

34. Schweißtechnische Fachtagung

Eine Gemeinschaftsveranstaltung von:

**Schweißtechnische
Lehranstalt Magdeburg**
Gemeinnützige GmbH



15. Mai 2025

Barleben



Impressum

34. Schweißtechnische Fachtagung

Herausgeber*innen:

Manuela Zinke, Marlen Wenzel und Marco Brietz

Kontaktadresse:

Institut für Werkstoffe, Technologien und Mechanik (IWTM)

Lehrstuhl für Fügetechnik

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Universitätsplatz 2

39106 Magdeburg, Germany



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 Lizenz (CC BY-SA 4.0). Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell, sofern der neu entstandene Text unter derselben Lizenz wie das Original verbreitet wird.

(Lizenz-Text: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>)

Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z. B. Schaubilder, Abb.en, Fotos und Textauszüge erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

ISBN 978-3-948749-56-9

DOI 10.25673/118884

1. Auflage, Mai 2025

Manuskriptdrucke. Die Autor*innen zeichnen für ihre Beiträge inhaltlich selbstverantwortlich. Die Manuskripte wurden durch die Herausgeber*innen nur redaktionell bearbeitet.

© 2025



Inhalt

Vorwort	4
Höchstspannungsfreileitungen zur Energieversorgung: Praxisberichte aus Fertigung, Schweißtechnik und Korrosionsschutz H. Tietze, A. Klein und B. Postrach, Jerichow / OT Redekin.....	7
Schweißen an Bauteilen für den Einsatz in einem atomaren Endlager - Losprüfung an Schweißzusätzen D. Baunack, Gerstungen sowie G. Fiebig, F. Pennartz, Peine	15
Neue Energieträger und resultierende Herausforderungen für die Schweißtechnik M. Schwetlick und R. Paschold, Langenfeld	26
Korrosionsschutz im Werk und auf der Baustelle aus der Sicht der Inspektorin E. Epperlein, N. Gaier, Hannover und J. Vogelsang, Duisburg	37
Bewertung von Schäden an Stahlbrücken und deren Instandsetzungen B. Senk und F. Schlufter, Nordhausen	44
Automatische Programmierung von Industrierobotern E. May, E. Bethge und M. Köhler, Magdeburg.....	54
Montagekatastrophen C. Männel, Zwickau.....	63
Autorenverzeichnis.....	67
Posterbeiträge	68
Vorankündigung	74

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

wir laden Sie herzlich zur 34. Schweißtechnischen Fachtagung ein, Ihrer etablierten Informations- und Netzwerkplattform für die Schweißtechnik. In diesem Jahr begrüßen wir Sie in unserer neuen Tagungsstätte mit einem Programm, das speziell auf die aktuellen Bedürfnisse von kleinen und mittelständischen Unternehmen sowie Vertretern aus Industrie, Lehre und Forschung zugeschnitten ist.

Erweitern Sie Ihr Wissen durch praxisnahe Berichte und innovative Lösungsansätze in Bereichen wie Höchstspannungsfreileitungen, Schweißen für atomare Endlager, den Einfluss neuer Energieträger, modernen Korrosionsschutz, die Sanierung von Stahlbrücken und die Automatisierung durch Industrieroboter. Profitieren Sie von unserem Angebot zu Montageherausforderungen und der unverzichtbaren Dokumentation.

Knüpfen Sie wertvolle Kontakte zu Fachkollegen und informieren Sie sich in unserer begleitenden Fachausstellung über die neuesten Produkte und Dienstleistungen. Wir sind zuversichtlich, dass Sie von dieser Tagung wertvolle Impulse für Ihre tägliche Arbeit mitnehmen werden!

Marlen Wenzel
DVS Bezirksvorstand
Magdeburg

Prof. Sven Jüttner
Institut für Werkstoffe, Technologien
und Fügetechnik
Lehrstuhl Fügetechnik

Marco Brietz
Schweißtechnische Lehranstalt
Magdeburg gGmbH

Magdeburg, im Mai 2025

- Anerkannt als Ausbildungsstätte und Prüfstelle (DVS-PersZert) für Schweißtechnik
- Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001
- Kooperationspartner von DVS-Zert für die Auditierung nach DIN EN 1090 und ISO 3834
- Werkstoffprüflabor akkreditiert nach DIN EN ISO 17025
- AZAV Träger- und Maßnahmezulassung für Schweißer und Schweißaufsichtspersonen
- Schadensanalyse und Sachverständigentätigkeiten

Schweißen will gelernt sein!

Sichern Sie sich Ihren Wettbewerbsvorteil durch schweißtechnisches Know How

Wir sind Ihr kompetenter Partner

- Schweißer Ausbildung in den manuellen Verfahren MAG-Schweißen, E-Schweißen, WIG-Schweißen, Gas-Schweißen mit Prüfungen nach ISO 9606, Betonstahl, DGRL und anderen Regelwerken
- Bedienerprüfungen nach ISO 14732 für UP-Schweißen, Bolzenschweißen sowie Orbitalschweißen
- Schulungen an Robotersystemen von CLOOS und Universal Robots (CoBot) i. V. m. Schweißtool von Smooth Robotics inkl. Bedienerprüfung (gemäß ISO 14732)
- Kundenspezifische Informations- und Weiterbildungsveranstaltungen in verschiedenen Themenbereichen der Automatisierung
- Ausbildung zur Flammrichtfachkraft, optional mit Prüfung
- Abnahme von Schweißer- und Bedienerprüfungen vor Ort in ihrem Unternehmen (ISO 9606, ISO 14732)
- Qualifikation von Schweißaufsichtspersonen – Schweißpraktiker oder Schweißfachmann mit international anerkanntem Abschluss (nach Richtlinie DVS-IIW 1170)
- Qualifikation zum Sichtprüfer nach ISO 9712 (VT 1/2 „w“)
- Seminare, Workshops und Erfahrungsaustausche für Schweißfachleute, Schweißaufsichtspersonen und alle Interessierten
- Gemäß AZAV zugelassene Weiterbildungsmaßnahmen für Schweißer und schweißtechnisches Fachpersonal



- Anerkannt als Ausbildungsstätte und Prüfstelle (DVS-PersZert) für Schweißtechnik
- Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001
- Kooperationspartner von DVS-Zert für die Auditierung nach DIN EN 1090 und ISO 3834
- Werkstoffprüflabor akkreditiert nach DIN EN ISO 17025
- AZAV Träger- und Maßnahmezulassung für Schweißer und Schweißaufsichtspersonen
- Schadensanalyse und Sachverständigentätigkeiten

Qualifizierungschancengesetz

Förderung der beruflichen Weiterbildung durch die Agentur für Arbeit – Regelung ab 01.04.2024

Das „Gesetz zur Stärkung der Chancen für Qualifizierung und für mehr Schutz in der Arbeitslosenversicherung“, kurz „Qualifizierungschancengesetz“, ermöglicht Kleinbetrieben, mittelständischen Unternehmen (KMU) sowie größeren Betrieben Fördermittel für die Weiterbildung ihrer Arbeitnehmer zu beantragen. Darüber hinaus können neben den förderfähigen Lehrgangskosten auch Arbeitsentgeltzuschüsse beantragt werden.

mögliche Förderungen:

Betriebsgröße	Zuschuss zu Lehrgangskosten	Zuschuss zu Arbeitsentgelt
Betriebe mit weniger als 50 Beschäftigten	100 %	75 %
Betriebe mit 50 – 499 Beschäftigten	50 %	50 %
bei älteren ^① oder schwerbehinderten ^② Beschäftigten	100 %	50 %
Betriebe ab 500 Beschäftigte	25 %	25 %

① „älter“ entspricht der Vollendung des 45. Lebensjahres

② i.S. des § 2 Abs. 2 SGB IX, Grad von min. 50 %

Die Förderung weiterbildungsbedingter Ausfallzeiten durch einen Arbeitsentgeltzuschuss (AEZ) ist auch für Weiterbildungen, die nicht zu einem Berufsabschluss führen, möglich.

*Beachtet werden muss allerdings, dass Beschäftigte nur gefördert werden können, wenn der letzte erworbene **Berufsabschluss mindestens zwei Jahre** zurückliegt bzw. **in den letzten zwei Jahren keine Förderung** gemäß § 82 SGB III erhalten haben. Darüber hinaus sind nur Weiterbildungen förderfähig, die von einem zugelassenen Träger durchgeführt werden und **mehr als 120 Stunden** (entspricht min. 18 Tage) umfassen.*

Für geringqualifizierte Mitarbeiter (§ 81 Abs. 2 i.V.m. § 82 SGB III), die an berufsabschlussorientierten Weiterbildungen teilnehmen, gelten diese Einschränkungen nicht!

> > > Über unser Modul C bieten wir Ihnen gern auch kundenspezifische Lehrgänge an. < < <

Für Fragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung. Sprechen Sie uns gerne an:

Marco Brietz

Leiter Marketing / Vertrieb

Tel.: 039203 761 - 43

Mobil: 0151 292293 - 77

E-Mail: brietz@sl-magdeburg.de

Adam Kassawat

Leiter Ausbildung

Tel.: 039203 761 - 36

Mobil: 0151 292293 - 82

E-Mail: kassawat@sl-magdeburg.de

1. Einleitung

Wiegel Parey ist Deutschlands größter Hersteller für Gittermaststahl. Wiegel hat jahrzehntelange Erfahrung und Know-how in der Gittermastfertigung, Winkelstahlverarbeitung und Korrosionsschutz. Mit dem TÜV-zertifiziertem Qualitätsmanagementsystem nach DIN EN ISO 9001, einem Umweltmanagementsystem nach DIN EN ISO 14001 und der Schweiß-Zertifizierung nach DIN EN 1090 EXC4 ist Wiegel der Garant für die Realisierung höchster Qualitätsanforderungen.

Wiegel Parey Gittermastbau verfügt über hochmoderne technische Anlagen zum Zuschnitt, Zusammenbau und Schweißen. Zu den Kunden zählen alle deutschen Übertragungsnetzbetreiber, Verteilnetzbetreiber sowie Mobilfunkanbieter und europäische Netzbetreiber. Am Standort in Parey werden seit 1958 Gittermaste produziert. Wiegel übernahm das Werk 1995 und firmiert seitdem unter Wiegel Parey GmbH & Co KG. Im Jahr 2015 konnte in Redekin ein neues Fertigungswerk in Betrieb genommen werden, da in Parey die Kapazitäten nicht mehr ausreichten und keine Erweiterungsmöglichkeit gegeben war. Die Produktionskapazität liegt mit 180 Mitarbeitern bei 12.000-20.000 t Gittermaststahl pro Jahr, produktabhängig. Zum Produktportfolio gehören Freileitungsmaste, Bahnstrommaste, Telekommunikationsmaste, Umspannwerke und Sonderkonstruktionen (Imagevideo).

2. Stromverteilstromnetz in Deutschland

2.1. Warum Gittermaste und die verschiedenen Masttypen

Gittermaste bilden seit über 100 Jahren das Rückgrat der Energieinfrastruktur. Um elektrischen Strom über große Entfernungen möglichst verlustarm zu transportieren zu können ist die Transformation auf hohe und höchste Spannungsebenen (110-1.150 kV) notwendig. Dazu haben sich Freileitungen bewährt. Unter Freileitungen verstehen wir elektrische Leitungen, deren spannungsführende Leiter im Freien durch die Luft geführt werden und die durch die umgebende Luft voneinander und vom Erdboden isoliert sind. Stahlgittermaste können einfach und schnell an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Ab 110kV kommen vornehmlich Stahlgittermaste zum Einsatz. An diesen können nachträglich einfach und wirtschaftlich Veränderungen an der Leiteranordnung vorgenommen werden. Auch Erweiterungen wie zusätzliche Stromkreise können günstig und unkompliziert realisiert werden. Stahlgittermaste passen sich gut an das landschaftliche Bild an. Durch die geschraubte Konstruktion sind Gittermaste einfach zu transportieren und aufzubauen. Eine optimale Widerstandsfähigkeit gegenüber atmosphärischen Einflüssen gewährleistet die Duplexbeschichtung für einen jahrzehntelangen wartungsfreien Einsatz.

Gittermaste können unterschiedliche Erscheinungsformen haben. Sie sind ihrem Einsatzzweck und den Umgebungsbedingungen angepasst. So hat einen wesentlichen Anteil die Leiterseilbelegung mit mehreren Stromkreisen in unterschiedlichen Spannungsebenen. Dazu werden mehrere Traversen notwendig. Ebenso können Datenleiter verlegt werden. Auf die Geometrie wirkt sich ebenfalls das umgebende Gelände aus.

2.2. Wie entsteht ein Gittermast?

Wiegel Parey hat in seinem Rohmateriallager ständig Zugriff auf über 10.000 t Winkelprofile und Bleche. Die Materialgüte ist ausschließlich S355J2. Die Winkelabmessungen reichen von L30x4 bis L300x35.

In der Arbeitsvorbereitung werden aus den Kundenzeichnungen und Stücklisten die benötigten Daten für die Bearbeitung und den Produktionsprozess generiert. Auf den CNC gesteuerten Säge-Bohr-Automaten, Winkelstanzmaschinen und Blechbearbeitungszentren werden die benötigten Profile und Bleche entsprechend bearbeitet. Die Bearbeitungsschritte umfassen das Ablängen, Plasma- und Autogenschneiden, Bohren, Stanzen und Signieren. Nicht alles am Gittermast ist geschraubt.

Bestimmte Teilelemente müssen thermisch gefügt werden. Zur schweißtechnischen Ausstattung gehört das MAG- und Unterpulverschweißverfahren. Dazu hält Wiegel modernste Geräteausstattung und die entsprechenden Qualifikationen vor. Die dann produzierte Rohware wird dann dem Prozess des Feuerverzinkens zugeführt.

2.3. Wer benötigt Stahlgittermaste?

Die vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber 50 Hertz, Amprion, TenneT und TransnetBW bewirtschaften das Hoch- und Höchstspannungsnetz in Deutschland und kümmern sich um dessen zukunfts-gerechten Ausbau auf dem Weg zur klimaneutralen Stromversorgung. Die Gesamtlänge des Hochspannungs-netzes in Deutschland beträgt ca. 95.000 km. Im Bereich der Mittelspannung übertragen die Verteilnetzbetreiber den Strom zu den Endverbrauchern. Die Länge des Verteilnetzes beträgt ca. 1,7 Millionen Kilometer.

2.4. Herausforderungen für uns in der Zukunft

In den nächsten Jahren (bis 2045) sieht der Netzentwicklungsplan Deutschland und der Forecast der deutschen Übertragungsnetzbetreiber eine Gesamtneubautonnage von ca. 130.000 t pro Jahr vor. Auf diesen steigenden Bedarf reagiert Wiegel mit dem Ausbau der Fertigungskapazitäten und Modernisierung des Anlagen- und Maschinenparkes. Im Zuge der Verlängerung der Standzeit steigen zudem die Qualitätsanforderungen und Dokumentationsanforderungen. Aufgrund der hohen Bedarfe und aufgrund kostengünstigerer Produktion rufen die Übertragungsnetzbetreiber verstärkt Gittermaststahl im europäischen Ausland ab. Wiegel stellt sich diesem Wettbewerb mit Innovationsgeist, höchster Qualität und Liefertermintreue. Die von der Bundesregierung beschlossene Klimaneutralität Deutschlands soll bis 2045 umgesetzt sein. Dazu werden auch Stahlgittermaste aus decarbonisiertem Stahl benötigt. Wiegel Parey ist in Deutschland führend in der Herstellung CO₂ reduzierter Gittermaste. Deutschlands größter Übertragungsnetzbetreiber TenneT hat dazu im Jahr 2024 ein erstes Pilotprojekt bei Wiegel fertigen lassen. (CO₂ Video)

3. Gittermastfertigung und Schweißtechnik

3.1. Einleitung

Die Energieinfrastruktur moderner Gesellschaften ist maßgeblich auf den zuverlässigen Transport elektrischer Energie über weite Distanzen angewiesen. Hierbei spielen Hochspannungs-Gittermasten eine zentrale Rolle. Sie ermöglichen die Übertragung großer Energiemengen mit hohen Spannungen, typischerweise im Bereich von 110kV bis 380kV, und tragen somit den steigenden Anforderungen durch Urbanisierung, industrielles Wachstum und die Integration erneuerbarer Energiequellen Rechnung. In Deutschland beispielsweise wird die überwiegende Mehrheit der Hochspannungsfreileitungen von Gittermasten getragen, was ihre fundamentale Bedeutung unterstreicht.

Um die strukturelle Integrität und Langlebigkeit dieser essenziellen Bauwerke zu gewährleisten, ist die Qualität der verwendeten Fügetechniken von entscheidender Bedeutung. Geschweißte Verbindungen stellen in Gittermasten kritische strukturelle Elemente dar, da sie die verschiedenen Stahlbauteile zu einem robusten Rahmenwerk verbinden. Die Güte der Schweißnähte hat direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Lebensdauer dieser Infrastrukturkomponenten, die erheblichen Umweltbelastungen ausgesetzt sind.

3.2. Grundlagen des Unterpulverschweißens (UP-Schweißen)

Das Unterpulverschweißen ist ein Lichtbogenschweißverfahren, bei dem der Lichtbogen zwischen einer kontinuierlich zugeführten, blanken Drahtelektrode und dem Werkstück unter einer Schicht aus körnigem Schweißpulver brennt. Dieses Pulver schmilzt während des Schweißprozesses und bildet eine schützende Schlacke, die das Schweißbad vor atmosphärischen Einflüssen abschirmt. Das Pulver erfüllt dabei drei Hauptaufgaben: Es schützt den Lichtbogen und das Schweißbad vor der umgebenden Luft, beeinflusst die metallurgische Zusammensetzung des Nahtgefüges und verlangsamt die Abkühlung der

Schweißnaht durch die Bildung einer wärmeisolierenden Schlackenschicht. Typischerweise wird das UP-Schweißen in automatisierten oder mechanisierten Prozessen eingesetzt, was eine hohe und gleichbleibende Schweißqualität sowie eine hohe Produktivität gewährleistet.

Das UP-Schweißverfahren bietet eine Reihe bedeutender Vorteile. Durch die Verwendung hoher Schweißströme im Bereich von 300 A bis 2000 A, in Extremfällen bei Mehrfachlichtbogen sogar bis zu 5000 A, werden sehr hohe Abschmelzleistungen und Schweißgeschwindigkeiten erreicht, was zu einer deutlichen Steigerung der Produktivität und einer Reduzierung der Fertigungszeiten führt. Das Verfahren ermöglicht zudem ein tiefes Eindringen in das Grundmaterial, wodurch sich dickwandige Bauteile, typischerweise ab einer Blechdicke von 6 mm, effizient verschweißen lassen. Die schützende Pulverschicht resultiert in einer exzellenten Schweißnahtqualität mit guter Homogenität und einer glatten Oberfläche. Im Vergleich zu anderen Lichtbogenschweißverfahren entstehen beim UP-Schweißen weniger Emissionen wie Rauch, Spritzer und intensive UV-Strahlung, da der Lichtbogen unter dem Pulver verborgen ist. Darüber hinaus besitzt das Verfahren eine gute Spaltüberbrückungsfähigkeit, was bei der Fertigung großer Strukturen mit möglichen Ungenauigkeiten von Vorteil sein kann.

3.3. Anwendung des UP-Schweißens im Gittermastbau für Höchstspannungen

Im Gittermastbau für Höchstspannungsleitungen findet das UP-Schweißen typischerweise in verschiedenen Bereichen Anwendung. Es wird häufig für das Schweißen der Hauptstrukturelemente wie „Turmfüße“, die oft aus dicken Winkelprofilen oder Blechprofilen bestehen. Ein konkretes Beispiel ist die Fertigung von sogenannten "Schmetterlingsprofilen", bei denen zwei Winkelprofile an ihrer Wurzel, also Spitze auf Spitze, mittels UP-Schweißens verbunden werden, um stabilere und tragfähigere Doppel-Eckstiele zu erzeugen.

Die Wahl des UP-Schweißens im Gittermastbau beruht auf mehreren Faktoren. Das Verfahren ermöglicht das effiziente und qualitativ hochwertige Verschweißen der dicken Stahlquerschnitte, die für die hohen strukturellen Anforderungen von Höchstspannungsmasten notwendig sind. Die hohe Schweißnahtqualität ist entscheidend für die strukturelle Integrität unter den erheblichen statischen Lasten (Gewicht der Leiterseile, Eis, Wind) und dynamischen Lasten (windinduzierte Schwingungen). Für die Großserienfertigung bietet das UP-Schweißen aufgrund seiner hohen Abschmelzleistung und der Automatisierungsmöglichkeiten wirtschaftliche Vorteile, da es die Produktionszeit verkürzt und die Kosten senkt. Die Eignung für automatisierte Fertigungsprozesse ist ein weiterer wichtiger Aspekt, da diese in der Stahlbauindustrie zunehmend eingesetzt werden, um die Effizienz zu steigern und die Arbeitskosten zu reduzieren.

Die effiziente Verbindung zweier Winkelprofile, Spitze auf Spitze, zur Schaffung eines stärkeren und stabileren Doppel-Eckstiels durch UP-Schweißen ist ein prägnantes Beispiel für die Anwendung dieses Verfahrens. Die so entstehenden hochwertigen, durchgehenden Schweißnähte entlang der gesamten Profillelänge gewährleisten die notwendige Festigkeit, um axialen und Biegebelastungen in der Turmstruktur standzuhalten. Die Tatsache, dass UP-Schweißen speziell für diese "Schmetterlingsprofile" eingesetzt wird, verdeutlicht die Eignung des Verfahrens zur Herstellung komplexerer Querschnitte.

3.4. Spezifische Anforderungen an Schweißverbindungen im Gittermastbau für Höchstspannungen

Die Schweißverbindungen in Hochspannungs-Gittermasten müssen eine Reihe spezifischer Anforderungen erfüllen, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Konstruktion über ihre gesamte Lebensdauer zu gewährleisten.

Hinsichtlich der Festigkeit müssen die Schweißnähte eine hohe Zugfestigkeit aufweisen, um den erheblichen statischen Lasten durch das Gewicht der Leiterseile, Eisansatz und Winddruck standzuhalten. Typische Werte für die Zugfestigkeit von in Übertragungstürmen verwendetem Stahl sind angegeben. Ebenso ist eine ausreichende Streckgrenze erforderlich, um dauerhafte Verformungen der Schweißverbindungen unter maximalen Designlasten zu verhindern. Besonders in Regionen mit niedrigen Umgebungstemperaturen ist die Kerbschlagzähigkeit von großer Bedeutung, um Sprödbrüche in den Schweißverbindungen zu vermeiden.

Die Dauerfestigkeit ist ein weiterer kritischer Faktor, da Gittermasten zyklischen Belastungen durch windinduzierte Schwingungen ausgesetzt sind. Die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen ist im

Allgemeinen geringer als die des Grundwerkstoffs, was auf Spannungskonzentrationen an den Schweißnahtübergängen und mögliche Eigenspannungen zurückzuführen ist. Das Schweißnahtprofil, der Übergangsradius und das Vorhandensein von Schweißfehlern können die Dauerfestigkeit erheblich beeinflussen. Daher sind Konstruktionsprinzipien, wie die Auswahl geeigneter Schweißdetails und die Berücksichtigung von Spannungshüben, entscheidend für die langfristige Zuverlässigkeit der Turmstruktur.

Da Gittermasten verschiedenen atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt sind, einschließlich Feuchtigkeit, Schadstoffen und Salz in Küstennähe, ist die Korrosionsbeständigkeit der Stahlkonstruktion und der Schweißverbindungen von großer Bedeutung. Geeignete Korrosionsschutzmaßnahmen wie Feuerverzinken, Schutzanstriche und die Auswahl geeigneter Werkstoffe sind unerlässlich, um die lange Lebensdauer der Türme zu gewährleisten. Auch das Schweißgut und die Wärmeeinflusszone müssen eine ausreichende Korrosionsbeständigkeit aufweisen, die durch die Schweißzusätze und Prozessparameter beeinflusst werden kann.

Schließlich ist eine hohe Schweißnahtqualität ohne Defekte entscheidend, um die Anforderungen an Festigkeit, Dauerfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu erfüllen. Die Sichtprüfung, wie in Normen wie DIN EN ISO 17637 beschrieben, ist eine grundlegende Methode der Qualitätssicherung vor, während und nach dem Schweißen. Darüber hinaus können zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZFP) wie Ultraschallprüfung (UT, PAUT), Magnetpulverprüfung (MT) und Röntgenprüfung (RT) erforderlich sein, um innere und äußere Oberflächenfehler zu erkennen, die die Integrität der Schweißverbindungen beeinträchtigen könnten. Die Einhaltung von Qualitätsstufen für Unregelmäßigkeiten in Schmelzschweißverbindungen, wie in Normen EN ISO 5817 festgelegt, stellt sicher, dass die Schweißnähte akzeptable Kriterien für strukturelle Anwendungen erfüllen.

Das UP-Schweißen eignet sich im Allgemeinen gut für das Schweißen von Kohlenstoff- und niedriglegierten Stählen, die üblicherweise im Gittermastbau verwendet werden. Die Auswahl geeigneter Schweißzusätze (Draht und Pulver) ist entscheidend, um Schweißnähte mit den gewünschten mechanischen Eigenschaften und einer mit dem Grundwerkstoff kompatiblen chemischen Zusammensetzung zu erzielen.

3.5. Relevante Normen und Richtlinien

Für das Unterpulverschweißen im Stahlbau und speziell im Bereich von Höchstspannungsleitungen existiert eine Vielzahl relevanter Normen und Richtlinien in Deutschland und international.

Zu den wichtigsten deutschen Normen gehören die DIN EN 1090-1, welche die Anforderungen an die Konformitätsbewertung von tragenden Stahl- und Aluminiumbauteilen festlegt und die CE-Kennzeichnung für Stahlbaukomponenten vorschreibt. Die DIN EN 1090-2, Teil 2 dieser Normenreihe, spezifiziert die technischen Anforderungen an die Ausführung von Stahltragwerken und beinhaltet detaillierte Vorgaben für das Schweißen, einschließlich Verweisen auf Qualitätsstandards und Schweißverfahren. Die DIN EN ISO 3834 definiert Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen metallischer Werkstoffe und bietet einen umfassenden Rahmen für das Qualitätsmanagement in Schweißbetrieben, auf den EN 1090-2 häufig Bezug nimmt. Die DIN EN ISO 15609-1 legt die Anforderungen an die Spezifikation und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe fest, insbesondere für das Lichtbogenschweißen, und ist somit auch für das Unterpulverschweißen relevant. Die DIN EN ISO 5817 definiert Qualitätsstufen für Unregelmäßigkeiten in Schmelzschweißverbindungen in Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen und legt somit akzeptable Fehlergrenzen für Schweißnähte in Abhängigkeit von den Qualitätsanforderungen fest. Des Weiteren sind die VDE-Bestimmungen und relevante Sicherheitsstandards zu beachten, die die Konstruktion und Errichtung von Hochspannungsleitungen betreffen und die elektrische Sicherheit sowie die strukturelle Integrität gewährleisten.

3.6. Fallbeispiele

Es gibt verschiedene Beispiele für den Einsatz des UP-Schweißens in großen Stahlkonstruktionen. WIEGEL Parey GmbH & Co KG setzt das UP-Schweißen in seinem Produktionsprozess umfangreich ein, insbesondere bei der effizienten Fertigung von "Schmetterlingsprofilen", die als Doppel-Eckstiele verwendet werden. Wiegel Parey GmbH & Co KG war auch an Projekten beteiligt, bei denen innovativer, CO₂-reduzierter Stahl mit UP-Techniken verschweißt wurde.

Der Bau von Hochspannungsleitungsmasten, wie beispielsweise der 227 Meter hohen Elbekreuzung 2 (1000 t Stahl, 35 t Farbe), die von WIEGEL Parey gefertigt wurde, umfasste einen erheblichen Einsatz des UP-Schweißens zum Fügen der großen Stahlquerschnitte, die für solch massive Strukturen erforderlich sind.

Die Beispiele der Verwendung von UP-Schweißen durch WIEGEL Parey im Gittermastbau und die Anwendung in ähnlichen schweren Stahlkonstruktionen wie Windkraftanlagen- und Pipelines, liefern überzeugende Beweise für den praktischen und effizienten Einsatz dieses Schweißverfahrens bei der Fertigung von Hochspannungs-Gittermasten. Diese Beispiele, kombiniert mit der Forschung zu Prozessparametern, unterstreichen die etablierte Rolle des UP-Schweißens in dieser Industrie.

4. Korrosionsschutz der Gittermaste

4.1. Feuerverzinkung von Gittermastteilen

Das Feuerverzinken nach DIN EN ISO 1461 ist ein Verfahren, mit welchem Stahl vor Korrosion geschützt wird. Durch das Feuerverzinken wird ein metallischer Überzug auf die Gittermastteile aufgebracht. Dazu werden die Gittermastteile in schmelzflüssiges Zink getaucht und es bildet sich auf der Oberfläche eine festhaftende Eisen-Zink-Legierungsschicht aus. Die Verfahrensschritte beim Feuerverzinkungsprozess sind Entfetten der Bauteile, Beizen, Fluxen (Flussmittelbad) sowie der Kernprozess des Tauchens im Zinkbad bei ca. 450 °C Badtemperatur.

Der Zinkgehalt der Schmelze liegt gemäß EN ISO 1461 bei mindestens 98,5 %. Feuerverzinken ist ein Tauchprozess. Aufgrund der relativ geringen Dichteunterschiede von Stahl und Zink (7,85 g/cm³ vs. 7,14 g/cm³) ist der Auftrieb für die zu verzinkenden Gittermastteile im Zinkbad sehr hoch. Nach dem Eintauchen des Verzinkungsgutes in das geschmolzene Zink verbleiben die Teile solange im Zinkbad, bis sie dessen Temperatur angenommen haben. Bei Zinkbadtemperatur bildet sich beim Verzinkungsvorgang als Folge des wechselseitigen Diffusionsprozesses zwischen flüssigem Zink und der Stahloberfläche auf dem Stahlteil ein Überzug verschiedenartig zusammengesetzter Eisen-Zink-Legierungsschichten (Legierungsphasen). Hierbei nimmt der Gehalt an Zink in der Eisen-Zink-Legierungsschicht mit zunehmendem Abstand zur Stahloberfläche zu, gleichlautend nimmt der Eisengehalt ab. Im Schichtbildungsprozess entstehen Legierungsphasen mit unterschiedlicher Struktur und Zusammensetzung. Die oberste Legierungsschicht ist oftmals eine hellglänzende Reinzinkschicht mit dem bekannten Zinkblumenmuster.

Das Schichtwachstum und das finale Aussehen der Zinkschicht wird im Wesentlichen von der Stahlzusammensetzung beeinflusst. Hierbei ist ein wesentlicher Einflussfaktor der Gehalt an Silizium im Stahl. Bei Schweißkonstruktionen ist aufgrund der Unterschiede im Siliziumgehalt zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut die Zinkschichtdicke auf Grundwerkstoff und Schweißnaht unterschiedlich. Wesentlich höhere Schichtdicken sind im Bereich der Schweißnaht erkennbar.

Die Höhe der Streckgrenze von Baustahl, aus dem Gittermastkomponenten gefertigt werden, ist bekanntlich temperaturabhängig. Nimmt das Bauteil während des Verweilens im Verzinkungskessel die Zinkbadtemperatur von 450°C an, dann sinkt die Streckgrenze. Sind Eigenspannungen im Bauteil, dann werden diese zu diesem Zeitpunkt abgebaut und sind als plastische Verformung sichtbar. Daher ist bei der feuerverzinkungsgerechten Konstruktion und Fertigung darauf zu achten, dass eigenspannungsarme Konstruktionen gefertigt werden, welche nicht zum Verzug neigen.

Resultat des Feuerverzinkungsprozesses ist eine festhaltender und sehr gut vor Korrosion schützender Überzug.

Voraussetzung für einen verzinkungsfehlstellenfreien Überzug ist die beim Beizvorgang zu erzielende metallisch blanke Bauteiloberfläche. Schwierigkeiten beim Beizen verursachen silikonhaltige Schweißsprays, Reste von Schmierungen und Kühlmitteln, diverse Farbsignierungen bzw. Farbverunreinigungen sowie Schweißschlackeanhaftungen. Alle genannten Verunreinigungen sind vor dem Verzinkungsprozess zu beseitigen oder bereits vorab im Fertigungsprozess zu vermeiden.

Eine Herausforderung für die Feuerverzinkung von Gittermastteilen ist die Beherrschung der logistischen Abläufe aufgrund der Vielzahl der Einzelteile am Gittermast. Ein Gittermast besteht aus ca. 1.000 verschiedenen Positionen mit einer daraus resultierenden Gesamtanzahl von Einzelteilen von ca. 4.000 Stück.

4.2. Farbbeschichtung von Stahlgittermasten (Duplex-System)

Entsprechend der Beschichtungsspezifikation der Netzbetreiber werden die Gittermastkomponenten zusätzlich zur Feuerverzinkung farbbeschichtet (Duplexbeschichtung = Zink plus Farbe).

Je nach Aufstellungsort der Gittermaste (z.B. Küstennähe oder Binnenland) sind diese unterschiedlichen Korrosionsbelastungen ausgesetzt. Auf Basis der zu erwartenden Korrosionsbelastung (Korrosivitätskategorie) ist festgelegt, welches Beschichtungssystem zu applizieren ist. Hierbei wird im Wesentlichen zwischen Einschicht- und Zweischichtsystemen unterschieden.

Verfahrensschritte bei der Werkbeschichtung der Gittermastkomponenten sind:

- Oberflächenvorbereitung durch Sweepstrahlen der Zinkschicht (säubern, aufrauen),
- Entstauben der Oberfläche,
- Applizieren der Farbbeschichtung (einschichtig oder zweischichtig),
- Trocknung bis zum geforderten Trocknungsgrad.

Beim Sweepstrahlen wird die feuerverzinkte Oberfläche von Verunreinigungen (z.B. Zinkkorrosionsprodukt Weißrost, allgemeine Verschmutzungen bei Transport und Lagerung der Bauteile) gereinigt. Bei diesem Reinigungsverfahren wird die Zinkschicht um wenige Mikrometer abgetragen und aufgeraut. Das Ergebnis ist eine mattgraue Oberfläche, welche vor der Farbbeschichtung noch entsprechend DIN EN ISO 8502-3 staubfrei gehalten wird.

Beim Sweepen wird genauestens auf die Einhaltung der Sweep-Parameter (Strahlmittel, Teilchengröße des Strahlmittels, Strahldruck und Anstrahlwinkel) geachtet, um die Intaktheit der Zinkschicht zu wahren und um diese nicht zu beschädigen und zu enthaften.

Der Auftrag des Beschichtungsstoffes erfolgt im Airless-Spritzverfahren. Zur Anwendung kommen wasser verdünnbare Beschichtungsstoffe. Qualitätsüberwachende Maßnahmen im Beschichtungsprozess sind die Messung der Nass- und Trockenschichtdicke sowie das Anlegen von Kontrollflächen.

Vor dem baustellengerechten Verpacken der beschichteten Bauteile ist sicherzustellen, dass der Trockengrad 7 nach DIN EN ISO 9117 erreicht ist.

Gittermastspezifische Besonderheiten zur Aufrechterhaltung der Leitfähigkeit im Mast sind bei der Festlegung der zu beschichtenden Bauteilflächen zu beachten (Erdung des Gittermastes).

Gittermaste, die in der Nähe von Flughäfen stehen, erhalten einen sogenannten Flugwarnanstrich in rot und weiß, um die Sichtbarkeit zu erhöhen.

Übliche Farbtöne der Gittermaste an nicht exponierten Lagen sind RAL 7033 oder DB 601 (im Wesentlichen hellgrau/hellgrün).

Die Fachkompetenz im Verzinkungs- und Beschichtungsprozess ist ein wesentlicher Faktor für eine qualitativ hochwertige und normenkonforme Ausführung der Korrosionsschutzarbeiten.

Fazit: die Gittermaste der Wiegel Parey GmbH & Co KG gestalten den sichtbaren Teil der Energiewende in Deutschland!

THE ULTIMATE LINE-UP

ESAB®

Wir sind der Meinung, dass Sie die besten Geräte verdient haben, was immer auch Ihre Anforderungen bei Ihren Schweißarbeiten sind. Genau deshalb haben wir unser schon beeindruckendes Sortiment noch einmal erweitert.



Rogue ET 230 iP AC/DC

- professionelle WIG-Schweiß-Performance unter 20 kg
- 5"-TFT-Farbdisplay
- neues Kühlgerät mit Zwangszuschaltung
- verschiedene AC-Formen für optimales Alu-Schweißen
- Doppelstrommodus zum Umschalten zwischen den Schweißströmen



Schweißfachhandel

 ensslen-gmbh.de

 0 39 31 - 64 920

Bezwinger des Stahls – Plasma-Schneidanlage

Voyager 105

- aktuell bestes Gewichts-/Leistungsverhältnis 23 kg • 105 A • 50 mm Schnitt
- Schnellkupplung, EasyFit
- auch Einsatz von Automatenbrenner
- moderne Digitalsteuerung für syergisches und manuelles Schneiden
- Fugenhobeln und Gitterschneiden
- Farbdisplay für einfachste Bedienung
- erhältlich als Voyager 75 und 105 A in Basic + Evo-Version



BESUCHEN SIE UNSEREN ONLINESHOP



alles, was Schweißer begeistert



schnell und sicher bestellen

Neu!

absolute Top-Deals in unserem Outlet

Der Fachhandel für Klugschweißer

Michelle Merten (Auftragsbearbeitung)

☎ 03931 - 6492-11

✉ m.merten@ensslen-gmbh.de

Detlef Jastram (Beratung + Vertrieb)

☎ 0178 - 864 92 40

✉ d.jastram@ensslen-gmbh.de

Henry Enßlen (Beratung + Vertrieb)

☎ 0178 - 4612433

✉ h.ensslen@ensslen-gmbh.de



Vertrieb



Service



Vermietung



Schweißfachhandel

🏠 Daimlerstraße 6 • 39576 Stendal

☎ 0 39 31 - 64 920 🌐 [ensslen-gmbh.de/jobs](https://www.ensslen-gmbh.de/jobs)

Schweißen an Bauteilen für den Einsatz in einem atomaren Endlager - Losprüfung an Schweißzusätzen

D. Baunack, Gerstungen sowie G. Fiebig, F. Pennartz, Peine

1. Einleitung

Im niedersächsischen Salzgitter entsteht aktuell das erste nach Atomrecht genehmigte Endlager für schwach- und mittlerradioaktive Abfälle in Deutschland. In diesem Beitrag soll der Fokus auf schweißende Gewerke zur Einrichtung dieses Endlagers gerichtet werden. Im Bereich der Stahl- und Aluminiumtragwerke und im Bereich der Schienenfahrzeuge ist die Schweißtechnik weitgehend durch die EN 1090 (bzw. früher die DIN 18800) und die die EN 15085 geregelt. Besondere Beachtung verdient jedoch der sogenannte schweißtechnisch unregelmäßige Bereich (vgl. DVS- Richtlinie 0711), zu dem z. B. geschweißte Werkzeuge, Straßenfahrzeuge, Baumaschinen, Transporteinrichtungen usw. gehören. Bei diesen Konstruktionen gilt teilweise die Maschinenrichtlinie, in der aber nur wenige konkrete Vorschriften zur Schweißtechnik enthalten sind. Selbstverständlich ist die Qualität dieser Baugruppen aber im Einsatz in einem Atommüll-Endlager besonders wichtig. Stellt man sich vor, dass bei einem speziell angefertigten Fahrzeug der geschweißte Rahmen versagt, während damit radioaktive Abfälle transportiert werden, oder dass bei einem Radlader der geschweißte Hubarm plötzlich nachgibt, wird klar, dass diese Bereiche für diesen speziellen Fall geregelt werden mussten. Wie hierbei für das Endlager in Salzgitter vorgegangen wurde, welche Anforderungen z. B. an Verfahrensprüfungen, Schweißanweisungen oder Schweißerprüfungen gestellt werden und wie diese geprüft werden, wird in diesem Beitrag an Beispielen wie u.a. dem Stapelfahrzeug (siehe [Abb. 1](#)) erläutert. Die Schweißkonstruktion mit einem zulässigen Gesamtgewicht von ca. 69 t wurde von dem auf individuelle Lösungen in der Fördertechnik spezialisierten Unternehmen HUBTEX Maschinenbau GmbH & Co. KG entwickelt und wird dort aktuell gebaut.



Abb. 1: Darstellungen des Stapelfahrzeuges; während der Herstellung [1] wurde das Fahrzeug schon, bevor alle Komponenten beschichtet waren, im sogenannten „Schwarzaufbau“ montiert und es wurde geprüft, ob das Zusammenspiel aller Komponenten, wie von der Konstruktion im CAD (rechts) [2] vorgehen, funktioniert.

Durch den Einsatz von hochfestem Feinkornbaustahl und moderner Schweißtechnik können die beladenen und mit Beton vergossenen Container sicher abgeladen und an die finale Endlagerposition verbracht werden. Unter anderem wurden spezielle strahlengeschützte Kabinen entwickelt, die aufgrund der großen Wand- bzw. Blechdicke von ca. 100 mm auch noch weitere Schutzfunktionen erfüllen können.

2. Einsatzgebiet des Stapelfahrzeugs

Es ist geplant, im Endlager Konrad max. 303.000 m³ verpackte schwach- und mittlerradioaktive Abfälle zu lagern. Hierfür müssen die in Abfallgebände (Container) verpackten Abfälle an dieses Ziel

transportiert werden. Sie können via Straße oder, wie bevorzugt geplant, via Schienen bis in die Umladehalle auf dem Gelände des Endlagers gebracht werden. Dort werden diese mittels eines Hallenkranes entladen werden und gelangen nach einer weiteren Überprüfung mit einem Aufzug in den ca. 800 m tiefen Einlagerungsbereich. Mittels eines Transportfahrzeuges werden die Abfallgebände dann unter Tage jeweils einzeln in die Einlagerungsbereiche verbracht. Dort übernimmt das Stapelfahrzeug die Behälter. Das Stapelfahrzeug hebt also den Container vom Transportfahrzeug, fährt bis an die Endposition und stapelt dort bis zu drei Container auf und zwei nebeneinander. In *Abb. 2 (links)* ist das Stapelfahrzeug im Einsatz mit einem solchen Container im Außenbereich in einem Steinbruch zur Erprobung dargestellt. In diesen neuen, nach Tunnelbaurichtlinie grundsanierten Bereichen bzw. Tunneln des Bergwerkes werden nach dem Stapeln der Container die Tunnelabschnitte alle 50 m mit Spritzbetonwänden verschlossen. Somit entstehen die Einlagerungskammern, die wiederum durch kleine Öffnungen mit Beton verfüllt werden. Das Stapelfahrzeug ist somit in einer langen Kette von durchdachten Transportvorgängen das letzte Fahrzeug, was den leicht- und mittelradioaktiven Abfall, der nicht wärmeentwickelnd ist, bewegt. Abschließend, nach Beendigung des gesamten Einlagerungsprozesses, werden die Strecken und Schächte verfüllt.



Abb. 2: Das Stapelfahrzeug in einem Steinbruch zur Erprobung (links) und nach abgeschlossener Fertigung mit den Geschäftsführern des Herstellers Hans-Joachim Finger und Marco Goldbach [3].

Die Container selbst sind gefüllt mit Fässern, in denen sich der radioaktive Abfall befindet. Der Raum sowohl zwischen den Fässern als auch zwischen den Fässern und dem Container wurde vor dem Transport mit Beton verfüllt. Diese Container sind so gestaltet, dass keine gefährliche Strahlendosis aus diesen austreten kann. Dass die Kabine des Stapelfahrzeuges dennoch als Strahlenschutzkabine geplant und gebaut wurde, ist also nicht auf eine anzunehmende gefährliche Strahlung aus den Containern zurückzuführen, sondern handelt es sich um eine zusätzliche Sicherheitsmaßnahme.

3. Geforderte Herstellerqualifikationen

Um ein Fahrzeug wie das Stapelfahrzeug planen und bauen zu dürfen, bedarf es verschiedener Voraussetzungen. Generell ist in Deutschland die BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH) für die dauerhafte Lagerung von radioaktiven Abfällen im tiefen Untergrund verantwortlich. Neben der Endlagersuche und der Rückholung von radioaktiven Abfällen aus Zwischenlagern gehört die Produktionskontrolle und der Endlagerbau zu den im Auftrag des Bundes übertragenen Aufgaben. Zum Beispiel bedarf es eines Herstellers, der zum einen Erfahrungen in dem jeweiligen Bereich und zum anderen die entsprechenden Zulassungen und Kapazitäten vorweisen kann. In dem in diesem Beitrag geschilderten Fall des Stapelfahrzeuges ist der benötigte Erfahrungsbereich der des Spezialmaschinen- bzw. Sonderfahrzeugbaus. Hierbei sind insbesondere Erfahrungen im Planen, in der Anfertigung und Inbetriebnahme sowie der Betreuung von Sonderflurförderfahrzeugen nötig. Die Firma HUBTEX Maschinenbau GmbH & Co. KG kann jahrzehntelange Erfahrung mit spezialgefertigten Flurförderzeugen vorweisen. Unter anderem wurden Spezialfahrzeuge für:

- die Bundeswehr (schweißtechnisch gesehen die Wehrtechnik [4]),
- große Unternehmen in der Luft und Raumfahrt, z. B. Air Cargo Fahrzeuge,
- die Holzindustrie (schweißtechnisch gesehen ungeregelt [4]),
- die Lebensmittelindustrie,
- den Bereich der erneuerbaren Energien sowie
- für die Branchen Automotive, Gießereiwesen, Blech, Baustoffe, usw.

geplant und gefertigt. Im Bereich von strahlendem Transportgut wurde z. B. in einem vorangegangenen Projekt in Zusammenarbeit mit der Firma AMAS Technology GmbH ein Transport- und Stapelfahrzeug für die BGZ (Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH) geplant und erfolgreich hergestellt. Neben dieser Erfahrung ist es speziell für den Bereich der Schweißtechnik, bei der es sich nach ISO 9000 [5] um einen speziellen Prozess handelt, wichtig, nach festgelegten Qualitätsanforderungen (vgl. ISO 3834 [6]) vorzugehen. Schweißtechnisch gesehen handelt es sich bei dem Stapelfahrzeug (wenn man den speziellen Einsatzbereich der Endlagerung ausklammert) um ein Flurförderfahrzeug, wie bspw. einen Gabelstapler, und somit um einen schweißtechnisch ungeregelten Bereich [4]. Selbstverständlich ist dies der BGE bekannt, weshalb sie sogenannte Vorprüfunterlagen erstellen lassen hat. In diesen Vorprüfunterlagen mit dem Titel „Qualifikation von Betrieb, Personal, Dienstleister“ ist umfangreich beschrieben, dass dieses spezielle Fahrzeug schweißtechnisch geregelt gebaut wird. Somit muss der Hersteller selbstverständlich über ein Qualitätsmanagement nach ISO 9001 und die betrieblichen Zulassungen für DIN 18800-7 [7], DIN 15018 [8] und ISO 3834-2 [6] verfügen und diese anwenden. Neben der Umsetzung dieser Regelwerke, die zum Zeitpunkt der Planung dem Stand der Technik entsprochen haben, wurde die DIN 18800 mittlerweile durch die EN 1090-2 [9] ersetzt und die DIN 15018-1 zurückgezogen. Der Hersteller HUBTEX Maschinenbau GmbH & Co. KG hält, um allen Anforderungen des Projektes gerecht zu werden, sowohl die Zulassung älterer Regelwerke z. B. DIN 18800 und der DIN 15018 als auch der aktuellen wie der EN 1090 EXC3, der ISO 3834-2 usw. aufrecht.

4. Eingesetzte Werkstoffgruppen und Schweißverfahren

Bei den eingesetzten Werkstoffen und Schweißverfahren besteht das Ziel nicht darin, möglichst neue Verfahren oder Werkstoffe einzusetzen. Stattdessen ist das Konzept, wie in den schweißtechnisch geregelten Bereichen (Tragwerke, Schienenfahrzeug-, Druckbehälter- und Rohrleitungsbau, also alle schweißtechnisch geregelten Bereiche bis auf die Wehrtechnik) üblich, konservativ. Es werden Werkstoffe eingesetzt, die bereits seit vielen Jahren oder gar Jahrzehnten aus anderen schweißtechnischen Produkten bekannt sind und sich bewährt haben. Im Wesentlichen kommen neben den klassischen und zuverlässigen Vertretern der Werkstoffgruppe 1 nach ISO 15608 [10], also zum Beispiel dem unlegierten Qualitäts- bzw. Baustahl S355J2(+N) (siehe *Abb. 3*), bei hoch beanspruchten Bauteilen die aufgrund ihrer guten Schweißeignung bekannten Feinkornbaustähle der Werkstoffgruppe 3 zum Einsatz.

Als Beispiel für die besondere Akribie, mit der in diesem Projekt gearbeitet wird, sei erwähnt, dass alle Flächen, die z. B. durch eine maschinelle Bearbeitung entstanden sind und später als Oberfläche erhalten bleiben, eine Oberflächenrissprüfung erfahren. Denn Unregelmäßigkeiten, die im Werkstoffinneren zulässig sind (wie z. B. kleine Poren) sind in diesem Projekt an der Oberfläche nicht zulässig, da diese potenziell strahlende Teilchen aufnehmen und somit die Dekontaminierbarkeit negativ beeinflussen würden (vgl. KTA-Regelwerk [11]).

Auch bei den eingesetzten Schweißverfahren wird auf bekannte und zuverlässige Prozesse gesetzt. Verhältnismäßig neue oder noch nicht weit verbreitete Verfahren wie das SLM (Selective Laser Melting) [12], das induktive Stumpfschweißen [13] oder das Magnetimpulsschweißen [14] werden bewusst nicht eingesetzt. Stattdessen wird auf bekannte und bewährte Schweißtechnik zurückgegriffen, eingesetzt wird das MAG-Schweißen (Prozess 135 [15]) und das WIG-Schweißen (Prozess 141 [15]).



Abb. 3: Kabine mit ca. 100 mm dicken Stahlwänden und Türen mit einem Gesamtgewicht von ca. 9 t und einem Gewicht des abgebildeten Bauzustandes von ca. 6 t mit deutlich erkennbaren blecheben geschliffenen, geschweißten Vollanschlüssen.

5. Qualifikation einer Schweißanweisung

Wie in der ISO 15610 beschrieben, gibt es mehrere Verfahren, wie ein Schweißverfahren bzw. eine vorläufige Schweißverfahrensanweisung pWPS (Preliminary Welding Procedure Specification) qualifiziert werden kann [16]. Obwohl es normativ viele Möglichkeiten gibt, z. B. Qualifizierung aufgrund des Einsatzes von:

- a. geprüften Schweißzusätzen [17],
- b. vorliegender schweißtechnischer Erfahrung [18] oder
- c. einem Standardschweißverfahren [19],

wurden die oben aufgeführten Punkte wegen mangelnden Untersuchungsumfanges ausgeschlossen. Zulässig ist die Qualifizierung aufgrund einer Schweißverfahrensprüfung [20] und muss, wie in dieser Norm beschrieben, „wenn die Verbindung nicht den genormten Prüfständen entspricht,“ anhand einer vorgezogenen Arbeitsprüfung [21] qualifiziert werden. Bei dem Geltungsbereich gilt streng der durch die normativen Rahmenbedingungen vorgegebene Bereich.

5.1 Schweißparameterprüfung

Alle Schweißstromquellen müssen jährlich elektrisch geprüft und kalibriert werden, damit sichergestellt ist, dass die eingestellten Parameter, den Parametern entsprechen, die während des Schweißens der Schweißverfahrensprüfung, Arbeitsprüfung oder Arbeitsprobe eingestellt waren, auch wieder zur Anwendung kommen. Dies ist im schweißtechnisch geregelten Bereich so üblich. Einzig die Sorgfalt, mit der die Geltungsbereiche einzelner Schweißanweisungen und Schweißverfahrensprüfungen ausgelegt werden, unterscheidet sich je nach Anwendungsregelwerk und Auftraggeber und ist in diesem Fall sehr hoch.

5.2 Prüfung des Schweißzusatzes (mechanisch und chemisch)

Für die Produktion der Fahrzeuge für den Einsatz in einem atomaren Endlager wurden zusätzlich zu den durch die Verfahrensprüfung vorgeschriebenen weitere Untersuchungen durchgeführt. Beispielsweise sind bei Werkstoffgruppe 1 normativ nur bei Stumpfnähten Zugversuche vorgeschrieben.

Um die Erkenntnisse über die Einflüsse eines dreidimensionalen Spannungszustandes auf das Festigkeitsverhalten des Schweißgutes berücksichtigen zu können, wurden vom Hersteller auch Zugversuche an Doppel-T-Stößen mit einseitiger Kehlnaht der Werkstoffgruppe 1 durchgeführt. Bewusst wurden hierbei auch Proben am Rande des schweißtechnisch möglichen Parameterfensters hergestellt, um auch „worst case“-Szenarien zu prüfen und somit die Schweißprozessanfälligkeit zu ermitteln.

Nachfolgend wird ein Auszug der zusätzlich ermittelten Ergebnisse vorgestellt.

Wird die Mindestfestigkeit des für die Werkstoffgruppe 1 verwendeten Schweißzusatzes DIN EN ISO 14341-A-G 46 5 M21 4Si1 betrachtet, so liegt die Streckgrenze normativ bei 460 MPa und die Zugfestigkeit zwischen 530 MPa und 680 MPa [22]. Ausgewertet wird die Zugfestigkeit in Schweißverfahrensprüfungen beim Querzugversuch [23]. Bei Stumpfnähten ist dies mühelos durchführbar, da die tragende Fläche verhältnismäßig einfach ermittelt werden kann. Bei Kehlnähten ergibt sich die tragende Fläche theoretisch aus dem a -Maß und der Nahtlänge. Praktisch ist in diesem Fall auch noch die Fläche, die durch Einbrand entsteht, zu berücksichtigen, bzw. muss die Flächenreduzierung, die aufgrund von zulässigen Unregelmäßigkeiten nach ISO 5817 [24] nicht trägt, berücksichtigt werden. Beispielsweise reduziert eine „schlechte Passung bei Kehlnähten“, die auch in der Bewertungsgruppe B zulässig ist, die tragende Fläche. Die beim Zugversuch an einseitigen Kehlnähten am Doppel-T-Stoß (siehe *Abb. 4*) ermittelte Kraft kann also unterschiedlich ausgewertet werden.

Daher wurden Proben im „worst case“-Szenario und im „best practice“-Szenario geschweißt und geprüft, mit dem Ziel, die Fehleranfälligkeit bzw. Fehlerauswirkung besser einschätzen zu können. Festgestellt wurde, dass die Schweißgutmindestzugfestigkeit mit einer Spannung von 532 MPa dennoch erreicht wird, wenn die Spannung auf die zeichnerische Nahtdicke bezogen wird, obwohl die Fläche durch Unregelmäßigkeiten maßgeblich reduziert ist. Bei optimalen Schweißparametern steigt die ermittelte Zugfestigkeit, da der zusätzliche Einbrand in dieser Betrachtung nicht in die Fläche mit einbezogen wird, auf 781 MPa. Selbstverständlich wurden jeweils die optimalen Parametersätze für die WPS und somit für die Produktion verwendet. Vermisst man die Bruchfläche und bezieht die ermittelte Maximalkraft jeweils auf die probenspezifische Bruchfläche, so ergibt sich mit sehr geringen Abweichungen, wie erwartet, sowohl bei den Proben mit als auch bei den Proben ohne Unregelmäßigkeiten eine Zugfestigkeit des Schweißgutes von ca. 596 MPa, was auch den Werten im Abnahmeprüfzeugnis des Schweißzusatzes entspricht. Diese Versuche sichern zusätzlich die Qualität, verdeutlichen aber auch, warum nach EN 1090 bei Stählen $>S460$ MPa zusätzlich Zugversuche am Doppel-T-Stoß und am Überlapstoß vorgeschrieben sind. Die Videos der Zugversuche werden für interne Schweißer-Informationsveranstaltungen genutzt, um auch den Schweißer für die hohen Ansprüche zu sensibilisieren.



Abb. 4: Kreuzzugproben vor und während der Prüfung, jeweils an 15 mm dickem Blech aus S355J2 mit einer vorgegebenen Kehlnaht $a = 4$ mm.

Es ist bekannt, dass der aktive Gasanteil beim MAG-Schweißen Legierungselemente thermisch umsetzt und diese exotherme Reaktion den Einbrand erhöht. Gleichzeitig verringert sich aber auch der Legierungsgehalt im Schweißgut. Die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes bestimmt aber maßgeblich, neben den oben vorgestellten quasistatischen Eigenschaften, über z. B. die Kerbschlagzähigkeit, die Alterungsbeständigkeit usw. Wieviel der Legierungselemente verbrennt und ob der Schweißzusatz den Angaben zur chemischen Zusammensetzung im Abnahmeprüfzeugnis 3.1 entspricht, wurde zusätzlich überprüft. Hierzu wurde u. a. Auftragsschweißungen hergestellt, bei der die Anzahl der Lagen (13 Lagen) so gewählt wurde, dass der Aufmischungsgrad mit der Grundplatte bei der obersten Lage als vernachlässigbar angenommen werden kann. Diese Auftragsschweißung wurde plangeschliffen und Spektralanalysen zur Ermittlung der chemischen Zusammensetzung durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit den normativen Mindestvorgaben des Drahtes, des Grundwerkstoffes und den Angaben im Abnahmeprüfzeugnis verglichen (siehe Tabelle 1). Deutlich ist erkennbar, wie die sauerstoffaffinen Elemente wie Silicium und Mangan im Vergleich von der Schweißdrahtanalyse des Drahtherstellers zur Schweißgutanalyse abnehmen. Diese Elemente bilden die leichte Schlacke (Mangan- bzw. Siliziumoxid) die auf MAG- Schweißnähten aufschwimmt und erstarrt.

Tabelle 1: Probe, Prüfposition und eine Ergebnisauswahl in % der chemischen Analyse am Schweißgut und Schweißdraht.

Spektral. Schweißversuch:	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cu	V
Schweißgut Versuch 1:	0,0720	0,8390	1,4500	0,0080	0,0220	0,0089	0,0190	0,0820	0,0010
Schweißgut Versuch 2:	0,0740	0,8410	1,4400	0,0081	0,0200	0,0092	0,0190	0,0800	0,0010
Schweißgut Versuch 3:	0,0760	0,8480	1,4500	0,0083	0,0210	0,0093	0,0200	0,0840	0,0010
Standardabweichung	0,0016	0,0039	0,0047	0,0001	0,0008	0,0002	0,0005	0,0016	0,0000
Mittelwert:	0,0740	0,8427	1,4467	0,0081	0,0210	0,0091	0,0193	0,0820	0,0010
Grenzwerte nach EN 10025-2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S355J2 Max:	0,23	0,6	1,7	0,035	0,035	-	-	0,6	-
Grenzwerte nach ISO 14341	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
G 46 5 M21 4Si1 Min:	0,0600	0,8000	1,6000	Einzelwerte gelten als Maximalwerte					
G 46 5 M21 4Si1 Max:	0,1400	1,2000	1,9000	0,0250	0,0250	0,1500	0,1500	0,3500	0,0300
Abnahmeprüfzeugnis des Herstellers: Charge 086552	✓ 0,0690	✓ 0,9980	✓ 1,6420	✓ 0,0080	✓ 0,0190	✓ 0,0100	✓ 0,0340	✓ 0,0430	✓ 0,0020
Spektralanalyse des Schweißdrahtes*:	✓ 0,12	✓ 1,07	✓ 1,78	✓ 0,023	✓ 0,071	✓ 0,0081	✓ 0,017	✓ 0,026	✓ 0,0088
Differenz Schweißgut/ -draht	0,0460	0,2273	0,3333	0,0149	0,0500	-0,0010	-0,0023	-0,0560	0,0078

*Mittelwert aus drei Analysen

Um sicherzustellen, dass vor dem Schweißen diese Elemente im Schweißdraht vorhanden waren, wurden Drahtstücke so zugeschnitten, dass an diesem unverschweißten Draht unter einer Schutzgasglocke Spektralanalysen (siehe *Abb. 5, unterste Zeile rechts*) durchgeführt werden konnten. Deutlich ist erkennbar, dass Silicium und Mangan im Vergleich von der Schweißdrahtanalyse zur Schweißgutanalyse in der Größenordnung mehrerer Zehntel abnehmen, während alle anderen Elemente nur Änderungen in der Größenordnung einiger Hundertstel Prozent aufweisen. Ob die verbleibenden Legierungselemente die mechanischen Mindesteigenschaften erfüllen, wurde geprüft und der Schweißzusatz gegebenenfalls entsprechend freigegeben.

Durch diese Versuchsreihe wurde geprüft, ob das Herstellerprüfzeugnis tatsächlich zu dem gelieferten Schweißdraht gehört, ermittelt wieviel der Legierungselemente im Lichtbogen verdampfen, oder exotherm reagieren und ob die verbleibenden Elemente die mechanischen Anforderungen erfüllen. Weiterhin wird deutlich, dass das entstehende Schweißgut weitgehend der normativen chemischen Zusammensetzung eines Baustahls z. B. dem S355J2 entspricht.

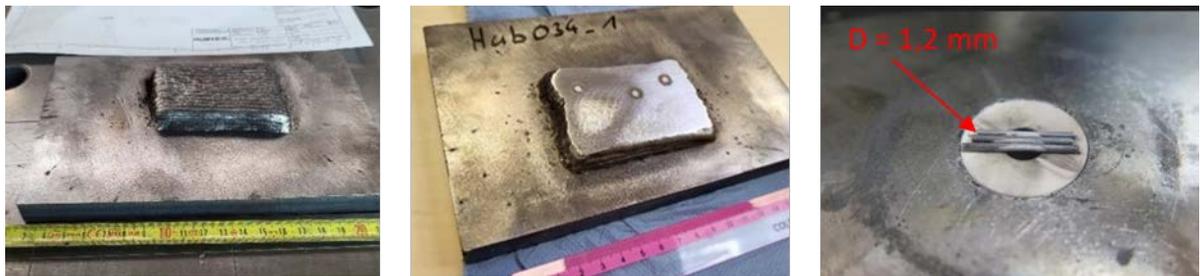


Abb. 5: Auftragsschweißung (links) während des Schweißens (Abkühlphase) und mit geschliffener Oberfläche; Lichtbogenspuren von der Spektralanalyse (mittig) vgl. [25] rechts drei Drahtabschnitte auf der Spektralanalyse, die unter einer Schutzgasglocke geprüft wurden.

5.3 Arbeitsproben

Wenn eine Schweißanweisung qualifiziert ist, ist diese unbegrenzt lange gültig. Dennoch werden beim Schweißen für den Einsatz in einem atomaren Endlager regelmäßig zusätzlich Arbeitsproben (siehe Abb. 6) geschweißt und ausgewertet [26].

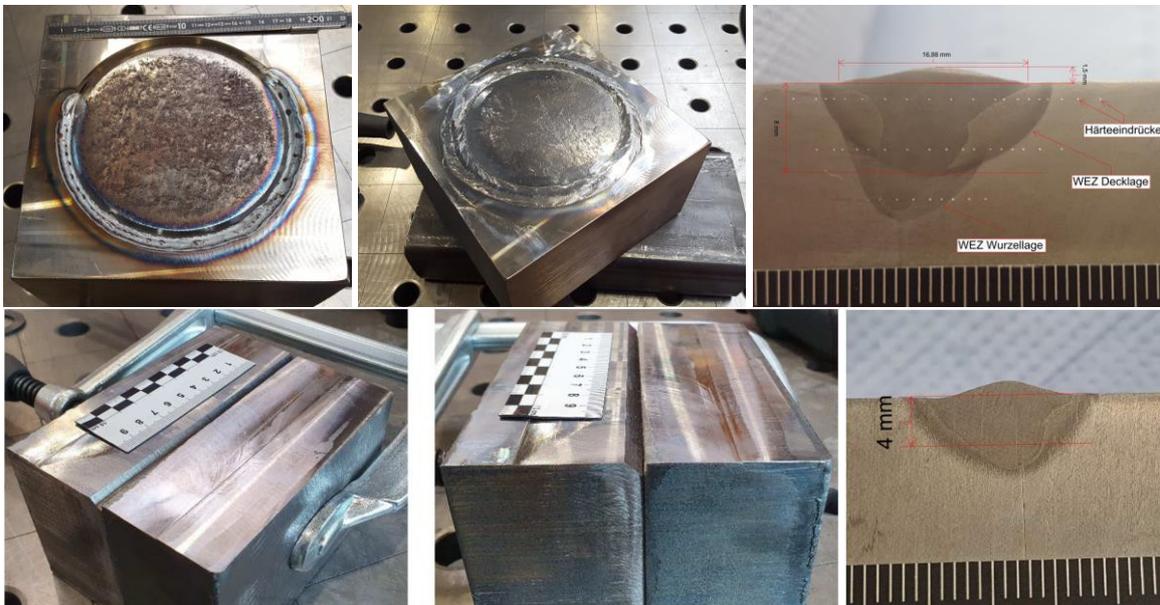


Abb. 6: Beispiel geschweißter Arbeitsproben zur Überprüfung der Nahtdicke nicht durchgeschweißten HY-Stumpfnähte; zweilagig, $s = 8$ mm (oben) und einlagig, $s = 4$ mm (unten).

Hierbei orientiert sich das Vorgehen beim Schweißen an Fahrzeugen für den Einsatz in einem atomaren Endlager am Vorgehen, wie es beim Schweißen von Schienenfahrzeugen vorgeschrieben ist. Arbeitsproben unterscheiden sich von Arbeitsprüfungen im Wesentlichen durch den von der Schweißaufsicht weitgehend festlegbaren Untersuchungsumfang. Beispielsweise werden die meisten Arbeitsproben für Schweißnähte angefertigt, bei denen die Nahtdicke von außen nicht zu erkennen ist, z. B. Y- oder HY-Nähte. Hierbei beschränkt sich der Untersuchungsumfang bei geringen Blechdicken oft auf einen Makroschliff, um die Einschweißtiefe bestimmen zu können. Bei größeren Blechdicken wird der Untersuchungsumfang um Härteverläufe erweitert, um eine unzulässig hohe Aufhärtung und somit Kaltrisse auszuschließen.

6. Prüfung vor, während und nach dem Schweißen (Prüfbeteiligung)

Die Prüfung findet beim Schweißen für den Einsatz in einem atomaren Endlager, wie normativ durch die ISO 3834-2 vorgeschrieben, vor dem Schweißen, während des Schweißens und nach dem Schweißen statt. Auch dies ist im schweißtechnisch geregelten Bereich üblich und wird wiederum je nach

- [4] „DVS 0711:2016-08 Aufgaben, Verantwortung und Zuständigkeit des Schweißaufsichtspersonals nach DIN EN ISO 14731“.
- [5] „ISO 9000:2015-09 Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe“.
- [6] „ISO 3834-1:2021-09 Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen - Teil 1: Kriterien für die Auswahl der geeigneten Stufe der Qualitätsanforderungen“.
- [7] „DIN 18800-7 | 2008-11 Stahlbauten - Teil 7: Ausführung und Herstellerqualifikation“.
- [8] „DIN 15018-1:1984-11 Krane; Grundsätze für Stahltragwerke; Berechnung“.
- [9] „DIN EN 1090-2:2018-09 Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 1090-2:2018“.
- [10] „ISO/TR 15608:2017-02 Schweißen - Richtlinien für eine Gruppeneinteilung von metallischen Werkstoffen“.
- [11] „Regelwerk des Kerntechnischen Ausschusses,“ [Online]. Available: <https://www.bmu.de/themen/nukleare-sicherheit/rechtsvorschriften-und-technische-regeln/ktaregelwerk>. [Zugriff am 15.05.2024].
- [12] C. R. J. V. M. K. M. N. T. & B. S. Koch, „(2021). Adhesively bonded joints in components manufactured via selective laser melting. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 235(3), 518-526“.
- [13] „Baunack, Django & Niendorf, T. & Scholtes, B. (2022). Induktives Stumpfschweißen von Schwarz-Weiß-Verbindungen. Schweißen und Schneiden/Welding and Cutting. 7/8-2022. 454 - 463“.
- [14] „Schumacher, E., Rebensdorf, A., & Böhm, S. (2019). Influence of the jet velocity on the weld quality of magnetic pulse welded dissimilar sheet joints of aluminum and steel. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 50(8), 965-973“.
- [15] „DIN EN ISO 4063:2023-07 Schweißen, Hartlöten, Weichlöten und Schneiden - Liste der Prozesse und Ordnungsnummern (ISO 4063:2023); Deutsche Fassung EN ISO 4063:2023“.
- [16] „Regeln, ISO 15607:2019-10 Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Allgemeine“.
- [17] „DIN EN ISO 15610:2023-06 Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Qualifizierung aufgrund des Einsatzes von geprüften Schweißzusätzen (ISO 15610:2023); Deutsche Fassung EN ISO 15610:2023“.
- [18] „ISO 15611:2024-01 Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Qualifizierung aufgrund von vorliegender schweißtechnischer Erfahrung“.
- [19] „ISO 15612:2018-06 Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Qualifizierung durch Einsatz eines Standardschweißverfahrens“.
- [20] „DIN EN ISO 15614-1:2020-05 Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Schweißverfahrensprüfung - Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen“.
- [21] „ISO 15613:2004-06 Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Qualifizierung aufgrund einer vorgezogenen Arbeitsprüfung“.
- [22] „DIN EN ISO 14341:2020-12 Schweißzusätze - Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall- Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen - Einteilung (ISO 14341:2020)“.
- [23] „DIN EN ISO 4136:2022-09 Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Querzugversuch (ISO 4136:2022); Deutsche Fassung EN ISO 4136:2022“.
- [24] „DIN EN ISO 5817:2023-07 Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO 5817:2023)“.
- [25] „DIN EN ISO 6847:2021-01 Schweißzusätze - Auftragung von Schweißgut zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung“.
- [26] „DVS 1621:2017-11 Arbeitsproben im Schienenfahrzeugbau“.
- [27] „Django Baunack, Gina Fiebig and Frank Pennartz. "Schweißen an Bauteilen für den Einsatz in einem atomaren Endlager." DVS CONGRESS 2024 Große Schweißtechnische Tagung, DVS Berichte, Band: 395. Vol. 2024. 2024.“
- [28] „ISO 9001:2015-09 Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen“.
- [29] „DIN EN 1090-1:2012-02 Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 1: Konformitätsnachweisverfahren für tragende Bauteile; Deutsche Fassung EN 1090-1:2009+A1:2011“.

SCHWEISSEN
SCHNEIDEN
AUTOMATION



LASERSCHWEISSTECHNIK

Beratung · Verkauf · Service



**BWG LASERZELLE MIT
VIELEN TECHNISCHEN
DETAILS**

austrittssicher ggü. Streustrahlung (Laserklasse 4)
LxBxH außen: 4 x 3 x 2,7 m, 1.800 kg, max. 4 kW
Sicherheitsvorrichtungen + Sensorik, Kamera + Monitor
geschützte Luftzufuhr + Durchführungen



Jetzt anrufen:
Marcel Weihshaupt

0172 - 32 77 596

Beratung + Service für
Lasertechnik | MSS



LASER PRODUKTE

Laserschweißgeräte · Laserzellen · Zubehör



HAND-LASERSCHWEISS-
GERÄT CRAFT-LASER
1500 S DRAHTVORSCHUB



LASER- / SCHWEISS-
HELM PANORAMAXX
HYBRID CLT

LASERSCHUTZHAND-
SCHUHE BWG MAG
PROFESSIONAL

LASERSCHUTZSCHILD
FS1 GOLD, FILTER,
YAG, FASERLASER



PRODUKTE

Gemeinsam mit unseren leistungsstarken Partnern bieten wir in unserem Laserprogramm alles zum Laserschweißen:

- Handlaser-Schweißmaschinen
- Laserzellen
- Verbrauchsmaterial
- Zubehör und mehr

VORTEILE

- bis zu 4 x schneller als WIG
- geringer Materialverzug
- Wobble-Technologie
- kosteneffizient
- einfach zu bedienen
- übersichtliches Interface
- klein, mobil, flexibel, praktisch
- optional Drahtzufuhr
- sauberes Schweißergebnis

SUPPORT

- Wir unterstützen Sie hinsichtlich Sicherheit & Anwendung, Schulung & Service sowie Support.
- Dank moderner Ausstattung und erfahrener Fachkräfte sind kurze Reparaturzeiten und höchste Betreuungsqualität garantiert.

Neue Energieträger und resultierende Herausforderungen für die Schweißtechnik

M. Schwetlick und R. Paschold, Langenfeld

1. Einleitung

Neben fossilen Flüssiggasen treten neue Energieträger, wie Wasserstoff, Methanol und Ammoniak, in den Markt und bringen den Bedarf nach Erweiterung bestehender sowie neuer Infrastruktur mit sich. Daraus resultieren werkstoffliche und schweißtechnische Herausforderungen, die zum Teil besondere Tiefkaltzähigkeit und chemische Reinheit der Grundwerkstoffe sowie Schweißgüter erfordern. Die Siedetemperatur flüssigen Wasserstoffs („LH2“ = Liquid Hydrogen) liegt bei ca. -253°C. Im kryotechnischen Tank- und Rohrleitungsbau für diesen Energieträger verwendete Werkstoffe müssen sich bei dieser Temperatur noch zäh und duktil verhalten. Die schweißtechnische Verarbeitung stellt besondere Anforderungen an die Rahmenbedingungen und Schweißzusätze. Allerdings gewinnen weitere Wasserstoffderivate als Energieträger an Bedeutung. Hier spielen unter anderem die Spannungsrisskorrosion und die Eigenspannungen der Schweißverbindungen eine tragende Rolle.

2. Für LH2 einsetzbare Grundwerkstoffe

Für die Eignung eines Werkstoffes für das Medium LH2 spielen neben den Zähigkeitseigenschaften bei tiefen Temperaturen bis zu -273 °C bzw. -269 °C auch andere Eigenschaften eine Rolle. Dazu gehört z. B. die Beständigkeit gegen Wasserstoffversprödung. Eine Auswahl tiefkaltzäher Werkstoffe enthält *Tabelle 1*, wobei nach EN 13445-2, Tabelle B.2-11 das Schweißgut (SG) und die Wärmeeinflusszone (WEZ) bei Auslegungstemperaturen unter -105 °C die Anforderungen für austenitische Stähle nach EN 13445-4:2021 [5] erfüllen müssen. Dann sind SG und WEZ bei -196 °C zu prüfen und müssen eine Kerbschlagarbeit KV ≥ 40 J erreichen.

Tabelle 1: Tiefkaltzähe austenitische Stähle und ihre globale Eignung für LH2 [1, 3-8].

EN 13445-2:2023, Tabelle B.2-11, T _M = -273°C	EN13458-2:2002, Anhang K, Tabelle K.1 - Druckbehälter (Auswahl)	ISO/TR 15916:2015, Tabelle C.1 (Auswahl), Anfälligkeit für Wasserstoffversprödung	SAE J2579, 2023-01, Tabelle B2 (Auswahl)	DIN EN 13445-4, 9.2 Kriterien, Schweißzusätze (Auswahl)	ASME BPVC, UHA-51, ASME B31.12 (Schweißzusätze)
			1.3952		
	1.4301 X5CrNi18-10	(304): k.A.*			
1.4306 X2CrNi19-11	1.4306 X2CrNi19-11	304 ELC (304L): stark		19 9 L	308L, 308LSi
1.4307 X2CrNi18-9	1.4307 X2CrNi18-9	304 ELC (304L): stark			
1.4311 X2CrNi18-10	1.4311 X2CrNi18-10	304 ELC (304L): stark			
	1.4315 X5CrNi19-9	(304N): k.A.			
1.4335 X1CrNi25-21		310 (310L): leicht		25 20 L	310L
	1.4401 X5CrNiMo17-12-2	316 (316L): leicht	1.4401 / 316	19 12 3 L, 19 12 3 L Si	316L, 316LSi
1.4404 X2CrNiMo17-12-2	1.4404 X2CrNiMo17-12-2	316 (316L): leicht	1.4404 / 316L		
1.4406 X2CrNiMoN17-12-2	1.4406 X2CrNiMoN17-12-2	316 (316L): leicht			
1.4429 X2CrNiMoN17-13-3	1.4429 X2CrNiMoN17-13-3	316 (316LN): leicht			
			1.4432 / 316L		
1.4434 X2CrNiMoN18-12-4		(317LN): k.A.		19 13 4 N L	
1.4435 X2CrNiMo18-14-3	1.4435 X2CrNiMo18-14-3	316 (316L): leicht	1.4435 / 316L	19 12 3 L, 19 12 3 L Si	316L, 316LSi
	1.4436 X2CrNiMo17-13-3	316 (316L): leicht			
1.4438 X2CrNiMo18-15-4		(317L): k.A.	1.4438 / 317L		
	1.4439 X2CrNiMoN17-13-5	(317LMn): k.A.			
1.4466 X1CrNiMoN25-22-2		(310MoLN): k.A.		25 22 2 N L	
			1.4529 / „926“		
			1.4539 / „904L“		
1.4541 X6CrNiTi18-10	1.4541 X6CrNiTi18-10	(321): k.A.		19 9 Nb	
	1.4550 X6CrNiNb18-10	(347): k.A.			
1.4563 X1NiCrMoCu31-27-4		(Alloy 28): k.A.			
1.4571 X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571 X6CrNiMoTi17-12-2	(316Ti): k.A.			

* = keine Angabe

Zwar sind CrNi-Stähle wie 1.4306 X2CrNi19-11 / AISI 304L nach EN 13445-2, Tabelle B.2-11 [1] für Temperaturen bis -273 °C einsetzbar, jedoch zeigen Untersuchungen [2, 3], dass CrNiMo-Werkstoffe wie 1.4404 X2CrNiMo17-12-2 / AISI 316L und die zugehörigen artgleichen Schweißgüter wegen ihres höheren Nickelanteils einen stabileren Austenit aufweisen und beständiger gegenüber Wasserstoffversprödung sind. Ähnliches gilt für den höher Nickel-legierten CrNi-Stahl 1.4335 X1CrNi25-21 / AISI 310L. Bezogen auf Wasserstoffanlagen für den Fahrzeugbau enthält Tabelle B2 nach SAE J2579 [4] eine Übersicht mit als geeignet anerkannten Werkstoffen. Betrachtet man die austenitischen Stähle, werden auch hier höher Nickel-legierte Sorten empfohlen. Als optimal gelten hiernach austenitische Stähle mit $Ni \geq 13 \%$, $N \leq 0,25 \%$ und einem Deltaferritanteil $\leq 3 \%$ (entspricht 3 FN).

Allgemein ist derzeit ein Markttrend der LH2-Branche für die Verwendung von CrNiMo-Stählen wie 1.4404 / AISI 316L zu beobachten, der neben den hinreichend guten Werkstoffeigenschaften auch Preis und Verfügbarkeit des Werkstoffes berücksichtigt. Hinzu kommt, dass es nach dem ASME-Code [7] und ASME Code Case B31 [8] derzeit nur wenige, als zuverlässig und erprobt geltende, Typen geeigneter Schweißzusätze gibt: 308L / 19 9 L, 308LSi / 19 9 L Si, 310L / 25 20 L, 316L / 19 12 3 L und 316LSi / 19 12 3 L Si.

3. Für LH2 einsetzbare Schweißzusätze

In der aktuellen Fassung DIN EN 14532-1:2005-02 [9] wird im Anhang D für austenitisches reines Schweißgut der Gruppe 8.1 eine Mindestkerbschlagarbeit $KV \geq 32 \text{ J}$ gefordert, wenn nicht höher vereinbart. In der kommenden Überarbeitung ist auch in Harmonisierung mit der DIN EN 13445-2 mit einer Mindestanforderung $KV \geq 40 \text{ J}$ zu rechnen.

Schweißzusätze, die ein tiefkaltzähes Schweißgut liefern, sind seit langer Zeit verfügbar und werden z. B. für die Lagerung von flüssigem Helium (-269 °C) und zunehmend flüssigem Wasserstoff (-253 °C) eingesetzt. Neben der Reinheit der chemischen Analyse ist auch der Anteil von Deltaferrit im Schweißgut von Bedeutung für die Tiefkaltzähigkeit (Kerbschlagarbeit und laterale Breitung), sowie die Anfälligkeit gegen Wasserstoffversprödung. Die Auswahl der eingesetzten Schweißzusätze erfolgt meist artgleich zum verwendeten Grundwerkstoff, wobei derzeit der Schwerpunkt bei CrNiMo-Stählen wie 1.4404 / 316L liegt. Daneben sind auch noch CrNi-Stähle wie 1.4306 / 304L für bestimmte Anwendungen im Einsatz (siehe Anwendung 4.1).

Schweißzusätze vom Typ 19 9 L / 308L bzw. 19 9 L Si / 308LSi werden daher meist mit einem maximal zulässigen Deltaferritanteil (z. B. $\leq 8 \text{ FN}$) spezifiziert und Mindestanforderungen für die Kerbschlagbiegeprüfung bei -196 °C ($KV \geq 40 \text{ J}$, laterale Breitung $\geq 0,53 \text{ mm}$) gestellt.

Die Forderungen an Schweißgüter des Typs 19 12 3 L / 316L bzw. 19 12 3 L Si / 316LSi sind meist ähnlich, teils auch mit strikteren Limitierungen des Ferritanteils ($\leq 6 \text{ FN}$), lassen sich mit Standard-Schweißzusätzen jedoch nicht oder nicht zuverlässig reproduzierbar erreichen. Daher ist es sinnvoll, einen speziell für den tiefkaltzähen Einsatz bis -269 °C entwickelten Schweißzusatz vom Typ (19 12 3 L) / 316L (Exaton 19.12.3.L CRYO) einzusetzen. Dieser zeichnet sich durch seinen besonders geringen Deltaferritanteil und die hohe Reinheit der chemischen Analyse aus, wofür ein speziell erschmolzenes Vormaterial aufwändig hergestellt werden muss. Bei sehr geringem Deltaferritanteil neigen austenitische Schweißgüter zur Heißrissbildung. Um dies zu verhindern, werden entsprechend wirkende Begleitelemente minimiert und z. B. der Schwefel-Anteil extrem abgesenkt. Nur auf diese Weise kann ein heißrissbeständiges und sehr tiefkaltzähes Schweißgut erzeugt werden. Darüber hinaus entspricht der Schweißzusatz den in SAE J2579 [4] gegebenen Empfehlungen mit $Ni \geq 13 \%$, $N \leq 0,25 \%$ und einem Deltaferritanteil $\leq 3 \%$ (entspricht etwa 3 FN), siehe *Tabelle 2*.

Tabelle 2: Klassifizierung und chemische Richtanalyse des Schweißzusatzes Exaton 19.12.3.L CRYO.

Klassifizierung der Drahtelektrode / des Schweißstabes:											
SFA/AWS A5.9: ER316L			EN ISO 14343-A: G/W/P/S (19 12 3 L)				EN ISO 14343-B: SS316L		Werkstoffnummer: ~1.4430		
Chemische Analyse der Drahtelektrode / des Schweißstabes in %:											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Al, Co, Cu, Nb, Ti, u.a.	Ferrit	
0,02	0,4	1,8	0,012	0,003	18,5	13,3	2,3	0,06	minimiert	2 – 4 FN	

Die *Abb. 1 und 2* zeigen die Mittelwerte der lateralen Breitung und der Kerbschlagzähigkeit, die bei Pre-Use-Tests reiner Schweißgüter bei -196 °C ermittelt wurden. Erfahrungsgemäß sind die Prüfwerte des WIG-Schweißens höher als die des MAG-Schweißens. Hierfür sind prozessbedingt höhere Sauerstoffanteile im Schweißgut und höhere Korngrößen in MAG-Schweißgütern verantwortlich. Die Querschnittsform der Schweißraupen und die damit verbundene Lage der Dendriten spielt ebenfalls eine Rolle. Neben dem Deltaferritanteil sind auch die Verteilung und die Morphologie des Ferrits von Bedeutung. Das UP-Schweißen nimmt daher eine Sonderrolle ein und stellt höhere Anforderungen an die Schweißmetallurgie und die Schweißbedingungen.

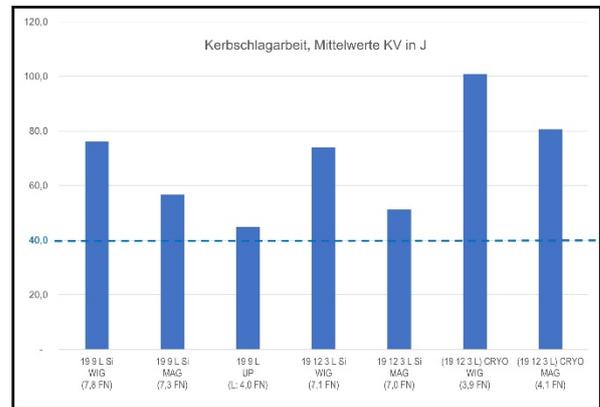
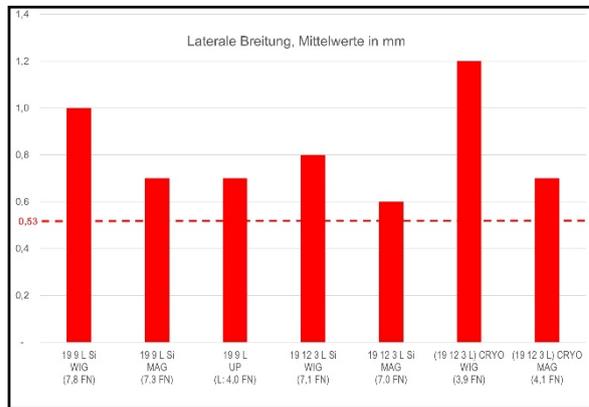


Abb. 1: Mittelwerte der lateralen Breitung austenitischer Schweißgüter in Pre-Use-Tests bei -196 °C nach Legierungstyp, Schweißprozess und mittlerem Ferritanteil (WRC-92); Sollwert: Laterale Breitung $\geq 0,53$ mm.

Abb. 2: Mittelwerte der Kerbschlagarbeit austenitischer Schweißgüter in Pre-Use-Tests bei -196 °C nach Legierungstyp, Schweißprozess und mittlerem Ferritanteil (WRC-92); Sollwert: Kerbschlagarbeit KV ≥ 40 J.

Die Praxis zeigt, dass mit Schweißzusätzen des Typs 19 9 L Si / 308LSi bzw. 19 9 L / 308L mit eingegrenztem Ferritanteil die Mindestanforderungen erreicht werden. Das Niveau der Standardlegierung 19 12 3 L / 316L bzw. 19 12 3 L Si / 316LSi fällt dagegen etwas ab und bietet dem Verarbeiter geringere Sicherheitsmargen zu den Mindestanforderungen. Die weiterentwickelte Legierung (19 12 3 L) / 316L (Exaton 19.12.3.L CRYO) zeigt im Vergleich deutlich höhere Werte der lateralen Breitung und Kerbschlagarbeit.

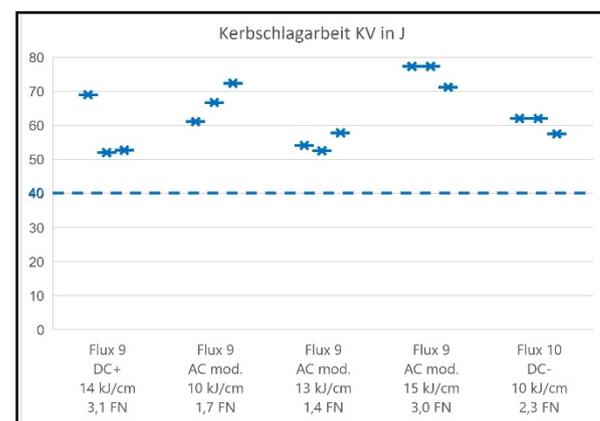
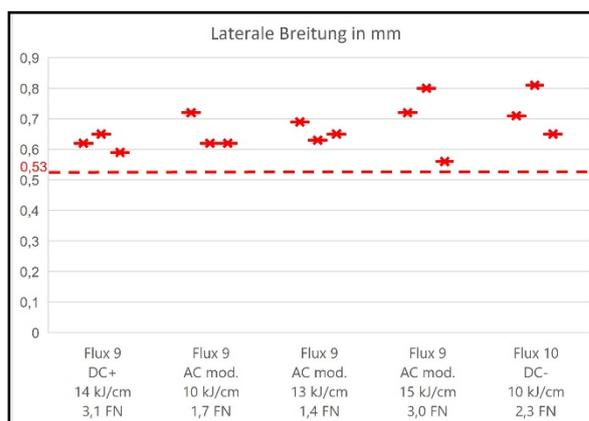


Abb. 3: Laterale Breitung austenitischer UP-Schweißgüter bei -196 °C nach UP-Pulver, Stromart und Ferritanteil (gemessen); Sollwert: $\geq 0,53$ mm.

Abb. 4: Kerbschlagarbeit austenitischer UP-Schweißgüter bei -196 °C nach UP-Pulver, Stromart und Ferritanteil (gemessen); Sollwert: ≥ 40 J.

Die Erreichung der Mindestanforderungen an das reine Schweißgut und das Schweißgut der Verbindungen ist beim UP-Schweißen eine besondere Herausforderung. Neben der Schweißmetallurgie sind die Schweißbedingungen gezielt zu wählen und einzuhalten. Die *Abb. 3 und 4* zeigen die Ergebnisse einer

kleinen Auswahl von durchgeführten UP-Schweißversuchen. Verwendet wurde die UP-Drahtelektrode (19 12 3 L) / 316L (Exaton 19.12.3.L CRYO) der Abmessung $\varnothing 2,4$ mm im Eindrahtprozess. Variiert wurden verschiedene Schweißpulver, Stromart und Polung, Schweißparameter und Wärmeeinbringen. Ziel der umfangreichen Untersuchungen ist die Definition geeigneter Schweißzusätze und des zugehörigen Parameterfensters für das reproduzierbare und sichere Erfüllen der Mindestanforderungen bzw. der Erwartungen von Verarbeitern. Natürlich sind neben den geforderten Mindestwerten der Standards möglichst Sicherheitszuschläge der Verarbeiter zu erreichen. Beispielsweise wird gewünscht, dass die laterale Breitung möglichst oberhalb 0,6 mm und die Kerbschlagarbeit im Mittelwert um oder oberhalb 60 J liegen sollten, wobei die Werte nicht breit streuen. Dies soll dem Hersteller eine gewisse Sicherheit bei Auftreten fertigungsbedingter Toleranzen bieten.

Der Sauerstoff- bzw. Oxidanteil im Schweißgut hat ebenfalls einen Einfluss auf die Tieftemperaturzähigkeit. Für die Sauerstoffaufnahme in der UP-Kaverne sind verschiedene Faktoren wie die chemische Zusammensetzung des Pulvers, Lichtbogenlänge (bestimmt über die Schweißspannung) und Tropfengröße des Werkstoffübergangs relevant. Eine relativ geringe Lichtbogenspannung ist hier von Vorteil. Größere Schweißguttropfen bieten die geringste spezifische Oberfläche für die Aufnahme von Gasen während des Werkstoffübergangs in der Lichtbogenkaverne. Während das UP-Schweißen meist mit Gleichstrom und positiv gepolter Elektrode ausgeführt wird (typisch: O = 0,05-0,07 %), zeigen das Schweißen mit modifiziertem Wechselstrom und insbesondere das Schweißen mit Gleichstrom und negativ gepolter Elektrode geringere Anteile von Sauerstoff bzw. Einschlüssen und Oxiden, wie die *Abb. 5 und 6* zeigen. Beide Pulver sind Fluorid-basisch, wobei Flux 10 einen höheren Basizitätsgrad aufweist.



Bild 5: Mikroeinschlüsse im UP-Schweißgut mit O = 0,045 %; Flux 9, AC mod., E = 10 kJ/cm, U_s = 28 V, Ferritanteil 3 FN.



Bild 6: Mikroeinschlüsse im UP-Schweißgut mit O = 0,032 %; Flux 10, DC-, E = 10 kJ/cm, U_s = 28 V, Ferritanteil 2,3 FN.

4. Herstellung von Behältern, Rohrleitungen und Armaturen für LH2 nach europäischen Regelwerken

Nach DIN EN 13445-2 [1] muss die Kerbschlagarbeit KV für drucktragende Teile aus austenitischen Stählen der Gruppe 8 mindestens $KV \geq 40$ J betragen. Für Schweißgut und WEZ muss die Probenposition den Festlegungen in DIN EN 13445-4 entsprechen. Der Mittelwert aus drei Proben muss den geforderten Wert erreichen, dabei darf ein Wert niedriger sein, jedoch nicht kleiner als 70 % des geforderten Wertes (hier 28 J). Bei geringeren Wanddicken sind auch Kleinproben zulässig, die proportional umzurechnen sind. Unter 5 mm Probenbreite ist ein Kerbschlagbiegeversuch unzulässig.

Schweißverfahrensprüfungen und ggf. Arbeitsproben sind nach DIN EN 13445-4:2021 durchzuführen. Für Schweißzusätze des Typs 19 9 L, 19 9 Nb, 19 12 3 L, 19 12 3 L Si, 19 13 4 N L, 25 20 L, 25 22 2 N L, 27 31 4 Cu L und Nickelbasis-Schweißzusätze kann der Nachweis anhand von Verfahrensbewertungen erfolgen und weitere Arbeitsproben entfallen. Bei anderen Schweißzusatz-Legierungen und bei einem Ferrit-Gehalt des Schweißgutes > 12 FN müssen die erforderlichen Kerbschlageigenschaften für jedes Schweißgutlos nachgewiesen werden, oder es ist für jeden Behälter ein Arbeitsproben-Prüfling bei -196°C einem Kerbschlagbiegeversuch zu unterziehen.

DIN EN 13458-2 [6] fordert für ortsfeste, vakuum-isolierte Kryo-Behälter bei Arbeitsprüfungen an austenitischen nichtrostenden Stählen mit einer Wanddicke ≤ 12 mm neben Biegeproben eine Querkzugprobe und Makroschliff, bei Wanddicken > 12 mm den Querkzugversuch, einen Makroschliff und die Durchführung eines Kerbschlagbiegeversuches am Schweißgut.

Identische Anforderungen enthält DIN EN 13530-2 [10] für große ortsbewegliche, vakuum-isolierte Kryo-Behälter mit einem Fassungsvermögen > 1000 l.

Die Norm DIN EN ISO 21028-1 [11] wurde unter Mitwirkung des Technischen Komitee CEN/TC 268 „Kryo-Behälter und spezielle Einsatzgebiete der Wasserstofftechnologie“ erarbeitet und umfasst die Zähigkeitsanforderungen an Werkstoffe bei Arbeitstemperaturen unter -80 °C für den Einsatz für Kryo-Behälter. Für die eingesetzten Werkstoffe ist für jede Charge (Lot) der Zähigkeitsnachweis durch Kerbschlagbiegeversuche zu führen. Gleiches gilt für die Qualifikation von Schweißverbindungen und die WEZ. Als Mindestwert für austenitische CrNi-, CrNiMo- und CrNiMn-Stähle (in GW, WEZ und SG) wird bei Einsatz kälter als -196 °C ein Mindestwert der Kerbschlagarbeit von 48 J/cm^2 vorgegeben (entspricht $38,4\text{ J}$ für eine Probe der vollen Größe). Die Mindestwerte gelten für den Mittelwert aus drei Proben, wobei eine Probe den Mindestwert unterschreiten darf, aber mindestens 70% des festgelegten Wertes erreichen muss. Sind die Anforderungen nicht erfüllt, darf durch einen zweiten Probensatz ergänzt werden. Nun muss der Mittelwert aus den sechs Proben den Mindestwert erreichen und maximal zwei Proben dürfen den festgelegten Mindestwert unterschreiten. Bei Nichterfüllung ist das Prüfmuster zurückzuweisen und der Rest des Prüfloses Wiederholungsprüfungen zu unterziehen.

Für Wanddicken unter 10 mm enthält die Norm entsprechende Regelungen zur Kerbschlagbiegeprüfung, wobei die Mindestwanddicke jedoch 5 mm betragen muss. Die Lage der Kerbschlagproben wird ebenfalls beschrieben.

Der Mindestwert der lateralen Breitung ist 0,53 mm, bezogen auf den Normalquerschnitt 10 x 10 mm. Wird als Ergebnis der Kerbschlagbiegeprüfung im Mittelwert die Anforderung erfüllt, jedoch bei einer Probe der Mindestwert nicht erreicht, darf der Wert nicht geringer als 2/3 der Anforderungen liegen. In diesem Falle sind drei ergänzende Proben zu prüfen, wobei alle den Mindestwert erreichen oder überschreiten müssen. Bei Nichterfüllung ist eine erneute Wärmebehandlung zulässig. Danach müssen alle drei Proben des Satzes die Anforderungen erfüllen.

Die Anforderungen an die Konstruktion, Herstellung und Prüfung von Absperrarmaturen für den tiefkalten Betrieb regelt DIN EN 1626 [12]. Diese Norm gilt für Armaturen mit Nennweiten bis DN 150 im Kryo-Betrieb, das heißt für tiefkalte Fluide (außer LNG) unter -10 °C und bezieht vakuum-isolierte Armaturen mit ein. Jedoch nimmt diese und weitere relativ alte Normen der Kryo-Behälter-Reihe noch Bezug auf DIN EN 1252-1, die inzwischen durch DIN EN ISO 21028-1 [11] ersetzt wurde.

5. Herstellung von Behältern, Rohrleitungen und Armaturen für LH2 nach ASME-Code

Kerbschlagbiegeprüfungen in Grundwerkstoff (GW), Wärmeeinflusszone (WEZ) und Schweißgut (SG) bei -196 °C durchzuführen. Beträgt die theoretische Restwanddicke am Kerb der Kerbschlagbiegeprobe weniger als 2,5 mm, kann alternativ die Prüfung nach ASTM E1820 J_{IC} zur Ermittlung der Bruchzähigkeit angewendet werden. Nach UHA-51 (3) sind für austenitische Stähle und Schweißzusätze bei Einsatztemperaturen unter -196 °C die Schweißprozesse Lichtbogenhand-, Unterpulver-, Schutzgas-, WIG- und Plasmaschweißen zulässig einsetzbar. Jede Schmelze (Heat) und Charge (Lot) muss einem „Pre-Use-Test“ mit Kerbschlagbiege-Prüfung nach (f)(4)(a) bis (f)(4)(c) unterzogen werden. Nach (f)(4) müssen die verwendeten Schweißzusätze die Spezifikationen nach ASME II, Part C erfüllen und nach (-a) muss jede Schmelze (Heat) und/oder Charge (Lot) von Stabelektroden oder Drähten zum Schutzgasschweißen einem Pre-Use-Test mit der Kerbschlagbiege-Prüfung nach (a) unterzogen werden. Dieser Pre-Use-Test wird üblicherweise durch den Schweißzusatz-Hersteller durchgeführt und mit einem Werkszeugnis belegt. Dabei muss nach (-c) für jeden Schweißprozess separat getestet werden. Gleiches gilt nach (-b) für jede Schmelze bzw. Charge der zum Unterpulverschweißen eingesetzten Drähte und Pulver. Hervorzuheben ist, dass die in den o.g. Prüfungen für die Pre-Use-Tests die Schweißparameter der in der Fertigung verwendeten WPS anzuwenden sind. Dies bedarf unbedingt der vorherigen Abstimmung zwischen Hersteller kryotechnischer Anlagen und dem Schweißzusatz-Hersteller!

Bei Schweißzusätzen vom Typ 316L zum WIG- oder Schutzgasschweißen wird nach (3)(-a)(-1) im reinen Schweißgut ein Ferritanteil von $\leq 10\text{ FN}$ gefordert, für Typ 308L 4 – 14 FN. Die Kerbschlagbiegeprüfungen an GW, WEZ und SG sind bei -196 °C auszuführen, dabei muss jede Probe eine laterale Breitung von $\geq 0,53\text{ mm}$ aufweisen.

5.1 Herstellung von Flüssigwasserstofftanks aus SA 240 Grade 304L nach ASME

Bei der Firma König & Co. sind Böden für Flüssigwasserstofftanks nach ASME zu fertigen. Der hohe Umformgrad der Böden aus geschweißten Ronden erfordert ein Lösungsglühen als Wärmenachbehandlung. Als Schweißprozess wurde das Unterpulverschweißen gewählt, das Schweißgut ist vom Typ 308L / 19 9 L. Für den geforderten Pre-Use-Test wurden die Rahmenbedingungen zwischen König & Co. und dem Schweißzusatzhersteller im Vorfeld abgestimmt, da die Schweißparameter der durchzuführenden Prüfung nach UHA-51 [7] in Übereinstimmung mit der in der Fertigung angewendeten WPS liegen müssen. Es wurde eine UP-Drahtelektrode vom Typ SFA A5.9 - ER308L / DIN EN ISO 14343-A – S 19 9 L im Durchmesser 2,4 mm und einem Ferritanteil von 7 FN in Kombination mit einem fluoridbasischen UP-Pulver DIN EN ISO 14174 – S A FB 2 55 53 AC eingesetzt. Da ein Pre-Use-Test des reinen Schweißgutes recht aufwändig ist und durch eine WPQR in der Fertigung zu ergänzen war, wurden UP-Draht und UP-Pulver in entsprechenden Mengen projektbezogen aus jeweils nur einer Charge/Lot gefertigt und bezogen. *Tabelle 3* zeigt die Prüfergebnisse.

Tabelle 3: Anforderungen und Ergebnisse des Pre-Use-Tests nach UHA-51 [7] bei ESAB.

Zugversuch	Prüftemperatur in °C	Dehngrenze Rp0,2 in MPA	Zugfestigkeit Rm in MPA	Dehnung A4 in %
Anforderungen nach UHA-51 und SFA-5.4	RT	≥ 205	≥ 515	≥ 40
Längszugprobe reines Schweißgut	RT	272	518	47
Kerbschlagbiegeversuch	Prüftemperatur in °C	Kerbschlagarbeit in J	Laterale Breitung in mm	Bruchflächenbeurteilung, Gleitbruchanteil in %
Anforderungen nach UHA-51 und SFA-5.4	-196	(≥ 40 J, Kundenwunsch)	≥ 0,53	-
Kerbschlagbiegeproben reines Schweißgut	-196	45, 46, 42, 48, 43 Mittelwert: 44,8	0,72, 0,74, 0,66, 0,78, 0,74 Mittelwert: 0,73	jeweils 100%

Tabelle 4: Ergebnisse der Verfahrensprüfung (WPQR) nach Lösungsglühen bei König & Co.

Zugversuch	Prüftemperatur in °C	Dehngrenze Rp0,2 in MPA	Zugfestigkeit Rm in MPA	Dehnung A4 in %
Anforderungen nach UHA-51 und SFA-5.4	RT	≥ 205	≥ 515	≥ 40
Längszugprobe SG	RT	289	544	47,5
Querzugprobe Naht	-	-	590	-
Kerbschlagbiegeversuch	Prüftemperatur in °C	Kerbschlagarbeit in J	Laterale Breitung in mm	Bruchflächenbeurteilung, Gleitbruchanteil in %
Anforderungen nach UHA-51 und SFA-5.4	-196	(≥ 40 J, Kundenwunsch)	≥ 0,53	-
Kerbschlagbiegeproben Schweißgut (VWT)	-196	64, 69, 68 Mittelwert: 67	1,02, 0,98, 0,86 Mittelwert: 0,95	-
Kerbschlagbiegeproben WEZ (VHT)	-196	83, 97, 98 Mittelwert: 93	1,24, 1,49, 1,53 Mittelwert: 1,42	-

Die Anforderungen an die mechanisch-technologischen Eigenschaften des reinen Schweißgutes sind erfüllt, das Niveau der Kerbschlagarbeit liegt bedingt durch die zum UP-Schweißen verwendete Stromart (=+) relativ knapp über der 40 J-Marke. Die Werte streuen aber nicht breit und zeigen dabei eine hohe laterale Breitung, die das Kriterium nach ASME UHA-51 [7] erfüllt. Dieses Phänomen ist wahrscheinlich auf das höhere Sauerstoffniveau in Schweißgütern zurückzuführen, das beim Unterpulverschweißen auftreten kann. Die vorhandenen Oxide beeinträchtigen das Zähigkeitsniveau im Schweißgut und

werden auch durch Lösungsglühen nicht aufgelöst. In der Regel weist das UP-Schweißgut eine höhere Korngröße auf, das beim Lösungsglühen auftretende Kornwachstum kann das Zähigkeitsverhalten ebenfalls beeinträchtigen. Daher ist beim WIG- und Schutzgasschweißen mit einer höheren Lage der Kerbschlagarbeit zu rechnen.

Im Vergleich zum Pre-Use-Test des reinen Schweißgutes weisen die Ergebnisse der Verfahrensprüfung (WPQR) an 16 mm dickem Blech deutlich höhere Werte auf, wie [Tabelle 4](#) zeigt. Dies ist durch die Aufmischung aus dem Grundwerkstoff bedingt, welche zu einer Absenkung des Ferritanteils im Schweißgut führt. Dieser positive Effekt ist beim UP-Schweißen relativ dünner Bleche von Vorteil. Beim Schweißen dicker Bleche und der damit verbundenen Annäherung an das reine Schweißgut sind die mechanisch-technologischen Güterwerte aus dem Pre-Use-Test des reinen Schweißgutes von noch größerer Bedeutung.

6. Transport und Lagerung von Wasserstoff und seinen Derivaten

Der globale Transport und die Lagerung von Wasserstoff stellen eine besondere Herausforderung dar. Sind keine Pipelines für den Transport von gasförmigem Wasserstoff vorhanden oder leicht zu errichten, ist der Transport mit Tankschiffen eine Lösung. Im Vergleich zu verflüssigtem Wasserstoff ist der Transport von Wasserstoff in Form seiner Derivate oft technisch leichter und kostengünstiger zu lösen. Hierfür wird der Wasserstoff z.B. an Trägermoleküle aus der Luft gebunden (Stickstoff N_2 oder Kohlendioxid CO_2). Werden zur Synthese erneuerbare Energien und Trägermoleküle aus der Luft oder dem Recyclingkreislauf eingesetzt, kann dieser Weg ökologisch und ökonomisch sinnvoll sein. Als leichter zu transportieren und auch direkt als Energieträger einsetzbar sowie zur Rückumsetzung in Wasserstoff geeignet gelten z. B.:

- Synthetisches Erdgas (SNG) = Methan CH_4 ,
- Methanol CH_4O ,
- Ammoniak NH_3 ,
- Strombasierte synthetische Kraftstoffe (E-Fuels, E-Kerosin).

Im Zuge einer immer größeren Popularität von Wasserstoff als alternativen Energiequelle zu fossilen Ressourcen wird intensiv nach möglichst effizienten Methoden geforscht, Wasserstoff wirtschaftlich zu transportieren und zu lagern. Dieser hat im flüssigen Zustand bei -253 °C lediglich eine Dichte von $0,071\text{ kg/L}$. Demgegenüber existiert für Ammoniak (NH_3) bereits bedingt durch seinen verbreiteten Einsatz eine etablierte Lieferkette im Gegensatz zu reinem Wasserstoff, dessen Herausforderungen an Konstruktion und Fertigung zuvor diskutiert wurden. Ammoniak wird seit langer Zeit für eine Vielzahl an Anwendungen hergestellt und ist eine der weltweit am meisten produzierten Chemikalien, wobei 80 % für die Düngemittelherstellung gebraucht werden. Es ist mit $0,68\text{ kg/L}$ bei lediglich -33 °C fast zehnmal dichter als Wasserstoff. Eine weitere Alternative, Methanol (CH_4O), ist mit etwa $0,79\text{ kg/L}$ bei Raumtemperatur ebenfalls deutlich effizienter im Vergleich. Ohnehin werden 90 % des global produzierten Wasserstoffs bereits für die Ammoniak- und Methanol-Produktion verwendet [13].

So wurde in China von Sinopec bereits eine Wasserstoff-Tankstelle für den kommerziellen Gebrauch in Betrieb genommen, die den zu tankenden Wasserstoff mittels eines selbstentwickelten Katalysators aus Ammoniak gewinnt. So sollen nach dem Testbetrieb täglich bis zu 40 LKW mit Wasserstoff betankt werden können [14].

Die Lagerung von Ammoniak erfordert weitaus geringere Anforderungen an Kaltzähigkeit, als zum Beispiel Wasserstoff und LNG bzw. SNG. Ammoniak hat eine Siedetemperatur von etwa -33 °C , somit können im Markt verfügbare Feinkornstähle als kaltzähe Güten (z. B. P355NL2, $>27\text{ J}$ bei -50 °C) in der Konstruktion verwendet werden, was die Fertigung und Auswahl von Schweißzusätzen erheblich vereinfacht.

Je nach Regelwerk existieren abweichende Empfehlungen, beziehungsweise Vorgaben für die Auslegung von Lagertanks für verflüssigtes Ammoniak. So werden gemäß Technischen Regeln für Dampfkessel TRD 451 die Tankwandungen für einen Betriebsdruck bis 20 bar, zuzüglich einem Sicherheitszuschlag von 20% zur Kompensation von auftretenden Zugspannungen zwecks Minimierung der Gefahr von Spannungsrissskorrosion, veranschlagt.

Dieser Zuschlag wird jedoch nicht für gemäß diesem Regelwerk ausgewählte austenitische CrNi-Stähle angesetzt [15]. Demgegenüber werden nach prEN 14620-1:2022 Lagertanks nicht als Druckbehälter, sprich mit einem maximalen Betriebsdruck von 500 mbar, ausgelegt. Darüber hinaus soll EN 13455 herangezogen werden [16].

Generell gilt, dass mit steigender Streckgrenze die Gefahr der Spannungsrissskorrosion steigt, daher ist der Einsatz von Stählen mit einer annehmbar geringen Streckgrenze zu empfehlen [15], [17].

Dennoch bestehen auch hier besondere Anforderungen an die Werkstoffe. Diese werden insbesondere durch die inhärente Gefahr der Spannungsrissskorrosion hervorgerufen. Hierbei kommt es unter Einwirkung von korrosivem Angriff und Zugspannungen zu inter- und transkristallinen Gefügeschädigungen und damit zu einer Materialtrennung [18]. Hierbei sind letztere für das Auftreten dieser Schädigungsform unbedingt notwendig, was Maßnahmen zur Eigenspannungsreduktion notwendig macht. Dazu zählt vor allem das Spannungsarmglühen. Demnach schreibt beispielsweise die Prüfanweisung für den Transport von UN 1005 wasserfreiem Ammoniak auf Kesselwagen der Deutschen Bahn vor, dass Tanks aus Feinkornstählen mit Streckgrenzen >400 MPa geprüft werden müssen. Nach den Schweißarbeiten soll ein Spannungsarmglühen durchgeführt werden mit dem Ziel einer Streckgrenze von unter 500 MPa, Zugfestigkeit über 630 MPa und Härtewerte von maximal 250 HV10 [19]. Weitere geeignete Maßnahmen sind das Einbringen von „Gegenspannungen“ durch z.B. höherfrequentes Hämmern oder auch Abdrücken der Behälter mit „ausreichend hohem Prüfdruck“ [14].

7. Zusammenfassung und Ausblick

Für den Transport und die Lagerung flüssigen Wasserstoffs (LH₂) besteht derzeit ein Trend zur Verwendung von CrNiMo-Werkstoffen wie 1.4404 X2CrNiMo17-12-2 / AISI 316L und den zugehörigen artgleichen Schweißzusätzen wie (19 12 3 L) / 316L (Exaton 19.12.3.L CRYO). Dieser Schweißzusatz ist auf die kryotechnischen Anforderungen abgestimmt und erfüllt den ASME-Case 316L nach UHA-51 sowie die Zulassungsanforderungen von TÜV und DNV bei -269 °C.

Als Mindestanforderungen der Kerbschlagbiegeprüfung des austenitischen Grundwerkstoffs, der Wärmeeinflusszone und des Schweißgutes bei -196 °C können normübergreifend die laterale Breitung $\geq 0,53$ mm und die Kerbschlagarbeit ≥ 40 J angesetzt werden. Hersteller von Behältern, Rohrleitungen, Armaturen etc. für LH₂ müssen nach ASME UHA-51 die Eignung der eingesetzten Schweißzusätze in Pre-Use-Tests (laterale Breitung $\geq 0,53$ mm bei -196 °C) nachweisen lassen, üblicherweise vom Schweißzusatzhersteller. Dabei sind die Schweißparameter der WPS des Herstellers mit denen des Schweißzusatzherstellers beim Pre-Use-Test in Übereinstimmung zu bringen. Diese Vorgehensweise ist auch für die Herstellung nach anderen Regelwerken sehr zu empfehlen, da die alleinige Limitierung des Deltaferitanteils die Erfüllung der Mindestanforderungen (laterale Breitung $\geq 0,53$ mm und die Kerbschlagarbeit ≥ 40 J bei -196 °C) häufig nicht sicherstellt.

Erfahrungsgemäß bieten das WIG- und MAG-Schweißen mit der Sondergüte (19 12 3 L) / 316L (Exaton 19.12.3.L CRYO) hohe Kerbschlagarbeit und laterale Breitung im Schweißgut. Nach umfangreichen Untersuchungen zeigt sich, dass prozesstechnische Sondervarianten wie das UP-Schweißen mit negativ gepolter Drahtelektrode zielführend sein könnten. Zur statistischen Absicherung bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen.

Mit Hinblick auf eine Ausweitung der Ammoniak-Logistik zum Zweck des Wasserstofftransports ist sicherlich eine Erweiterung der erforderlichen Infrastruktur zu erwarten und auch notwendig. Darüber hinaus erscheint es sinnvoll, vorhandene Regelwerke, Richtlinien und Empfehlungen anzupassen, beziehungsweise zu modernisieren. Aus Sicht der Schweißtechnik sind geeignete Verfahren anzuwenden, die zur Vermeidung von Spannungsrissskorrosion für einen zugspannungsarmen Nahtbereich sorgen. Bislang war das Spannungsarmglühen eine übliche Methode, jedoch stehen heute weitere Methoden wie HFMI u.ä. zur Verfügung.

Weitere Wasserstoffderivate wie Methanol spielen im Energietransport eine wachsende Rolle. Entsprechend ist mit einem Ausbau der erforderlichen Infrastruktur zu rechnen.

Neu im Fokus sind die natürlichen geologischen Vorkommen von Wasserstoff („weißem“ oder „goldenen“ Wasserstoff), die lokal bergbaulich gefördert werden können und die Synthese von Derivaten bzw. den Transport über weite Distanzen als Flüssiggas oder Derivat teils obsolet machen könnten.

8. Schrifttum

- [1] DIN EN 13445-2:2021+A1:2023: Unbefeuerte Druckbehälter – Teil 2: Werkstoffe.
- [2] Yun HS et al., Effect of δ -ferrite in welded ER308 and ER316 microstructure on hydrogen embrittlement, International Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.025>
- [3] ISO/TR 15916:2015(E): Technical Report - Basic considerations for the safety of hydrogen systems.
- [4] SAE J2579: Surface Vehicle Standard – [®] Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles, Januar 2023.
- [5] DIN EN 13445-4:2021: Unbefeuerte Druckbehälter – Teil 4: Herstellung.
DIN EN 13445-4/A1:2023: Unbefeuerte Druckbehälter – Teil 4: Herstellung.
- [6] DIN EN 13458-2:2002: Kryo-Behälter – Ortsfeste, vakuum-isolierte Behälter, Teil 2: Bemessung, Herstellung und Prüfung.
DIN EN 13458-2 Ber 1:2007-07: Kryo-Behälter – Ortsfeste, vakuum-isolierte Behälter, Teil 2: Bemessung, Herstellung und Prüfung.
- [7] ASME BPVC.VIII.1-2019, UHA-51.
- [8] Cases of the ASME B31 Code for Pressure Piping, B31 Case 201: Piping for Hydrogen Service ASME, B31.12 Hydrogen Piping. Last Updates January 2, 2024.
- [9] DIN EN 14532-1:2005-02: Schweißzusätze – Prüfverfahren und Qualitätsanforderungen – Teil 1: Grundprüfungen und Konformitätsbewertungen von Schweißzusätzen für Stahl, Nickel und Nickellegierungen.
- [10] DIN EN 13503-2:2002: Kryo-Behälter – Große ortsbewegliche, vakuum-isolierte Behälter. Teil 2: Bemessung, Herstellung und Prüfung.
DIN EN 13530-2:2002/A1:2004: Kryo-Behälter – Große ortsbewegliche, vakuum-isolierte Behälter. Teil 2: Bemessung, Herstellung und Prüfung.
- [11] DIN EN ISO 21028-1:2017-01: Kryo-Behälter – Zähigkeitsanforderungen an Werkstoffe bei kryogenen Temperaturen – Teil 1: Temperaturen unter -80°C .
- [12] DIN EN 1626:2009-01: Kryo-Behälter – Absperrarmaturen für tiefkalten Betrieb.
- [13] International Energy Agency: Global Hydrogen Review 2023 (September 2023).
- [14] Bork, Henrik: Die Tankstelle, die sich ihren Wasserstoff aus Ammoniak selbst erzeugt, konstruktionspraxis Dezember 2023.
- [15] TRD 451 (Dezember 1996): Anlagen zur Lagerung von druckverflüssigtem Ammoniak für Dampfkesselanlagen – Druckbehälter –.
- [16] EN 14620-1:2022: Auslegung und Herstellung standortgefertigter, stehender, zylindrischer Flachboden-Tanksysteme für die Lagerung von tiefkalt verflüssigten Gasen bei Betriebstemperaturen zwischen 0°C und -196°C – Teil 1: Allgemeines.
- [17] Fertilizers Europe: Guidance for inspection of atmospheric, refrigerated Ammonia storage tanks (2014).
- [18] Internationaler Schweißfachingenieur GSI SLV Duisburg, Kapitel 2.14: Einführung in die Korrosion (2017).
- [19] Prüfanweisung-Druckgaskesselwagen für den Transport von UN 1005 Ammoniak Sondervorschrift. TT 8 RID (Oktober 2013).

SCHWEISSEN SIE, wir schützen Ihre Gesundheit.

Ihre Herausforderung: Sie fertigen hochwertige Metallprodukte und möchten dabei die Gesundheit Ihrer Schweißer bewahren.

Effizient, ergonomisch und sicher

Bis zu
98%

des Schweißbrauchs
werden mit unseren
Absauglösungen erfasst

Unsere innovativen
Absauglösungen erfassen
schädliche Schweißrauche
direkt an der Entstehungsstelle
und passen sich flexibel Ihren
Produktionsanforderungen an.



+33 (0)228 0828-29



contact@engmar.fr



<https://www.engmar.eu/de/>



ABSAUGGERÄT ATMOFLOW



Flexibler Rundumschutz bei jeder Schweißaufgabe.

+ PRODUKTVORTEILE

- **Absaugung und Filtrierung von bis zu 99,999%** der Schweißrauchpartikel ab 0,3µm und größer
- **Entleerung der Partikel** mit Hilfe eines intuitiven Benutzerprogrammes
- **Kein direkter Kontakt** mit den Schweißrauchpartikeln - weder beim Schweißen, noch bei Servicearbeiten

Allgemeine Funktionen

- **Startfunktion:** automatischer Start/ Stopp
- **Konstante Absaugung:** stabile Leistung dank automatischer Filterreinigung
- **Optimierter Energieverbrauch**

- Ausziehbarer Griff
- **Mobilität und Flexibilität**



- Benutzeroberfläche
- **Intuitiv und ergonomisch**
 - **Meldungen und Warnungen** werden durch **optische und akustische Signale** sowie auf dem Display angezeigt
 - Das **Gerät unterstützt** Sie in der täglichen Anwendung



- Optimale Abscheidung
- **Bis zu zwei Filterstufen**
 - Zustandsüberwachung beider Filter
 - **Automatische Abreinigung**

- Sichere Wartung
- **Einfacher und sicherer** Zugang für die Entleerung der Partikel

- CE EUROPÄISCHE NORMEN
- EN 21904-1
 - EN 21904-4
 - EN 60974-7



Korrosionsschutz im Werk und auf der Baustelle aus der Sicht der Inspektorin

E. Epperlein, N. Gaier, Hannover und J. Vogelsang, Duisburg

Die Niederlassungen der GSI mbH sind Ausbildungsträger und Dienstleister auf dem Gebiet der Schweiß-, Prüf- und Beschichtungstechnik und als unabhängige Inspektionsstelle gemäß ISO/IEC 17020, ist die GSI mbH auch im Bereich der Fertigungs- und Bauüberwachungen geschweißter Konstruktionen und des Korrosionsschutzes tätig. Die Inspektionen umfassen die Bewertung von Fertigungs- und Beschichtungsarbeiten vor, während und nach den jeweiligen Tätigkeiten gemäß anzuwendender Anforderungs- und Bewertungsnormen. In diesem Beitrag werden an geschweißten und beschichteten Bauteilen verschiedener Bauprojekte, unterschiedlicher Anwendungsnormen die vielfältigen Aufgaben und Herausforderungen eines Inspektors der GSI mbH beschrieben und der Umgang mit Abweichungen von den Anforderungsnormen erläutert.

1. Korrosionsschutz im Stahlbau - Normen

Die Überwachung von Korrosionsschutzarbeiten findet durch die Inspektoren der Niederlassungen der GSI mbH gemäß normativen Anforderungen, ggfs. auch spezieller kundenspezifischer Vorgaben statt.

Anforderungsnormen im Bereich des Stahlbaus sind beispielsweise die DIN EN 1090, Teile 1 bis 3 „Ausführung von Stahltragwerken“ mit den dort genannten und anzuwenden weiteren Normen und Regelwerken, wie z.B. der DIN EN ISO 12944 Teile 1 bis 9 „Beschichtungsstoffe“. Im Bereich von Ingenieurbauten sind das die ZTV-ING „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“, die RI-ERH Ing und die Richtlinie RI-EBW-PRÜF „Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauten“ mit der „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 und die TL KOR-Stahlbauten „Technische Lieferbedingungen für Ingenieurbauten“ (vgl. [Abb. 1](#)). Im Bereich der Deutschen Bahn werden Inspektionen z.B. nach der DBS (DB Standard) 918 084 durchgeführt (vgl. [Abb. 2](#)). Im Bereich des Stahlwasserbaus werden Inspektionen gemäß ZTV-W „Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen“ und DIN 19704 „Stahlwasserbauten“ ausgeführt. Weitere Regelwerke, wie beispielsweise der Druckbehälter- und Rohrleitungsbau werden in diesem Vortrag nicht angesprochen.



Abb. 1: Allertalbrücke (Foto Epperlein).



Abb. 2: DB Anwendungsregelwerk (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Rawie).

2. Korrosionsschutz im Stahlbau – Inspektionstätigkeiten

2.1 Inspektionstätigkeiten vor Beginn der Beschichtungsarbeiten

Vor Beginn der Beschichtungsarbeiten wird durch den Inspektor geprüft, ob ein Anwendungsregelwerk durch den Auftraggeber vorliegt und, ob die Elemente des Regelwerkes mit den mitgeltenden Normen und ggfs. spezifischen Anforderungen des Auftraggebers in eine Korrosionsschutzspezifikation übertragen wurden (z.B. gemäß DIN EN ISO 12944-8 „Beschichtungsstoffe — Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme — Teil 8: Erarbeiten von Spezifikationen für Erstschutz und Instandsetzung“).

Der Inspektor prüft die Spezifikation auf Plausibilität, u.a. auf die korrosionsschutzgerechte Gestaltung gemäß z.B. DIN EN ISO 12944-3 „Beschichtungssysteme — Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme — Teil 3: Grundregeln zur Gestaltung“ (vgl. [Abb. 3 bis 6](#)).



Abb. 3: Freischnitte.

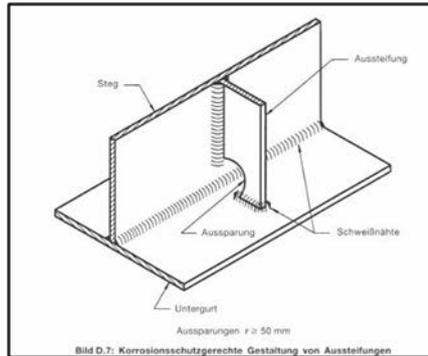


Abb. 4: Auszug aus DIN EN ISO 12944-3 (für Unterrichtszwecke).



Abb. 5: Ovale Öffnung (Mannloch) am Brückenbauteil.

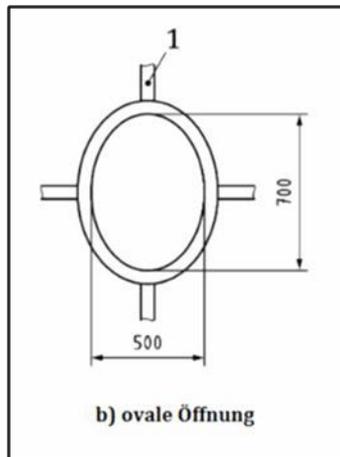


Abb. 6: Auszug aus DIN EN ISO 12944-3 (für Unterrichtszwecke).

Es folgen Prüfungen zu geforderten Hersteller-, Personal- und Prozessqualifikationen. I.d.R. erfolgt während des Startgesprächs eine Inaugenscheinnahme des Herstellerwerkes (oder der Baustelle) auf Eignung der Herstellerbedingungen (Ausstattung, Hallengrößen, Lichtverhältnisse usw.) Weiterhin werden die Prüf- und Messmittel des Herstellers mit den Kalibrierintervallen geprüft. Für die Baustelle werden zusätzlich auch Bedingungen überprüft, die das Beschichten (Vorbereitung, Beschichtung, Prüfung) unter gegebenen Wetterverhältnissen ermöglichen, wie z.B. Einhausungen, Beheizung usw.) (vgl. [Abb. 7](#)).



Abb. 7: Brücke mit Einhausung. Ansicht von innen mit Strahlschutt.

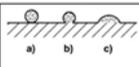
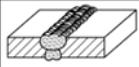
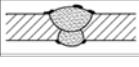


Abb. 8: Lagerung von Beschichtungsstoffen.

Auch die Lagerungen der Beschichtungsstoffe (u.a. Temperatur) sowie die Bereitstellung und deren Übereinstimmung mit der Spezifikation und der, zur Verarbeitung der Beschichtungsstoffe notwendigen Werkzeuge werden vor, aber auch während der Beschichtungsarbeiten geprüft und dokumentiert (vgl. [Abb. 8](#)).

Zu den Arbeiten, die bei Anlieferung von geschweißten Konstruktionen (Bauteilen) gehören sind die Bewertung des Vorbereitungsgrades (P1, P2, P3) gemäß DIN EN ISO 8501-3 „Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Aufbringen von Beschichtungsstoffen – Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit Teil 3: Vorbereitungsgrade von Schweißnähten, Kanten und anderen Flächen mit Unregelmäßigkeiten“ sowie die Aufnahme der vorhandenen Rostgrade gemäß DIN EN ISO 8501-1 „Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Aufbringen von Beschichtungsstoffen – Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit Teil 1: Rostgrade und Oberflächenvorbereitungsgrade von unbeschichteten Stahloberflächen und Stahloberflächen nach ganzflächigem Entfernen vorhandener Beschichtungen“ (vgl. [Abb. 9 und 10](#)). Es sind hier nur einige wesentliche Inspektionsarbeiten genannt worden. Eine Vollständigkeit kann innerhalb dieses Berichtes nicht erbracht werden. Alle aufgeführten und nicht aufgeführten Arbeiten dienen dazu, sicherzustellen, dass die technischen und normativen Anforderungen aus den Regeln der Technik eingehalten werden.

Tabelle 1 — Unregelmäßigkeiten und Vorbereitungsgrade

Art der Unregelmäßigkeit		Vorbereitungsgrade		
Beschreibung	Darstellung	P1	P2	P3
1 Schweißnähte				
1.1 Schweißspritzer		Die Oberfläche muss frei von allen losen Schweißspritzern sein (siehe a).	Die Oberfläche muss frei von allen losen und leicht anhaftenden Schweißspritzern sein (siehe a) und b). Schweißspritzer wie in c) dargestellt dürfen verbleiben.	Die Oberfläche muss frei von allen Schweißspritzern sein.
1.2 Geriffelte/profilierete Schweißnaht		keine Vorbereitung	Die Oberfläche muss bearbeitet werden (z. B. durch Schleifen), um unregelmäßige und scharfe Profilierungen zu entfernen.	Die gesamte Oberfläche muss bearbeitet werden, d. h. glatt sein.
1.3 Schweißschlacke		Die Oberfläche muss frei von Schweißschlacke sein.	Die Oberfläche muss frei von Schweißschlacke sein.	Die Oberfläche muss frei von Schweißschlacke sein.



[Abb. 9](#): Auszug aus DIN EN ISO 8501-3 (für Unterrichtszwecke).

[Abb. 10](#): Beurteilung des Rostgrades gemäß DIN EN ISO 8501-1.

2.2 Inspektionstätigkeiten während der Beschichtungsarbeiten

Die Inspektionstätigkeiten während der Beschichtungsarbeiten beginnen bereits vor dem unmittelbaren Beschichtungsauftrag sowohl im Werk als auch auf der Baustelle mit der Bewertung der gestrahlten Oberfläche unter Berücksichtigung der Oberflächenvorbereitungsgrade gemäß o.a. Normen sowie der Beurteilung des Rauheits- und Reinheitsgrades gemäß DIN EN ISO 8503-1 „Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Aufbringen von Beschichtungsstoffen – Rauheitskenngrößen von gestrahlten Stahloberflächen Teil 1: Anforderungen und Begriffe für ISO-Rauheitsvergleichsmuster zur Beurteilung gestrahlter Oberflächen“ und „DIN EN ISO 8501-2 „Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Aufbringen von Beschichtungsstoffen – Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit Teil 2: Oberflächenvorbereitungsgrade von beschichteten Oberflächen nach örtlichem Entfernen der vorhandenen Beschichtungen“ (vgl. [Abb. 11](#)). Weiterhin werden die Oberflächen auf artfremde Verunreinigungen, wie Staub, Öle, Fette untersucht (in Augenschein genommen) und nach den jeweiligen Normen bewertet (vgl. [Abb. 12 und 13](#)). Das sind u.a. DIN EN ISO 8502-3, 6 und 9 mit der SPEC 55684. Bei Inspektionsarbeiten vor und während des Beschichtens werden Klimadaten (Relative Luftfeuchtigkeit, Taupunkt, Luft- und Oberflächentemperatur) gemäß DIN EN ISO 8502-4 „Prüfungen zum Beurteilen der Oberflächenreinheit Teil 4: Anleitung zum Abschätzen der Wahrscheinlichkeit von Taubildung vor dem Beschichten“ aufgenommen.

Während der Beschichtungsarbeiten werden die Chargennummern, Verfallsdaten usw. der Beschichtungsstoffe aufgenommen, die Verarbeitung (z.B. Mischungsverhältnisse, Temperaturen, Bodensatz) kontrolliert und die Überarbeitungsintervalle werden abgeglichen.



Abb. 11: Gestrahltes Bauteil. Mit freundlicher Genehmigung der Fa. SEH Engineering GmbH.



Abb. 12: Bohrmilch auf den Bauteilen. Mit freundlicher Genehmigung der Fa. Stahlbau Peters.



Abb. 13: Salze (Schweiß) auf dem Bauteil.

Es erfolgt ein Abgleich auch mit den Aufzeichnungen des Verarbeiters. Es werden Nass- und Trockenschichtdicken aufgenommen und die Einhaltung der fachgerechten Verarbeitung (Applikationsverfahren- und bedingungen, Vorlegen von Freischnitten, Schweißnähten usw.) kontrolliert und dokumentiert (vgl. Abb. 14 bis 16). Es erfolgt jeweils ein Abgleich mit der Korrosionsschutzspezifikation und den Anforderungsnormen (z. B. DIN EN ISO 12944-5, DIN EN ISO 2808, ISO 19840).



Abb. 14: Applikation einer Beschichtung. Mit freundlicher Genehmigung der Fa. Nietiedt.



Abb. 15: Beschichtungsprotokoll. Auszug.



Abb. 16: Vorlegen der Kanten. Mit freundlicher Genehmigung der Fa. Nietiedt.

Im Anschluss und auch während der Beschichtungsarbeiten werden je nach Anwendungsregelwerk geforderte Prüfungen, die routinemäßige Prüfungen und/oder zusätzliche Prüfungen an der Beschichtung sein können durchgeführt. Diese Untersuchungen können als zerstörungsfreie (z. B. Sichtprüfung auf

Läufer, Runzeln, Blasen, Risse ..., Schichtdickenprüfung, Bresle-Verfahren) oder zerstörende Prüfungen (z.B. Haftabzugsversuch gemäß DIN EN ISO 4624 und DIN EN ISO 16276-1, Gitter- und Kreuzschnittprüfung gemäß DIN EN ISO 16276-2 und DIN EN ISO 2409) ausgeführt werden (vgl. [Abb. 17 und 18](#)). Zerstörende Prüfungen sind immer mit dem Auftraggeber abzusprechen oder sind bereits bei der Bestellung vereinbart.



Abb. 17: Haftabzugsversuch.



Abb. 18: Bresle-Verfahren.



Abb. 19: Hochmoselbrücke bei Ürzig. Projekt der Niederlassungen Saarbrücken und Hannover.

Zu jeder Überwachung werden Tagesberichte erstellt. Nach Abschluss aller Inspektionen wird ein zusammenfassender Inspektionsbericht für den Auftraggeber erstellt.

3. Schrifttum

- [1] Zitierte Normen.
- [2] GSI-IS-FÜ AA 003 und 004 (Arbeitsanweisungen der GSI mbH für Inspektionstätigkeiten)

IHR PARTNER IM INDUSTRIE- UND SCHWEISSFACHHANDEL



Betker & König

GmbH

INDUSTRIE- UND SCHWEISSFACHHANDEL

MEHR ALS SCHWEISSTECHNIK

KOMPETENZ IN 2. GENERATION

FAMILIENGEFÜHRT

Was einst mit der Leidenschaft für Schweißtechnik begann, ist heute viel mehr:

Die Betker & König GmbH steht als moderner Industrie- und Schweißfachhandel für Qualität, Innovation und umfassende Lösungen.

Mit über 25 engagierten Mitarbeitern bieten wir Ihnen nicht nur erstklassige Schweißtechnik, sondern auch ein breites Portfolio an Arbeitsschutz, Werkzeugen und professionellem Service – alles aus einer Hand.

Unsere starken Marken und unser tiefes Know-how sichern Ihnen Produkte und Lösungen, die Ihren Arbeitsalltag effizienter, sicherer und erfolgreicher machen.

Wenn es um Sicherheit und Effizienz geht, sind wir Ihr starker Partner – mit Top-Werkzeugen und professionellem Know-how im Arbeitsschutz.

Sprechen Sie uns an,
wir freuen uns auf Ihre Herausforderungen!

 bk@betkerundkoenig.de

 (03 91) 66 27 46 0



SCHWEISSTECHNIK | ARBEITSSCHUTZ | WERKZEUGE | SERVICE

Betker & König GmbH
Schweißtechnik-Fachhandel
Silberbergweg 11
39128 Magdeburg

Telefon: (03 91) 66 27 46 0
Telefax: (03 91) 66 27 46 10
E-Mail: bk@betkerundkoenig.de
Internet: www.betkerundkoenig.de

RAUCHGAS-ABSAUGTECHNIK FÜR DEN PROFESSIONELLEN INDUSTRIEEINSATZ VON ABICOR BINZEL.

DER PASSENDE ABSAUGBRENNER FÜR JEDE ANWENDUNG.

WIG-Rauchgas-Absaugbrenner xFUME® TIG

gas- und flüssiggekühlt

	xFUME® TIG 150	xFUME® TIG 260 W	xFUME® TIG 300 W
Kühlart:	gasgekühlt	flüssiggekühlt	flüssiggekühlt
Belastung:	150 A DC 105 A AC	260 A DC 185 A AC	300 A DC 210 A AC
Einschaltdauer:	35 %	100 %	100 %
Wolframelektroden:	Ø 1,0–2,4 mm	Ø 1,0–3,2 mm	Ø 1,0–3,2 mm

MIG/MAG-Rauchgas-Absaugbrenner xFUME® PRO

gas- und flüssiggekühlt

	xFUME® PRO 24	xFUME® PRO 36	xFUME® PRO 501
Kühlart:	gasgekühlt	gasgekühlt	flüssiggekühlt
Belastung:	270 A CO ₂ 250 A Mischgas M21*	330 A CO ₂ 300 A Mischgas M21*	500 A CO ₂ 450 A Mischgas M21*
Einschaltdauer:	60 %	60 %	100 %
Draht-Ø:	0,8–1,2 mm	0,8–1,2 mm	1,0–1,6 mm

* (DIN EN ISO 14175)

Automaten-Rauchgas-Absaugbrenner xFUME® AUT

gas- und flüssiggekühlt

	xFUME® AUT 36	xFUME® AUT 501
Kühlart:	gasgekühlt	flüssiggekühlt
Belastung:	330 A CO ₂ 300 A M21	500 A CO ₂ 450 A M21
Einschaltdauer:	60 %	100 %
Draht-Ø:	0,8–1,2 mm	1,0–1,6 mm

xFUME® ROBO Absaugkit

Die ideale Ergänzung zur Schweißzellenabsaugung ist dieser Aufsatz zur Punktabsaugung. Mit wenigen Handgriffen auf dem MIG/MAG-Industrieroboter montiert nimmt er Schweißrauch direkt an der Entstehungsstelle auf.

xFUME® ADVANCED

Die mobile Rauchgasabsaugung für bis zu zwei nebeneinander liegende manuelle Arbeitsplätze. Optimal für die punktuelle Rauchgasabsaugung nach Vorschrift.

xFUME® PRIME

Hocheffizientes Rauchgas-Absauggerät für mehr Gesundheitsschutz beim Handschweißen und automatisierten Schweißen. Bis zu vier Absaugbrenner anschließbar.

xFUME® FLEX

Hervorragend geeignet für den mobilen Einsatz an wechselnden manuellen Arbeitsplätzen. Dieser mobile Alleskönner lässt sich einfach an die Steckdose anschließen.



Vereinbaren Sie einen kostenfreien Vorführtermin und überzeugen Sie sich selbst von der einfachen Handhabung.

Bewertung von Schäden an Stahlbrücken und deren Instandsetzungen

B. Senk und F. Schluffer, Nordhausen

1. Einleitung

Das Aufrechterhalten der Mobilität auf unseren Straßen ist Voraussetzung für unsere vielschichtige und verzweigte Wirtschaft. Bundesautobahnen und deren Brücken spielen dabei eine besondere Rolle. Neben den wirtschaftlichen Auswirkungen spüren alle Verkehrsteilnehmer auch täglich einen Einfluss auf die Lebensqualität, auf das Arbeitsleben und die Freizeit. Schäden an Überquerungsbauwerken, wie Brücken über Bahngleise oder Wasserstraßen können gravierende Folgekosten und schwer vorhersehbare Verkehrseinschränkungen auf Straßen, Schienen oder Wasserwegen verursachen.

Verkehrsprognosen des Bundes [1] sagen bis 2030 dabei einen weiteren Zuwachs um ca. 38 % der Güterverkehrsmengen in und durch Deutschland voraus. Damit verschärft sich die Dringlichkeit zur Beseitigung von Brückenschäden, um Deutschlands Mobilität und Infrastruktur aufrecht zu erhalten. Die Wahrung der Sicherheit und Funktionstüchtigkeit von geschädigten Bauwerken verlangt daher von allen Beteiligten, sowohl Auftraggebern, Planungsbüros als auch den ausführenden Unternehmen ein hohes Maß an Fachwissen, Flexibilität und Verantwortung.

2. Entwicklung der Beanspruchungsseite

Die Straßenbrücken Deutschlands wurden für die Verkehrsregellasten entsprechend der Normensituation ihres jeweiligen Baujahres entworfen und bemessen. Das anzusetzende Bemessungsfahrzeug für die Tragfähigkeit einzelner Bauteile war dabei ein 60 t LKW.

Das tatsächlich zulässige LKW-Fahrzeuggewicht betrug damals 32,5 t, also 54,2 % des Bemessungslastmodells. Insofern konnte auch ein allgemeiner rechnerischer Ermüdungsnachweis geführt werden, der besagt, dass die Ermüdungssicherheit für Straßenbrücken ausreichend gegeben ist und damit für die einzelne Brücke und deren Details kein weiterer Ermüdungsnachweis geführt werden musste. Erst mit Einführung der DIN-Fachberichte/Eurocodes im Jahr 2003 wurde ein durchgängiger Ermüdungsnachweis für alle Bauteile zur Pflicht. Für Hauptbauteile (Hauptträger, Seile, etc.) muss die Ermüdungssicherheit rechnerisch nachgewiesen werden, bei lokalen Bauteilen der orthotropen Fahrbahnplatte werden Konstruktionsregeln vorgegeben, die eine ausreichende Ermüdungssicherheit gewährleisten. Nur bei Abweichung von diesen Konstruktionsregeln sind rechnerische Ermüdungsnachweise zu führen.

Heute beträgt das zulässige Fahrzeuggewicht 40 t (im kombinierten Straßen- mit Bahn- oder Schiffsverkehr 44 t), also 66 bis 73 % des Bemessungsfahrzeuges. Hierdurch wird die Tragsicherheit nicht eingeschränkt, wohl aber die Ermüdungssicherheit für die einzelnen Detailvorgaben deutlich reduziert.

Weiterhin sind die Sondertransporte mit überschweren Lasten (möglich sind inzwischen Transporte von 800 bis 900 t) deutlich angestiegen und auch wir Stahlbrückenbauer transportieren inzwischen ganze Brücken mit Gewichten von über 120 t auf den Straßen, siehe [Abb. 1](#).



Abb. 1: Genehmigter Sondertransport einer im SCHACHTBAU Nordhausen gefertigten Eisenbahnbrücke.

Die Ingenieure und Konstrukteure von damals hätten hellseherische Fähigkeiten haben müssen, um diese Entwicklung zu erkennen und dauerhaft zu planen. Die heutigen Brücken sind damit hochfrequent belastete Bauwerke und nicht mehr die weitgehend statisch ruhend beanspruchten Bauwerke, die sie vor 1980 waren. Die Konsequenz aus der Verkehrsentwicklung war, dass die zur Verfügung stehenden Verkehrsflächen einschließlich des Standstreifens in der Gesamtheit genutzt wurden. Bereits in den 70er Jahren wurde die Rheinbrücke Leverkusen dreispurig pro Fahrtrichtung genutzt und die Rheinbrücke Neuenkamp fast direkt mit der Eröffnung und viele weitere nach 1970 geplanten Bauwerke sogar planmäßig 3-spurig je Fahrtrichtung betrieben.

Inwieweit mit den heutigen Lastmodellen die Entwicklung in 50 bis 100 Jahren richtig abgebildet wird, bleibt offen.

3. Bewertung der Konstruktion

Abb.2 zeigt die alte Rheinbrücke Leverkusen mit der Nutzung von drei Spuren pro Fahrtrichtung, in Abb.3 in Blau eingetragene, die aus heutiger Sicht neuralgischen Punkte, an denen inzwischen mehr oder weniger viele Schäden festgestellt wurden.

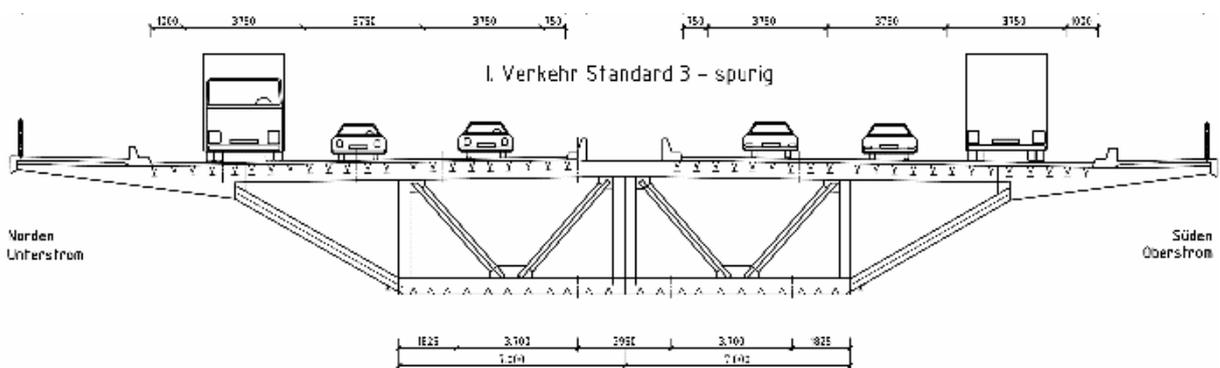
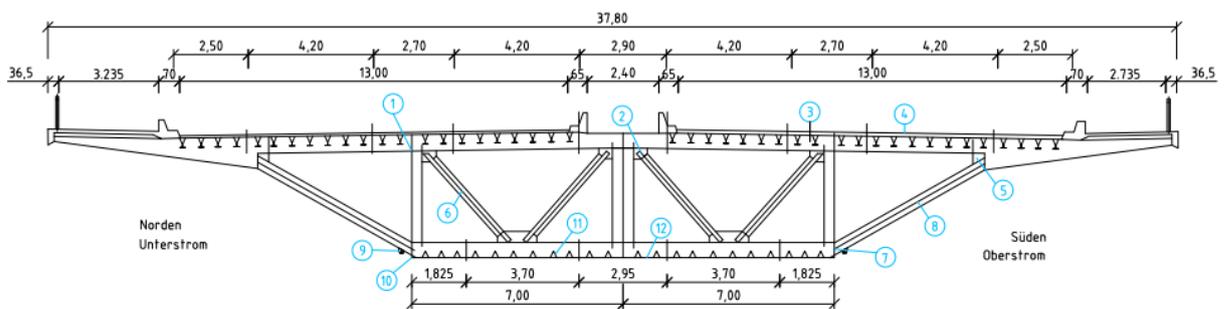


Abb. 2: Nutzung der gesamten Fahrbahnbreite bei der Rheinbrücke Leverkusen im Querschnitt.



- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1: Anschluss Querträger – Hauptträger | 7: Unterer Schrägstrebenanschluss |
| 2: Anschluss Querfachwerk innen | 8: Schrägstrebe |
| 3: Anschluss Deckblech – Längsrippen | 9: Aufhängung Besichtigungswagen |
| 4: Deckblech | 10: Krafteinleitung Schrägstrebe |
| 5: Oberer Schrägstrebenanschluss | 11: Bodenlängsrippenprofil |
| 6: Querfachwerk | 12: Bodenblech |

Abb. 3: Schadensbehaftete Details nach Nutzung der gesamten Fahrbahnbreite.

Die neuen zusätzlichen Verkehrslasten auf den ausragenden Fahrbahnbereichen, siehe Abb.2 in Kombination mit dem gesteigerten Verkehr führten insbesondere an den im Abb. 3 genannten Anschluss Bereichen zu massiven und teilweise auch durchgängigen Schäden und Rissen. In den statischen Berechnungen finden sich Anmerkungen, dass der eigentliche Standstreifen nur für das Liegenbleiben eines LKWs (60 t Fahrzeug) zu bemessen war. Wegen der dadurch vorherrschenden rein statischen Beanspruchung erfolgte kein ermüdungsgerechtes Konstruieren der Kragarmbereiche.

Neben den neuralgischen Punkten am Haupttragsystem und Quersystem der Brücke, treten immer wieder auch an anderen Stellen Schäden auf. Beispielsweise wurden Schäden in den Seileinleitungspunkten und den Schublechen der Seilkammern festgestellt, welche immer wieder aufgrund von schlechter Zugänglichkeit eine große Herausforderung in der Instandsetzung darstellen (vgl. [Abb.4](#)).



Abb. 4: Seilkammer mit Schubeinleitungsebenen

Weiterhin findet man einen immer wiederkehrenden Rissansatz in älteren und auch neueren Konstruktionen im Bereich von vorhandenen Freischnitten siehe [Abb. 5](#) und [Abb. 6](#). Es lässt sich an nahezu allen Bauwerken feststellen, dass die Umschweißungen an den Freischnitten Ausgangspunkt für eine Rissinitiierung sind. Dies begründet sich vorwiegend in der schlechten Zugänglichkeit der Umschweißung und den damit einhergehenden Unregelmäßigkeiten in den bestehenden Umschweißungen. Die Anwendung von Freischnitten zur Vermeidung von Schweißnahtanhäufungen in den Eckbereichen sollte hinsichtlich der heutigen Fertigungsmethoden und fortschreitenden technischen Entwicklung überdacht werden, um diese ermüdungstechnische Schwachstelle nicht auch in neue Konstruktionen einzubringen. Um diese systematische Bauwerksschädigungen ausgehend von den Freischnitten in Zukunft vermeiden zu können finden zurzeit Untersuchungen hinsichtlich eines verbesserten Kerbdetails für den Eckbereich im Quersystem von Brückenbauwerken statt.



Abb. 5: Rissausgangspunkt am Freischnitt einer älteren Brücke.



Abb. 6: Rissausgangspunkt am Freischnitt einer neuen Brücke.

5. Instandsetzung von Schäden an kritischen Detailpunkten

Bei der Instandsetzung von Schadensbehafteten Details in bestehenden Brückenbauwerken können aufgrund von verschiedenen Ursachen immer wieder ähnliche Schadensbilder auftreten. Ursachen für diese systematisch scheinenden Schäden sind zumeist Fertigungsungenauigkeiten in Form von Toleranzen oder Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Aber auch Materialfehler der damals verwendeten Grundmaterialien oder grundsätzlich nicht ausreichend ermüdungsgerecht gewählte Konstruktionsdetails können Schadensursachen sein.

Wie bereits beschrieben, kann bei älteren Stahlkonstruktionen davon ausgegangen werden, dass bei fast allen kreuzenden Bauteilen, die damals verwendeten Blechwerkstoffe nicht für eine Beanspruchung in Dickenrichtung geeignet sind und nur geringe, bis keine Dickenbeanspruchung aufgenommen werden kann. Dadurch sind diese Werkstoffe für Terrassenbrüche anfällig.

Diese Erkenntnis führte bei einer Brücke dazu, dass die ermüdungsgerechte Umgestaltung der Verbindungsstelle zwischen Querträger und Hauptträger durch einen kompletten Blechaustausch in diesem Bereich notwendig wurde. Das Blech aus ST52 wurde hier durch ein „modernes“ Blech mit ausreichender Z-Güte ausgetauscht. Dadurch konnte die als schadhaft identifizierte Verbindung zwischen dem Querträger und dem Hauptträger wieder qualitätsgerecht ausgeführt werden, ohne das Risiko von Terrassenbrüchen im Hauptträger einzugehen. Die nachfolgende Bildfolge zeigt dabei den Arbeitsablauf und das Ergebnis der Instandsetzung.



Schadensstelle



Herausgetrennter Blechknoten



Freischnitt im Hauptträgersteg



Neues Blech im Hauptträgersteg



Erneuerter Blechknoten



Fertig instandgesetzter Bereich

Abb. 8: Austausch eines Blechknotens zur Verbesserung der Dickeneigenschaften.

An anderer Stelle wurde der Querträgeruntergurt durch den Hauptträgersteg durchgeführt. Diese Konstruktionsform umgeht das Problem der fehlenden Z-Güte der älteren Bleche, indem die Belastung des Querträgeruntergurtes nicht in Dickenrichtung in den Hauptträgersteg eingeleitet wird. Diese Schäden können sehr gut durch eine Verstärkungsmaßnahme mit einer Schraub- Schweißkonstruktion instandgesetzt werden. Hierbei wird eine Überlapplasche an den Untergurt angeschraubt, um so den geschädigten Bereich des Untergurtes zu unterstützen, und die Tragfähigkeit des Quersystems wiederherzustellen.



Querträger durchgeführt und verstärkt



geschraubte Überlapplasche

Abb. 9: Querträgerverstärkung durch Schraubkonstruktion.

Aufgrund der Wichtigkeit der Brücken innerhalb Deutschlands Infrastruktur, entsteht bei einer eventuellen Sperrung aufgrund von Instandsetzungsarbeiten ein enormer volkswirtschaftlicher Schaden. Häufig ist es nicht im Interesse der Auftraggeber eine Brücke zu sperren, gelegentlich können teilweise Sperrungen einzelner Fahrbahnen oder eine Umverlagerung des Verkehrs stattfinden. Allerdings können auch unter fließendem Verkehr Instandsetzungsarbeiten, bei Berücksichtigung besonderer Randbedingungen, stattfinden. Besonders bei Schweißarbeiten unter fließendem Verkehr gibt es verschiedene Bedingungen zu beachten und es wird von allen Beteiligten ein noch größeres Maß an Fachwissen und Flexibilität verlangt als ohnehin schon. Im Speziellen ist das Maß der Rissöffnung an dem zu sanierenden Riss entscheidend für das Gelingen der Schweißverbindung. Um trotz Rissuferbewegung eine rissfreie Schweißnaht herzustellen, ist weiterhin auf eine besonders abgestimmte Schweißfolge zu achten. Das Detaillierte vorgehen hierzu wird in Zukunft auf Basis eines DVS-Merkblattes zusammengefasst.

Zur Bestimmung der Rissuferbewegungen bietet es sich an mit Messsystemen zu arbeiten, um die tatsächlichen Bewegungen detektieren zu können. Hierfür eignen sich besonders spezielle Wegaufnehmer. Auch in anderen Zusammenhängen kann es massive Vorteile bieten ein bestehendes Brückenbauwerk mit Messtechnik auszustatten, um ein Monitoring ausgewählter Querschnitte und Detailpunkte zu realisieren. Dadurch können die Beanspruchungen infolge von Referenzfahrzeugen und regulären Verkehrsströmen ermittelt werden und in Zusammenhang mit werkstofftechnischen Untersuchungen und einer Beurteilung der vorhandenen Schadenslage am Bauwerk Aussagen zur möglichen Restlebensdauer getroffen werden.

Allem voran sollten jedoch an jeder Stahlbrücke eine Begutachtung der Bausubstanz und die Identifizierung möglicher Schäden gehen. Diese kann in Form von visuellen Kontrollen oder mit weitergehenden zerstörungsfreien Werkstoffprüfungen erfolgen. Zur Prüfung der als schadhaft vermuteten Schweißnähte und Bleche am Bauwerk mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren können verschiedenste Verfahrensvariationen angewendet werden. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass es im Wesentlichen die Magnet-Pulver-Prüfung, die allgemeine Ultraschall Prüfung und die weiterführende Phased-Array-Prüfung sind, die gute und belastbare Ergebnisse erbringen.

Weiterhin ist zur zerstörungsfreien Prüfung der Brückendetails eine entschichtete Oberfläche notwendig. Die Bauwerke sollten daher zumindest in den kritischen Bereichen oder gegebenenfalls, je nach Umfang der geplanten Prüfungen, auch komplett entschichtet werden. Hierbei kann es vorkommen, dass weitere Schäden entdeckt werden, welche bisher von der Beschichtung verdeckt wurden.

Diese Schäden sind meist bereits seit Fertigung der Brücke im Bauwerk vorhanden, können allerdings auch während der Betriebszeit der Brücke initiiert worden sein und sind durch die gute Spaltüberbrückbarkeit und Dehnfähigkeit der Beschichtung bisher nicht sichtbar gewesen.

Durch die zahlreichen Schadensentwicklungen an diversen Brückenbauwerken imitiert setzt eine weitere Entwicklung ein, das Verdichten der Bauwerksprüfung. Die DIN 1076 [4] fordert alle 6 Jahre eine umfassende und handnahe Bauwerkshauptprüfung aller Bauteile, dazwischen wird nach drei Jahren eine Einfachprüfung durchgeführt, bei der die vitalen Bauteile oder die besonders auffälligen Bauteile geprüft werden. Um eine ausreichende Sicherheit für den Betrieb von Brücken mit bekannten Schadensbild sicherstellen zu können, sollte das Prüfintervall von 6 Jahren auf Zeiträume von 3-6 Monaten reduziert werden. Extrem kritische Bauteile, wie z. B. die Seilverankerungen können auch monatlich und bei Bedarf bzw. bei vorhandenen Schäden öfter geprüft werden. Je nach vorherrschender Situation und Risiko bei Schadensentstehung und Rissfortschritt einzelner Bauteil muss vor Ort mit dem Bauüberwacher und Auftraggeber ein Prüfintervall festgelegt werden.

6. DVS-Merkblatt 1709

Der DVS arbeitet stetig daran das Wissen aus Forschung und Baupraxis zusammenzuführen und gibt mit Hilfe der DVS-Merkblätter zu zahlreichen Themen Anregungen und Hilfestellungen für den Umgang mit gängigen Fragestellungen der Schweißtechnik oder verwandten Verfahren. Die „Arbeitsgruppe A 5“ hat sich hierbei auf das Thema „Schweißen im Bauwesen“ spezialisiert und veröffentlicht durch die Zusammenarbeit einer Gruppe erfahrener Fachleute und Wissenschaftler in ehrenamtlicher Gemeinschaftsarbeit Empfehlungen zu Schweißtechniken für die praktische Anwendung in Planung und Ausführung. Eine dieser Empfehlungen wurde als DVS-Merkblatt 1709 [5] veröffentlicht. Dieses befasst sich mit dem Thema der „Instandsetzung und Verstärkung von geschweißten Stahlbrücken“. Es werden die Grundsätze für die Durchführung von schweißtechnischen Maßnahmen zur Instandsetzung und Ertüchtigung bestehender Stahlbrücken, insbesondere mit orthotroper Fahrbahnplatte, beschrieben.

Ein weiteres Merkblatt zum Thema Schweißen unter Betriebsbeanspruchungen ist momentan in Arbeit und wird in naher Zukunft auch für die baupraktische Anwendung zur Verfügung stehen. Das Merkblatt wird Empfehlungen für den Umgang mit Schweißarbeiten an Stahlbrücken unter fließendem Verkehr beinhalten und einen Leitfaden inklusive Arbeitsschritte für das Schweißen unter Verkehr liefern. Weiterhin sollen alle zu beachtenden Besonderheiten, sowie die Grenzen und Rahmenbedingungen der Vorgehensweise betrachtet werden.

Mit der Veröffentlichung dieser Merkblätter versucht die Arbeitsgruppe einen Leitfaden zu schaffen, um das spezialisierte Wissen der Fachunternehmen, welches aus speziellen Projekten gewonnen wurden, für alle Anwender greifbar zu machen. Hierfür wird das praktische Vorgehen durch Forschungsprojekte geprüft und untermauert. Die Anwendung dieser Merkblätter kann volkswirtschaftliche Schäden und Kosten in Zusammenhang mit Sperrungen oder verspäteten Notinstandsetzungen abmildern, indem ein funktionierender und sinnvoller Weg zur Findung einer Problemlösung aufgezeigt wird. Natürlich wird auch weiterhin von allen Beteiligten ein hohes Maß an Sachkunde gefordert und die Arbeiten müssen im Einklang mit den maßgeblichen Regelwerken erfolgen.

7. Ausblick

Die Hauptbautätigkeit unserer Stahlbrücken erfolgte in den Jahren zwischen 1960 bis 1985 in der Brückenklasse 60 nach DIN 1072. [6] Es muss geklärt werden, inwieweit diese Bauwerke bei der weiteren Zunahme des erwarteten Schwerlastverkehrs noch zukunftsfähig sind. Diese sehr komplexe Aufgabe erfordert von allen Beteiligten ein hohes Fachwissen und ein gründliches Befassen mit der vorhandenen Konstruktion im Detail. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) hat hierzu eine Nachrechnungsrichtlinie erarbeitet. In Konsequenz bedeutet dies, dass die zuständigen Ämter und Bundesbehörden Entscheidungen treffen werden, ob Sperrungen, Verkehrsbeschränkungen, Sofortinstandsetzungen, Verstärkungen oder in naher Zukunft ein Ersatzneubau erforderlich sind. Je nach dem Schädigungsgrad können für die bestehenden, geschädigten Brückenbauwerke verkürzte Prüfintervalle erforderlich werden, um mögliche neue Schäden sowie den Schadensfortschritt bestehender Details erfassen zu können, und rechtzeitig die besten Maßnahmen zur Beseitigung der Schäden in die Wege zu leiten.

8. Quellen

- [1] Bundesverkehrswegeplan 2030, www.bvwp2030.de.
- [2] DIN 17100:1980-01 – „Allgemeine Baustähle; Gütenorm“.
- [3] DAST-Richtlinie 014 – „Empfehlungen zum Vermeiden von Terrassenbrüchen in geschweißten Konstruktionen aus Baustahl.“, Deutscher Ausschuß für Stahlbau DAST, Stahlbau Verlags- und Service GmbH.
- [4] DIN 1076:1999-11 – „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung“.
- [5] Merkblatt DVS 1709 (11/2022) – „Instandsetzung und Verstärkung von geschweißten Stahlbrücken“, Ausschuss für Technik im DVS, Arbeitsgruppe A 5 „Schweißen im Bauwesen“.
- [6] DIN 1072:1985-12 – „Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen“.

Your future - our MISSION



VacuFil Compact

Platzsparende Hochvakuum- absaugung ohne Kompromisse

Das Hochvakuum Absauggerät VacuFil Compact ist für große Schweißrauch- und -Staubmengen ausgelegt. Es verfügt über ein großes, abreinigbares Filter und eine komfortable Einknopf-Bedienung, auch mit Handschuhen. Viele Zusatzausstattungen wie die automatische Luftvolumenstromregelung stehen zur Auswahl. Der Seitenkanalverdichter zur Unterdruckerzeugung sorgt für robuste Leistungsfähigkeit für industrielle Anwender.

Deutscher Pionier und Technologieführer mit über 40 Jahren Erfahrung

KEMPER ist der Technologieführer für Absaugtechnik und Arbeitsschutz in der Metallbe- und verarbeitung. Aus dem einzigartigen Fokus auf die Anforderungen beim Schweißen und Schneiden entsteht seit 1977 innovative Anlagentechnik für die Praxis.

Verlassen Sie sich drauf: Mit KEMPER setzen Sie auf den Richtigen. Sie erlangen Rechtssicherheit und nachhaltige Leistungssicherheit durch saubere Luft am Arbeitsplatz.

Sortiment im Überblick:



Absaugsysteme mobil



Absaugsysteme stationär



Absaugarme und Ventilatoren



Hochvakuumabsaugung



Raumlüftungssysteme



Absaugsysteme zentral



Absaug- und Schneidische



Arbeitsschutz und Trennwände

1. Einleitung

Industrieroboter gehören zu den modernsten Werkzeugmaschinen, die der Menschheit zur Verfügung stehen. Inzwischen stellt deren Einsatz in der Wirtschaft eine Grundsäule unserer heutigen Produktionseffizienz und unseres Wohlstands dar. Doch die Anforderungen an die Wirtschaft entwickeln sich weiter. Die Abkehr von der Massenproduktion, hin zu kleinen, bedarfsgerechten Losgrößen oder gar individuellen Produkten. Die effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen, sowohl im Material- als auch im Energieverbrauch. Die Sicherung der Qualität von anspruchsvollen Produktionsprozessen bei gleichzeitigem Fachkräftemangel.

Als Konsequenz hieraus nimmt der Anteil an Industrierobotern in der Produktion stetig zu und wird und muss auch weiterhin zunehmen. Aufgrund ihrer flexiblen Bewegungsmöglichkeiten, der Anpassbarkeit ihrer Aufgaben und Werkzeuge können Industrieroboter in verschiedensten Anwendungen eingesetzt werden. Insbesondere in solchen, die komplexe, repetitive und präzise Bewegungsabläufe erfordern. Die Vielseitigkeit dieser universellen Werkzeugmaschinen kann allerdings nur genutzt werden, wenn deren Programmierung häufig an neue Arbeitsaufgaben angepasst wird.

Aktuell kann jedoch festgestellt werden, dass die Kosten für deren Initial-, Neu- und Anpassungsprogrammierung einen Großteil der Gesamtkosten dieser Systeme ausmachen. Über die Lebenszeit einer Industrieroboteranlage entfallen im Durchschnitt 75 % der Kosten auf Programmieraktivitäten. D.h. für eine Industrieroboteranlage im Wert von 250.000 € entstehen weitere 750.000 € Kosten durch deren flexible Verwendung. Dies liegt daran, dass es keine Möglichkeit gibt Industrieroboter schnell und kostengünstig auf neue Aufgabenstellungen anzupassen. Programmieraktivitäten für Industrieroboter sind, Stand heute, eine manuelle Tätigkeit, unabhängig davon, ob direkt an der Roboteranlage oder computergestützt. Die steigenden Lohnkosten und die wachsende Komplexität der Anwendungsszenarien treiben die Programmierkosten für Roboteranwendungen überproportional in die Höhe. In der Folge ist die dringend benötigte Automation mit Industrierobotern für viele Unternehmen unwirtschaftlich.

Seit 2020 entwickelt das Team von byte robotics (vormals bekannt unter EXIST AuRora) an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg eine Softwaretechnologie, die es ermöglicht, die notwendigen Zeitaufwände zur Roboterprogrammierung um bis zu 75 % zu reduzieren. In Einzelfällen, kann die menschliche Programmierung sogar komplett entfallen. Die neue Technologie basiert auf der Automatisierung der manuellen Programmierprozesse in sogenannten Offline-Programmierungsumgebungen, mit denen aktuell Industrieroboter computergestützt, manuell programmiert werden. Innerhalb dieser Softwareumgebungen sind alle Daten vorhanden, die eine automatische Programmierung ermöglichen. Hierfür werden selbst entwickelte, autonome Pfadplanungsalgorithmen verwendet, welche dem weitläufigen Feld der Künstlichen Intelligenzen zugeordnet werden können.

2. Stand der Technik

Der Einsatz von Industrierobotern in der Schweißtechnik ist seit mehreren Jahrzehnten ein fester Bestandteil automatisierter Fertigungsprozesse. Während Roboterschweißsysteme ursprünglich primär in der Großserienfertigung mit hohen Stückzahlen Anwendung fanden, ermöglichen technologische Fortschritte mittlerweile den wirtschaftlichen Einsatz auch in der Kleinserien- und Einzelteilfertigung. Die Motivation zur Automatisierung im Bereich des Schweißens ist vielfältig: Neben dem zunehmenden Mangel an qualifiziertem Schweißfachpersonal spielen insbesondere Entwicklungen im Bereich der robotergestützten Programmierung und Simulation eine zentrale Rolle, da sie den Aufwand für die Inbetriebnahme und Anpassung von Schweißprogrammen signifikant reduzieren.

Grundsätzlich lassen sich zwei Hauptansätze zur Programmierung von Industrierobotern unterscheiden:

1. Online-Programmierung: Bei diesem Verfahren werden die Bewegungsabläufe direkt am physischen Roboter mithilfe eines Bediengeräts (z. B. Handbediengerät oder Tablet) definiert, verifiziert und bei Bedarf angepasst. Dieser manuelle Prozess wird häufig als „Teachen“ bezeichnet.

2. Offline-Programmierung: Hierbei erfolgt die Programmierung unabhängig vom realen Roboter in einer virtuellen Umgebung mithilfe spezialisierter Simulationssoftware (Robotersimulationssysteme bzw. Robot Controller Simulation – RCS). Die Trajektorien (= Bewegungsabläufe) und Prozessparameter werden innerhalb dieser Softwareumgebung modelliert, getestet und optimiert, bevor sie auf das reale System übertragen werden.

Trotz moderner Programmiersysteme bleibt das Anlegen der Zwischenbewegungen, also der Bewegungsplanung des Roboterarms vom Ende einer Schweißnaht zum Anfang der nächsten, häufig eine manuelle Aufgabe. Dieser Schritt erweist sich insbesondere bei komplexen Schweißaufgaben als zeitintensiv, sowohl bei der Online- als auch bei der Offline-Programmierung. Ein zentrales Problem bei der Planung von Schweißpfaden und Zwischenbewegungen ist die sogenannte optimale Aufgabensequenzierung (task sequencing optimization) aus der Robotik. Dabei stellt sich die grundlegende Frage, in welcher Reihenfolge und auf welche Weise die einzelnen Schweißaufgaben an einem Bauteil effizient und unter Einhaltung aller Rahmenbedingungen durchgeführt werden können. Zu den relevanten Teilaspekten zählen unter anderem [1]:

- o Ermittlung einer zeitlich optimalen Bearbeitungsreihenfolge
- o Kollisionsfreie Pfadplanung unter Berücksichtigung von Störkonturen
- o Einhaltung prozessspezifischer Randbedingungen, wie z. B. geeigneter Brennerneigung oder verzugsarmer Schweißreihenfolgen
- o Vermeidung von Achs-Singularitäten
- o Auswahl geeigneter Bewegungsvarianten bei redundanter Kinematik, d. h., wenn mehrere Achsstellungen zum gleichen Zielpunkt führen

Die Bewältigung dieser in *Abb. 1* genannten Herausforderungen erfolgt in der Praxis meist durch erfahrene Roboterprogrammierer und wird manuell in das Roboterprogramm integriert. Zwar unterstützen moderne Simulationssysteme den Anwendenden, etwa durch Hinweise auf potenzielle Kollisionen oder Singularitäten, die eigentliche Behebung solcher Probleme bleibt jedoch manuell und erfahrungsbasiert.

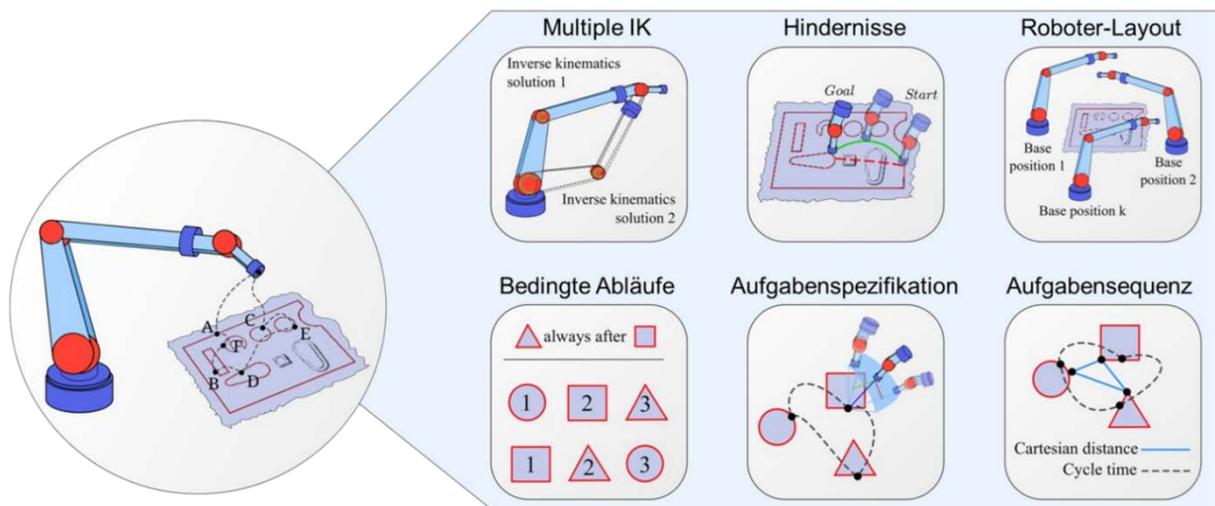


Abb. 1: Herausforderungen bei der Erstellung von Roboterprogrammen [2]

Aktuelle Offline-Programmierungsumgebungen (kurz: OLP) bieten Roboterprogrammierer:innen die Möglichkeiten Industrieroboter in einer 3D-Simulation manuell zu programmieren. Das Werbeversprechen der automatisierten Erzeugung von Roboterbewegungen beschränkt sich hier auf das Imitieren von Prozesswissen zur Erzeugung von Prozesspfaden an 3D-Werkstücken. Das kann z.B. das Anlegen einer Schweißnaht an einer Innenkante oder eine Sprühpfad für eine Oberfläche sein. Prozesswissen, das jeder Facharbeiter in einem Fertigungsbetrieb detailliert erklären kann.

Einzelne wenige OLPs bieten kollisionsfreie Pfaderzeugung zwischen zwei vorgegebenen Positionen der Roboter an, welche jedoch technologisch, als auch funktional, deutlich von einer automatischen, taktzeitoptimalen Programmerzeugung zu unterscheiden ist.

In der Anwendung der OLPs rücken weitere Limitierungen in den Blickpunkt, die sich wie folgt auflisten lassen:

- keine Sicherstellung der fehlerfreien Ausführbarkeit der Prozesspfade
- keine Garantie zur fehlerfreien Ausführbarkeit des Roboterprogramms auf der Robotersteuerung
- keine Sortierung von einzelnen Teilprozessen der zu bewältigenden Roboter Aufgabe in eine zeitoptimale Reihenfolge
- Prozess- und Anlagen-Freiheitsgrade werden nicht vollends ausgenutzt, um zeitoptimierte Pfade zu ermöglichen oder überhaupt ausführbar zu machen
- sämtliche notwendige Zwischenbewegungen zwischen den Prozesspfaden können folglich nicht zeitoptimal erzeugt werden

Kurz gesagt, ist es nicht möglich per Knopfdruck aus den Prozessbeschreibungen ein ausführbares, kollisionsfreies, taktzeitoptimales Roboterprogramm zu generieren. Die Herausforderungen zum Programmieren eines Industrieroboters müssen durch häufig noch durch das Know-How des Bedienenden vor dem Computer bewältigt werden.

Die Wahrscheinlichkeit, dabei sofort eine zeitlich oder energetisch optimale Roboterbewegung zu generieren, ist gering und stark von der Qualifikation des Bedienenden abhängig. Zudem ist der energetisch oder zeitlich effizienteste Bewegungsablauf für den Menschen häufig nicht intuitiv erkennbar.

Zwar besteht prinzipiell die Möglichkeit, Programme iterativ zu optimieren – etwa durch sukzessive Anpassung einzelner Bewegungen –, dieser Prozess erfordert jedoch erheblichen manuellen Aufwand. Jede Optimierungsiteration erfordert zudem eine vollständige Neusimulation, was bei komplexen Programmen zu erheblichen Zeitverzögerungen führen kann.

3. Industrierelevante, anwendungsnahe Grundlagenforschung

Für die algorithmische Erzeugung von Roboterprogrammen ist es grundlegend, dass Roboterverhalten schnell und präzise berechnet werden kann. Roboterhersteller besitzen (teilweise) für Ihre Robotersysteme sogenannte Robot-Controller-Simulation-Module (RCS-Module). Diese bilden das Verhalten ihrer Roboter in Software ab und werden genutzt, um die simulativen Bewegungen in Offline-Programmierungsumgebungen zu erzeugen. Diese sind weder frei verfügbar, noch standardisiert, noch dokumentiert. Weiterhin sind diese für die visuelle Darstellung von Roboterbewegungen entwickelt, nicht für die algorithmische Verwendung, und dementsprechend langsam. [3]

Die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse von byte robotics führen zu einer Technologie, welche diese Eigenschaften vollumfänglich erfüllt. Der zeitliche Rechenaufwand beläuft sich dabei durch die Entwicklung eines neuartigen cRCS Moduls (Computing Robot Control Simulation) auf wenige Minuten, wodurch es möglich wird, Roboterbewegungen schnell und präzise zu beschreiben. Das neue cRCS in der Lage ist das Bewegungsverhalten von Industrierobotern ca. 100.000-mal schneller zu berechnen als die nativen RCS-Module der Roboterhersteller. Es handelt sich hier nicht um eine triviale Berechnung der Kinematik, sondern berücksichtigt ebenfalls die Dynamik und das Verhalten der Robotersteuerung. Der Programmieraufwand wird grundlegend reduziert und die Effizienz der robotergestützten Anlage damit maßgeblich erhöht.

Für die automatische Programmierung werden in erster Linie Optimierungskriterien benötigt. Aktuell ist dies die Zyklus-Zeit der Roboter Aufgabe. Das bedeutet, dass die Roboterprogramme während der Erzeugung gegen eine möglichst geringe Abarbeitungszeit konvergieren. Die Roboterprogramme werden Zykluszeit-optimal. Andere Optimierungskriterien sind ebenfalls möglich, wie bspw. geringer Energieverbrauch oder geringer Verschleiß. Dies richtet sich generell nach dem Bedarf des Anwendenden. Beispielsweise soll ein Schweißroboter die Aufgabensequenz zum Verbindungsschweißen von Bauteilen nach einem gewissen Schweißfolgeplan bewältigen und die Zwischenbewegungen zwischen zwei Schweißungen möglichst schnell und auf kürzesten Wegen ausführen.

Bediener:innen eines OLP legen anhand seiner Erfahrung im Umgang mit der Software die Bahnplanung fest. Die individuellen Abweichungen unter verschiedenen Nutzer:innen können erheblich sein. Allgemein arbeitet der Anwendende nachfolgender Aufgabensequenz.

- (A) Festlegen der effektiven Bewegungen für Schweißnähte am Bauteil
- (B) Setzen von Start-bzw. Endpunkten für die Schweißbewegungen
- (C) Festlegen der Reihenfolge der einzelnen Schweißbewegungen
- (D) Setzen von kollisionsfreien Zwischenbewegungen (zwischen den Schweißungen)
- (E) Bestimmen des Bewegungsprofils (Geschwindigkeit, Beschleunigung und Bahnkurven).

Eine beispielhafte Ausführung ist in *Abb. 2* dargestellt. Das cRCS-Modul erleichtert dem Anwendenden die Schritte B bis E nachdem die Kanten für die Schweißbewegung am Bauteil detektiert wurden. Lässt sich die Schweißreihenfolge in der Theorie in eine mathematische Gleichung verpacken, kann diese über die Algorithmik der cRCS-Technologie ebenfalls verwertet werden.

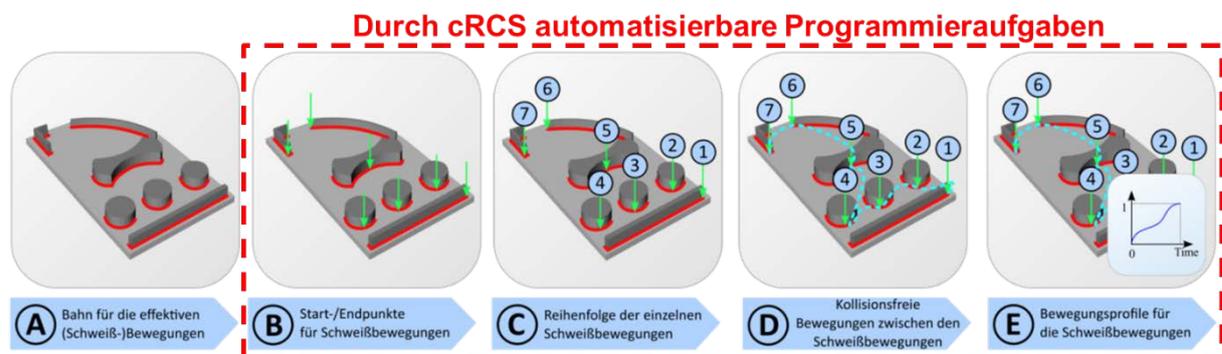


Abb. 2: Workflow bei der Programmerstellung [4]

Zusammengefasst treten durch die Verwendung der byte robotics-Technologie folgende Effekte ein.

1. Der Zeitaufwand für die Erstellung von Industrieroboterprogrammen wird drastisch reduziert.
2. Die Effizienz der Roboteranlage steigt.

Beide Effekte sind für Großkonzerne als auch für klein- und mittelständische Unternehmen relevant, um den Wert ihrer automatisierten Fertigungsanlage beziffern zu können. Im Zuge des allseits gegenwärtigen Fachkräftemangels ist es zudem absolut notwendig, dass jegliche Unternehmen den Sprung zur Automatisierung bewältigen. Die reine Beschaffung führt zudem noch nicht zu einer funktionierenden Roboteranlage. Neben der Bewältigung des Implementierungsaufwandes muss das Bedienpersonal geschult werden. Je leichter die Programmierung des Industrieroboters durch Software-Tools wie einer automatischen Bahnplanung gestaltet ist, desto schneller

Es ist an dieser Stelle wichtig festzuhalten, dass der Fokus der Programmerstellung die Bewegungsprogrammierung ist. Signalverschaltung, Anlagenlayout sowie Anlagenlogik werden und sollen von Anlagenplaner:in bzw. Roboterprogrammierer:in vorgegeben werden. Der Mensch ist das Zentrum des Anlagen-Design-Prozesses.

4. Veranschaulichung an einem Anwendungsbeispiel

Das Unternehmen byte robotics verfolgt einen Ansatz der Integration, um Funktionen basierend auf unserer Technologie verfügbar zu machen. Innerhalb bereits existierender und genutzter Offline-Programmierungsumgebungen wird diese Software-Applikation von byte robotics eingebettet.

So ist es möglich, anwendende Programmier:innen bei ihrer aktuellen Arbeit zeitnah zu unterstützen, ohne eine neue Softwareumgebung erlernen zu müssen oder die vorhandenen Workflows umzulernen. Das dies möglich ist, konnte bereits für drei unterschiedliche Programmierungsumgebungen nachgewiesen (Artimind RPS, KUKA.Sim, Visual Components).

Innerhalb dieser Programmierumgebungen wird, nach der ohnehin notwendigen Aufgabenbeschreibung für den Industrieroboter, die automatische Programmerzeugung gestartet. Innerhalb von Minuten wird ein kollisionsfreies, taktzeitoptimales Roboterprogramm generiert, welches mit den bekannten Softwarewerkzeugen der Programmierer:innen weiterverwendet werden kann.

Um einen quantitativen Vergleich zwischen verschiedenen Programmieransätzen zu ziehen, wurden für eine einfache Beispielbaugruppe aus Aluminium-Strangpressprofilen exemplarisch Roboterprogramme erstellt und die Rüstzeiten (inkl. Programmierzeit) sowie die Grundzeiten (entspricht der Ablaufzeit des Programms) ermittelt. Die Programmieransätze unterscheiden sich wie folgt:

1. Robotergestütztes Schweißen mit Online-Programmierung (teachen)
2. Robotergestütztes Schweißen mit Offline-Programmierung
3. Robotergestütztes Schweißen mit Offline-Programmierung + cRCS-Modul (byte robotics)

Zur Vermeidung von Lerneffekten wurde jeder der drei Ansätze von einem anderen Mitarbeiter durchgeführt. Die Baugruppe bestand aus stranggepressten Aluminium-Hohlprofilen der Legierung AlMgSi0,5 mit quadratischem Querschnitt (Maßangaben siehe [Abb. 3](#)) und musste an allen vier Ecken verschweißt werden. Die Schweißaufgabe wurde so ausgelegt, dass der Roboter zahlreiche Zwischenbewegungen sowie Orientierungswechsel des Brenners ausführen und gleichzeitig Hindernisse durch die Spannvorrichtungen umfahren muss. Ergänzend wurde die Baugruppe einmal manuell verschweißt.

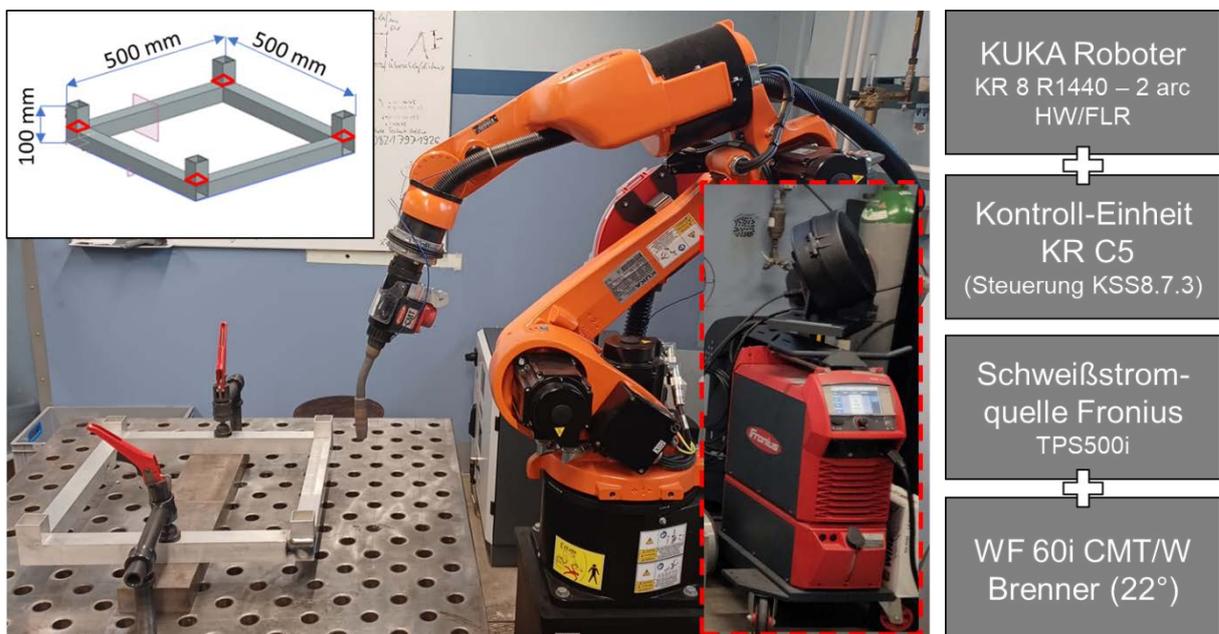


Abb. 3: Verwendete Anlagentechnik und Beispielbauteil für Vergleichsschweißungen

Die Zeiten der einzelnen Prozessschritte wurden erfasst und miteinander verglichen. Ein exemplarisches Schweißergebnis ist in [Abb. 4](#) dargestellt, die ermittelten Zeiten sind in [Tabelle 1](#) aufgeführt. Für alle Programme galten dabei einheitliche Randbedingungen:

- Schweißgeschwindigkeit $v_s = 600 \text{ mm/min}$
- Brennerneigung 45 ± 5 (PC - Querposition)
- SPTP Bewegungen mit 100 % Achsgeschwindigkeit
- alle Bewegungen wurden als Spline-Bewegungsbefehle angelegt (SLIN, SPTP)

Die Abkürzungen SPTP (Spline Point-to-Point) und SLIN (Spline Linear Movement) bezeichnen herstellerspezifische Fahrbefehle der Firma KUKA. Linearbewegungen (SLIN) kamen überwiegend für das Abfahren der Schweißbahnen zum Einsatz, während Punkt-zu-Punkt-Bewegungen (SPTP) hauptsächlich für die Verfahrbewege zwischen den Schweißnähten verwendet wurden.



Abb. 4: Beispiel für verschweißte AlMgSi0,5-Profile (Zusatzwerkstoff: AlMg4.5Mn, energiereduzierte Kurzlichtbogen mit reversierender Drahtbewegung)

Tabelle 1: Aufgenommene Schweißzeiten für das MSG-Schweißen der Beispielbaugruppe mit verschiedenen Programmieransätzen

	1. Online	2. Online	3. Online + cRCS
Rüstzeit inkl. Programmierzeit [min]	90	100	40
Grundzeit [s/Stk] / [min/Stk]	111 / 1,85	95 / 1,58	88 / 1,47
Davon Hauptzeit [s/Stk] / [min/Stk]	64 / 1,07	64 / 1,07	64 / 1,07
Davon Nebenzeit [s/Stk] / [min/Stk]	47 / 0,78	31 / 0,52	24 / 0,40
Auftragszeit T für Stückzahl 1 [min]	91,85	101,58	41,47

Es zeigt sich, dass insbesondere die Rüstzeit – hier überwiegend bestehend aus der Programmierzeit – durch den Einsatz des cRCS deutlich reduziert werden konnte, da die einzelnen Bewegungspunkte nicht manuell definiert werden mussten. Auch die Grundzeit, die der reinen Ablaufzeit des Programms entspricht, konnte merklich verringert werden. Für das manuelle Schweißen wurde eine gesamte Auftragszeit von 19,72 Minuten ermittelt, wobei 5,22 Minuten auf die stückzahlabhängige Grundzeit entfallen. Abb. 5 stellt eine Hochrechnung der in Tabelle 4 aufgeführten Zeiten für Losgrößen von 100 bzw. 1000 Stück dar (Erholungs- und Verteilzeiten wurden hierbei nicht berücksichtigt). Für einen präzisen Vergleich wären ergänzend weitere Zeitarten gemäß REFA [5] zu berücksichtigen. Da jedoch alle übrigen Tätigkeiten bei den verschiedenen Programmieransätzen identisch sind, kann die ermittelte Zeitdifferenz als aussagekräftig angesehen werden.

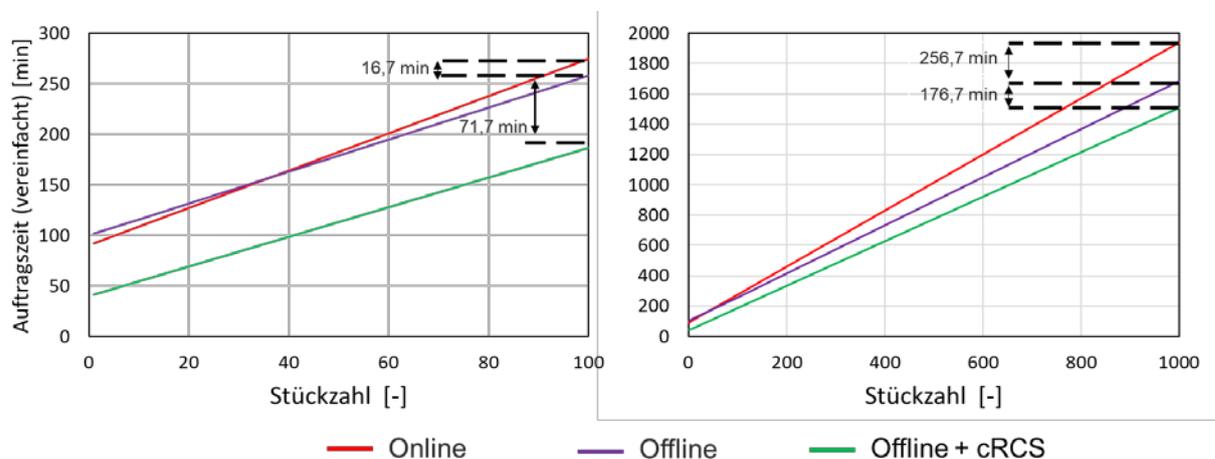


Abb. 5: Hochrechnung der Fertigungszeiten für Stückzahlen von 100 bzw. 1000

Die automatische Generierung der Roboterpfade mittels cRCS ermöglicht eine erhebliche Zeitersparnis bei der Programmerstellung – in diesem Fall über 50 %. Auch die Grundzeit pro Werkstück konnte deutlich reduziert werden. So war das automatisch erzeugte Programm in diesem Beispiel 7 Sekunden schneller als das manuell offline erstellte, was bei einer Losgröße von 100 Teilen eine Einsparung von insgesamt 71,67 Minuten (entspricht 28 %) und bei 1000 Teilen eine Reduktion von 176,67 Minuten (entspricht 10 %) bedeutet.

Der Vergleich zwischen Online- und Offline-Programmierung zeigt zudem, dass bei kleinen Stückzahlen die Differenz in Rüst- bzw. Programmierzeit geringer ausfällt. Die Programmerstellung direkt am Roboter (Online) dauerte 10 Minuten weniger als offline am PC. Allerdings war die erreichte Grundzeit je Stück beim online erstellten Programm um 16 Sekunden länger, was bei 100 Teilen einen zeitlichen Nachteil von 16,67 Minuten gegenüber der Offline-Programmierung ergibt. Diese relativ geringe Abweichung bei der Programmerstellung ist größtenteils auf die individuelle Erfahrung der Programmierenden zurückzuführen.

Der Einsatz von Offline-Programmiersoftware bleibt dennoch sinnvoll, insbesondere wenn der Eingriff in den laufenden Roboterbetrieb möglichst geringgehalten werden soll. Darüber hinaus zeigt sich, dass eine gezielte Optimierung der Programmeffizienz lohnenswert ist – insbesondere bei hohen Stückzahlen wirken sich selbst kleine Zeiteinsparungen pro Ablauf signifikant auf die Gesamtprozesszeit aus (vgl. Abbildung 5 rechts).

5. Zusammenfassung / Fazit

Um die Automatisierung in der Schweißtechnik weiter voranzutreiben, wurden im Laufe der Jahre zahlreiche Hilfsmittel entwickelt, um den Programmieraufwand für Industrieroboter zu reduzieren. Dennoch besteht weiterhin Optimierungspotenzial, insbesondere im Hinblick auf die Minimierung manueller Anteile bei der Offline-Programmierung und die Reduzierung von Programmier- und Nebenzeiten, in denen keine Schweißprozesse stattfinden.

Die Ausgründung byte robotics, vormals Forschungsgruppe EXIST AuRora der OVGU Magdeburg, hat hierfür eine algorithmenbasierte Technologie entwickelt, mit der in einer Offline-Programmierungsumgebung automatisch zeitoptimierte Roboterpfade erzeugt werden können. In diesem Beitrag wurde die Methode speziell die Schweißtechnik validiert. Anhand einer exemplarischen Baugruppe konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die Programmerstellungszeit als auch die Grundzeit pro Werkstück durch den Einsatz einer cRCS signifikant reduziert werden können. Andere Fertigungsprozesse, wie das Zerspanen, Entgraten, Beschichten etc., können aber ebenfalls bedient werden.

Besonders hervorzuheben ist, dass die erzielten Zeiteinsparungen unabhängig von der Bedienerqualifikation erreicht werden, da das zugrundeliegende mathematische Optimierungsproblem automatisch durch die Simulationssoftware gelöst wird. Insbesondere bei komplexen Schweißaufgaben mit vielen Einzelnähten oder häufig wechselnden Anforderungen bietet dieser Ansatz ein hohes Potenzial zur Verkürzung der Fertigungszeiten und zur nachhaltigen Senkung der Produktionskosten.

6. Schrifttum

- [1] Alatarsev, S., Stellmacher, S. u. Ortmeier, F.: Robotic Task Sequencing Problem: A Survey. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 80 (2015) 2, S. 279–298.
- [2] Alatarsev, S.: Robot trajectory optimization for relaxed effective tasks, Dissertation, 2015.
- [3] N. Schillreff, J.-B. Scholle, K. Kirchheim und F. Ortmeier: High Speed RCS for Robot Task Sequencing Optimization, München 2022.
- [4] Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg: EXIST AuRoRa - Das Projekt. <https://www.au-roro.ovgu.de/Das+Projekt.html>, abgerufen am: 29.04.2025.
- [5] Datenermittlung. Methodenlehre der Betriebsorganisation / REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation. München: Hanser 1997.

Trans- Steel Pulse

Infinite applications to unleash
your welding potential

Kontrolliertes Schweißen
im Bereich des
Übergangsbogen

Die Puls Funktion bei der Trans
Steel 3000C Pulse, 4000 Pulse und
5000 Pulse ermöglicht schnellere
Schweißgeschwindigkeiten bei
größeren Materialstärken. Durch
den Puls-Lichtbogen verringert sich
auch die Nacharbeit, da weniger
Schweißspritzer entstehen.



Mehr Informationen zur TransSteel Pulse
Geräteserie unter: www.fronius.de/transsteel



70% 30%

weniger
Nacharbeit

schneller
schweißen

TransSteel 2200C EF Paket



MIG/MAG



Lieferumfang

- TransSteel 220 A Schweißgerät*
- Handschweißbrenner 250 A gasgekühlt 3,5 m
- Massekabel 25 mm² 4 m
- Starter Kit mit Verschleißteilen



Set-Preis* € 1.799,00

Art.-Nr. 4,075,220,880

TransSteel 3000C Pulse Paket



MIG/MAG



Lieferumfang

- TransSteel 300 A Schweißgerät*
- Handschweißbrenner 320 A gasgekühlt 3,5 m mit UpDown-Bedienung
- Massekabel 35 mm² 5 m
- Starter Kit mit Verschleißteilen



Set-Preis* € 4.099,00

Art.-Nr. 4,075,227,880



<https://warrantyfronius.com/de>

* Unverbindliche Preisempfehlung. Der Preis versteht sich zzgl. MwSt. und Versandkosten. Nur in teilnehmenden Shops und bei zertifizierten Fronius Partnern z.B. MSS Schweißtechnik GmbH erhältlich.

Montagekatastrophen

C. Männel, Zwickau

Sollte man wirklich über so etwas berichten? Ich sage: „Ja“ und habe für Sie 4 solcher Ereignisse aufbereitet. Bildmaterial ist knapp und nicht immer für die Öffentlichkeit zugelassen. Zum Glück gab es hier keine Verletzten oder gar Tode zu beklagen.

Jede Montage ist eine neue Herausforderung und will gut vorbereitet sein. In den letzten Jahren waren z.B. Transporte von Giganten auf der Endmontagebaustelle durch zeitgleiche Vormontage an der Tagesordnung. Auch Naturgewalten wie Wind, Regen usw. sind nicht montagefreundlich. Natürlich gibt es auch Unachtsamkeit, Überschätzung und Nachlässigkeit aus Routine seitens der Monteure.

1. Kranunfall auf einer Baustelle im engl. York:

Der Raupenkran stürzt um Totalschaden und zerstört einen Großteil der vormontierten Baugruppen!



2. Transportunfall beim Bau der Svinesundbrücke (Schweden):

Spezialtransporter kippt mit 80 t-Brückenschuss um!



3. Kranunfall bei HKM-Duisburg:

Eine Windböe schob den nichtgesicherten Hafenkran gegen den Prellbock, wo dieser kippte und zerschellte. Totalschaden!



4. Transportunfall bei US-STEEL in Chicago:

Ein vorgefertigtes 450 t Hochofenteil kippt vom Spezialtransportwagen. Baugruppe blieb unversehrt, 2 Transportwagen stark beschädigt!



Zur Bergung wurden in allen 4 Fällen mittels E-Schweißen schnell und unkompliziert Hilfskonstruktionen angebracht ... die Elektrode lebt!

Ich hoffe, Sie neugierig gemacht zu haben und wünsche uns allen einen interessanten Vortrag.



Gesunde Luft.
Gesunde Mitarbeiter.
Gesunde Zukunft.



DIE LUNGE DER INDUSTRIE

Seit **30 Jahren** bringt TEKA aus Coesfeld frischen Wind in **Werkstätten, Labore** und **Produktionshallen**. Ob **Handwerk, Industrie** oder **Hightech-Labor** – wir sorgen überall für saubere Luft. Als einer der **Top-Hersteller in Europa** liefern wir moderne Absaug- und Filtersysteme, auf die man sich verlassen kann – vom kleinen Mittelständler bis zum internationalen Großkonzern.





IMMER DIE PASSENDE LÖSUNG

Vom kleinen tragbaren **HandyCart**
über unseren mobilen absaugstarken
StrongMaster bis zur über 6 m hohen
Zentralanlage **AirTech** versorgen wir
jeden Halle und jeden Arbeitsplatz mit
sauberer Luft.

teka.eu/dvs-md



Autorenverzeichnis

Claus Männel, Pensionär, Zwickau
claus.maennel@gmx.de

Dipl.-Ing. (FH) Henrik Tietze, Wiegel Parey GmbH & Co KG, Gittermastbau, Jerichow / OT Redekin
Hendrik.Tietze@wiegel.de

Dipl. Wirt.-Ing. Andre Klein, Wiegel Parey GmbH & Co KG, Gittermastbau, Jerichow / OT Redekin
Andre.Klein@wiegel.de

Dr.-Ing. Birgit Postrach, Wiegel Parey GmbH & Co KG, Gittermastbau, Jerichow / OT Redekin
Birgit.Postrach@wiegel.de

Dr.-Ing. Django Baunack, Ingenieurbüro Dr.-Ing. D. Baunack, Gerstungen
d.baunack@outlook.de

M. Sc. Gina Fiebig, BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine
dialog@bge.de

Dipl.-Ing. Frank Pennartz, BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine
dialog@bge.de

Dipl.-Ing. Burkhard Senk, Schachtbau Nordhausen GmbH, Nordhausen
Burkhard.Senk@schachtbau.de

Dipl.-Ing. Fabian Schlufter, Schachtbau Nordhausen GmbH, Nordhausen
Fabian.Schlufte@schachtbau.de

B. Eng. Max Schwetlick, ESAB Welding & Cutting GmbH, | Zweigstelle Langenfeld, Langenfeld
max.schwetlick@esab.de

Dipl.-Ing. Rolf Paschold, ESAB Welding & Cutting GmbH, | Zweigstelle Langenfeld, Langenfeld
rolf.paschold@esab.de

Dipl.-Ing. Elke Epperlein, GSI-Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Niederlassung SLV Hannover, Hannover
epperlein@slv-hannover.de

Dipl.-Ing. Natascha Gaier, GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Niederlassung SLV Hannover, Hannover
gaier@slv-hannover.de

Dr.-Ing. Jörg Vogelsang, GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Niederlassung SLV Duisburg, Duisburg
vogelsang@slv-duisburg.de

Erik May, byte robotics GmbH, Magdeburg
erik.may@byte-robotics.com

M. Sc. Eric Bethge, IWTM, Lehrstuhl Fügetechnik, OVGU Magdeburg
eric.bethge@ovgu.de

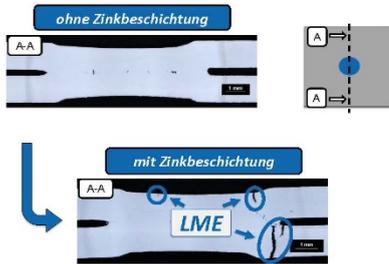
M. Sc. Marcel Köhler, IWTM, Lehrstuhl Fügetechnik, OVGU Magdeburg
marcel.koehler@ovgu.de

Posterbeiträge

Bestimmung des LME-Einflusses auf die Schwingfestigkeit widerstandspunktgeschweißter Proben mittels DIC

Ausgangssituation

- Höchstfeste Stähle der dritten Generation (3G AHSS), werden vermehrt in der Automobilindustrie eingesetzt
→ Reduktion der erforderlichen Blechdicken
- **Problematik:** flüssigmetallinduzierte Rissbildung (LME) durch die Zinkbeschichtung während des Widerstandspunktschweißens
- **Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Schwingfestigkeit**, in Abhängigkeit der Rissgröße und-Lage ist bisher **nicht quantifiziert**

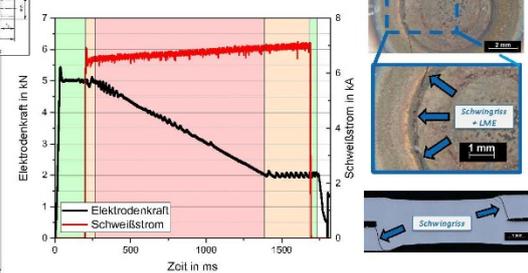


Projektidee

- **Gezielte und reproduzierbare Erzeugung von LME-Rissen** durch die **Einstellung von definierten Spannungszuständen und Temperaturprofilen**
- Untersuchung des **Einflusses unterschiedlicher Risse auf die statischen und dynamischen Verbindungseigenschaften**

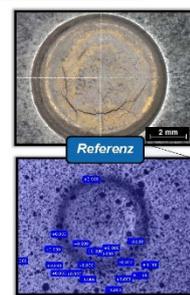
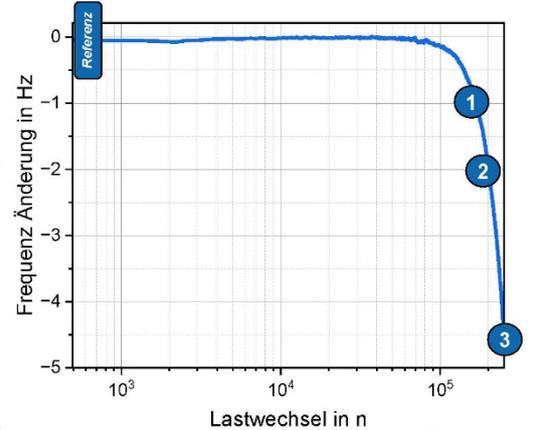
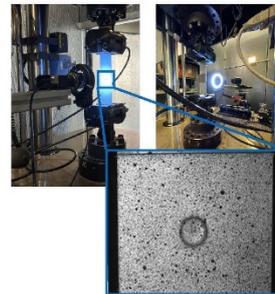
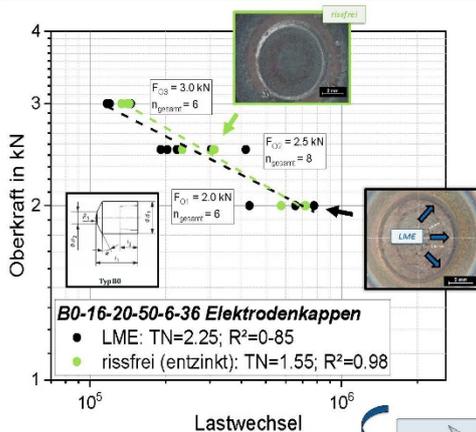
Methodik zur Risserzeugung

- **Abfallendes Elektrodenkraftprofil** in Kombination mit **B0-Elektrodenkappen** (B0-16-20-50-6-36) für 3G AHSS
→ reproduzierbare **Risserzeugung im erwarteten Belastungsbereich**
- **Vergleich (LME-) rissbehafteter Proben mit rissfreien Proben**

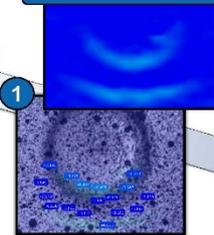


Bewertung des LME Einflusses mittels DIC

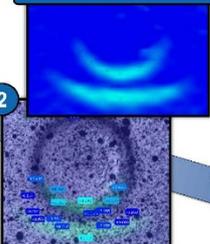
- Durch Aufbringung eines stochastischen Musters können mittels digitaler Bildkorrelation (engl.: digital image correlation, DIC) **lokale Dehnungen während der Schwingprüfung (R = 0,1)** bewertet werden
→ Ermittlung **belasteter Bereiche**
→ Aufzeichnung des **Rissfortschritts**
→ Aufnahme in definiertem Abstand von 30 s (≅ ca. 1200 Schwingspielen)
→ Abbruchkriterium: Frequenzverlust von 5 Hz



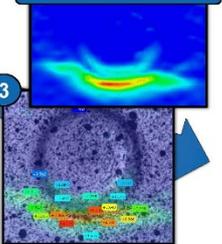
Optische Dehnungsmessung



Optische Dehnungsmessung



Optische Dehnungsmessung



- **Innerhalb des Elektrodenindrucks keine Belastung**
→ **Risse in diesem Bereich voraussichtlich unkritisch**

Weiteres Vorgehen

- Abbruch der Schwingprüfung bei definierten Frequenzänderungen
- **Bruchflächenanalyse** nach der Schwingprüfung → **Führen LME Risse zu einem schnelleren Rissfortschritt?**



Produktivitätssteigerung beim additiven Lichtbogenschweißen dünnwandiger Strukturen aus hochlegierten korrosionsbeständigen Werkstoffen

Forschungsbedarf

- **Wärmemanagement:** Voraussetzung für hohe Aufbauraten und Bauteilqualität
- **Unzureichende Wärmeableitung:** verursacht Schmelzbaddurchbrüche sowie metallurgische und geometrische Inhomogenitäten
- **Kühlung:** reduziert Leerlaufzeiten und steigert Prozess-Effizienz
- **Wartezeiten:** Gängige Maßnahme zur Wärmestauvermeidung (Einhaltung der Zwischenlagentemperatur)
- **DED-AW-Produktivität:** erhöhte Abschmelzleistung und optimiertes Wärmemanagement sichern hohe Fertigungsgeschwindigkeit bei konstanter Bauteilqualität

Arbeitsplan

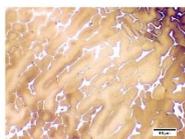
1. Fertigen von Referenzproben (Pendel- / Strichraupe)
2. Erforschung aktiver Kühlmethoden am Austenit
3. Erforschung kombinierter Kühlmethoden am Austenit
4. Anwendungspotentiale für Duplex- und Ni-Legierung
5. Potentiale für MSG-Prozesse mit hoher Abschmelzleistung
6. Fertigung/Prüfung eines Demonstrators

Versuchswerkstoff

G 19 12 3 L Si
(316 L Si, W.-Nr. 1.4430)

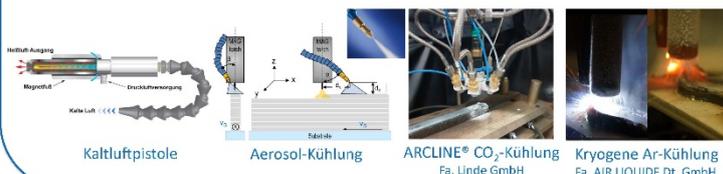
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	N	Cr _{Äq}	Ni _{Äq}	FN
0,02	0,76	1,85	18,4	2,6	11,3	0,067	21,0	13,4	8,0

- austenitische Drahtelektrode für artähnliche stabilisierte und nicht stabilisierte CrNi- und CrNiMo-Stähle, insbesondere im Chemieanlagenbau
- Hitze- und zunderbeständig bis 800°C
- bei Nasskorrosion bis 400 °C einsetzbar
- 3 bis 15 FN δ-Ferrit (Heißrisse) nach WRC-92
- 500-1050 °C : Karbide, Nitride, ρ-Phase, χ-Phase



Aktive Kühlmethoden

Kühlmittel	Geräte
Wasserbad	Behälter
komprimierte Druckluft	Kaltluftpistole
Wasserdampf (Aerosol)	Feinstzerstäubung mit Sprühsystem
CO ₂ -Schnee + CO ₂ -Gas (-78,5 °C)	kryogene Kühlung (Fa. Linde)
flüssiges Gas (Argon)	kryogene Kühlung (Fa. AirLiquide)



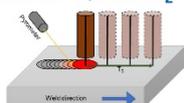
Ergebnisse

Schweißprozess

MAG-CMT, Rest Ar + 2,5 % CO₂

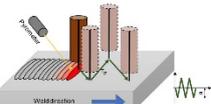
Strichraupe

(150 x 150 [mm²])



Pendelraupe

(∅ 240 mm)



$$E_{Dr} = \frac{IP}{v_{Dr} \cdot (Z + a)}$$

Referenzschweißung



$v_{Dr} = 10,5 \text{ m/min}$
 $E = 3,1 \text{ kJ/cm}^2$



$v_{Dr} = 4,9 \text{ m/min}$
 $E = 4,1 \text{ kJ/cm}^2$

Schweißen im Wasserbad

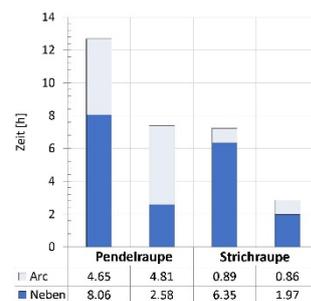


$v_{Dr} = 11,2 \text{ m/min}$
 $E = 3,1 \text{ kJ/cm}^2$



$v_{Dr} = 4,8 \text{ m/min}$
 $E = 3,8 \text{ kJ/cm}^2$

Fertigungszeiten



Mikrostruktur (Austenit + vermicularer δ-Ferrit)

Referenz

Wasserbad

Strichraupe

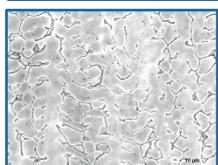


5,9 FN



6,3 FN

Pendelraupe



6,1 FN

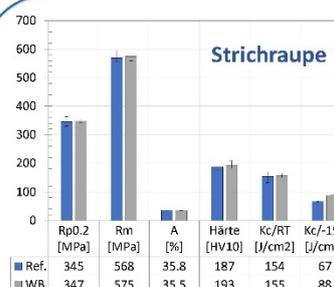


6,7 FN

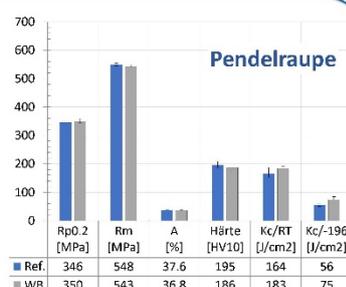
(Ätzung: Beraha II)

Ätzung: V2A-Beize

Strichraupe



Pendelraupe



- Strichraupentechnik bewirkt leicht höhere Zugfestigkeit als Pendelraupentechnik; Bruchdehnung und Kerbschlagarbeit sind leicht reduziert
- Schweißen im Wasserbad reduziert deutlich die Nebenzeiten, eine signifikante Veränderung der mechanisch-technologischen Gütewerte ist nicht beobachtbar



Vereinfachte Prüfmethode zur Bewertung der Gefahr wasserstoffinduzierter Kaltrisse (HACC) beim Lichtbogenschweißen hochfester Stähle

Ausgangssituation



Bild 1: Einflussgrößen für HACC

- Hydrogen Assited Cold Cracking (HACC) → Degradation mechanischer Eigenschaften des Werkstoffs
- Verschiedene H-Quellen während des Schweißprozesses (z.B. Feuchtigkeit in Zusatz- und Hilfsstoff)

Überprüfung des diffusiblen Wasserstoffgehalts
DIN EN ISO 3690

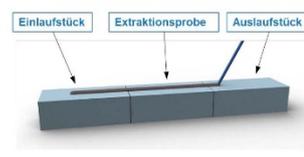


Bild 2: Normprobe nach DIN ISO 3690

Überprüfung der Kaltrissanfälligkeit für Schweißverbindungen
DIN EN ISO 17642 Teil 1 bis 3

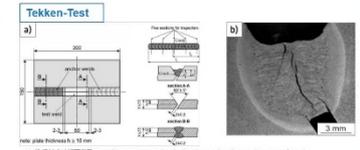


Bild 3: Normprobe Tekken-Test

Fehlende Prüfmethode zur vereinheitlichten Betrachtung der Wasserstoffkonzentration und Überprüfung der Kaltrissanfälligkeit an praxisnahen Schweißungen

Versuchsmethodik

Versuchswerkstoffe

Grundwerkstoffe: MAG-Drahtelektrode (∅ 1,2 mm):
S690 QL, S960 QL Mn3Ni1CrMo (S690 QL)
(t = 10 mm und 20 mm) Mn4Ni2CrMo (S960 QL)

Einzelsegmente für:

- Wasserstoffmessung (diff. H-Gehalt)
- Metallografische Untersuchung (Schliffbilderzeugung, Härte, Lagenaufbau)
- Zugprüfung
- Konstant-Lastversuch (48 h Messung)



Bild 4: Blechprobe

Bei möglichen Kryoschnitten: Blechproben ohne vorgeschrittene Einzelsegmente

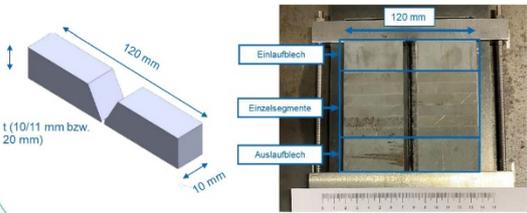


Bild 5: Einzelsegment und Ersatzprobe

Schweißtechnische Verarbeitung

Metall-Aktivgas-Schweißverfahren (MAG)
Schutzgas: M21
V-Naht
Schweißparameter für beide Werkstoffe und beide Blechdicken identisch

Parameter für Ersatzprobe	v _D [m/min]	v _S [cm/min]	I _m [A]	U _m [V]	E [kJ/cm]
Wurzellage	2,8	17	118	17,1	7,12
Fülllage	5,5	23	190	21,6	10,70
Decklage	7,5	28	235	22,6	11,38

t in mm	b in mm
10 / 11	2
c in mm	α in °
1	60

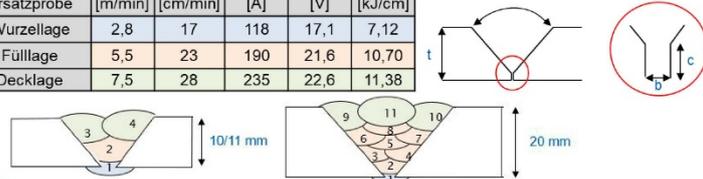


Bild 6: Lagenaufbau der Schweißproben

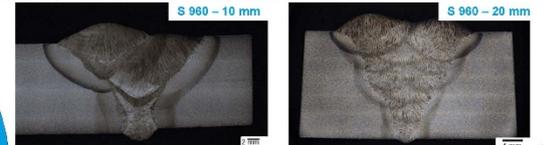


Bild 7: Schliffbilder der Schweißproben

Bestimmung diff. Wasserstoff



- Durch Veränderung des Volumensstroms des befeuchteten Gases, wird der eingebrachte H₂ variiert

Fertigung der Ersatzprobe

Praxisnahes Schweißen

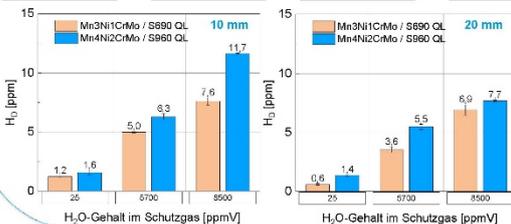
Bestimmen diff. Wasserstoffgehalte

Bestimmen mechanischer Güterwerte

Bestimmung mech. Güterwerte

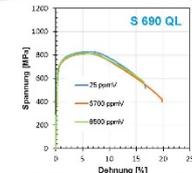
- Durchführung von Zugversuchen an den Ersatzproben
- Degradation infolge des Wasserstoffeintrags

Trennung der Einzelsegmente (in Anlehnung an DIN ISO 3690)



- Bezugsmasse: Masse reines Schweißgut
- Prüfzeit: 1h, 400°C
- Bild 8: diffusive Wasserstoffwerte

Ersatzprobe 10 mm



Ersatzprobe 20 mm

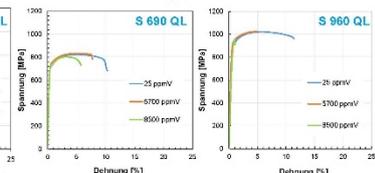


Bild 8: mechanische Güterwerte der Ersatzproben

Material	Befuchung [ppmV]	R _{0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _{50%} [%]	Bruchort
S690 QL (10 mm)	25	682	815	14,5	GW
	5700	682	817	15,8	GW
	8500	679	828	13,8	GW
S960 QL (20 mm)	25	892	1045	7,0	GW
	5700	905	1034	2,3	SG
	8500	896	966	0,5	SG

Material	Befuchung [ppmV]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _{50%} [%]	Bruchort
S690 QL (20 mm) Ersatzprobe	25	718	822	7,4	SG
	5700	737	832	6,2	SG
	8500	722	802	4,1	SG
S960 QL (20 mm) Ersatzprobe	25	920	1029	8,1	SG
	5700	908	1030	4,2	SG
	8500	880	935	0,5	SG



Bewertung innerer Qualitätsgrößen an MAG-Schweißungen im Dünnschleibereich durch optische Analyse der Nahtgeometrie

Ausgangssituation

Zerstörende Prüfung / metallografische Analyse zur QS von MAG-Schweißungen ist industrieller Standard

Problematik: Hohe Prüfkosten und keine kontinuierliche Qualitätsaussage über Produkte

Projektidee: Zerstörungsfreie Vorhersage des Einbrands durch Analyse der äußeren Nahtgeometrie mittels Laser-Scanner

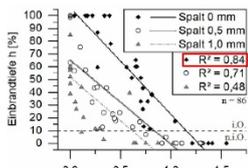


Bild 1: Korrelation zw. Nahtüberhöhung H_2 [°] und Einbrandtiefe h [%] Blechdicke]

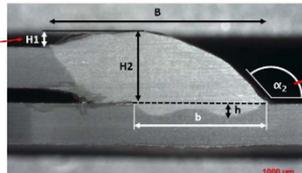


Bild 2: innere/äußere Messgrößen an MAG-Schweißungen im Überlappstoß

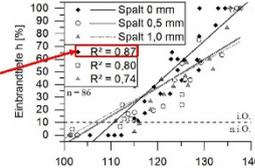


Bild 3: Korrelation zw. Nahtübergangswinkel α_2 [°] und Einbrandtiefe h [%] Blechdicke]

z.T. starke Korrelation zwischen äußerer Nahtgeometrie und inneren Qualitätsgrößen (Einbrand) in Vorarbeiten festgestellt!

Versuchsmethodik

Betrachtung der Schweißaufgabe

Grundwerkstoffe: Baustahl S355 J2+N ($t = 1,5 \text{ mm}; 2,5 \text{ mm}$)
Zusatzwerkstoff: MAG-Drahtelektrode G3Si1 ($\varnothing 1,0 \text{ mm}$)
Hilfsstoff: Schutzgas M21-ArC-18 (18% CO_2 , Rest Argon)

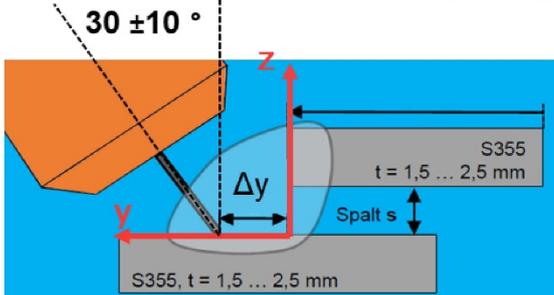


Bild 4: Schematischer Aufbau der Schweißaufgabe, Bleche im Überlappstoß

Gezielte Variation produktionsbedingter Störgrößen (z.B. Spalt s, Brennersversatz Δy) und Anpassung Prozessparameter

Versuchsaufbau/ -durchführung

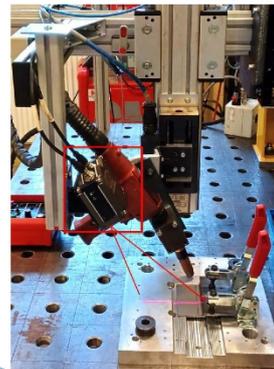
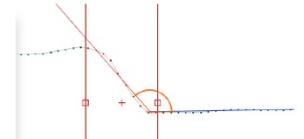


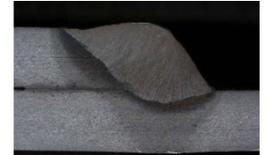
Bild 5: Versuchsaufbau (Schweißportal) mit integriertem Laser-Scanner (Fa. Micro Epsilon)

V Versuchsergebnisse:

1. Daten Laserscanner (Oberflächenscan)

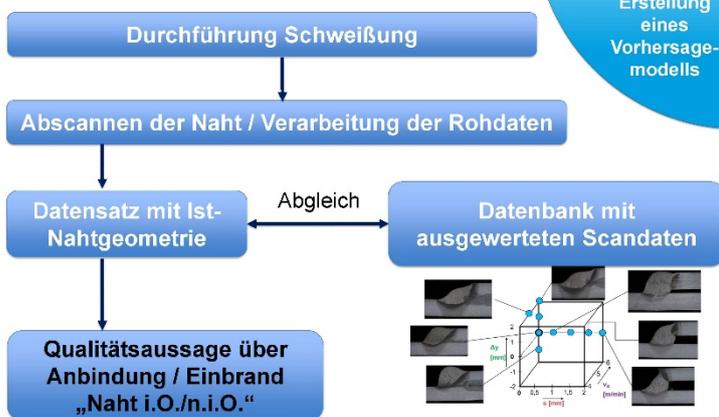


2. Reales Schweißergebnis (Schliffbild)



Vermessung der Nahtoberfläche und Vermessung hergestellter Schliffbilder

Modellbildung (Ausblick/Vision)



Lückenlose zerstörungsfreie Qualitätsaussage

1.

Festlegung des Versuchsprogramms

2.

Durchführung von Schweißprozess und Scanprozess

4.

Erstellung eines Vorhersagemodells

3.

Auswertung der Scandaten

Geometrische Analyse der Scandaten

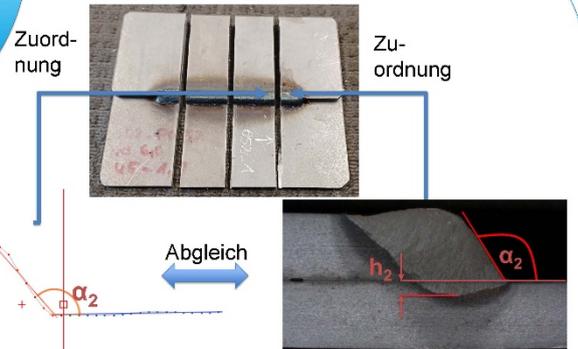


Bild 6: Beispielhafte Vermessung des Nahtübergangswinkels α_2 [°] mit Software des Laserscanners und manuelle Vermessung am Schliffbild

1. Zuordnung von Scandaten zu Schliffpositionen
2. Abgleich von Scandaten mit Schliffbildern
3. Korrelation von äußerer Nahtgeometrie (z.B. α_2) mit Einbrandtiefe h_2



Vorankündigung

Die nächste

Schweißtechnische Fachtagung

findet statt am:

07. Mai 2026

**Schweißtechnische
Lehranstalt Magdeburg**
Gemeinnützige GmbH



BEZIRKSVERBAND
MAGDEBURG





<https://www.dvs-home.de/dvs/vor-ort/landesverband-ost/bezirksverband-magdeburg>

ISBN 978-3-948749-56-9
DOI 10.25673/118884
© 2025