieden, das neue Trägerstück in den Bestandträger einzuschweißen. Um ungewollte Eigenspannungen infolge der Querschrumpfung der Schweißnähte zu vermeiden, wurde nur die querträgernahe Stirnseite stumpf geschweißt. Der Anschluss der gegenüberliegenden Seite erfolgte nach Abschluss der Schweißarbeiten durch aufgeschraubte Laschen. Die Schweißnähte wurden nach einer Oberflächenrissprüfung vollständig einer Ultraschallprüfung nach DIN EN ISO 17640 unterzogen, sodass innere Ungenzen wie Schlauchporen oder Bindefehler ausgeschlossen werden konnten.

Dank

Das vorgestellte Forschungsprojekt wurde mitfinanziert aus Steuermitteln auf Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushalts. Die beiden Industrie-Kooperationspartner DB Bahnbau Gruppe GmbH (Brückenwerkstatt Dresden) und Kjellberg Finsterwalde Elektroden und Zusatzwerkstoffe GmbH wirkten aktiv im Forschungsprojekt mit. Außer-

dem unterstützten Herr Prof. Dr.-Ing. Gunther Göbel, Professur Fügetechnik, und Herr Dipl.-Ing. (FH) Marco Steinhauser, Bereich Produktionstechnik – beide Angehörige der Fakultät Maschinenbau an der HTW Dresden – das Forschungsprojekt sowohl wissenschaftlich als auch in der Durchführung von Versuchen. Die Förderer und Partner des Forschungsvorhabens haben wesentlichen Anteil am Erkenntnisgewinn im Projekt. Für ihr konstruktives Mitwirken bedanken sich die Autoren außerordentlich.

Literatur

- [1] Deutsche Bahn AG [Hrsg.] (2019) *Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2018 – Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung*. Ausgabe Apr. 2019.
- [2] Bowman, M. D.; Piskorowski, A. M. (2004) *Evaluation and Repair of Wrought Iron and Steel Structures in Indiana*. Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- [3] Sire, S.; Douroux, J.-F. (2015) *The Electric Arc Welding Reinforcement Of Steel Bridges From The Paris Metro In The 1930s: The Case Of The Austerlitz Viaduct Over The Seine* in: Bowen, B.; Friedman, D.; Leslie, T. et al. [eds.] *Proceedings of the Fifth International Congress on Construction History (ICCH)*. Construction History Society of America, Chicago, Illinois, 3–7 June 2015. pp. 345–354.
- [4] Deutscher Stahlbau-Verband [Hrsg.] (1996) *Stahlbau-Handbuch – Für Studium und Praxis, 1B*. Köln: Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH.
- [5] Helmerich, R. (2005) *Alte Stähle und Stahlkonstruktionen – Materialuntersuchungen, Ermüdungsversuche an originalen Brückenträgern und Messungen von 1990 bis 2003*. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin.
- [6] Cremona, C.; Patron, A.; Johansson, B. et al. (2007) *Improved Assessment Methods for Static and Fatigue Resistance of Old Steel Railway Bridges – Sustainable Bridges*. Background Document, Final Draft. European Commission. Ausgabe Aug. 2007.
- [7] Kühn, B.; Lukic, M.; Nussbaumer, A. et al. (2008) *Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life – Background documents in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*. JRC European Commission.
- [8] Käßlein, R.; Wielgosch-Frey, A. (2001) *Historische Eisen- und Stahlkonstruktionen – Untersuchen, Berechnen, Instandsetzen*. Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe.
- [9] Möll, R. (1997) *Altstahlschweißen und Nieten im Zuge der Grunderneuerung des „Eisernen Steges“ in Frankfurt am Main* in: Stahlbau 66, H. 1, S. 1–11.
- [10] Stroetmann, R.; Flederer, H.; Schmidt, H. et al. (2009) *Personenaufzug Bad Schandau – Revitalisierung eines denkmalgeschützten Turmbauwerks* in: Stahlbau 78, H. 9, S. 662–676.
- [11] Lüddecke, F. (2006) *Ein Beitrag zur Ertüchtigung bestehender Stahltragwerke unter besonderer Berücksichtigung des Fügeverfahrens Schweißen* [Dissertation]. BAM Dissertationsreihe Heft 17, Technische Universität Dresden. Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- [12] Lüddecke, F.; Mehdiانpour, M.; Graße, W. (2008) *Schweißen ermüdungsbeanspruchter Altstahlkonstruktionen – Untersuchungen zum Spröbruchverhalten geschweißter Verbindungen aus Flusstahl* in: Stahlbau 77, H. 8, S. 588–594.
- [13] Möll, R. (2000) *Grundhafte Erneuerung des großen Palmenhauses im Palmengarten in Frankfurt am Main* in: Stahlbau 69, H. 10, S. 741–755.
- [14] Mang, F.; Steidl, G.; Bucak, Ö. (1985) *Altstahl im Bauwesen* in: Schweißen und Schneiden 37, H. 1, S. 10–14.
- [15] Nießen, T. (1994) *Statistische Auswertung der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften von Flußstählen und Puddelstählen aus älteren Brückenkonstruktionen* [Diplomarbeit]. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- [16] Reiche, A. (2000) *Zustandsbewertung von metallischen Tragwerkskomponenten*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag.
- [17] DIN Taschenbuch 4 (1952) *Teil A – Werkstoffnormen Stahl und Eisen, Technische Lieferbedingungen Eigenschaften, Abmessungen*. Berlin: Beuth-Verlag.
- [18] DIN 17100 (1957) *Allgemeine Baustähle*. Berlin: Beuth. Ausgabe Okt. 1957.
- [19] TGL 7960 (1960) *Allgemeine Baustähle Gütebedingungen. DDR-Standard*. Ausgabe Sept. 1960.
- [20] DIN EN 10025 (1994) *Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen. Technische Lieferbedingungen*. Berlin: Beuth. Ausgabe März 1994.
- [21] Leuschke, U. (2013) *Einfluss von Ausscheidungen auf das Duktilitätsverhalten einzelner Erstarrungsgefüge während der Drahtwalzung am Beispiel von Automatenstahl*. Berichte aus dem Institut für Eisenhüttenkunde, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Band 6/2014. Aachen: Shaker Verlag.
- [22] Schulze, G. (2010) *Die Metallurgie des Schweißens – Eisenwerkstoffe – Nichteisenmetallische Werkstoffe*. VDI-Buch. Berlin: Springer-Verlag.
- [23] Baehre, R.; Käßlein, R. (1990) *Zeitabhängige Änderungen von Werkstoffeigenschaften bei alten Baustählen. SFB 315 – Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke*. Universität Karlsruhe. Berlin: Ernst und Sohn.
- [24] Schatt, W.; Simmchen, E.; Zouhar, G. (1998) *Konstruktionswerkstoffe des Maschinen- und Anlagenbaues*. Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- [25] DIN EN ISO 2560 (2010) *Schweißzusätze – Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung*. Berlin: Beuth.
- [26] DIN EN ISO 17636-1 (2013) *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Durchstrahlungsprüfung – Teil 1: Röntgen- und Gammastrahlungstechniken mit Filmen*. Berlin: Beuth.
- [27] DIN EN ISO 10675-1 (2017) *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Zulässigkeitsgrenzen für die Durchstrahlungsprüfung – Teil 1: Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen*. Berlin: Beuth.

- [28] DIN EN ISO 15614-1 (2017) *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung – Teil 1: Lichtbogen- und Gas-schweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen*. Berlin: Beuth.
- [29] DIN EN ISO 4136 (2013) *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Querzugversuch*. Berlin: Beuth.
- [30] DIN EN ISO 9016 (2013) *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Kerbschlagbiegeversuch – Probenlage, Kerbrichtung und Beurteilung*. Berlin: Beuth.
- [31] DIN EN ISO 17639 (2013) *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Makroskopische und mikroskopische Untersuchungen von Schweißnähten*. Berlin: Beuth.
- [32] DIN 50125 (2016) *Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben*. Berlin: Beuth.
- [33] DIN EN ISO 148-1 (2017) *Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy – Teil 1: Prüfverfahren*. Berlin: Beuth.
- [34] DIN EN ISO 643 (2013) *Stahl – Mikrophotographische Bestimmung der erkennbaren Korngröße*. Berlin: Beuth.
- [35] Langenberg, P. (1996) *Bruchmechanische Sicherheitsanalyse anrissgefährdeter Bauteile im Stahlbau* [Dissertation]. Berichte aus dem Institut für Eisenhüttenkunde, Institut für Eisenhüttenkunde RWTH Aachen. Aachen: Shaker.
- [36] Zerbst, U.; Hübner, P. (2004) *Bruchmechanische Bewertung von Fehlern in Schweißverbindungen – Merkblatt DVS 2401* in: Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. [Hrsg.] *Fachbuchreihe Schweißtechnik 101*.
- [37] Sieber, L. (2017) *Zur Beurteilung der Sprödbruchgefährdung gelochter Stahltragwerke aus Flusstahl* [Dissertation]. Technische Universität Dresden.
- [38] Doliva, S. (2016) *Einfluss des Reparaturschweißens von Altstählen auf deren Restlebensdauer* [Dissertation]. Berlin.
- [39] Dilthey, U. (2005) *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2 – Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Autoren

Dr.-Ing. Lars Sieber (IWE) (Korrespondenzautor)
Prof. Dr.-Ing. Holger Flederer
M.Sc. André Kilian
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
Labor Konstruktiver Ingenieurbau an der Fakultät Bauingenieurwesen
Friedrich-List-Platz 1
01069 Dresden

Zitieren Sie diesen Beitrag

Sieber, L.; Flederer, H.; Kilian, A. (2020) *Das Schweißen alter Flusstähle – Eine Option für die Instandsetzung bestehender Tragwerke*. Stahlbau 89, H. 4, S. 357–371. <https://doi.org/10.1002/stab.202000003>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 22. Januar 2020; angenommen: 19. Februar 2020.



Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

Unsere Forschungsschwerpunkte

- // Beurteilung und Umgang mit bestehenden Stahlkonstruktionen
- // Ermüdungsverhalten und Restnutzungsdauer
- // Holzkonstruktionen unter nicht-ruhenden Lasten
- // Carbonbewehrte Betontragwerke
- // Resilienz von Tragstrukturen

Unsere Dienstleistungen

- // Experimentelle und numerische Ermittlung der Trag- und Ermüdungssicherheit von Bauteilen und Tragwerken
- // Statisch konstruktive Beurteilung bestehender Tragkonstruktionen des konstruktiven Ingenieurbaus
- // Verhalten von Baukonstruktionen unter dynamischen Lasten
- // Bauwerkserhaltung / Verstärken von Baukonstruktionen
- // Versuchsgestützte Bemessung



Prof. Dr.-Ing. Holger Flederer
Leiter Labor Konstruktiver Ingenieurbau
Tel.: +49 351 462 2435
Email: holger.flederer@htw-dresden.de



Dr.-Ing. Lars Sieber
Leitender Forschungs- und Entwicklungsingenieur
Tel.: +49 351 462 3815
Email: lars.sieber@htw-dresden.de



HOCHSCHULE FÜR
TECHNIK UND WIRTSCHAFT
DRESDEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES