



31. Schweißtechnische Fachtagung

12. Mai 2022

Barleben

**Schweißtechnische
Lehranstalt Magdeburg**
Gemeinnützige GmbH



DVS VERBAND
DVS BV-MAGDEBURG



IWF INSTITUT FÜR
WERKSTOFF- &
FÜGETECHNIK



SCAN ME

31. Schweißtechnische Fachtagung

Tagungsband zur gleichnamigen Fachtagung

am 12. Mai 2022 in Barleben

Eine Gemeinschaftsveranstaltung von:

**Schweißtechnische
Lehranstalt Magdeburg**
Gemeinnützige GmbH



DVS VERBAND
DVS BV-MAGDEBURG



IWF INSTITUT FÜR
WERKSTOFF- &
FÜGETECHNIK

Impressum

31. Schweißtechnische Fachtagung

Herausgeber*innen:

Manuela Zinke, René Schasse und Dietmar Berndt

Kontaktadresse:

Lehrstuhl für Fügetechnik

Institut für Werkstoff- und 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, Abbildungen, Fotos und Textauszüge erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

ISBN 978-3-948749-20-0

DOI 10.25673/85177

1. Auflage, Mai 2022

Bildnachweis Titelblatt: Schweißroboter der ELSA GmbH in Helmstedt, Foto: Benjamin Schlosser

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

Copyright ©2022



Inhalt

Vorwort	5
Zukunft der Stahlproduktion - Was sind Wege zum "grünen" Stahl? S. Freese, Bremen.....	9
Wirtschaftliche Automatisierung durch Einsatz moderner Roboter- und Prozesstechnik in klein- und mittelständischen Unternehmen C. Paul, Haiger.....	17
Brennerintegrierte Absaugung beim MSG- und WIG-Schweißen. Gesetzliche und technische Grundlagen sowie praktische Umsetzung J. Osmont, Nantes.....	25
Optimierungspotenziale bei der Auswahl von Draht/Schutzgas-Kombinationen beim MAG-Schweißen unlegierter Stähle L. Riehl und R. Paschold, Langenfeld	35
Innovative MSG Draht / Schutzgaskombination für die schweißtechnische Verarbeitung von kaltzähen, Ni legierten Stählen B. Hoberg und A. Plozner, Düsseldorf	49
Potentiale der drahtbasierten additiven Fertigung mit dem Elektronenstrahl B. Baufeld, Gilching.....	61
Schweißplattieren mit dem MSG-Heißdraht-Schweißprozess C. Judex, M. Zinke, S. Jüttner, Magdeburg	67
Reused Steels-Wiederverwendende Stähle – Aktuelle Entwicklungen in der DIN EN 1090-Normenreihe R. Schasse, Barleben.....	77
Autorenverzeichnis	85
Posterbeiträge.....	87
Vorankündigung.....	97

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

Im Jahr 2022 findet die 31. Schweißtechnische Fachtagung traditionell im Mai als Gemeinschaftsveranstaltung des DVS Bezirksverbandes Magdeburg, des Instituts für Werkstoff- und Fügetechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der Schweißtechnischen Lehranstalt Magdeburg im Innovations- und Gründerzentrum (IGZ) im Technologiepark Ostfalen in Barleben statt.

Ein Blick in das Tagungsprogramm zeigt, dass es den Veranstaltern erneut gelungen ist, ein breit gefächertes und interessantes Vortragsangebot zu aktuellen Themen der Schweiß- und Fügetechnik zu organisieren.

So werden gegenwärtige Fragen des Arbeits- und Umweltschutzes, wie „Grüner Stahl“ „Brennerintegrierte Absaugung“ oder „Manganreduktion in der Drahtelektrode“ aufgegriffen, der aktuelle Stand der Forschung sowie Zukunftstechnologien, wie das Additive Manufacturing aufgezeigt, aber auch ganz bau-praktisch relevante Belange, wie die wirtschaftliche Fertigung im Klein- u. Mittelstand durch Automatisierung, in den Fokus gerückt.

Die Fachvorträge sind wie gewohnt im Tagungsband abgedruckt. Dieser hat ein neues frisches Layout erhalten, und steht nun auch zeitgemäß in digitaler Form zur Verfügung.

Wie gewohnt, besteht die Möglichkeit, die begleitende Fachausstellung vieler namhafter Anbieter schweißtechnischer Ausrüstungen zu besuchen.

Die Veranstalter der Fachtagung danken allen Referenten, die mit ihren Vorträgen über neueste schweiß- und fügetechnische Entwicklungen informieren, sowie den Ausstellern der Fachmesse für ihre interessanten Exponate und Unterstützung.

Nutzen Sie die Gelegenheit, sich umfassend zu aktuellen schweiß- und fügetechnischen Themen zu informieren und in regen Austausch mit Fachkollegen und Referenten zu treten.

Die Veranstalter freuen sich auf Ihren Besuch.

D. Berndt
DVS Bezirksvorstand
Magdeburg

Prof. S. Jüttner
Institut für Werkstoff- und Fügetechnik
Lehrstuhl Fügetechnik

Dr. R. Schasse
Schweißtechnische Lehranstalt
Magdeburg gGmbH

Magdeburg, im Mai 2022

**ABSOLUT PROFESSIONELL.
EXTREM LEISTUNGSFÄHIG.**



WELD-BESTER SERVICE

Wir konfigurieren, installieren und warten Ihre Schweißautomation.



Unser Weld-Verbesserer Marcel Weihshaupt ist Ihr Ansprechpartner bei der MSS, wenn es um eine für Sie zugeschnittene Lösung geht.

direkter Draht: 0172 - 32 77 596

Mit einer umfangreichen Ausstattung und erfahrenem Personal bieten wir kurze Reparaturzeiten in einer hohen Qualität der Betreuung. Die auf Service ausgerichtete Kundenbetreuung ist ein wesentlicher Eckpfeiler unserer erfolgreichen Unternehmensstrategie.

Die Anforderungen an die schweißtechnischen Komponenten erhöhen sich in einem atemberaubenden Tempo. Neue Werkstoffkombinationen stellen immer größere Herausforderungen an die Schweißtechnik. Mit modernster Schweißtechnik lassen sich die Aufgaben aber immer schneller und einfacher lösen.

Die Technik wird beratungsintensiver: Hier sehen wir für uns weitere Aufgaben in den nächsten Jahren. Gut ausgebildetes Fachpersonal und Produkte auf dem neuesten Stand der Technik garantieren die erfolgreiche Zukunft unseres Unternehmens.



**Die MSS meistert Ihre Schweiß-
automation und berät Sie gern.**



IMMER FÜR SIE DA

Wir konzipieren, liefern und schulen entsprechend Ihren Anforderungen.

Das Produktprogramm umfasst neben moderner Schweiß- und Schneidtechnik auch Schweißroboter, Schweißautomation, Schweißzubehör, Schweißzusatzwerkstoffe, schweißspezifischen Arbeitsschutz und Schweißrauchabsauganlagen. In unserem modernen Lager halten wir mehr als 5000 Artikel bereit, so dass eine schnellste Lieferung garantiert ist.

Mehr als 14.000 verkaufte Schweißgeräte, über 500 regionale und überregionale Kunden für schweiß- und umwelttechnische Anlagen dokumentieren unsere Leistungsfähigkeit.

Als Systemlieferant für Schweiß- und Umwelttechnik bieten wir komplette Lösungen: von der Konzeption über Finanzierungsmöglichkeiten bis zur Inbetriebnahme inkl. Schulung der Mitarbeiter unserer Kunden.

In unserem eigenen Anwendungszentrum führen wir neben speziellen Kundenversuchen auch Workshops und Fachveranstaltungen durch, die kompaktes Know-how vermitteln.



Einkaufen im Onlineshop für B2B-Kunden auf mss-schweisstechnik.de:

- individuelle Angebote und Konditionen
- umfassendes Sortiment
- einfach nachbestellen



Zukunft der Stahlproduktion - Was sind Wege zum "grünen" Stahl?

S. Freese, Bremen

1. Einleitung

1.1. Was ist Stahl? – eine Definition

Als Stahl wird im Wesentlichen eine Legierung aus Eisen und Kohlenstoffe bezeichnet. Für verschiedene Anforderungen und Anwendungen sind eine Reihe weiterer Legierungselemente einsetzbar bzw. erforderlich. Neben den erwünschten und in der Regel bewusst hinzugefügten Legierungsbestandteilen weist insbesondere das Eisen natürliche Begleitstoffe (Schwefel, Phosphor) auf, welche dem Stahl in der Regel nicht erwünschte Eigenschaften verleihen

1.2. Stahlproduktion heute – der derzeitige Stand der Technik

Deutschland ist mit einer jährlichen Produktion von knapp 42 Mio. Tonnen Rohstahl (2016) der siebtgrößte Stahlhersteller weltweit sowie der größte in der Europäischen Union. Auf Deutschland entfallen rund 2,6 % der Welterzeugung bzw. mehr als ein Viertel der Rohstahlerzeugung in der EU. Mit 17,2 Mrd. Euro hat die Stahlindustrie in Deutschland einen Anteil von rund 30 % an der Wertschöpfung in der Stahlindustrie in Europa.

Rund 70 % des Stahls werden in Deutschland in integrierten Hüttenwerken (Hochofen, Stahl- und Walzwerk) erschmolzen, die verbleibenden 30 % über die Elektrostahlroute hergestellt.

	in Tsd t	Veränderung zum Vorjahresmonat	in Tsd t	Januar - September Veränderung zum Vorjahreszeitraum
Rohstahl gesamt	3.018	-9,7 %	25.728	-15,7 %
Oxygenstahl	1.912	-15,4 %	17.260	-19,4 %
Elektrostahl	1.106	2,0 -11,0 %	8.468	-7,3 %
Roheisen	1.800	-6,4 %	16.064	-18,3 %
Warmgewalzte Stahlerzeugnisse	2.677		22.542	-14,8 %

Quelle: Wirtschaftsvereinigung Stahl

Abb. 1: Stahlproduktion in Deutschland September 2020

1.3. Sauerstoffblasstahl

Moderne Sauerstoffblasstahlverfahren (ab 1950) basieren im Wesentlichen auf dem Funktionsprinzip aus einer Blaslanze Sauerstoff von oben auf die Schmelze aufzublasen. Hierbei werden Kohlenstoff und andere unerwünschte Eisenbegleiter verbrannt. Die gilt nicht für Schwefel; Schwefel wird in einem vorgeschalteten Verfahren mittels Zugabe von Kalziumkarbid, Magnesium oder Fließkalk dem Eisen entzogen (Schlackebildung). Mit dem so genannten Linz-Donawitz-Verfahren (LD-Verfahren) werden derzeit weltweit ca. 70 % des Rohstahls hergestellt. Beschickt werden die Konverter in der Regel mit flüssigem Roheisen (aus Hochofenproduktion) sowie Schrott oder Eisenschwamm zur Kühlung. Durch den Verbrennungsprozess entstehen große Mengen Kohlenmonoxid, die als Brenngas genutzt werden und somit im Endeffekt als Kohlendioxid anfallen. Der Abstich erfolgt durch Schwenken des Konverters und Ausfluss der schwereren Stahlschmelze aus dem Abstichloch in eine Stahlpfanne. Anschließend wird die Schmelze entweder weiteren Nachbehandlungen unterzogen (Pfannenmetallurgie) oder direkt vergossen. Der Verguss erfolgt als Brammen, Knüppel oder in geringen Mengen als Block.

1.4. Elektrostahl

Elektrostahl wird in so genannten Lichtbogenöfen im Wesentlichen durch Einsatz von Schrott bzw. Eisenschwamm erschmolzen. Dabei wird der Lichtbogen durch wassergekühlte Graphitelektroden gezündet und aufrechterhalten. Alternativ kann für kleinere Mengen der Stahl auch in Induktionsöfen erschmolzen werden. Der Ofen wird bei geöffnetem Deckel mit Stahlschrott und eventuell zugesetztem Eisenschwamm befüllt (chargiert). Anschließend wird der Deckel geschlossen, die unter elektrischer Hochspannung stehenden Elektroden werden eingefahren. Treffen die Elektroden auf den Stahlschrott, zündet ein Lichtbogen mit einer Temperatur von etwa 4000 °C. Der Lichtbogenofen wird überwiegend für die Edelstahlherstellung (korrosionsbeständiger Stahl) eingesetzt, denn die Herstellung von Stählen mit diesem Gerät ist energieintensiv und damit deutlich teurer als beispielsweise mit dem LD-Verfahren. Der Vorteil des Elektrostahls besteht in seiner hohen Güte.

1.5. Vakuumbehandlung, das RH-Gefäß

Beim RH-Verfahren zirkuliert ein Strom aus flüssigem Stahl unter Vakuum kontinuierlich zwischen Vakuumgefäß und Pfanne. Unerwünschte Elemente werden über die Gasphase entfernt. Ziel des Verfahrens ist es niedrigste Kohlenstoffgehalte zu erreichen – für die Herstellung von Feinblech zur Erzeugung von DDQ (Deep Drawing Quality – Tiefziehgüten) und EDDQ (Extra Deep Drawing Quality – Sondertiefziehgüten). Weiterhin wird Wasserstoff und Stickstoff aus dem flüssigen Stahl durch Ausgasen entfernt. Gleichzeitig erfolgen ein Legieren und Feintrimmen mit hoher Genauigkeit. Dabei kommt es zu einer schnellen Homogenisierung des Pfanneninhalts – auch bei Zugabe größerer Legierungsmengen.

1.6. Welche Stahlsorte für welchen Einsatzbereich?

Ein Blick auf die heutige Verwendung von Stahl zeigt, dass hochlegierte und hochfeste Stähle im Wesentlichen in Bereichen wie Automobilbau und Kranbau eingesetzt werden. Ebenso in Bereichen mit stark erhöhten physischen Anforderungen, wie hohe oder tiefe Betriebstemperaturen. Im Bereich des Bauwesens, das immerhin rund ein Drittel des weltweiten Stahlbedarfes darstellt, werden aber nach wie vor herkömmliche Stahlqualitäten mit eher als niedrig einzustufenden Festigkeiten eingesetzt.

2. Stahlproduktion morgen – was sind die Ansätze zu einer grünen Stahlproduktion?

2.1. Anforderungen an eine zukünftige Stahlproduktion

Je Tonne Rohstahl werden in heutigen konventionellen Stahlproduktionen (Hochofenroute) rund 1,7 t an CO₂-Emissionen je produzierter Tonne Stahl erzeugt. Die CO₂-Emissionen in der Stahlerzeugung zählen somit zu den „größten“ Erzeugern – in Deutschland; ca. 67 Mio. Tonnen CO₂ im Jahr 2007. Die Emissionen entstehen im Wesentlichen bei der Roheisen- und Rohstahlproduktion, also auf der Route Hochofen - Stahlwerk. Rund 65 bis 70 % der Gesamtemission pro Tonne produzierten Stahls fallen auf dieser Ebene an. Der Anspruch an eine zukünftige Stahlproduktion kann nach derzeitigen Erkenntnissen über die Umweltrelevanz also nur in einer dramatischen Reduzierung der CO₂-Emissionen liegen, unter Umständen sogar mit dem Ziel der CO₂-Neutralität. Hierzu existiert bereits eine Reihe von Ansätzen, die jedoch zum jetzigen Zeitpunkt nicht im industriellen Maßstab zur Verfügung stehen.

2.2. Hybrid-Hochofenverfahren – Wasserstoff und Erdgas im Hochofenprozess

Im Hybrid-Hochofenverfahren wird der bisher zur Reduktion des Eisenerzes eingesetzte Koks zumindest anteilig durch Erdgas bzw. Wasserstoff ersetzt. Erste Versuche mit einer Wasserstoffeinblasung über eine Blasform wurden bereits erfolgreich durchgeführt (z. B. ThyssenKrupp). Durch diese Vorgehensweise lässt sich der CO₂-Ausstoß reduzieren. Das Ausmaß der Reduktion zeigt aber auf, dass es sich lediglich um eine Übergangstechnologie handeln kann.

Deshalb soll eine weitere Entwicklungsstufe das nach wie vor entstehende CO₂ in ein Plasmagas umwandeln, das wieder in den Prozess eingeführt wird, wodurch zumindest ein teilweiser Kreislauf

entsteht. Entscheidend wird bei solchen Anlagenkonfigurationen die Installation eines Elektrolyseurs, um Wasserstoff zu erzeugen und diesen dann in großen Mengen in die Hochofendüsen eingeblasen zu können. Durch das Projekt werden die für den Eisenerz-Reduktionsprozess benötigten Kohlemengen verringert. Damit verringern sich ebenfalls die CO₂-Emissionen.

2.3. DRI-Verfahren Reduktion von Eisenerz mit Wasserstoff

Beim DRI-Verfahren (DRI – Direct Reduced Iron) wird das Eisenerz mittels reduzierender Gase als Reduktionsmittel vom gebundenen Sauerstoff abgetrennt. Eine entsprechende Versuchsanlage befindet sich bei ArcelorMittal in Hamburg in Kombination mit einem Elektro-Lichtbogenofen. Dabei wird das Eisenerz in Form von Klumpen, Pellets oder Feingut in die Anlage eingebracht. Durch Erhitzen auf Temperaturen von 800 bis 1200 °C und Durchströmung mit einem reduzierenden Gas (ggf. Wasserstoff oder übergangsweise Kohlenmonoxid) des Erzes erfolgt die Reduktion zu metallischem Eisen. Dieses kann sowohl in konventionellen LD-Konvertern als auch in Lichtbögenöfen zu Stahl weiterverarbeitet werden. Die direkte Reduktion ist dabei ein Festkörperprozess unterhalb des Schmelzpunktes von Eisen.

2.4. Smart Carbon – zirkulärer Kohlenstoff

Smart Carbon ist ein CO₂-neutraler Stahlerzeugungsprozess, der alle sauberen Energien - zirkulären Kohlenstoff, saubere Elektrizität und Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) - in der Eisenherstellung nutzt.

2.5. Eisenerzreduktion mit Biokohle

Moderne Hochöfen ersetzen Kohle durch zirkulären Kohlenstoff wie Bioabfall. Auch wird erprobt den Koks durch Biokohle aus Restholz im Hochofen zu ersetzen.

2.6. Carbon2Value – Abscheidung fossilen Kohlenstoffs

Ziel von Carbon2Value ist, kostengünstige Technologien zu entwickeln, um CO₂ abzutrennen und es für Lagerung oder Wiederverwendung zu verflüssigen. Erste Pilotanlagen zur CO₂-Abscheidung werden gebaut.

2.7. Nutzung Koksofengas

Das Ziel der Nutzung von Koksofengas ist die Reduzierung des CO₂, das bei der Herstellung von Hot Metal erzeugt wird. Dazu wird ein Teil des Koksofengases wiederverwendet, um Koks als Brennstoff im Hochofen teilweise zu ersetzen. Vor dem Einblasen des Koksofengases in den Hochofen wird der Druck mit einem Kompressor erhöht. Das entstehende Gas wird durch ein Rohr befördert und auf Höhe der Düsen durch eine der beiden Lanzen in den Ofen eingeblasen. Koksofengas könnte später durch Wasserstoff ersetzt werden.

2.8. Recycling – Steigerung des Schrotteinsatzes

Einschmelzen von Schrott mit Elektroden (Schrottschmelzen).

3. Schlussbetrachtungen

3.1. Politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Die politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Stahlproduktion in Europa und ganz besonders in Deutschland sind kompliziert. Eine Gemengelage aus Preis- und Qualitätsansprüchen, Lieferzeiten und -mengen, Umweltaspekten, fairem Handel und fairer Beschäftigung nimmt erhebliche Einflüsse, die je nach politischer, gesellschaftlicher oder wirtschaftlicher Situation starken und abrupten Wechseln unterliegen.

Ein Blick auf die installierten Produktionskapazitäten zeigt, dass allein in China mehr als 50 % der installierten Produktionskapazität angesiedelt sind. Hinzu kommt, dass selbst vor der aktuellen Wirtschaftskrise die Stahlnachfrage die Produktionskapazitäten zum Teil nur zur Hälfte ausschöpfte.

Die Rahmenbedingungen für Stahlproduktionen unterscheiden sich dabei weltweit erheblich. Die Rahmenbedingungen werden dabei nicht allein durch Lohnniveaus, sondern auch Umwelanforderungen, Steuersätze usw. beeinflusst. Dies hat massive Einflüsse auf die realisierbaren Verkaufspreise.

3.2. „Grüne“ Energieträger – Strom und Wasserstoff

Die Umstellung auf neue Energieträger, und hier ist in ganz wesentlichem Maße Wasserstoff genannt, impliziert eine Reihe von Konsequenzen und Aufgabenstellung, die nach heutigem Stand jedoch nicht annähernd gelöst sind.

Die Produktion von Wasserstoff als Energieträger bzw. Reduktionsmittel macht nur dann Sinn, wenn die Produktion/Gewinnung ohne die Entstehung nennenswerter CO₂-Emissionen erfolgt. Mithin sind also regenerative Stromerzeugungen das Maß der Dinge. Wind- und auch Solarkraftanlagen haben jedoch in der jüngeren Vergangenheit insbesondere in Deutschland einen massiven Einbruch in ihrer Akzeptanz erfahren. War Deutschland vor 10 Jahren noch eine der führenden Nationen bei der Herstellung und Installation solcher Anlage, so berichtet heute die Solarenergiebranche eine nahezu vollständigen Produktionseinbruch -mit entsprechenden Konsequenzen für die Unternehmen- und auch die Windenergiebranche ist zeitlich versetzt mit der gleichen Tendenz konfrontiert. Erschwerend kommt hinzu, dass weiter Bedarfsträger auf Wasserstoff als Energiequelle zugreifen wollen bzw. müssen: Straßenverkehr, Schienenverkehr und Luftverkehr sind allein schon drei Bereiche mit einem in der Summe deutlichen Energiebedarf. Diese Bereiche werden zukünftig einen rapide ansteigenden Wasserstoffbedarf anmelden. Die Produktion von PKW mit Akkumulatoren stellt lediglich eine Übergangstechnologie dar, im Schienenverkehr werden sich längst nicht alle Strecken sinnvoll unter Draht nehmen lassen und beispielweise Airbus hat 3 Prototypen an Flugzeugen mit Wasserstoff als Energieträger aufgelegt. Es bedarf also einer umfassenden und sehr weit reichenden Restrukturierung unserer Primärenergieversorgung, um diese konkurrierenden Bedarfe auch nur annähernd decken zu können.

3.3. Übergangsweise Energieträger

In den letzten Wochen wurde deutlich, dass im Falle einer unzureichenden Versorgungssituation für grünen Wasserstoff die Übergangslösung (und diese wird in vorhandenen DRI Anlagen durchaus bereits praktiziert) Erdgas als Energieträger nicht problemlos ist. Die Versorgungssituation mit Erdgas (Preis und Menge) hat zum Beispiel aktuell dazu geführt, dass das Werk ArcelorMittal Hamburg seine Produktion drosseln musste. Die Frage der Umsetzung der Dekarbonisierung wird in der jüngsten Vergangenheit noch einmal deutlich als eine Frage der Energieträger beleuchtet.

3.4. Stahlsortenauswahl als ein zusätzlicher Weg

Standardwerkstoff im Stahlbau ist der S235. Die mechanischen Eigenschaften und das Verhalten beim Schweißen dieses Werkstoffes sind hinlänglich bekannt. Die Festigkeitseigenschaften sind jedoch auch für den Bereich Stahlbau am unteren Ende der Skala angeordnet, was zur Folge hat, dass Konstruktionen mit entsprechenden Wandstärken ausgestattet werden müssen.

Eine Alternative kann hier der S460N aufzeigen. Aufgrund der erheblich höheren Streckgrenze kann prinzipiell die erforderliche Materialstärke halbiert werden. Bei Verwendung im Außenbereich muss im

Gegensatz zum S235 nicht auf eine besondere Ausstattung (J2) zurückgegriffen werden, da der Werkstoff von sich aus eine hinreichende Kaltzähigkeit besitzt. Der Mehrpreis pro Tonne wird dabei durch die geringere Menge als auch durch die reduzierten Aufwendungen in der schweißtechnischen Verarbeitung mindestens teilweise kompensiert. Der S460N besitzt alle erforderlichen Zulassungen (siehe Bauregelliste) für den Einsatz im Stahlbau und die schweißtechnische Verarbeitung ist für diesen Feinkornstahl durchaus als unkompliziert zu bezeichnen.

Hier sind Regelwerksträger, Gesetzgeber aber auch Auftraggeber, Anwender und Verarbeiter gefordert, im Sinne einer Reduzierung von Emissionen aber zukünftig auch Energiebedarf den Einsatz solcher Stahlsorten zu forcieren.

Das Dienstleistungsangebot der SL Magdeburg gGmbH



Wir sind Ihr kompetenter Partner

- für** Schweißerausbildung im MAG-Schweißen, WIG-Schweißen, E-Schweißen, Gas-Schweißen UP-Schweißen und Bolzen-Schweißen
- für** Ausbildung zur Flammrichtfachkraft
- für** Qualifikation zum Sichtprüfer nach DIN EN ISO 9712
- für** Qualifikation zum Internationalem Schweißfachmann und Schweißpraktiker
- für** Schweißerausbildung und –prüfung nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU und DIN EN ISO 9606



Wir sind autorisierter Dienstleister

- als** Anerkannte unabhängige Überwachungsstelle nach Landesbauordnung
- für** Betriebszertifizierungen nach DIN EN 1090, DIN EN ISO 3834 und DIN EN ISO 17660
- für** Begutachtung von Schadensfällen
- für** Werkstoff- und Schweißnahtprüfungen
- für** Ergänzende Werkstoffprüfungen (Z-Güten, Aufschweißbiegeversuch, Warmzugversuch)
- für** Schweißverfahrensprüfungen u. Arbeitsproben
- für** Nachtestierung für alle Abnahmeorganisationen



Schweißtechnische Lehranstalt Magdeburg gGmbH

An der Sülze 7
39179 Barleben
Telefon: 039203/761-0
Telefax: 039203/761-55
E-Mail: info@sl-magdeburg.de

Erweiterte Fördermöglichkeiten für Unternehmen durch das Qualifizierungschancengesetz

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 sind z. B.:

Betriebsgröße	Zuschuss zu Lehrgangskosten	Zuschuss zu Arbeitgeberentgelt
Kleinbetriebe mit 1 – 9 Mitarbeitern	bis zu 100 %	bis zu 75 %
Betriebe mit 10 – 249 Beschäftigten (KMU)	bis zu 50 %	bis zu 50 %
<i>jedoch ältere ^① oder schwerbehinderte ^② im KMU</i>	bis zu 100 %	bis zu 50 %
Betriebe mit 250 – 2499 Beschäftigten	bis zu 25 %	bis zu 25 %
Betriebe mit 2500 und mehr Beschäftigten	bis zu 15 % bzw. 20 % ^③	bis zu 25 %

^① „älter“ entspricht einem Alter ab 45 Jahren

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

^③ abhängig vom Vorliegen von Betriebsvereinbarungen bzw. Tarifverträgen zur beruflichen Weiterbildung

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 bereits mindestens vier Jahre zurückliegt bzw. in den letzten vier 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 (also mindestens 121 Stunden) umfassen.

Für geringqualifizierte Mitarbeiter, die an berufsabschlussorientierten Weiterbildungen teilnehmen, gelten diese Einschränkungen nicht!

Ein Rechtsanspruch auf die Fördermittel besteht nicht.

Ihre Ansprechpartner:

Adam Kassawat

Tel.: 039203 761 - 36

Mobil: 0151 292293 - 82

E-Mail: kassawat@sl-magdeburg.de

Marco Brietz

Tel.: 039203 761 - 43

Mobil: 0151 292293 - 77

E-Mail: brietz@sl-magdeburg.de

Wirtschaftliche Automatisierung durch Einsatz moderner Roboter- und Prozesstechnik in klein- und mittelständischen Unternehmen

C. Paul, Haiger

1. Einleitung

Seit vielen Jahren ist die Automatisierung in Großbetrieben ständig gestiegen. Immer mehr Prozesse wurden mechanisiert und automatisiert. Ganze Fertigungshallen, in denen es kaum noch Arbeiter gibt, gehören heute zum Alltag. Vorreiter dieser Entwicklung waren sicher die Automobilindustrie und deren Zulieferer. Immer mehr hat aber auch die Automatisierung von Schweißprozessen in anderen Wirtschaftsbereichen Einzug gehalten. Hierzu gehören der allgemeine Stahlbau, der Behälterbau, der Baumaschinenbereich, der Schienenfahrzeugbau, der Schiffbau und viele weitere Bereiche, in denen Lichtbogenschweißprozesse eingesetzt werden. Mehr und mehr nimmt auch die Roboterautomatisierung in kleineren und mittelständischen Unternehmen zu.

Die Carl Cloos Schweißtechnik GmbH ist seit Anfang der 70er Jahre auf dem Gebiet der Schweißrobotertechnik tätig. Cloos wurde im Jahre 1919 gegründet. Hergestellt wurden Entwickler zum Acetylen-Schweißen. 1948 wurde die Produktion von Schweißgeräten für das Elektrode-Handschweißen aufgenommen. Im Jahre 1956 wurden die ersten Cloos Geräte für das CO₂-Schutzgasschweißen vorgestellt und somit wurde der erste Schritt in die Automatisierung für das Schutzgasschweißen getan. 1960 bereits beschäftigte sich Carl Cloos mit den ersten mechanisierten Sonderschweißanlagen für das Längs- und Rundnahtschweißen. 1978 vollzog Carl Cloos den Einstieg in die Robotertechnik. Das Unternehmen ist weltweit das einzige, welches alle Komponenten für komplette und komplexe Roboter-Schweißanlagen im eigenen Haus entwickelt und herstellt. Es liefert von der Stromdüse über den Schweißbrenner, die Schweißanlage, den Industrieroboter mit moderner Steuerung, die notwendigen Werkstückpositionierer sowie werkstückspezifische Spannvorrichtungen, alles aus einer Hand. Im Stammsitz der Firma Cloos in Haiger werden derzeit 550 Mitarbeiter beschäftigt. Weltweit gehören zur CLOOS-Gruppe mehr als 820 Beschäftigte. Ganz groß wird bei Cloos die Kundennähe geschrieben. 9 Produktionsstandorte, 14 Tochtergesellschaften, 64 Vertriebs & Servicestützpunkte sind weltweit auf 5 Kontinenten verteilt.



Abb. 1: Entwicklung der Firma Carl Cloos GmbH

In moderner Fließfertigung werden im Stammhaus Haiger Schweißstromquellen und Industrieroboter hergestellt. Jedes Jahr werden mehr als 800 Industrieroboter von hochqualifizierten Spezialisten in flexible Roboterzellen integriert.

2. Automatisierung durch Industrieroboter

In Deutschland setzen heute nahezu die Hälfte aller Unternehmen Industrieroboter ein.

Die Firmen, in denen heute noch keine Roboter im Einsatz sind, haben dafür u.a. folgende Begründung:

- Roboter sind für unsere Fertigung nicht geeignet.
- Wir lösen unsere Aufgaben auch ohne Roboter.
- Wir haben Bedenken mit der sicheren Funktion der Robotertechnik.
- Der Einsatz von Robotern ist uns zu teuer.

Der Fertigungsprozess wird vom sogenannten magischen Planungs-dreieck bestimmt (Abb. 2). Hierzu gehören das Produkt, die Maschine und der Mensch, die wechselseitig auf den Fertigungsprozess einwirken.



Abb. 2: Das magische Planungs-Dreieck

Hier ist zu erkennen, dass es offensichtlich noch verbreitete Vorbehalte gibt, die aus fehlendem oder mangelndem Wissen über die heute verfügbare Technik begründet sind. Durch immer bessere Informationen verlieren jedoch diese Argumente an Bedeutung und in immer mehr Unternehmen werden Automatisierungslösungen Einzug halten.

Die wesentlichen Gründe zur Automatisierung sind technische Gründe wie Flexibilität, Qualität, Prozessbeherrschung und Mangel an qualifizierten Schweißern. Der zunehmende Druck aus Billiglohnländern erhöht den Druck wirtschaftlicher zu fertigen d.h. Erhöhung der Produktivität, Senkung der Personal- und Fertigungskosten, das Erreichen von kalkulierbaren Fertigungszeiten. Nicht zu vergessen ist, dass die Automatisierung zur Humanisierung des Arbeitsplatzes beiträgt. Die Sorgfaltspflicht des Arbeitgebers sollte den Mitarbeiter von schwerer, monotoner und gesundheitsschädlicher Arbeit entlasten.

Technische Gründe:

- Flexibilität,
- gleichbleibende Qualität,
- wegen Aufgabenstellung / Prozessbeherrschung erforderlich.
- Mangel an ausgebildeten Handschweißern

Wirtschaftliche Gründe:

- Produktivität (Mehrschichtbetrieb)
- Personal- und Fertigungskosteneinsparung
- kalkulierbare Fertigungszeiten
- Einsparung von Zusatzwerkstoffen

Humanisierungsaspekte:

Entlastung der Menschen von

- Gesundheitsschädlicher,
- schwerer,
- monotoner / unangenehmer Arbeit

Abb. 3: Gründe zum Mechanisieren

Zur Vorbereitung einer Automatisierungslösung muss der Fertigungsprozess eingehend analysiert werden. Eine Fertigungs- und Materialflussanalyse gibt Auskunft über: den Teiletransport, die Anzahl der Schichten, die Minimierung der Rüstzeit, die Organisation des Materialflusses, die Materialbereitstellung und den dazu benötigten Platzbedarf.

Die Produktanalyse sollte Auskunft über nachfolgende Punkte geben:

- Welche Bauteile sollen automatisiert gefertigt werden?
- Welche Stückzahlen bzw. Losgrößen fallen an?
- Welche Bauteilabmessungen und –gewichte muss ich beachten? (Bauteilspektrum vom kleinsten bis zum größten relevanten Bauteil)
- Welche fertigungs- und materialspezifischen Gegebenheiten sind zu beachten?
- Wie hoch sind die derzeitigen Fertigungszeiten und welche Taktzeiten sollen durch den Roboter Einsatz erreicht werden?
- Welche Qualitätsanforderungen werden vorgegeben?

Für die Automatisierung stehen verschiedene Hilfsmittel zur Verfügung (Abb. 4, links). Überwiegend werden 6-Achs Roboter eingesetzt (Abb. 4, rechts).

Ausführung der Schweißbewegung

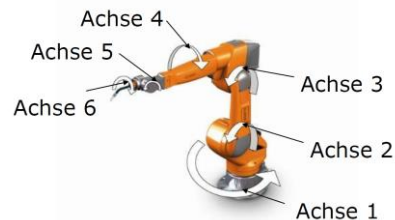
- Fahrwerke
- Roboter
- Geräteträger
- Portale (fest oder schwenkbar)

Peripherie Komponenten

- Drehpositionierer
- Dreh- Kippositioniere
- Wendevorrichtungen
- Rollenböcke

Hilfsmittel zur Werkstückpositionierung

- Heft- und Haltevorrichtungen
- Spannvorrichtung
- Schweißbadsicherung



- universell einsetzbar
- mehr als 3 Achsen
- frei programmierbar
- Sensorführung möglich

Abb. 4: Hilfsmittel zum Mechanisieren (links) und Definition Industrieroboter nach DVS 0922 [1] (rechts)

Roboter sind universell einsetzbar und frei programmierbar. Somit können unterschiedliche Bauteile an einer Roboteranlage mit minimalen Rüstzeiten gefertigt werden. Durch die Integration von Sensoren wie taktile Kontaktsensor, Lichtbogensensor, oder auch berührungslose Lasersensoren können Werkstücktoleranzen ausgeglichen werden. In der Robotertechnik werden grundsätzlich 2 Varianten unterschieden (Abb. 5).

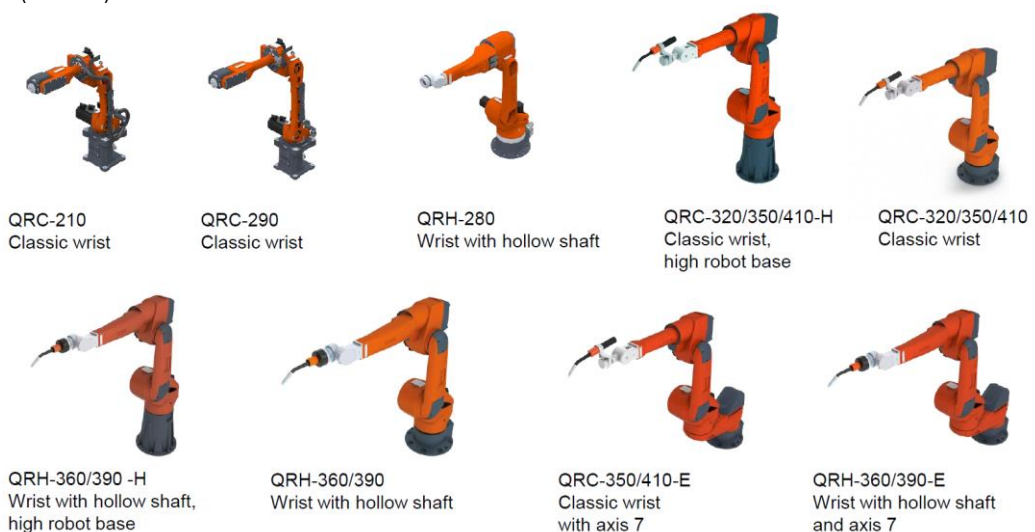


Abb. 5: Varianten in der Robotertechnik

Bei der klassischen Variante wird das Brennerschlauchpaket außerhalb der Robotermechanik geführt. Bei der Hohlwelle liegt das Schlauchpaket innerhalb des Roboters. Je nach Anwendung haben beide Varianten ihre Vorteile. So lässt sich bei der klassischen Variante ein Schweißbrennerwechsel für unterschiedliche Brennergeometrien oder auch unterschiedliche Drahtzusatzwerkstoffe problemlos durchführen. Die Hohlwellen-Variante hat eine verbesserte Zugänglichkeit und bildet keine Störgröße durch das Brennerschlauchpaket.

Zu einer kompletten Automatisierungsanlage gehören auch Peripherie-Komponenten. Hier kommen roboterführende und werkstückbewegende Komponenten zum Einsatz. Werkstückbewegende Peripherie bringt das Werkstück in die optimale Schweißposition bevorzugt PA oder PB um maximale Abschmelzleistung und hohe Schweißgeschwindigkeiten zu erreichen. Roboterführende Peripherie vergrößert den Arbeitsbereich des Roboters und lässt ein wechselseitiges Arbeiten zu. Somit fällt die Rüstzeit in die Schweißzeit was die Wirtschaftlichkeit einer Roboteranlage wesentlich erhöht.

Ein weiterer Baustein ist die Konstruktion. Automatisierung fängt bereits in der Konstruktion an. Automatisierungsgerechte Konstruktion ist die Voraussetzung für eine wirtschaftliche Fertigung. Konstruktionsvorgaben und Anforderungen an die Spannwerkzeuge sollten im Vorfeld mit den Fachabteilungen und den Mitarbeitern der Fertigung besprochen und abgestimmt werden. Durch Erfahrungsaustausch der einzelnen Fachabteilungen wie Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Qualitätskontrollen können Konstruktions- und Fertigungsfehler vermieden werden (KVP).

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Versuch in einer Aufspannung 2. Möglichst Kehlnähte für leichtere Anwendung von Sensoren und günstigerer Schweißparameter 3. Beachtung von Brennerbauformen (Zugänglichkeit) 4. Teilespektrum untersuchen auf gleiche Programmpakete 5. Spannmöglichkeiten in Verbindung mit Zugänglichkeit der Schweißstelle beachten. | <ul style="list-style-type: none"> • Nahtvorbereitung • Nahtformen • Zugänglichkeit • Schweißposition • Schweißfolgeplan • Festlegen der Schweißnahtdicke • Fixierung der Einzelteile (Spannvorrichtung oder geheftet) |
|--|---|

Abb. 6: Robotergerechtes Konstruieren (links) und Konstruktionsvorgaben (rechts)

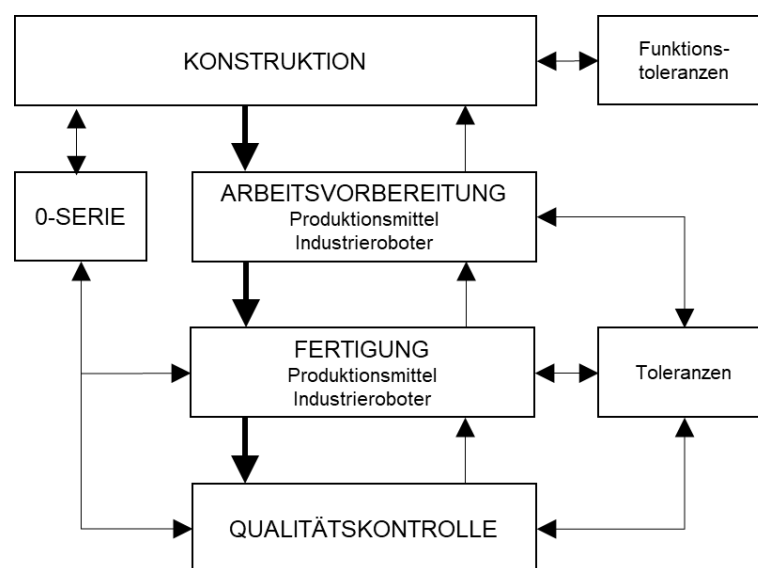
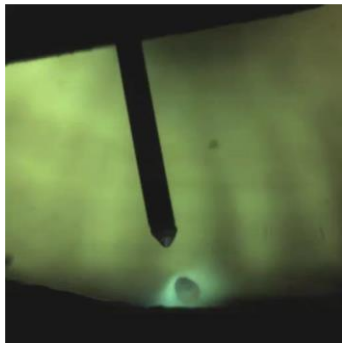


Abb. 7: Konstruktionsplanung

Die Auswahl des Schweißverfahrens ist die wichtigste Entscheidung. Bei der Vielfalt der Prozessnamen, die heute auf dem Markt angeboten werden, ist es für den Anwender sehr schwierig zu entscheiden welcher Prozess für die Aufgabenstellung der wirtschaftlichste Prozess ist. Man unterscheidet im Wesentlichen zwischen Ein- und Mehrdraht Prozessen.

Wenn man den Eindrahtprozess betrachtet, gelangt der Handschweißer schnell an seine Grenzen was Abschmelzleistung und Schweißgeschwindigkeit betreffen. Somit können auch schon Eindrahtprozesse nicht ausgereizt werden, da Haptik und Brennerführung bei hohen Schweißgeschwindigkeiten nicht so genau geführt werden können wie mit einem Roboter. Wenn beim Handschweißen der Werker bei Schweißgeschwindigkeiten ab 60-70 cm/min an seine Grenzen stößt, werden Eindrahtprozesse in der Automatisierung je nach Anwendung bis zu 400 cm/min umgesetzt.

Bei den Mehrdrahtprozessen hat sich das Tandemschweißen sehr stark etabliert. Hierbei werden zwei Schweißdrähte unter einer gemeinsamen Schutzgasdüse in einen gemeinsamen Lichtbogenfußpunkt zusammengeführt. Eingesetzt wird der Prozess bei Blechstärken ab 2,5 mm und zeichnet sich dabei durch hohe Schweißgeschwindigkeit bis zu 5 m/min aus. Bei dickeren Blechstärken, die eine gute Wärmeableitung haben, können Abschmelzleistungen bis zu 20 kg/h erreicht werden. Somit trägt der Tandemprozess wesentlich zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei.



- hohe Schweißgeschwindigkeit
- sehr stabiler Lichtbogen
- sichere Wurzelersfassung
- sichere Flankenbindung
- hohe Abschmelzleistung
- manuell und automatisch
- spritzerarm



- Synergiemodus Tandem Synergy Pro (TSP)
- sehr hohe Abschmelzleistung
- hohe Schweißgeschwindigkeit
- tiefer Einbrand
- vergleichbar geringe Streckenenergie
- gute Spaltüberbrückbarkeit
- Variantenvielfalt
- mit dem Roboter QTI abgestimmtes Paket

Abb. 8: Speed Weld (links) und Tandem Weld (rechts)

Nach und nach etabliert sich auch der MSG-Laser-Hybrid Prozess in der Roboterautomatisierung (Abb. 9). Hybride Prozesse sind dadurch gekennzeichnet, dass sich zwei unterschiedliche Prozesse unter einer gemeinsamen Schutzgasglocke in einem gemeinsamen Wirkpunkt treffen. Durch die hohe Energiedichte des Laserstrahls wird eine sehr hohe Einbrandtiefe erreicht und der MSG Prozess erhöht die Toleranz Überbrückung. Somit werden bei Bauteilen ohne Nahvorbereitung große Einbrandtiefen bei gleichzeitig hoher Schweißgeschwindigkeit erzielt.

Oftmals herrscht die Meinung vor, dass der Mensch mit der Automatisierung der Produktion in den Hintergrund tritt. Diese Meinung ist schlichtweg falsch! Trotz, oder gerade wegen der Automatisierung spielt jedoch der Mensch eine immer wichtigere Rolle.

Die Ausbildung der Mitarbeiter und die grundlegenden Kenntnisse zur Schweißtechnik und -technologie sind Grundvoraussetzung für die Erzeugung und die Beurteilung von qualitativ hochwertigen Schweißnähten. Auf Basis vorhandener Kenntnisse werden in speziellen Roboterschulungen die Grundlagen für die Erstellung optimaler und effektiver Schweißprogramme gelegt bzw. erweitert.

Durch den Einsatz moderner Robotertechnik werden die Mitarbeiter motivierter und zufriedener und dadurch leistungsstärker. Als Inhaber oder als Verantwortlicher des Managements werden Sie erkennen, dass durch die Schaffung kreativer Entfaltungsmöglichkeiten für ihr Personal teils überraschende Ergebnisse erzielt werden. Durch die sich aus dem Robotereinsatz ergebende Notwendigkeit, ihre Mitarbeiter ständig weiter zu bilden, um immer auf technologischem Höchststand zu sein, wird für ihr Unternehmen wiederum einen nicht unerheblichen Vorsprung gegenüber dem Mitbewerber entstehen.

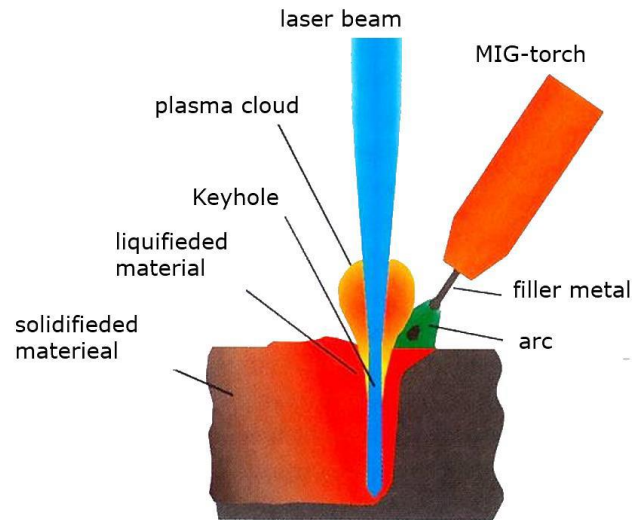


Abb. 9: MSG-Laser-Hybrid Prozess

- **Grundlagen der Schweißtechnik sind eine Voraussetzung für die qualitative Erzeugung und Beurteilung von Schweißnähten!**
- **Roboterschulungen legen die Grundlagen für optimale und effektive Schweißprogramme!**
- **Motivierte und zufriedene Mitarbeiter leisten mehr!**
- **Kreative Entfaltungsmöglichkeiten führen oft zu überraschenden Ergebnissen!**
- **Fördern Sie Ihre Mitarbeiter, um technologisch auf dem Stand der Technik zu bleiben und um einen Schritt weiter zu sein als der Wettbewerb!**

Abb. 10: Faktor Mensch

3. Quelle

- [1] Merkblatt DVS 0922-1 (10/2008): Industrierobotersysteme zum Schweißen, Schneiden, Kleben und Beschichten - Begriffsbestimmung und Definition der Kenngrößen. <https://www.dvs-regelwerk.de>.

SCHWEISSEN UND ABSAUGUNG IN EINEM ATEMZUG.

Absaugbrenner von
ENGMAR saugen den
Schweißrauch ab,
bevor er eingeatmet
werden kann.



RUNDUMSCHUTZ FÜR IHRE SCHWEISSER INDIVIDUELLE KOMPLETTLÖSUNGEN AUS EINER HAND



ABSAUGBRENNER MIG/MAG UND WIG
Höchste Effizienz durch Absaugung
an der Entstehungsstelle

MOBILE UND ZENTRALE ABSAUGSYSTEME

Beratung, Fertigung, Planung und Montage
von Absauglösungen



**ERGONOMIE DER
SCHWEIßARBEITSPLÄTZE**
Schwenkkräne für feste
Arbeitsplätze oder Balancer
für mobiles Arbeiten



Brennerintegrierte Absaugung beim MSG- und WIG-Schweißen. Gesetzliche und technische Grundlagen sowie praktische Umsetzung

J. Osmont, Nantes

1. Einleitung

In den letzten Jahren hat sich die Gesetzgebung rund um die Exposition der Arbeitnehmer gegenüber Schweißrauch stark verschärft. So wurde der Arbeitsplatzgrenzwert für Mangan bereits 2015 auf $0,02 \text{ mg/m}^3$ für A-Staub abgesenkt. 2017 wurde Schweißrauch durch die Internationale Agentur für Krebsforschung IARC als krebserregend eingestuft. 2018 lief die Übergangsfrist für den seit 2014 geltenden Arbeitsplatzgrenzwert für alveolengängige Stäube aus; dieser wurde damit auf $1,25 \text{ mg/m}^3$ festgesetzt.

Die Absauglösung spielt dabei beim Schutz der Schweißer, aber auch von Beschäftigten an Nachbararbeitsplätzen, eine immer wichtigere Rolle. Dabei gilt: je näher an der Entstehungsstelle abgesaugt wird, desto größer ist auch der Erfassungsgrad. Brennern mit integrierter Absaugung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Ein Großteil des entstehenden Schweißrauches und der freigesetzten Gase kann hier bereits unmittelbar an der Entstehungsstelle abgesaugt werden, eine Vermischung mit der Raumluft kann somit weitgehend verhindert werden.

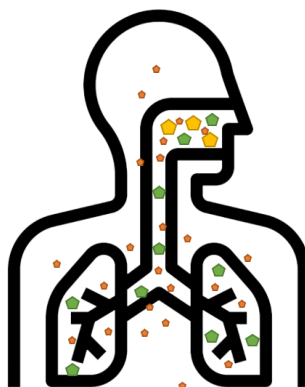
2. Was ist Schweißrauch?

Beim Schweißen entstehen partikelförmige Emissionen und Gase. Es handelt sich dabei um Stoffgemische, deren chemische Zusammensetzungen und Konzentrationen von den eingesetzten Werkstoffen und den angewendeten Verfahren abhängig sind.

Die freigesetzten Partikel können sowohl der alveolengängigen Staubfraktion (A-Fraktion) als auch der einatembaren Staubfraktion (E-Fraktion) angehören. Des Weiteren können so genannte ultrafeine Partikel entstehen, deren Durchmesser im Nanometerbereich liegen. Es entstehen weiterhin gasförmige Gefahrstoffe, wie Ozon oder sogenannte nitrose Gase, d.h. Oxide mit Stickstoffanteil.

- Nanopartikel: Massenanteil der Nanoteilchen, die sich über den Blutkreislauf im gesamten Organismus verteilen und die Blut-Hirn-Schranke durchdringen können. Größe $\leq 0,1 \mu\text{m}$
- A-Fraktion: Massenanteil der eingeatmeten Partikel, die bis in die Lungenbläschen vordringt, Größe $\leq 10 \mu\text{m}$; AGW $1,25 \text{ mg/m}^3$
- E-Fraktion: Massenanteil aller Schwebstoffe, die durch Mund und Nase eingeatmet werden können. AGW 10 mg/m^3

...dazu kommen gasförmige Gefahrstoffe.



Größe der im Schweißrauch enthaltenen Partikel: $0,01 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$. Zum Vergleich: \varnothing menschliches Haar: $20 - 80 \mu\text{m}$

Abb. 1: Größe der im Schweißrauch enthaltenen Partikel [1]

3. Geltende gesetzliche Regelungen

Der Arbeitgeber hat nach § 6 GefStoffV und § 5 Arbeitsschutzgesetz vor Aufnahme der Tätigkeit eine Gefährdungsbeurteilung (siehe TRGS 400 und TRGS 528) durchzuführen, in der die für die Beschäftigten mit ihrer Arbeit verbundenen Gefährdungen ermittelt und Maßnahmen zum Schutz der Gesundheit festgelegt werden.

Die TRGS 528 hilft bei der Erstellung der Gefährdungsbeurteilung. Diese ist in vier Schritten durchzuführen:

1. *Ermittlung der Zusammensetzung des Schweißrauchs:* Dabei sind nicht nur der Grundwerkstoff, sondern auch Schweißzusatzwerkstoffe, Beschichtungen, sowie Gase (Prozessgase sowie beim Schweißen gebildete Gase) zu berücksichtigen. In der Regel entstehen 95 % des Schweißrauchs aus dem Zusatzwerkstoff und nur etwa 5 % aus dem Grundwerkstoff.
2. *Ableitung der gesundheitlichen Risiken:* Auf der Grundlage der TRGS 528, 3.2.2 1, lassen sich die identifizierten Gefahrenstoffe in atemweg- bzw. lungenbelastend, toxisch bzw. toxisch-irritativ oder krebserzeugend einteilen. Die einzuhaltenden Grenzwerte finden sich in der TRGS 900 bzw. 910 oder in der Stoffdatenbank GESTIS der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung.
3. *Emissionsgruppe des angewandten Verfahrens:* Die Menge der emittierten Partikel hängt weiterhin stark vom angewendeten Verfahren ab. Die TRGS 528 bietet hier eine Orientierungshilfe zur Bewertung der wahrscheinlich vorliegenden Emissionsraten:
 - Gruppe 1 mit niedrigen Emissionen (<1 mg/s)
 - Gruppe 2 mit mittleren Emissionen (1 bis 2 mg/s),
 - Gruppe 3 mit hohen Emissionen (2 bis 25 mg/s),
 - Gruppe 4 mit sehr hohen Emissionen (>25 mg/s).Abgesehen von den Partikeln sind weiterhin die beim thermischen Fügen entstehenden Gase, wie Ozon, Kohlenstoffmonoxid bzw. nitrose Gase zu beachten.
4. *Die arbeitsplatzspezifischen Faktoren,* wie Schweißdauer, Zwangshaltungen, Arbeit in engen Räumen usw. sind ebenfalls zu berücksichtigen.
5. *Erstellung eines Maßnahmenplanes zur Reduzierung der Exposition:* Ist eine Gesundheitsgefährdung durch Gefahrstoffe nicht auszuschließen, muss diese auf ein Minimum reduziert werden. Hierfür sind folgende Maßnahmen in der aufgeführten Reihenfolge nach dem STOP-Prinzip zu ergreifen [2]:
 1. **Substitution:** Auswahl von Gefahrstoffarmen Verfahren und Zusatzwerkstoffen, (z.B. Impulsschweißen statt konventionellem Schweißen, Reduzierung CO₂-Anteil im Schutzgas)
 2. **Technisch:** Lüftungstechnische Maßnahmen,
 3. **Organisatorische und hygienische Maßnahmen** (z.B. Arbeitsplatzreinigung nicht durch Kehren oder Druckluft, Optimierung Arbeitspositionen) und
 4. **Persönliche Schutzmaßnahmen** (z.B. Frischluftbelüftete Helme).

Für die Lüftungstechnischen Maßnahmen gilt: Je näher an der Entstehungsstelle abgesaugt wird, desto effektiver ist die Erfassung der Gefahrstoffe. Weiterhin ist bei Verfahren, die mindestens der Emissionsklasse „hoch“ zugerechnet wurden, zusätzlich zur Absaugung an der Entstehungsstelle in der Regel eine weitere Lüftungstechnische Maßnahme, bzw. eine zusätzliche persönliche Schutzmaßnahme nötig. Lüftungsverfahren ohne Erfassungselemente an der Emissionsstelle sind als alleinige Schutzmaßnahme unzulässig, sie können lediglich als ergänzende Lüftungstechnische Maßnahme genutzt werden.

Die abgesaugte Luft darf nur dann in den Arbeitsbereich zurückgeführt werden, wenn sie gemäß der Norm DIN EN ISO 21904 Teil 1 ausreichend gereinigt ist. Entstehen bei den Schweißarbeiten krebserzeugende Stoffe der Kategorie 1A oder 1B, so darf die Luft nicht zurückgeführt werden. Ist keine andere

technische Lösung möglich, so muss die genutzte Absauglösung auf der Grundlage der DIN EN ISO 21904 Teil 1 und 2 W3 zertifiziert sein.

Die Norm DIN EN ISO 21904 Teil 1 und 2 bewertet hierbei ausschließlich den *Abscheidegrad* der Anlage. Dabei wird bewertet, welcher Prozentsatz der abgesaugten Partikel (nicht Gase) von Absauggerät herausgefiltert wurde. Je weiter die Absaugung aber von der Entstehungsstelle entfernt ist, desto geringer ist auch der *Erfassungsgrad* dieser Anlage. Es wird also ein geringerer Prozentsatz des entstehenden Schweißrauchs überhaupt erfasst. Um einer Anreicherung dieser Stoffe zu verhindern, ist deshalb ein Außenluftvolumenstrom von mindestens 200 m³/h pro Schweißer einzuführen, dieser Wert ist je nach Verfahren anzupassen.

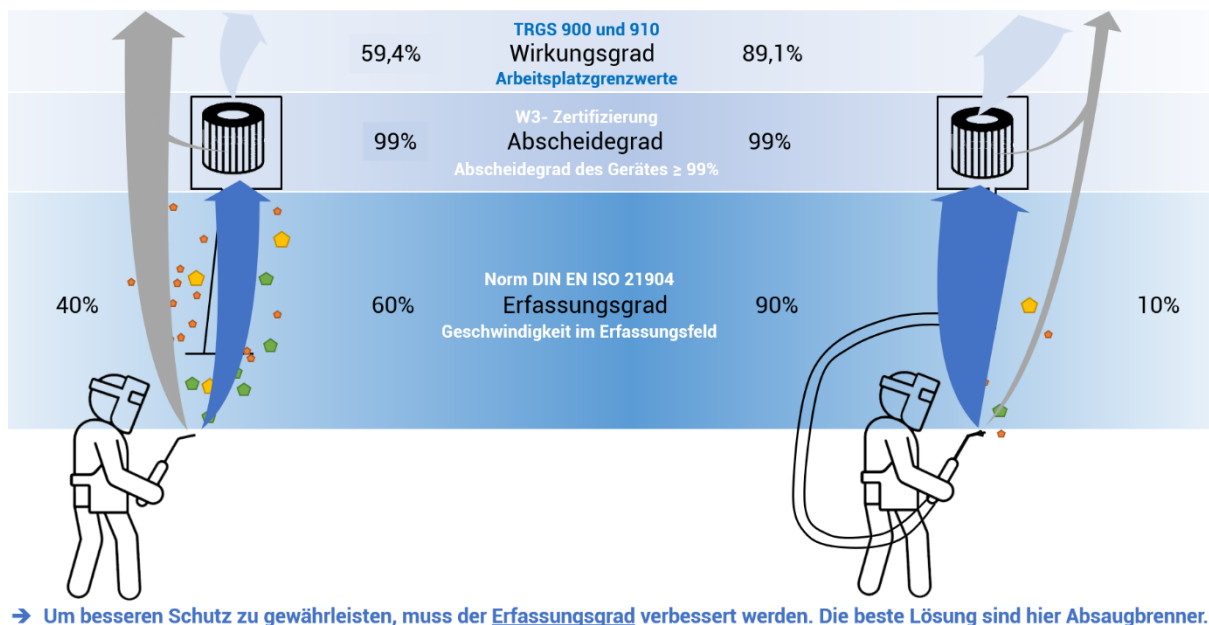


Abb. 2: Gesetzliche Grundlagen anhand eines Vergleichs Absaugarm und Absaugbrenner [3]

4. Absaugung an der Entstehungsstelle: Absaugbrenner

Die lüftungstechnische Maßnahme, die direkt an der Emissionsquelle ansetzt, sind Absaugbrenner. Sie bieten den weitaus besten Erfassungsgrad, der je nach Prozess und Position sogar bei bis zu 98% liegen kann. Ein weiterer Vorteil dieser Lösung ist, dass die Schweißer beim Arbeiten stets geschützt sind. Es ist hier kein Nachführen des Erfassungselements notwendig.

2015 hat der französische INRS einen neuen Bewertungsstandard für Absaugbrenner erlassen. Dieser wurde 2020 in die europäische Norm ISO EN 21904 aufgenommen. Je nach Nennleistung des Brenners, sind in der Norm induzierte Geschwindigkeiten angegeben, die mindestens einzuhalten sind, um einen Schutz der Schweißer zu gewährleisten.

Tabelle 1: Einzuhaltende induzierte Geschwindigkeiten [4]

Leistung	Induzierte Geschwindigkeit
< 200 A	0,25 m/s
> 200 A	0,35 m/s

Es wird momentan empfohlen, dass der Brenner so konzipiert sein sollte, dass eine Verwendung ohne Absaugdüse nicht möglich sein sollte. Hintergrund ist hier, dass der Schutz des Schweißers ohne die Absaugdüse nicht mehr ausreichend gewährleistet ist, weil der Schweißrauch nicht mehr bzw. nicht mehr ausreichend abgesaugt werden kann.

4.1. Induzierte Geschwindigkeit und ISO 21904

Es wird davon ausgegangen, dass sich um die Absaugdüsen ein sphärischer Absaugbereich bildet, in dem die gleiche Geschwindigkeit vorherrscht. Anhand des Absaugvolumens und der Entfernung L lässt sich die sogenannte induzierte Geschwindigkeit berechnen. Zurzeit findet die Formel lediglich bei MIG/MAG-Absaugbrennern Anwendung. Für WIG-Absaugbrenner gibt es bisher keine in der Norm festgeschriebenen Leistungswerte. Als einziges europäisches Land hat bisher Frankreich eine Verwendung der Formel im WIG-Bereich festgeschrieben.

Eine sehr gute Zusammenfassung der Norm findet sich im Merkblatt 1208 des DVS mit dem Titel „Brennerintegrierte Schweißrauchabsaugung - Technische und normative Anforderungen“.

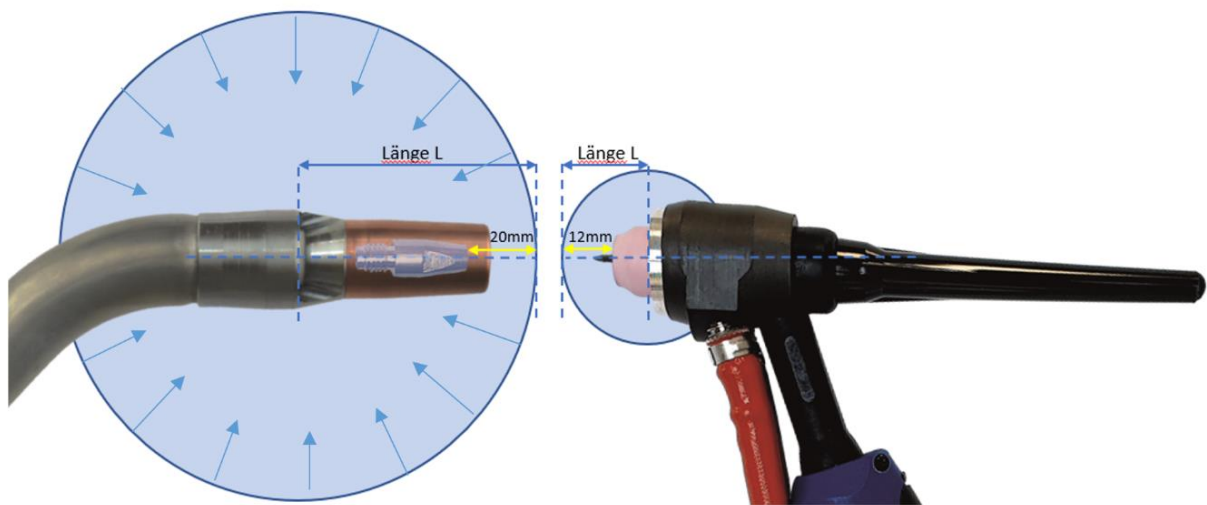


Abb. 3: Länge L und das theoretische Saugfeld bei MIG/MAG-Absaugbrennern (europäische Gesetzgebung) und WIG-Absaugbrennern (Frankreich) [5]

Die Formel zur Berechnung der theoretischen Geschwindigkeit lautet:

$$v = \frac{Q}{4\pi L^2}$$

Q: gemessenes Absaugvolumen.

L: Entfernung zwischen der äußersten Entfernung der Absaugöffnungen und einem Punkt 20 mm vor der Stromdüse. Besitzt der Brenner abnehmbare Absaugdüsen, wird der größtmögliche Wert gewählt.

Die Formel lässt sich für zwei Berechnungen nutzen. Diese sollen anhand eines Rechenbeispiels für den ENGMAR-Absaugbrenner FRM 380 mit einer Nennleistung von 340 A bei CO₂/Argon aufgezeigt werden (Abb. 4).

Nutzt man die vorgegebene Mindestgeschwindigkeit von 0,35 m/s, ergibt sich das Mindestabsaugvolumen, das bei der Länge L des Brenners notwendig ist. Wird an einer Absauganlage ein Wert $\geq 92 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht, so ist diese Konstellation mit der Norm konform. Im anderen Fall lässt sich jeweils die exakte induzierte Geschwindigkeit bei einem gemessenen Absaugvolumen ermitteln.

Unter Verwendung der Mindestgeschwindigkeiten von 0,25 m/s bzw. 0,35 m/s ergibt sich eine Kurve, anhand welcher sich der erforderliche Volumenstrom an der Absaugdüse in Abhängigkeit des Wertes L ermitteln lässt.

Bei einem FRM 380 Brenner liegt der **L-Wert bei 76mm.**

Die Formel lässt sich für zwei Berechnungen nutzen:

...um die induzierte Geschwindigkeit bei einem gemessenen Volumenstrom zu ermitteln:

$$v = \frac{Q}{4\pi L^2}$$

...um den notwendigen Volumenstrom zu ermitteln:

$$v = \frac{Q}{4\pi L^2}$$

$$v = \frac{95 \text{ m}^3/\text{h}}{4\pi(0,076 \text{ m})^2}$$

$$v = 1308,84 \text{ m/h} \quad | :3600$$

$$v = \underline{0,36 \text{ m/s}}$$



$$Q = v \cdot 4\pi L^2$$

$$Q = 0,35 \text{ m/s} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 0,076 \text{ m}^2$$

$$Q = 0,0254042 \text{ m}^3/\text{s} \quad | \cdot 3600$$

$$Q = \underline{91,46 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Abb. 4: Nutzung der Berechnungsformel der induzierten Geschwindigkeit [6]

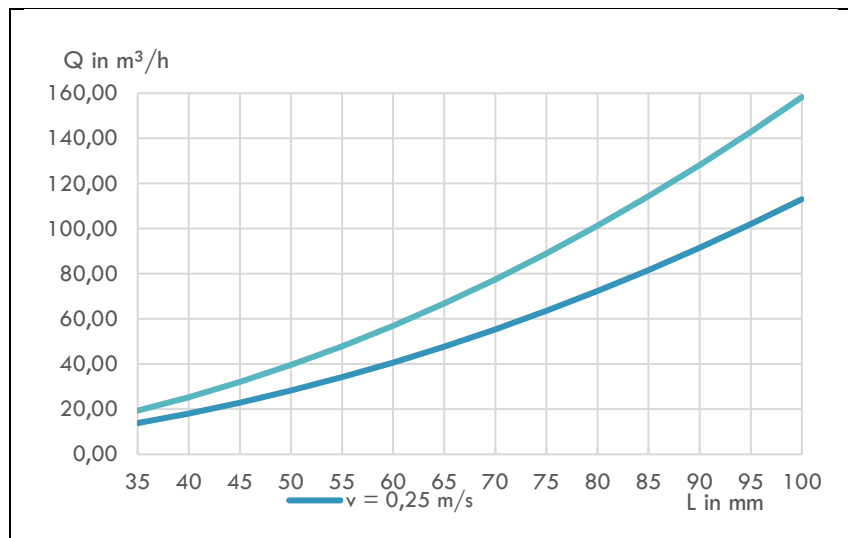


Abb. 5: Mindestvolumenstrom an der Absaugdüse [7]

In der Theorie lässt sich auch einfach die induzierte Geschwindigkeit innerhalb des durch „L“ definierten Absaugbereich messen. Dieser Wert ist aber sehr störanfällig: Querströmungen, Temperaturunterschiede oder Luftwiderstände können den gemessenen Wert stark verfälschen. Aus diesem Grund sind die französischen Berufsgenossenschaften von der direkten Messung wieder abgerückt. Hier gibt es eine Norm über die anzuwendende Methodik für die Ermittlung des Absaugvolumens, die eine Vergleichbarkeit der Messwerte und der berechneten induzierten Geschwindigkeit gewährleisten soll. Eine solche Normung gibt es in Deutschland bisher nicht.

Die Hersteller von Absaugbrennern sind laut der DIN EN ISO 21904 [8] dazu verpflichtet, das Absaugvolumen an der Gasdüse, am Anschlussstutzen der Absaugung, sowie den hierfür notwendigen Unterdruck anzugeben. In der Norm ist der maximale Unterdruck mit 18.000 Pascal angegeben; Ziel ist hier lediglich die Energieeinsparung.

Durch die Angabe dieser drei Werte soll erreicht werden, dass eine Eignung von Absauggerät und -brenner gewährleistet werden kann. Hintergrund ist hier, dass im Brenner selbst der höchste Druckverlust stattfindet und es gleichzeitig je nach Brenner durch Undichtigkeit mitunter zu einem hohen Abfall des Absaugvolumens kommen kann. Für die Anbieter von Absaugsystemen bzw. für die Endkunden soll damit Transparenz geschaffen und die Auslegung von zentralen Systemen bzw. die Auswahl eines mobilen Absauggerätes erleichtert werden.



Abb. 6: Pflichtangaben nach DIN EN ISO 21904 [8]

Die Anbieter von mobilen Absauggeräten dagegen geben oftmals den maximalen Unterdruck und das maximale Absaugvolumen an. Beide Werte sind für eine Prüfung, ob der Absaugbrenner an dem Gerät die entsprechende Leistung liefern kann, ungeeignet: Sie spiegeln lediglich die maximale Saugleistung ohne angeschlossenen Brenner und damit ohne Unterdruck, bzw. den Maximaldruck bei minimaler Absaugleistung wider. Je nach Motorkurve des eingebauten Ventilators kann das Absaugvolumen unter Umständen nach Anschluss des Brenners so niedrig sein, dass die notwendigen Leistungswerte nicht mehr erreicht werden können. Die Motorkurve wird heute nur selten vom Hersteller kommuniziert. Es bleibt daher in der Praxis nur ein Weg, eine dauerhafte Eignung zu prüfen: Testen Sie sowohl den Brenner als auch die Absauglösung und prüfen Sie die Kompatibilität beider Elemente.

4.2. Was ist bei der Arbeit mit Absaugbrennern zu beachten?

In der Gefährdungsbeurteilung sind nicht nur Gefahrstoffe, sondern auch Arbeitspositionen, die Muskel-Skelett-Erkrankungen auslösen können, zu berücksichtigen. Nutzen Sie das Projekt, um die Arbeitsposition des Schweißers zu verbessern und gleichzeitig die Akzeptanz der Absaugbrenner zu erhöhen.

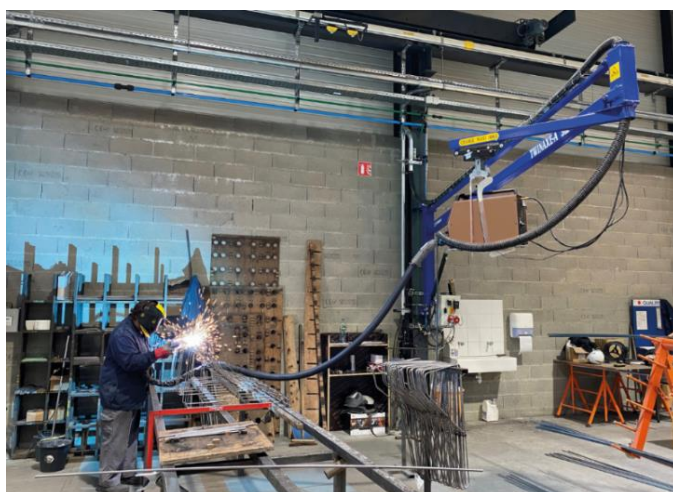


Abb. 7: Ergonomisch eingerichteter Schweißarbeitsplatz [9]

Anders als bei Standardbrennern ist die Brennerposition bei Absaugbrennern für die Nahtqualität von großer Bedeutung. Je flacher der Brenner gehalten wird, desto grösser ist die Gefahr, dass das Schutzgas den Schweißrauch aus den Absaugbereich bläst. Eine Position zwischen 45° und 70° ist deshalb einzuhalten.

Bei Brennern mit integrierter Absaugung muss zwischen Absaugung und Schutzgasglocke ein geeignetes Gleichgewicht gefunden werden. Grundsätzlich gilt: Bei Brennern mit geringerem L-Maß ist das Risiko, das Schutzgas abzusaugen größer, weil sich die Absaugung in unmittelbarer Nähe des Lichtbogens befindet. Gleichzeitig darf bei Absaugbrennern das Schutzgas nicht beliebig hoch eingestellt werden: Bei einem Zuviel an Schutzgas kann der Schweißrauch mitunter aus dem Absaugbereich herausgeblasen werden. Eine Verringerung des Schutzgasvolumens bringt in solchen Fällen eine echte Verbesserung des Absaugergebnisses und der Nahtgüte. Grundsätzlich sollte die Schutzgasmenge immer vor dem Schweißen direkt an der Gasdüse mit Hilfe eines Gasmengenmesser überprüft werden. Eine Schulung der Schweißer sollte deshalb Bestandteil des Projektes sein.

Je nach Geometrie des Werkstückes haben sich bei engen Winkeln, in denen die Absauggeschwindigkeit durch die Einschränkung des Saugfeldes sehr groß wird, Nebenluftöffnungen oder Taster, die die Absaugung kurzzeitig ausschalten, bewährt. Dies gilt vor allem dann, wenn das L-Maß sehr gering ist. Die Anwendung sollte an den jeweiligen Werkstücken bereits in der Projektphase getestet werden.

5. Fazit

Der Schutz der Schweißer ist in den letzten Jahren immer weiter in den Fokus der Gesetzgebung gerückt. Vor dem Hintergrund strengerer Grenzwerte kommt dabei der brennerintegrierten Absaugung eine immer größere Bedeutung zu. Sie sind vielfältig einsetzbar und bieten auch in schwierigen Schweißpositionen verglichen mit anderen Lüftungstechnischen Maßnahmen den besten Schutz. Dieser kann jedoch nur gewährleistet werden, wenn die gewählte Absauglösung die für den Brenner notwendigen Leistungsparameter, d.h. das notwendige Absaugvolumen bei einem bestimmten Unterdruck erbringen kann. Ein Test beider Elemente ist deshalb unabdingbar.

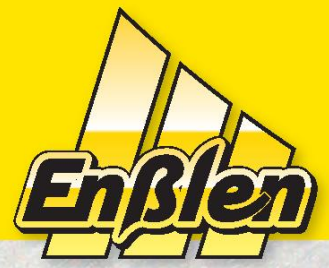
Natürlich bedürfen Absaugbrenner einer Veränderung und Anpassung der gewohnten Arbeitsabläufe. Solche Veränderungen sind nur in Zusammenarbeit mit den Schweißern umzusetzen, weshalb Versuche mit Brennern und Absauglösungen in der gewohnten Arbeitsumgebung und an den jeweiligen Werkstücken deshalb sehr wichtig sind. Um die Produktivität hier weiter zu optimieren, empfiehlt es sich je nach Arbeitsweise, Werkstücken und Prozessen auch die Ergonomie des Arbeitsplatzes mit in die Überlegungen einzubeziehen.

6. Literatur

- [1] Eigene Darstellung, vgl. auch TRGS 528.
- [2] Vgl. § 7 GefStoffV sowie Absatz 4 TRGS 528.
- [3] Eigene Darstellung.
- [4] DIN EN ISO 21904-1:2020-06: Arbeits- und Gesundheitsschutz beim Schweißen und bei verwandten Verfahren - Einrichtungen zum Erfassen und Abscheiden von Schweißrauch - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 21904-1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 21904-1:2020. Beuth-Verlag.
- [5] Eigene Darstellung nach DIN EN ISO 21904 sowie Vorschriften der CARSAT.
- [6] Eigene Darstellung.
- [7] Merkblatt DVS 1208 (04/2021): Brennerintegrierte Schweißrauchabsaugung - Technische und normative Anforderungen. <https://www.dvs-regelwerk.de>.
- [8] Vgl. DIN EN ISO 21904 bzw. DVS Merkblatt 1208.
- [9] Eigene Darstellung, Modell TWINAXE der Firma ENGMAR.



Für jeden Einsatz!



Schweißtechnik
Pumpen
Elektromotoren

Leistungsstarke Multiprozessmaschinen

Fabricator EM 401i/501i

- hoher Wirkungsgrad
- energieeffizient
- robust
- einfaches Handling



Aristo 500 ix

- innovativer Drahtvorschub Robust-Feed
- Die perfekte Lösung für anspruchsvolles Impulsschweißen!



Diese neuen Highlights von ESAB gleich hier in der Ausstellung erkunden!

Beratung unter Telefon: 0 39 31 - 64 92 11

www.ensslen-gmbh.de • info@ensslen-gmbh.de • Enßlen GmbH • Daimlerstraße 6 • 39576 Stendal

Schweißzusatzwerkstoffe der Extraklasse

Schweißtechnik
Pumpen
Elektromotoren

- Wir gewährleisten sehr gute Qualität und liefern auch in schwierigen Zeiten.
- Zeit- und Kostenersparnis durch beste Qualität
- alles aus einer Hand
- PURUS – unser Premium-Massivdraht für unlegierte Stähle



- PURUS sichert Prozessstabilität, stabile Lichtbögen
- geringe Silikatbildung und Spritzerausbringung
- perfekte Nähte ersparen Nacharbeiten
- hohe Effektivität mit den hochwertigen PURUS-Produkten



- OK 48.08 – die basischumhüllte Universalelektrode mit sehr guten Schweißigenschaften, speziell für das Schweißen von unlegierten und Feinkornstählen. Typische Anwendungsgebiete sind Stahl- und Behälterbau. Geeignet für alle Schweißpositionen.
- Die Lieferung erfolgt ausschließlich im VacPac und erspart so das Rücktrocknen.

Noch Fragen? Besuchen Sie unseren Stand im Foyer.

Beratung:

Enßlen GmbH · Daimlerstraße 6 · 39576 Stendal

Telefon: (0 39 31) 64 92 -11

www.ensslen-gmbh.de · info@ensslen-gmbh.de

Geöffnet: Montag bis Freitag: 7:00 bis 16:00 Uhr

Optimierungspotenziale bei der Auswahl von Draht/Schutzgas-Kombinationen beim MAG-Schweißen unlegierter Stähle

L. Riehl und R. Paschold, Langenfeld

1. Einleitung

In Zeiten stetig steigender Anforderungen hinsichtlich Qualität, Produktivität und vor allem Arbeits- und Gesundheitsschutz kann - neben Auswahl des Schweißprozesses und der zugehörigen Parameter sowie Nahtvorbereitung - die richtige Auswahl von Draht/Gas-Kombinationen zum MAG-Schweißen unlegierter Stähle einen nennenswerten Beitrag zur Optimierung des gesamten Prozesses leisten. Dies gilt sowohl für neue Projekte als auch bestehende Anwendungen. Hier kann es ebenfalls lohnend sein, die bestehende Auswahl in Abhängigkeit der Anwendung und der individuellen Anforderungen auf den Prüfstand zu stellen.

2. Parameter für die Auswahl von Schutzgas/Draht-Kombinationen zum MAG-Schweißen

Bei der Auswahl der Draht/Gas-Kombination zum MAG-Schweißen unlegierter Stähle existieren diverse Freiheitsgrade, die z.T. einen erheblichen Einfluss der o.g. Optimierungspotenziale haben können. Zu diesen zählen primär:

- Chemische Analyse des Schweißzusatzes,
- Schutzgaszusammensetzung,
- Oberflächenausführung der Drahtelektrode,
- Drahtdurchmesser,
- Steifigkeit und Durchmessertoleranz des Drahtes,
- Lieferform, wie Spule oder Großgebinde.

Die genannten Punkte beeinflussen in ihrer Gesamtheit die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Verbindung, Nahtbild und Einbrandverhalten, Produktivität und Aufwand für Nacharbeit, Schweißrauchemissionen und -zusammensetzung. Desweiteren wirken sich die genannten Aspekte sowohl direkt als auch indirekt auf die Schweißkosten aus.

An dieser Stelle sei vorab der wichtige Hinweis angebracht: Änderungen der chemischen Sollzusammensetzung des Schweißdrahtes, seines Durchmessers und/oder der Schutzgaszusammensetzung machen eine Anpassung der Schweißparameter und je nach Grad der Veränderung ggf. eine neue Verfahrensprüfung erforderlich [1]. Hier muss jeweils im Einzelfall beurteilt werden, inwieweit Kosten und Nutzen in einem angemessenen Verhältnis stehen.

3. Chemische Analyse der MAG-Drahtelektrode

Die Wahl des Schweißzusatzes wird primär durch die eingesetzten Grundwerkstoffe und die Anforderungen an Festigkeit und Zähigkeit der Verbindung unter Betriebsbedingungen bestimmt, die sich aus diversen Regelwerken oder auch dem Umfang von zugehörigen Zulassungen und Eignungsprüfungen ergeben können. Der gewählte Schweißzusatz muss die Anforderungen an das Schweißgut sicher und reproduzierbar erfüllen – diese Voraussetzung ist für einen überwiegenden Teil der Standardanwendungen beim Schutzgasschweißen typischer unlegierter Stähle (z.B. S355J2, P355N u. ä.) gegeben und unter Beachtung des Standes der Technik als unkritisch zu bewerten.

Im Allgemeinen ist die chemische Zusammensetzung der Drahtelektrode oder des Schweißgutes für den Anwender wenig relevant. Ausnahmen bilden Anwendungen mit besonderen Anforderungen an die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes wie Lagertanks und Rohrleitungen für besondere Medien wie Sauer gas oder Ammoniak, das Schweißen vor dem Verzinken und andere, wo die Analysegrenzen des Schweißgutes besonders spezifiziert werden.

Für das Schutzgasschweißen unlegierter Stähle mit Mindeststreckgrenzen von typischerweise max. 460 MPa stehen dem Anwender eine Vielzahl verschiedener kommerziell verfügbarer Massivdrahtelektroden zur Auswahl. Der überwiegende Teil der Schweißzusätze ist hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung in Übereinstimmung mit der DIN EN ISO 14341 [2] genormt (Tabelle 1). Innerhalb dieser Norm werden unter dem jeweiligen Kurzzeichen für die chemische Zusammensetzung Analysegrenzen für die Hauptlegierungselemente Kohlenstoff (C), Silizium (Si) und Mangan (Mn) ausgewiesen, sowie Höchstwerte für zulässige Anteile 9 weiterer Elemente, u.a. Schwefel (S) und Phosphor (P) festgelegt.

Tabelle 1: DIN EN ISO 14341:2020-12, Tabelle 3A – Chemische Zusammensetzung in % (Auszug).

Kurzzeichen	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu*	Al	Ti+Zr
G 2Si		0,5-0,8	0,9-1,3									
G 3Si1	0,06-0,14	0,7-1,0	1,3-1,6	≤0,025	≤0,025	≤0,15	≤0,15	≤0,15	≤0,03	≤0,35	≤0,02	≤0,15
G 4Si1		0,8-1,2	1,6-1,9									

* Kupferanteil inklusive Verkupferung

Die Hersteller von Schweißzusätzen sind frei, ihre Produkte innerhalb der durch die Norm vorgegebenen Grenzen weiter einzuschränken, bspw. für Begleitelemente wie Al, Ti, Zr, S, Cu. Dies wird in der Praxis auch so gehandhabt und kann auch solche Begleitelemente betreffen, die von der Norm nicht betrachtet werden, aber dennoch einen Einfluss auf das Prozessverhalten haben, z.B. Ca, Mg, O, N oder B.

Um Aufhärtungen zu vermeiden, kann Kohlenstoff als Festigkeitsträger nur begrenzt eingesetzt werden. Hauptelemente für die Festigkeitseigenschaften des Schweißgutes sind Mangan und Silizium. Das Verhalten im Lichtbogen und somit die Schweißigenschaften der Drahtelektrode werden durch ein optimales Mn/Si-Verhältnis innerhalb der vorgegebenen Grenzen eingestellt.

Die Hauptlegierungselemente C, Mn und Si bestimmen als maßgebliche Festigkeitsträger die erzielbaren mechanisch-technologischen Eigenschaften des Schweißgutes. Festigkeit und Zähigkeit steigen i.d.R. mit zunehmendem Legierungsanteil an. Die tatsächlich erreichbaren Gütewerte müssen jedoch immer im Kontext des verwendeten Schutzgases betrachtet werden, da diese durch Abbrand von Legierungselementen, Einschluss von Mikroschlacken und Sauerstoffaufnahme in das Schweißgut mit zunehmenden Aktivanteilen wie CO₂ und/oder O₂ signifikant abnehmen (Tabelle 2). Das Zähigkeits-Maximum ist allgemein bei ca. 400 ppm Sauerstoffgehalt im Schweißgut zu erwarten [3].

Begleitelemente beeinflussen die mechanischen Eigenschaften der Verbindung ebenfalls. Insbesondere Schwefel wirkt sich mit zunehmenden Gehalten negativ auf die Zähigkeitseigenschaften des Schweißgutes aus, indem dieses Element die Bildung von Nadelferrit hemmt [4]. Wie nachfolgend beschrieben, kann eine Analyseeinschränkung hinsichtlich des (Mindest-)Schwefel-Gehalts und weiterer, nicht durch die ISO-Normen betrachteten Mikrolegierungselementen aber je nach Anforderungen durchaus wünschenswert sein [5].

4. Mechanisch-technologische Eigenschaften des Schweißgutes

Es ist aus verschiedenen Gründen sinnvoll, eine Massivdraht/Gas-Kombination zu wählen, welche die Anforderungen an die mechanisch-technologische Eigenschaften des Schweißgutes zuverlässig erfüllt, jedoch nicht – wie in der Praxis häufig beobachtet – übererfüllt. Beispielsweise ist die Drahtelektrode DIN EN ISO 14341-A – G 4Si1 häufig in Kombination mit dem Schutzgas DIN EN ISO 14175 – M21-ArC-18 [6] anzutreffen, das resultierende Schweißgut kann nach Norm als DIN EN ISO 14341-A – G 46 5 M21 4Si1 klassifiziert werden. Das Schweißgut liefert eine Mindeststreckgrenze von 460 MPa und ist für Stähle wie P355/S355 mit Mindeststreckgrenzen von 355 MPa somit eigentlich „überdimensioniert“ (Tabelle 2).

Tabelle 2: Mechanisch-technologische Eigenschaften reiner Schweißgüter typischer Draht/Schutzgaskombinationen nach DIN EN ISO 14341-A [2]

Draht-elektrode ISO 14341-A	Schutzgas ISO 14175	Reines Schweißgut ISO 14341-A	Mindeststreck- oder Mindestdehngrenze ReL / Rp0,2 in MPa	Zugfestigkeit Rm in MPa	Mindestbruch- Dehnung As in %	Temperatur für KV ≥ 47 J T in °C
G 2Si	C1	G 35 2 C1 2Si	355	440-570	22	-20
	M21-ArC-18	G 38 3 M21 2Si	380	470-600	20	-30
G 3Si1	C1	G 38 3 C1 3Si1	380	470-600	20	-30
	M21-ArC-18	G 42 4 M21 3Si1	420	500-640	20	-40
	M20-ArC-10 M20-ArC-8	G 42 4 M20 3Si1	420	500-640	20	-40
G 4Si1	C1	G 42 3 C1 4Si1	420	500-640	20	-30
	M21-ArC-18	G 46 5 M21 4Si1	460	530-680	20	-50

Eine unnötig hohe Festigkeit respektive ein höherer Anteil an Legierungselementen bringen praktisch keine Vorteile, da der schwächste Punkt der Verbindung üblicherweise in der WEZ zu finden ist und auch bei dynamischer Beanspruchung führt eine Erhöhung der Schweißgutfestigkeit zu keiner Zunahme der Dauerfestigkeit. Gründe, welche hingegen für ein „Downgrade“ sprechen, werden nachfolgend näher erläutert. Tabelle 2 zeigt die Mindestanforderungen an das Schweißgut im geschweißten Zustand. Wird nach dem Schweißen eine Wärmenachbehandlung wie z. B. Spannungsarmglühen durchgeführt, ist dies bei der Auswahl der Drahtelektrode zu berücksichtigen. Durch das Glühen werden die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften des Schweißgutes beeinträchtigt. Daher sind die Angaben der Hersteller und die entsprechenden Zulassungen für den wärmebehandelten Zustand zu beachten.

5. Auswahl des Schutzgases

Neben der Auswahl des Schweißzusatzes mit seinen Merkmalen chemische Analyse, Oberflächenausführung und Durchmesser ist das verwendete Schutzgas von elementarer Bedeutung für das MAG-Schweißen. Das Schutzgas bietet entsprechende Möglichkeiten, den Prozess und seine Ergebnisse zu beeinflussen sowie in Abhängigkeit der Anforderungen zu optimieren.

Dem Anwender stehen für das Schweißen un-, niedrig- und mittellegierter Stähle diverse kommerziell verfügbare, zumeist innerhalb der DIN EN ISO 14175 [6] genormte Argon-Gemische mit üblicherweise bis zu 3 Komponenten zur Auswahl, die meist gebräuchlichen Schutzgase sind in Tabelle 3 enthalten.

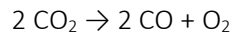
Tabelle 3: Meist verwendete Schutzgase zum MAG-Schweißen nach DIN EN ISO 14175 [6]

Symbol	Komponenten in Volumen-Prozent			Typische Gemische nach ISO 14175
	CO ₂	O ₂	Inert Ar	
C1	100			C1
M20	5-15		Rest	M20-ArC-8 M20-ArC-10
M21	15-25		Rest	M21-ArC-18

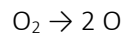
Für geltende Verfahrensprüfungen ist eine Abweichung von relativ ±20 % bezogen auf den CO₂-Anteil im Schutzgas zulässig, siehe DIN EN ISO 15614-1 [1]. Größere Veränderungen, zum Beispiel der Wechsel von M21-ArC-18 auf M20-ArC-8, machen eine neue Verfahrensprüfung erforderlich.

Mit steigendem Aktivanteil im Schutzgas nehmen der Abbrand von Legierungselementen und der Sauerstoffgehalt im Schweißgut zu. Mit fallendem CO₂/O₂-Anteil im Schutzgas nehmen Festigkeit und Zähigkeit tendenziell zu.

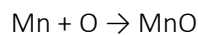
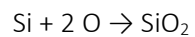
Das im Schutzgas enthaltene Kohlendioxid (CO₂) dissoziiert zunächst unter Aufnahme von Wärme aufgrund der hohen Temperaturen des Lichtbogens:



Aus molekularem Sauerstoff entsteht in Abhängigkeit von der Temperatur im Lichtbogenplasma zu einem Teil atomarer Sauerstoff:



Mit zunehmendem Sauerstoffangebot nimmt der Umfang der Gasreaktionen mit dem Schweißgut zu. Diese laufen zum überwiegenden Teil im Tropfenstadium an der Elektrodenspitze ab [4]. Die Tropfenreaktionen beim MAG-Schweißen mit unlegierten Massivdrahtelektroden umfassen in vereinfachter Form vorrangig:



Daraus ergibt sich ein maßgeblicher Einfluss des Gehaltes an Aktivkomponenten im Schutzgas auf die Menge an Oxiden (Silikaten), welche nach Erstarren des Schweißgutes auf der Nahtoberfläche verbleiben. Die Reduktion des CO₂/O₂-Anteils im Schweißgut stellt die mit Abstand wirksamste Maßnahme zur Verringerung des Silikat-Aufkommens dar. O₂ wirkt ca. dreimal stärker oxidierend als CO₂-Zumischungen gleichen prozentualen Anteils [7], weshalb im Rahmen einer Optimierung hinsichtlich verringerter Nacharbeit Ar/CO₂-Gemische zu bevorzugen sind. Insbesondere bei Einsatz eines Schutzgases mit kleinerem Aktivanteil bietet sich die gleichzeitige Verwendung einer Drahtelektrode mit geringerem Gehalt an Legierungselementen an.

Mit abnehmendem CO₂-Anteil im Gasmisch nimmt die Gefahr der Porenbildung tendenziell zu. Dies hängt u.a. vom Einbrandprofil und den damit verbundenen Entgasungsbedingungen ab.

Der Einfluss des Schutzgases auf die Spritzerbildung, Oxid- und Silikat-Ablagerungen, Schweißrauchemissionen, etc. wird in den nachfolgenden Absätzen berücksichtigt.

6. Spritzerbildung beim MAG-Schweißen

Neben den Fördereigenschaften, welche maßgeblich von Art und Qualität der Oberflächenausführung und weiterer Faktoren wie Geometrie und Festigkeit des Drahtes abhängen, spielt auch die chemische Zusammensetzung von unlegierten Massivdrahtelektroden eine Rolle im Hinblick auf die Spritzerbildung. Dies betrifft sowohl die Menge des Spritzeraufkommens als auch die Größe einzelner Schweißspritzer.

Beim MAG-Schweißen entstehende Spritzer sind nicht nur Folge von Kurzschlüssen, sondern können auch durch einen asymmetrischen Tropfenübergang bedingt sein [8]. Tropfengröße und -übergang hängen unter anderem von der Oberflächenspannung und Viskosität des schmelzflüssigen Tropfens an der Elektrodenspitze ab. Oberflächenaktive Elemente aus der Gruppe der Chalkogene wie Sauerstoff und Schwefel haben bereits im ppm-Bereich einen erheblichen Einfluss auf diese beiden physikalischen Größen und setzen sie mit steigenden Sauerstoff- und Schwefelgehalten herab [9], wodurch ein zunehmend feintropfiger und axialer Tropfenübergang gefördert wird. Die Größe entstehender Spritzer nimmt ebenfalls ab. Dabei ist aber der bei Schmelztemperatur freie und gelöste Sauerstoff maßgebend. Die Bindungsform hat dabei einen größeren Einfluss auf die Tropfenbildung als die Aktivkomponente aus dem Schutzgas. Begleitelemente, wie beispielsweise Al, Ca, und Mg, welche auch bei hohen Temperaturen stabile Oxide bilden, senken den Gehalt an freiem Sauerstoff im Tropfenstadium ab und erhöhen somit die Oberflächenspannung und Viskosität des Tropfens. Ein zunehmend grobtropfiger, radial ausgerichteter und damit auch zunehmend spritzerbehafteter Tropfenübergang ist die Folge [4].

Für beste Ergebnisse in der Praxis ist neben der Auswahl und Abstimmung des optimalen Schweißprozesses für den benötigten Leistungsbereich der Einsatz einer Drahtelektrode mit strenger Analyseinschränkung hinsichtlich der durch die einschlägigen Normen nicht vorgegebenen, aber dennoch relevanten Mikrolegierungs- und Begleitelemente empfehlenswert.

Auch die Wahl des Schutzgases hat entscheidenden Einfluss auf die Spritzerbildung beim MAG-Schweißen. Mit abnehmender Zumischung von CO₂ zu Argon werden die Kraftwirkung auf die Drahtelektrode und die Einschnürung des Lichtbogens vermindert, die Kurzschlussfrequenz nimmt ab. Unterhalb eines CO₂-Anteils von ca. 10 % stellt sich im Sprühlichtbogen ein zunehmend symmetrischer Tropfenübergang ein – das Spritzeraufkommen kann gegenüber dem Einsatz eines Gases des Typs M21 mit beispielsweise 18 % CO₂ reduziert werden. Zur Erzielung einer hohen Lichtbogenstabilität und Reduktion von Kurzschlüssen sind Mindestanteile von 2,5 % CO₂ bzw. 1,5 % O₂ im Schutzgas erforderlich [8].

7. Einbrand, Anfließverhalten und Spaltüberbrückung

Mit fallendem CO₂-Anteil im Schutzgas wird das Einbrandprofil zunehmend schmaler und tiefer, Flankeneinbrand und Einbrand in Zwangspositionen nehmen ab. Mit steigenden CO₂-Gehalten, insbesondere oberhalb von 10 %, wird der Einbrand breiter und runder. In der Praxis kann mit Schutzgasen des Typs M20 mit 8-10 % CO₂ ein zufriedenstellender Flankeneinbrand erzielt werden. Diese Gemische stellen für eine Vielzahl der Anwendungen einen optimalen Kompromiss dar. Darüber hinaus bieten die Hersteller von Schutzgasen verschiedene Gasgemische für spezielle Anwendungen an.

Beispielsweise kann bei großen Blechdicken oder hohen Schweißgeschwindigkeiten die Wahl von Dreikomponenten-Gasen mit He-Zumischung (z.B. DIN EN ISO 14175 – M20-ArHeC-30/10) eine Option sein. Helium bewirkt eine Defokussierung des Lichtbogens und einen höheren Wärmeeintrag in den Grundwerkstoff, wodurch der Flankeneinbrand verbessert wird [8]. Gleichzeitig können die Vorteile eines Gases mit geringerer Aktivkomponente weitestgehend beibehalten werden.

Eine Verringerung des CO₂-Anteils kann sich zudem positiv auf das Nahtbild auswirken. Aufgrund der reduzierten Kraftwirkung des Lichtbogens und des zunehmend gerichteten Tropfenübergangs können im Sprühlichtbogen gewünschte a-Maße zuverlässiger erzielt und die Nahtüberhöhung reduziert werden [8].

Ein höherer Anteil oberflächenaktiver Legierungs- und Begleitelemente, die die Oberflächenspannung erhöhen, hat bei gleichen Prozessbedingungen einen negativen Einfluss auf das Anfließverhalten. Elemente, die die Oberflächenspannung senken, sind für das Anfließverhalten förderlich. Aufgrund der geringeren Oberflächenspannung und Viskosität der Schmelze können insbesondere bei Kehlnähten die Nahtüberhöhung reduziert und weichere Übergänge zum Grundwerkstoff erzielt werden, darüber hinaus sind höhere Schweißgeschwindigkeiten realisierbar. Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass die Toleranz gegenüber Kantenversatz zunimmt [10]. Dies ist vor allem bei vollmechanisierten und Roboter-Schweißprozessen relevant und kann in Grenzbereichen zu einer Verringerung von Ausschuss führen. Unzureichendes Anfließverhalten des Schmelzbades kann zu ungünstigen, überhöhten Nahtgeometrien sowie schrofferen Nahtübergängen führen und sich insbesondere aufgrund der höheren Kerbwirkung nachteilig auf die Dauerfestigkeit von geschweißten Komponenten auswirken.

Zu beachten ist ebenfalls, dass Schweißgüter mit geringerer Viskosität tendenziell eine schlechtere Spaltüberbrückbarkeit aufweisen. Im Falle von Überlappnähten mit schwankenden Spaltmaßen wäre daher ein Schweißzusatz mit entsprechender Analyseinschränkung zu bevorzugen, der eine höhere Oberflächenspannung und Viskosität der Schmelze erzeugt. Die Viskosität des Schmelzbades wird insbesondere durch Schwefel, Sauerstoff und Silizium herabgesetzt [11]. Maßgebliche Quellen hierfür stellen Draht, Grundwerkstoff und Schutzgas dar.

8. Nacharbeit

Höhere Anteile an desoxidierenden Elementen, dies sind in unlegierten Massivdrahtelektroden vorrangig Silizium (Si) und Mangan (Mn) (teilweise auch Al, Ti und Zr), bedingen eine stärkeren Abbrand dieser Legierungselemente. Nach Reaktion mit freiem Sauerstoff in der Lichtbogenatmosphäre finden sich diese Elemente aufgrund der hohen Abkühlgeschwindigkeiten in Form von Mischoxiden auf der Nahtoberfläche des erstarrten Schweißgutes wieder.

Je nach Menge, Verteilung und Entfernbarekeit können diese „Silikat-Inseln“ einen nennenswerten Reinigungsaufwand bedingen und sich bei anschließender Lackierung (z.B. KTL) oder Verzinkung qualitätsmindernd auswirken, bzw. im Betrieb Ansatzstellen für Korrosion darstellen. Insbesondere beim Schweißen dickwandiger Komponenten summiert sich die Menge an Silikaten auf der Oberfläche mit jeder geschweißten Lage auf. Um das Auftreten von Qualitätsmängeln zu vermeiden, kann eine Zwischenreinigung erforderlich werden. Da die nichtleitenden Oxide auch die Lichtbogenzündung zunehmend erschweren, können sich die erforderlichen Prozessunterbrechungen zur Reinigung somit negativ auf die Produktivität auswirken.

Aus diesem Grunde kann es in gewissen Anwendungsfällen sinnvoll sein - unter Berücksichtigung der Anforderungen - in einem ersten Schritt der Gesamt-Prozessoptimierung auf einen Schweißzusatz mit einem geringeren Anteil desoxidierender Elemente zu wechseln.

Dies kann bedeuten, anstatt eines Drahtes mit Sollzusammensetzung nach DIN EN ISO 14341-A - G 4Si1 einen Schweißzusatz mit dem Kurzzeichen G 3Si1 oder G 2Si mit geringeren Anteilen an Oxidbildnern (Si, Mn) einzusetzen, Tabelle 1. Dies ist auch in der Praxis bereits häufig erfolgreich umgesetzt worden. Neben einer Reduzierung des Silikataufkommens und der damit verbundenen Steigerung der Produktivität und Qualität, bietet der Einsatz von niedriger legierten Drahtelektroden zusätzlich ein - wenn i.d.R. auch geringes - Kosteneinsparpotenzial.

Innerhalb derselben Normenteilung kann durch Verwendung eines Schweißzusatzes mit spezieller Analyseinschränkung zusätzliches Optimierungspotenzial genutzt werden. Zum einen können die Anteile von Silizium und Mangan innerhalb der in DIN EN ISO 14341 [2] vorgegeben Grenzen besonders eingegrenzt werden. Zum anderen können durch strenge Kontrolle von Mikrolegierungselementen die Strömungsverhältnisse des Schmelzbades und damit auch die Verteilung und Entfernbarekeit von Silikaten in einem gewissen Rahmen beeinflusst werden, Bilder 1 bis 4.

Bei gleicher, verbindlicher Normbezeichnung und gleicher chemischer Soll-Zusammensetzung ist beim Wechsel des Schweißzusatzes auf ein anderes Produkt oder einen anderen Hersteller bei Einsatz von Massivdrahtelektroden keine neue Verfahrensprüfung nach DIN EN ISO 15614-1 [1] erforderlich.



Abb. 1: Eine 3-lagige Kehlnaht, geschweißt mit einem G 4Si1 Ø1,2 mm ohne Analyseinschränkung, Schutzgas M21-ArC-18, zeigt ein hohes Aufkommen an Oxiden/Silikaten auf der Oberfläche, schwer entfernbar



Abb. 2: Eine 3-lagige Kehlnaht, geschweißt mit einem G 4Si1 Ø1,2 mm mit besonderer Analyseinschränkung (ESAB Purus 46), Schutzgas M21-ArC-18, zeigt ein günstigeres Aufkommen an Oxiden/Silikaten auf der Oberfläche, leichter entfernbar



Abb. 3: Eine 3-lagige Kehlnaht, geschweißt mit einem G 4Si1 Ø1,2 mm, Schutzgas M21-ArC-18, zeigt ein hohes Aufkommen an Oxiden/Silikaten auf der Oberfläche, schwer entfernbar



Abb. 4: Eine 3-lagige Kehlnaht, geschweißt mit einem G 3Si1 Ø1,2 mm mit besonderer Analyseinschränkung (ESAB Purus 42 CF), Schutzgas M20-ArC-8, zeigt ein günstigeres Aufkommen an Oxiden/Silikaten auf der Oberfläche, leichter entfernbar

9. Schweißrauch

Die TRGS 528 [12] beschreibt primär Schutzmaßnahmen zur Reduzierung von Schweißrauchexposition und verweist auf die in der TRGS 900 festgelegten Arbeitsplatzgrenzwerte. Hier sind bei der schweißtechnischen Verarbeitung un- und niedriglegierter Stähle in erster Linie die Rauchemissionsrate (mg/s) sowie die als toxisch eingestufte Leitkomponente Manganoxid (A- und E-Staubfraktion) zu nennen. Als wirksamste Maßnahmen werden persönliche Schutzmaßnahmen und Lüftungstechnische Maßnahmen - insbesondere die Schweißrauchabsaugung an der Entstehungsstelle - genannt.

Kann auf ein Schweißverfahren der Emissionsgruppe „hoch“, beispielsweise das hier diskutierte MAG-Schweißen aus praktischen Gründen nicht verzichtet bzw. durch ein Verfahren mit niedrigerer Emission substituiert werden, so sollten nach Möglichkeit prozess- und werkstoffseitige Maßnahmen umgesetzt werden, um die Schweißrauchemission und den Anteil potenziell gesundheitsschädlicher Komponenten im Schweißrauch zu minimieren. Neben sehr effektiven prozesstechnischen Maßnahmen wie Einsatz des Impulslichtbogens anstatt des Sprühlichtbogens (Emissionsgruppe „mittel bis hoch“) und der nachfolgend ebenfalls betrachten Auswahl des Schutzgases, bietet der eingesetzte Schweißzusatz einen weiteren Ansatzpunkt zur Minimierung von Gefahrstoffen, hier insbesondere Manganoxid.

Tabelle 4: Schweißrauchemissionsrate und -zusammensetzung beim MAG-Schweißen, Messung für Rauchdatenblätter nach DIN EN ISO 15011-4 [13] (Gemeinschaftsprojekt der Schweißelektroden-Vereinigung SEV e.V.)

Draht- elektrode ISO 14341-A	Draht- durchmesser [mm]	Draht- oberfläche	Emissionsrate	Zusammensetzung des Schweißrauchs in % Leitkomponente			
			[mg/s]	Mn	Cu	Cr	Ni
G 2Si	1,0	verkupfert	10,0	5,39	0,28	0,04	0,05
		unverkupfert	8,4	5,19	0,12	0,04	0,06
	1,2	verkupfert	10,8	6,01	0,52	0,05	0,07
		unverkupfert	12,9	4,56	0,12	0,05	0,03
G 3 Si1	1,0	verkupfert	9,5	6,13	0,18	0,02	0,06
		unverkupfert	7,0	7,24	0,07	0,02	0,05
	1,2	verkupfert	9,5	6,31	0,35	0,06	0,07
		unverkupfert	9,7	6,76	0,12	0,04	0,05
G 4Si1	0,8	verkupfert	4,0	7,28	0,31	0,02	0,06
	1,0	verkupfert	9,0	6,41	0,28	0,04	0,04
		unverkupfert	8,4	7,06	0,06	0,06	0,05
	1,2	verkupfert	11,0	6,99	0,25	0,03	0,04
		unverkupfert	11,0	6,71	0,03	0,04	0,05
	1,6	verkupfert	11,5	7,54	0,18	0,02	0,04

Beim MAG-Schweißen bestehen Schweißrauche typischerweise zu rund 95% aus Schweißzusatz und nur einem entsprechend geringen Anteil aus Grundwerkstoff [12]. Aus diesem Grunde ist zur Reduktion der Leitkomponente Mangan im Schweißrauch beim Schweißen un- und niedriglegierter Stähle die Auswahl eines Schweißzusatzes mit möglichst geringem Mn-Anteil anzustreben. Eine Kompensation der geringeren Festigkeitseigenschaften durch Einsatz von Ni- oder Mo-legierten Typen (z.B. DIN EN ISO 14341-A - G 3Ni1 oder G 2Mo) erscheint vor dem Hintergrund einer angestrebten Reduktion von Schadstoffen wenig sinnvoll, da sowohl Nickel- als auch Molybdänoxide als toxisch und karzinogen eingestuft werden [12]. In diesem Zusammenhang erscheint die zusätzliche Auswahl eines Schutzgases mit reduzierter Aktivkomponente zielführender.

Schweißrauchdatenblätter nach DIN EN ISO 15011-4 bilden ein „Worst-Case-Szenario“ [13] ab und zeigen die höchstmögliche Schweißrauch-Emissionsrate. Da die in Tabelle 4 genannten MAG-Drähte auch

für das Schweißen mit CO₂ geeignet sind und dieses Schutzgas von den Herstellern als anwendbar empfohlen wird, ist dieses Gas als das am stärksten oxidierende für die Messung zu wählen. Es sind 90% des maximalen Schweißstromes einzustellen, der vom Hersteller empfohlen wird. Die Norm definiert weitere Bedingungen für die Prüfung.

Somit ist das Schweißrauchdatenblatt für die im Betrieb durchzuführende Gefährdungsbeurteilung nützlich, bildet aber nicht die spezifischen Bedingungen im eigenen Schweißbetrieb und damit die Exposition der Schweißenden ab (andere Schutzgase, Schweißstrombereiche, Impulsschweißen, Schweißrauchabsaugung etc.), siehe auch TRGS 528 [12].

Die ermittelten Werte in Tabelle 4 zeigen, dass die Emissionsrate im Mittel mit dem Durchmesser der Drahtelektrode zunimmt und mit zunehmendem Mangangehalt in der Drahtelektrode der Anteil der Leitkomponente Mangan im Schweißrauch zunimmt. Unverkupferte MAG-Drähte liefern erheblich geringere, aus dem Draht selbst und vom Abrieb des Stromkontaktröhres stammende Kupferanteile. Die Verwendung dünnerer unverkupfelter MAG-Drähte mit geringeren Mangangehalten kann zur Verringerung der Emissionsrate und der Anteile der Leitkomponente Mangan sowie Kupfer im Schweißrauch beitragen.

Die Schweißbedingungen und insbesondere das verwendete Schutzgas haben großen Einfluss auf die Emissionsrate. Alle Zumischungen zu Argon, insbesondere aber CO₂, steigern die Verdampfungsrate. Dagegen werden durch Sauerstoff und Helium vergleichsweise geringe Zunahme der Verdampfung beobachtet. In Sprühlichtbogenprozessen kann der Einsatz eines Ar/CO₂-Gemisches mit weniger als 10% CO₂-Anteil eine deutliche Reduzierung der Schweißrauchemissionen gegenüber Standardgasen mit höheren Zumischungen bewirken. Die weitere Absenkung des CO₂-Anteils auf bis zu 2,5 % (M12-ArC-2,5) geht mit einer Minderung der Emissionsrate um bis zu 70% verglichen mit M21-ArC-18 einher [14, 15]. Da die Absenkung des Aktivgasanteils in argonreichen Schutzgasen mit Änderungen des Lichtbogen- und Einbrandverhaltens einhergeht, ist die Anwendbarkeit bauteilspezifisch in der Praxis zu überprüfen. Auch unter Einsatz des emissionsärmeren Impulslichtbogens kann je nach Prozessbedingungen die Verwendung eines Schutzgases des Typs M20 anstelle von M21 die Emissionsrate um bis zu 50% senken. Eine weitere Absenkung des CO₂-Anteils scheint sich für diese Prozessvarianten nur noch geringfügig auf die Schweißrauchemission auszuwirken [14].

10. Durchmesser der Drahtelektrode

Die Wahl des Drahtdurchmessers beeinflusst den elektrischen Widerstand der Drahtelektrode. Die aus Durchmesser und Schweißstrom resultierende Stromdichte (A/mm²) hat damit u.a. direkte Auswirkungen auf die Produktivität und verschiedene weitere praxisrelevante Prozessgrößen, Tabelle 5.

Ein zunehmender Drahtdurchmesser bewirkt bei gleichem Schweißstrom:

- eine Abnahme der Abschmelzleistung,
- eine geringere Einbrandtiefe,
- eine Vergrößerung der Nahtbreite,
- eine bessere Spaltüberbrückbarkeit.

Bezogen auf die gleiche Abschmelzleistung ergeben sich mit zunehmendem Drahtdurchmesser:

- steigende Schweißströme und Streckenenergie,
- größere Einbrandtiefen,
- höhere Aufmischungsgrade,
- kleinere Drahtvorschubgeschwindigkeiten.

Tabelle 5: Einfluss des Drahtelektroden-Durchmessers auf Drahtvorschubgeschwindigkeit und Schweißstrom im Sprühlichtbogen bei einer Richtabschmelzleistung von 5,9 kg/h

Abschmelzleistung in kg/h bei 100% Einschaltdauer	ca. 5,9			
Drahtdurchmesser in mm	0,8	0,9	1,0	1,2
Drahtvorschubgeschwindigkeit in m/min	25	20	16	11
Schweißstrom in A	220	230	240	330

Unabhängig von der Betrachtungsweise geht mit einer Vergrößerung des Drahtdurchmessers eine Abnahme des effektiven Wirkungsgrades einher. Lichtbogen- und Tropfenkräfte nehmen zu, die Lichtbogenzündung wird schwieriger. In der Regel bieten größere Drahtdurchmesser einen geringfügigen Kostenvorteil gegenüber kleineren Durchmessern.

Der Einsatz von Impulslichtbogenprozessen erlaubt im Vergleich zum Sprühlichtbogen die Verwendung größerer Drahtdurchmesser auch in niedrigeren Leistungsbereichen.

Der Wechsel des Drahtdurchmessers macht innerhalb der DIN EN ISO 15614-1 [1] nur dann eine neue Verfahrensprüfung erforderlich, falls die Streckenenergie um mehr als $\pm 25\%$ abweicht.

11. Oberflächenausführung von MAG-Drahtelektroden

DIN EN ISO 544 [16] fordert in Bezug auf die Oberflächen von Massivdrahtelektroden lediglich, dass diese frei von nicht näher definierten „Verschmutzungen und Oberflächenbeschädigungen“ sein müssen. Die Hersteller sind in der Wahl der Oberflächenausführung frei, solange der Schweißprozess und die Eigenschaften des Schweißgutes nicht negativ beeinflusst werden.

Unverkupferte Drahtelektroden verschiedener Hersteller sind seit vielen Jahren im Markt über diverse Branchen hinweg etabliert. Qualitativ hochwertige Produkte zeichnen sich gegenüber den herkömmlichen, verkupferten Typen durch zahlreiche Vorteile aus:

- konstanter Drahtvorschub, geringere Vorschubkräfte,
- optimaler Stromübergang im Kontaktrrohr,
- kein Kupferabrieb im Drahtfördersystem,
- reduzierte Schweißrauchentwicklung, da weniger Kupfer im Schweißrauch,
- guter Korrosionsschutz während der Lagerung.

Insbesondere eine ungleichmäßige Drahtvorschubgeschwindigkeit ist eine der häufigsten Ursachen von Fehlern beim MIG/MAG-Schweißen [17]. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass die Drahtoberfläche einen maßgeblichen Einfluss auf die Fördereigenschaften der Drahtelektrode und den Stromübergang im Kontaktrrohr haben, Abbildungen 5-8.

12. Chargenkonstanz der Drahtelektroden

Ein häufig geäußelter Anwenderwunsch ist die Forderung nach chargenunabhängiger, konstanter Qualität, insbesondere bei Roboteranwendungen mit geringen Toleranzen gegenüber Prozessänderungen. Eine ggf. notwendige Anpassung von Schweißparametern ist aus diversen Gründen unerwünscht und häufig praktisch schwer umsetzbar. Daher kann eine striktere Analyseeinschränkung des Drahtes gegenüber DIN EN ISO 14341 [2] als essenzieller Teil des Schweißprozesses gegenüber den teils weit gefassten Normen Abhilfe schaffen und reproduzierbare Ergebnisse – unabhängig von der eingesetzten Charge – erzielt werden, Tabelle 6.

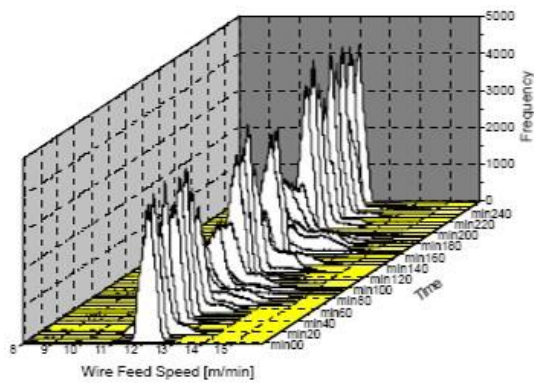


Abb. 5: Langzeitschweißverhalten einer verkupferten Drahtelektrode G 3Si1 Ø1,2 mm, Schutzgas M21-ArC-18, $I_s = 350$ A, $U_s = 32$ V, zeigt ein instabiles Förderverhalten, Drahrückbrand nach 220 min

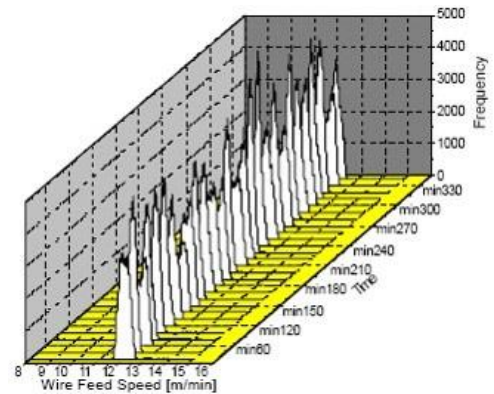


Abb. 6: Langzeitschweißverhalten einer unverkupferten Drahtelektrode G 3Si1 (OK AristoRod 12.50) Ø1,2 mm, Schutzgas M21-ArC-18, $I_s = 350$ A, $U_s = 32$ V, zeigt auch nach 330 min ein stabiles Förderverhalten

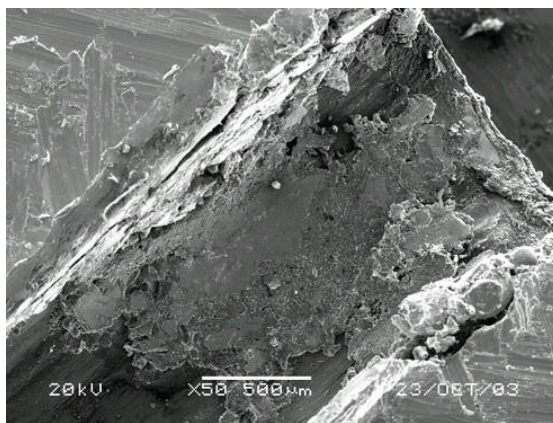


Abb. 7: Stromkontaktrohr nach 1h Schweißzeit mit 10,2 m/min Drahtvorschubgeschwindigkeit, Drahtelektrode verkupfert, G 3Si1 Ø1,2 mm, Kontaktfläche 50-fach vergrößert, mit deutlichen Kupferablagerungen und Verschleiß

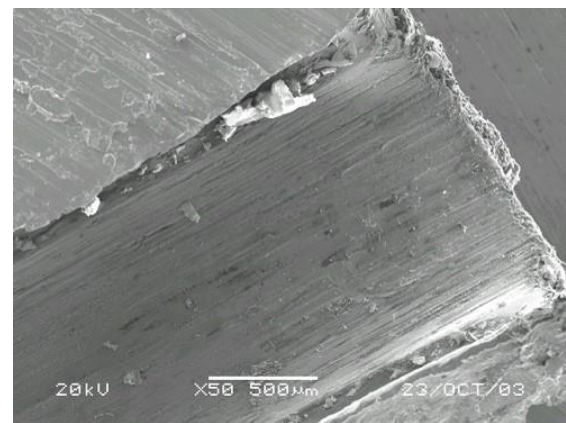


Abb. 8: Stromkontaktrohr nach 1h Schweißzeit mit 10,2 m/min Drahtvorschubgeschwindigkeit, Drahtelektrode unverkupfert G 3Si1 Ø1,2 mm, Kontaktfläche 50-fach vergrößert, mit leichtem, gleichmäßigem Verschleiß

Tabelle 6: Analysegrenzen nach DIN EN ISO 14341 [2], ASME SFA A-5.18 [18] und ESAB Werksstandard für eine Drahtelektrode G 3Si1 / ER70S-6

Kurzzeichen	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu*	Al	Ti+Zr
ISO 14341-A:	0,06	0,70	1,30									
G 3Si1	-	-	-	≤0,025	≤0,025	≤0,15	≤0,15	≤0,15	≤0,03	≤0,35	≤0,02	≤0,15
SFA A-5.18:	0,06	0,80	1,40									
ER70S-6	-	-	-	≤0,025	≤0,035	≤0,15	≤0,15	≤0,15	≤0,03	≤0,50	-	-
G 3Si1 / ER70S-6	0,07	0,80	1,40									
ESAB Purus 42 CF	-	-	-									
	0,10	0,90	1,50									

* Kupferanteil inklusive Verkupferung

Neben der chemischen Analyse des Drahtes sind weitere Parameter wie engere Drahtdurchmesser-Toleranzen als in DIN EN ISO 544 [16] und Konstanz der Oberflächeneigenschaften sowie die Qualität der Spulung beim Drahthersteller wichtige Eigenschaften.

13. Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

- Die Festigkeit des Schweißgutes sollte nur so fest wie nötig - nicht so fest wie möglich gewählt werden. Die Verwendung von Drahtelektroden der Typen G 2Si oder G 3Si1 statt des G 4 Si1 erfüllen in vielen Fällen die Anforderungen an die mechanisch-technologischen Güterwerte des Schweißgutes. Die geringeren Anteile an Mangan und Silizium führen zu weniger Ablagerungen von Oxiden und Silikaten auf der Schweißnaht, besserem Nahtaussehen beim anschließenden Verzinken und nicht zuletzt auch zur Reduktion der Leitkomponente Mangan im Schweißrauch.
- Die Kombination mit weniger oxidierenden Schutzgasen wie M20-ArC-10 oder M20-ArC-8 statt M21-ArC-18 reduziert den Abbrand beim Schweißen und folglich die Schweißrauch-Emissionsrate, die Bildung von Schlacke-Inseln sowie das Spritzeraufkommen.
- Der Einsatz unverkupfelter MAG-Drähte senkt gegenüber verkupferten Drähten die Kupfermenge im Schweißrauch und bietet weitere Vorteile bei den Drahtfördereigenschaften.
- Das MAG-Impulslichtbogen-Schweißen bietet hinsichtlich des Spritzeraufkommens und der Schweißrauch-Emissionsrate erhebliche Vorteile.
- Für auftretenden Schweißrauch gilt das Minimierungsgebot. Optimal ist das Absaugen an der Entstehungsstelle, siehe auch TRGS 528 [12].
- Die chemische Zusammensetzung und Qualität der Drahtelektrode ist kostenwirksam. Oft lohnt sich der Einsatz von MAG-Drähten mit besonders eingestellter chemischer Analyse zur Reduktion des Aufkommens an Oxiden/Silikaten und Spritzern. Aufwendungen für Nacharbeit zur Entfernung von Schlacken und Spritzern oder das Zwischenreinigen bei mehrlagigen Anwendungen sind mit den etwas höheren Kosten für diese Drähte bei den Schweißkosten zu verrechnen.
- Konstante, chargenunabhängige Qualitäts- und Spulungseigenschaften sind insbesondere für automatisierte Schweißlösungen von Bedeutung. Hierzu zählen die chemische Analyse, Durchmessertoleranzen, die Eigenschaften der Oberflächenbeschichtung und die konstante Qualität der Spulung. Sind die Förder- und Lichtbogeneigenschaften des Drahtelektrode chargenunabhängig konstant, lassen sich Aufwendungen für Anpassungen der Parameter z.B. am Roboter einsparen.
- Bei vielen Anwendungen lohnt sich die Überprüfung des Drahtdurchmessers. Häufig kann durch die Wahl eines kleineren Drahtdurchmessers die Abschmelzleistung gesteigert werden, wodurch sich Wärmeeinbringen und Verzug sowie die Schweißkosten reduzieren lassen. Die Hersteller von MAG-Drähten bieten hier ein breites Portfolio zur Auswahl.

14. Schrifttum

- [1] DIN EN ISO 15614-1:202-05: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung - Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen.
- [2] DIN EN ISO 14341:2020-12: Schweißzusätze – Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung.
- [3] Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens, Springer-Verlag, Berlin, 2010
- [4] Killing, R.: Angewandte Schweißmetallurgie: Anleitung für die Praxis, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [5] Purus – Das neueste Werkzeug für die Reinigung nach dem Roboterschweißen ist überhaupt kein Werkzeug. Firmenschrift ESAB Welding & Cutting, 2019. (PURUS (esab.de))
- [6] DIN EN ISO 14175:2008-06: Schweißzusätze – Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse.
- [7] Miklos, E.; Trube, S.: Metall-Aktivgasschweißen MAG / Metall-Inertgasschweißen MIG, Tagungsband: 29. Sondertagung: Schweißen im Anlagen- und Behälterbau, Basis-Info, München 2001.

- [8] Füssel, U.: Steigerung der Wirtschaftlichkeit der MSG-Schweißprozesse durch konsequente Nutzung der Potentiale von Schutzgasen Schlussbericht IGF-Vorhaben 14.431B, TU Dresden 2014.
- [9] Subramaniam, S.; White, D.R.: Effect of Shield Gas Composition on Surface Tension of Steel Droplets in a Gas-Metal-Arc Welding Arc, Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 32B, April 2001.
- [10] Ahsan, R.U.: A Study on the Effect of Wire Composition on Welding with Gap and Offset in Cold Metal Transfer (CMT) GMAW, Research Paper, Journal of Welding and Joining, 2018.
- [11] Czener, S.: Schmelzbaddynamik beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Eisenwerkstoffen, Dissertation, Universität Hannover, 2005.
- [12] TRGS 528: Technische Regeln für Gefahrstoffe – Schweißtechnische Arbeiten. Fassung vom 07.08.2020. (BAuA - Technischer Arbeitsschutz (inkl. Technische Regeln) - TRGS 528 Schweißtechnische Arbeiten - Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- [13] DIN EN ISO 15011-4:2018-05: Arbeits- und Gesundheitsschutz beim Schweißen und bei verwandten Verfahren - Laborverfahren zum Sammeln von Rauch und Gasen - Teil 4: Rauchdatenblätter.
- [14] Trautmann, M.; Füssel, U.: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Schweißrauchentstehung bei Schutzgasschweißverfahren – Kolloquium Schweißrauche, TU Dresden 2020.
- [15] Miklos, E.: REarc welding – von der DVS-Initiative zum nachhaltigen Reduzieren der Expositionen beim Lichtbogenschweißen. DVS-Berichte Band 371, S. 130 -139. DVS Media GmbH, Düsseldorf, 2021.
- [16] DIN EN ISO 544:2018-04: Schweißzusätze - Technische Lieferbedingungen für Schweißzusätze und Pulver - Art des Produktes, Maße, Grenzabmaße und Kennzeichnung.
- [17] DVS Merkblatt 0926-3 (04/2012): Prozessparameter und Gerätetechnik für das Impuls-Lichtbogenschweißen, DVS-Media GmbH, Düsseldorf, 2012.
- [18] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part C, SFA-5.18/SFA5.18M, 2021.

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.

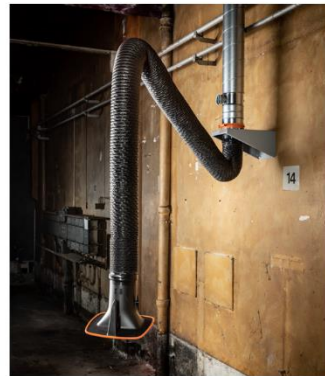
Sortiment im Überblick:



Absaugsysteme mobil



Absaugsysteme stationär



Absaugarme und Ventilatoren



Hochvakuum absaugung



Raumlüftungssysteme



Absaugsysteme zentral



Absaug- und Schneidische



Arbeitsschutz und Trennwände

Innovative MSG Draht / Schutzgaskombination für die schweißtechnische Verarbeitung von kaltzähen, Ni legierten Stählen

B. Hoberg und A. Plozner, Düsseldorf

1. Einleitung

Das ressourcenschonende Design von technischen Einrichtungen und Anlagen ist eine komplexe Aufgabe, da Einsparungen in den seltensten Fällen die Funktionalität einer konstruktiven Gestaltung einschränken dürfen.

Solche Überlegungen führen zur Entwicklung von leistungsfähigeren Grund- und Schweißzusatzwerkstoffen, wie in dem Beitrag am Beispiel von Schweißzusätzen für vergütete, kaltzähe, Ni legierten Stähle vorgestellt wird.

Neben den vollaustenitischen CrNi Stählen z. B. der 300er Reihe, den Eisen-Nickellegierungen mit 36 % Nickel und niedrigen Ausdehnungsbeiwerten, sind es die nickelmartensitischen Stähle, die hervorragend für Anwendungen bei sehr niedrigen Betriebstemperaturen geeignet sind.

Die z.B. für Lagertanks von verflüssigtem Erdgas (LNG) favorisierten Grundwerkstoffe sind die 9 %igen Nickelstähle welche üblicherweise mit hochlegierten Schweißzusätzen aus der Gruppe der Nickellegierungen verschweißt werden. Da die Fertigung solcher Tanks überwiegend ohne Wärmebehandlung der Schweißverbindung erfolgt, sind es die „artfremden“ Schweißzusätze, die die hohen Anforderungen an Festigkeit und Duktilität in der Schweißverbindung erfüllen. Es sind dennoch die z.T. unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften der jeweiligen Grund- und Schweiß-zusatzwerkstoffe, die die Auslegung von Bauteilen stark beeinflussen. Die Auslegung orientiert sich an den Festigkeitskennwerten des mechanisch-technologisch „schwächeren“ Werkstoffkonzeptes, was i.d.R den Schweißzusatzwerkstoff betrifft. Auf der Grundlage internationaler Design- und Sicherheitsstandards für Seeschiffe mit Flüssiggastanks (Lagerung und oder Brennstoff) wie dem IGC/IGF-Codes ist es zudem möglich, neuere Grundwerkstoffe für den Bau solcher Tanks zu verwenden.

Abhängig von den gewünschten Abmessungen und den aktuellen Legierungspreisen kann voestalpine neben den klassischen 9 % Ni Stählen, wie dem X7Ni9 und X8Ni9 einen weiterentwickelten 5,5 %Ni Grundwerkstoff für derartige Anwendungen anbieten. Bei gleichwertigen mechanischen Eigenschaften und vergleichbarem thermischen Ausdehnungsverhalten ist der Ni reduzierte Grundwerkstoff damit ca. 20 % günstiger als die typischen 9 % Ni Werkstoffe.

Grundsätzlich sind die gängigen Schmelzschweißverfahren wie Unterpulver, E-Hand, Metallschutzgas- oder Fülldrahtschweißen mit den erwähnten hochlegierten, austenitischen Zusätzen anwendbar.

Es sind jedoch spezifisch für den jeweiligen Schweißprozess und Schweißzusatz unterschiedliche Abminderungsfaktoren bei den mechanisch-technologischen Eigenschaften des reinen Schweißgutes in Bezug auf die Werkstoffkennwerte des Grundwerkstoffes zu berücksichtigen.

2. Kaltzähe Grundwerkstoffe für kryogene Anwendungen

Die 5,5 und 9 % Nickelstähle mit niedrigem Kohlenstoffgehalt wurden als kaltzähe Werkstoffe für Tieftemperatur-Anlagen entwickelt. Abweichend von üblichen Kohlenstoff und Mangan legierten Stählen weisen die 9 % Ni und bestimmte 5,5 %Ni Stähle eine hohe Festigkeit und Duktilität bei Temperaturen auf, bei denen sich z. B. Methan (-162 °C), Sauerstoff (-183 °C) und Stickstoff (-196 °C) unter Atmosphärendruck verflüssigen. Diese Stähle sind daher für Anlagen zur Herstellung, zur Lagerung oder zum Transport von Flüssiggasen besonders geeignet. Im Hinblick auf den Anwendungszweck musste der klassische, in den 1960er Jahren entwickelte 9 %-Nickelstahl gut schweißbar sein. Eine gute Schweißbarkeit wird in diesem Fall durch den niedrigen Kohlenstoffgehalt beeinflusst, der somit die Bildung von Kohlenstoff-Martensit unterdrückt [1]. Der Kohlenstoffgehalt ist in den Normen wie EN 10028-Teil 4 auf max. 0,1 % [2] und ASTM A 553 - 2017 ASTM A 645 auf max. 0,13 % [3, 4] begrenzt.

Moderne Erschmelzungs- und Herstellungsverfahren des Grundwerkstoffes gestatten es jedoch deutlich geringere Kohlenstoffgehalte zu erzielen. Die zur Einstellung eines feinkörnigen Gefüges, thermo-

mechanisch gewalzten Bleche der voestalpine Grobblech GmbH, liegen typischerweise unter 0,04 % C [5] und weisen daher auch im vergüteten Zustand keinen Kohlenstoff-Martensit auf.

Der Nickelgehalt von 9 % verleiht dem Stahl eine hohe Härte mit niedriger kritischer Abkühlgeschwindigkeit, wie aus dem Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild in Abb. 1 hervorgeht [6]. Bleche und Profile, die von Austenitisierungstemperatur in Wasser abgeschreckt oder an Luft abgekühlt werden, wandeln normalerweise in Nickel-Martensit mit niedrigem Kohlenstoffgehalt oder in Zwischenstufengefüge um.

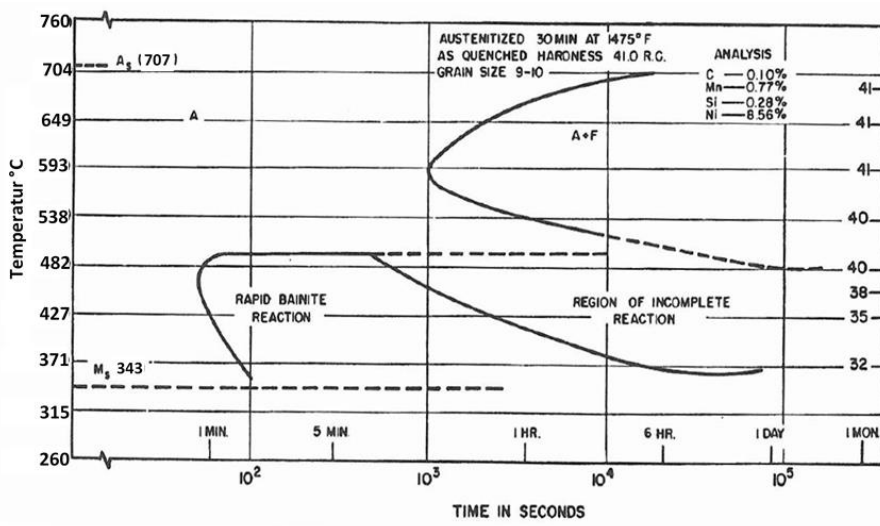


Abb. 1: ZTU Schaubild: kaltzäher 9 % Ni Stahl mit 0,1 % C, 0,77 % Mn, 0,28 % Si, 8,56 % Ni, 0,05 % Cr, Rest Fe, austenitisiert bei 800 °C

Der Grundwerkstoff hat nachweislich gute Schweiß Eigenschaften. Schweißzusatzstoffe bzw. Schweißgüter, die hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung und den mechanisch-technologischen Eigenschaften uneingeschränkt den 9 % Nickelstählen und deren Festigkeitsklassen entsprechen, sind nur bedingt verfügbar.

Das Hauptproblem besteht darin, in einem ferritischen oder ggf. nickelmartensitischen Schweißgefüge bei -196 °C eine ausreichende Bruchdehnung und Zähigkeit zu erreichen. Im Fall von artgleichen Schweißzusätzen ist eine Wärmebehandlung unumgänglich, um Mindestanforderungen an die Bruchdehnung und Kerbschlagarbeit zu gewährleisten, die sich aus den jeweiligen Grundwerkstoffnormen, aber auch aus Regelwerken von Klassifizierungsgesellschaften ableiten.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung einiger kaltzäher, Ni legierter Stähle gemäß DIN EN 10028-4 und äquivalenter ASTM Normen

Bezeichnung DIN / ASTM	C max.	Si max.	Mn	P max.	S max.	Al- gesamt min.	Mo max.	Nb max.	Ni	V max.
X12Ni5	1.5680	0,15	0,35	0,30-0,80	0,02	0,005	—	—	4,75-5,25	0,05
X8Ni9	1.5662	0,10	0,35	0,30-0,80	0,02	0,005	—	0,10	8,5-10,0	0,05
X7Ni9	1.5663	0,10	0,35	0,30-0,80	0,015	0,005	—	0,10	8,5-10,0	0,01
ASTM A 553 TYP I	0,13	0,4	0,9	0,015	0,015	—	—	—	8,5-9,5	—
ASTM A 654 Gr.A	0,13	0,4	0,30-0,60	0,025	0,025	—	0,20-0,35	—	4,8-5,2	—
ASTM A 654 Gr.B	0,13	0,4	0,90-1,5	0,020	0,010	—	0,10-0,30	—	5,0-6,0	—

Die nickelmartensitischen Stähle mit geringen Anteilen an Restaustenit neigen beim Schweißen auch nicht zu starker Aufhärtung in den Wärmeeinflusszonen (WEZ). Selbst bei einer Härte über 400 HV tritt keine Versprödung der Schweißnaht ein [1]. Schwierigkeiten durch Kaltrisse, die beim Schweißen niedrig

legierter Stähle mit höheren Kohlenstoffgehalten oft ein Problem darstellen, entstehen bei 9 % Nickelstahl nicht.

Beim LNG-Verfahren (Liquefied Natural Gas) wird Erdgas durch Abkühlung auf -164 °C verflüssigt. Dabei schrumpft das Volumen des Gases auf 1/600stel. Das macht die Lagerung und den Transport des Gases in flüssiger Form erst möglich und wirtschaftlich. Bei diesen sehr tiefen Temperaturen ist der Einsatz von speziellen, nickellegierten Stählen notwendig, um noch ausreichende Zähigkeit und Sprödbrechbarkeit zu gewährleisten. Diese Werkstoffe sind in der DIN EN ISO 10028-4, ASTM A 353 [7], A 553 und ASTM A 645 aufgeführt und weisen zwischen 5 bis 9 % Nickel auf. Im Unterschied zur europäischen Normung ist gemäß der ASTM A 645 der Grade B mit nominell 5,5 % Ni ebenfalls bis -196 °C verwendbar. Je nach Warmformgebung und Wärmebehandlungszustand lassen sich unterschiedliche Mindestanforderungen bezüglich Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften definieren.

Tabelle 2: Mechanisch technologische Eigenschaften einiger kaltzäher, Ni legierter Stähle gemäß DIN EN 10028-4 und äquivalenter ASTM Normen

Stahlsorte	Üblicher Lieferzustand _a	Neandicke für Zugversuch	Streckgrenze min	Zugfestigkeit	Bruchdehnung min	Neandicke für Kerbschlagprüfung	Rich- Kerbschlagarbeit, min
Kurzname	DIN/ASTM	(WB-Symbol)	t, mm	R _{eH} , MPa	R _m , MPa	A, %	KV ₂ , J -196 °C
X12Ni14	1.5680	+N oder +NT oder +QT	≤ 30 30 < t ≤ 50	390 380	530-710	20	—
X8Ni9	1.5662	+N plus	≤ 30	490	640-840	18	≤ 50 längs 50
+NT640 _a	+NT640 _a	+NT	30 < t ≤ 50	480			≤ 50 quer —
X8Ni9	1.5662	+QT _b	≤ 30	490	680-820	18	≤ 125 längs 50
+QT640 _a	+QT640 _a	+QT _b	30 < t ≤ 125	480			≤ 125 quer 40
X8Ni9	1.5662	+QT _b	≤ 30	585	680-820	18	≤ 125 längs 70
+QT680 _a	+QT680 _a	+QT _b	30 < t ≤ 125	575			≤ 125 quer 50
X7Ni9	1.5663	+QT _b	≤ 30 30 < t ≤ 125	585 575	680-820	18	≤ 125 längs 100 ≤ 125 quer 80
ASTM A 553	TYP I	+QT		585	690-825	20	nb längs 27 J -0,38mm lat. Breit.
ASTM A 654	Gr.A	+QT	Vereinbarung	450	655-795	20	nb
ASTM A 654	Gr.B	Q + I* + T		590	690-830	20	nb längs 27 J -0,38mm lat. Breit.

a) +N: normalgeglüht; +NT: normalgeglüht / angelassen; +QT: vergütet; +NT640/+QT640/+QT680: Wärmebehandlung => min R_m 640 MPa oder 680 MPa.

b) Für Neandicken < 15 mm sind auch die Lieferzustände +N plus +NT anwendbar.

*) Intermediate Heat Treatment

WB: Wärmebehandlung

3. Zusätze und Hilfsstoffes für die schweißtechnische Verarbeitung

Die gängigen Schmelzschweißverfahren gemäß DIN EN ISO 4063 wie Unterpulver, E-Hand, Metallschutzgas- oder Fülldrahtschweißen sind für die schweißtechnische Verarbeitung von kaltzähen nickellegierten Stählen anwendbar [8]. Die Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der jeweiligen Schweißzusätze und Schweißprozesse.

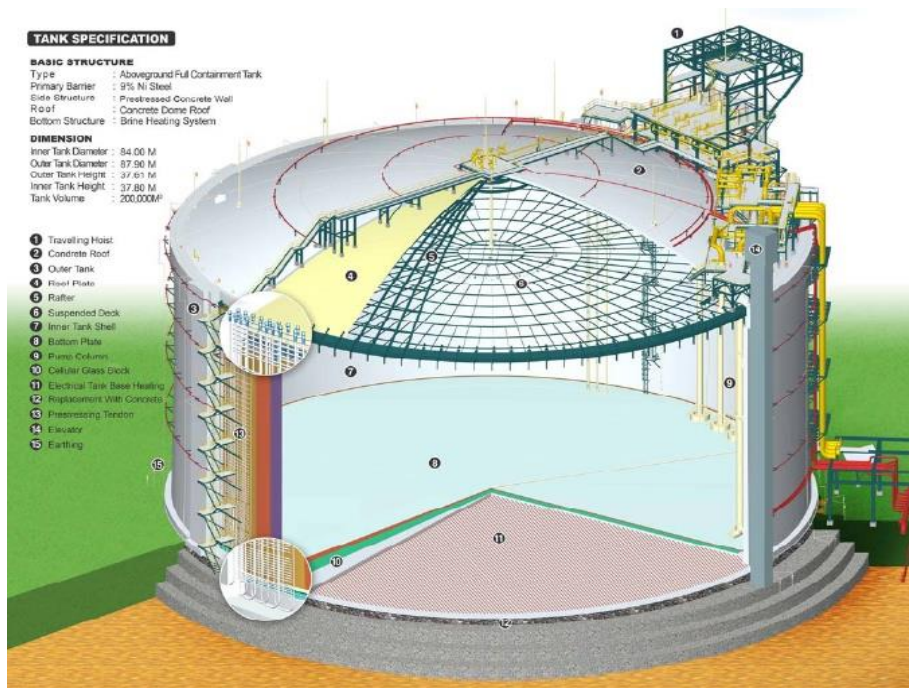
Tabelle 3: Übersicht der jeweiligen Schweißzusätze und Schweißprozesse

Voestalpine Böhler Welding Handelsname	Schweißprozess	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Nb [%]	Fe [%]	W [%]	Andere [%]	Mind. Festigkeit Schweißgut [MPa]		KV ₂ [J] -196°C
												Rp0,2	Rm	
UTP Soudonel D	E- Hand (111)	0,05	3,5	0,3	14	Bal.	6,5	0,7	7,5	1,1	-	420	690	55
Thermanit Nimo C 276, Marathon 104 (Pulver)	UP (121)	0,01	0,5	0,1	15,4	Bal.	16	-	6	3,7	-	420	690	110
FOXCore 625-T1	FCAW (136)	0,02	0,3	0,5	20,7	Bal.	8,5	3,3	< 1,0	-	-	420	690	70
Thermanit 17/15 TT	MAG (135)	0,2	10,5	0,4	17,5	14	-	-	Bal.	3,5	N: 0,06 N: 0,15	430 490 ¹⁾	600 700 ¹⁾	50
Union S 1 Ni 11 UV 511 TT (Pulver)	UP (121)	0,04	0,79	0,3	-	11,5	0,1	-	Bal.	-	-	700 ²⁾	800 ²⁾	40 ²⁾

1) Unter Verwendung von MSG Schutzgas Cronigon Ni 30 (Linde Gas)

2) PWHT 540°C / 1 h / Luft

Die Auswahl der „artgleichen“ Draht-Pulverkombination beschränkt sich derzeit auf Komponenten für LNG Anwendungen, bei denen aus fertigungstechnischen Gründen eine Wärmebehandlung erforderlich ist. In den übrigen Fällen wird für großvolumige stationäre oder mobile Tanks z. B. für Seeschiffe das Schweißen mit austenitischen Zusätzen angewendet. Das UP Schweißen von Flachboden -Speichertanks wie in Abb. 2 skizziert wird hierbei vorwiegend für die Rundnähte in der PC Schweißposition angewendet.



Typische Merkmale:

Durchmesser:

- » Innen: 84 m
- » Außen: 87,9 m

Höhe:

- » 38 m

Tankvolumen:

- » 200.000 m³

Abb. 2: Prinzipskizze eines LNG Speicher Tank

Fülldrähte und Stabelektroden, wie in der Tabelle 3 aufgeführt, kommen für die steigende Schweißposition oder sonstige Zwangslagen aufgrund der dafür bekannt guten Eignung dieser Schweißprozesse zur Anwendung.

Im Folgenden soll die Verwendung der Massivdrahtelektrode Thermanit 17/15 TT für das MAG Schweißen näher erläutert werden. Neben den aufgezeigten Schweißzusätzen aus der Gruppe der Ni-Cr-Mo-(W) Legierungen ist seit Jahren auch das Legierungssystem Fe-Cr-Ni-Mn-W für kryogene Anwendungen bekannt. Der Vergleich zwischen den Tabellen 2 und 3 zeigt jedoch deutlich wie sich die mechanisch-technologischen Eigenschaften von wasservergüteten, nickelmartensitischen Stählen und austenitischen Schweißgütern unterscheiden.

Der Einsatz der Massivdrahtelektrode Thermanit 17/15 TT für das teilmechanisierte MAG Puls Schweißen (t-MAGp) bietet neben seiner hervorragenden Schweißbarkeit ebenfalls ein Einsparungspotential im Hinblick auf die Beschaffungskosten für Schweißzusätze aus Nickellegierungen.

Der Schweißzusatz Thermanit 17/15 TT, gemäß DIN EN ISO 14343 – G Z 17 15 Mn, bietet zudem die Möglichkeit, die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes mittels geeigneter Schutzgase zu variieren. Durch die Aufnahme von Stickstoff aus der Lichtbogenatmosphäre in das Schweißgut lassen sich höhere mechanisch-technologische Anforderungen aus der konstruktiven Gestaltung erfüllen, die mit gängigen Schutzgasen der Gruppe M12 oder M13 gemäß DIN EN ISO 14175 nicht einhaltbar sind [9].

Die in Tabelle 3 aufgeführten austenitischen Schweißzusätze sind Mehrstoffsysteme, deren im Schweißgut erzielte Festigkeitseigenschaften auf die Mischkristallverfestigung zurückzuführen sind. Stickstoff ist ein weiteres Legierungselement, was zur Verfestigung beitragen kann. Wenn das Zulegieren wie im vorliegenden Fall über das Schutzgas erfolgen soll, muss der Matrixwerkstoff so beschaffen sein, dass eine unerwünschte Ausscheidung von Nitriden unterbunden wird. Aus Gründen der Beschaffung des Hilfsstoffes Schutzgas, Durchführung und Aufrechterhaltung von Eignungsnachweisen ist die Verwendung von handelsüblichen Schutzgasen hierbei wünschenswert.

Im Rahmen der Qualifizierungen von vollaustenitischen Schweißgütern gem. DIN EN 14532-1[10] ist neben der Ermittlung von Werkstoffkennwerten (Tabelle 4), die Prüfung der Heißrissempfindlichkeit des Schweißgutes von besonderem Interesse.

Tabelle 4: Auswertung der mechanisch-technologischen Eigenschaften und chemischen Zusammensetzung des reinen Schweißgutes einer Schweißgutprobe gem. DIN EN ISO 15792-1 [12]

Zugversuch		nach EN ISO 6892-1									
Prüfmaschine: WP31		Messmittel : WP20 / WP55 / WP56									
Pos Item	Zustand Condition	Durchm. Diameter [mm]	Dicke x Breite Thickness x Width [mm]	Temp. Temp. T [°C]	Dehngrenze Yield Strength R _{p0,2} R _{p1,0} [MPa]		Festigkeit Tensile Strength R _m [MPa]	Dehnung Elongation A ₄ A ₅ [%]		Einschnürung Reduction Z [%]	Referenz Reference
16	as welded	10,01		23	526	555	745	-	34,60	61,00	
Bemerkung/Remarks: / Abb.2											
17	as welded	10,01		23	508	535	729	-	30,60	58,00	
Bemerkung/Remarks: RZ ins Labor / Abb.2											

Kerbschlagversuch		nach DIN EN ISO 148-1																		
Prüfmaschine: WP29		Messmittel : WP09 / WP52																		
Pos Item	Zustand Condition	Lage Position (ISO 9016)	Temp. Temp. T [°C]	Kerbschlagarbeit Impact Energy KV ₂ [J]					Laterale Breitung Lateral Expansion LE [mm]	Duktiler Bruchanteil Shear fracture SF [%]	Referenz Reference									
18	as welded	VWT -	-196	55	60	57	-	-	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Chemische Analyse												
Prüfmaschine: -												
Messmittel : - / - / -												
Pos / Item : 1D	Probe aus / -										Referenz	
C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	V %	W %	Al %	Co %	
0,1930	0,4330	10,2230	0,0110	<0,0010	17,6800	0,0180	14,0000	0,0380	3,3860	<0,0050	<0,0250	
Cu %	N %	Nb %	Ti %									
0,0480	0,183	<0,0150	<0,0250									

Abb. 3 zeigt das Ergebnis der fremd-beanspruchten Heißrissprüfung gem. ISO /TR 17641-3 [11].

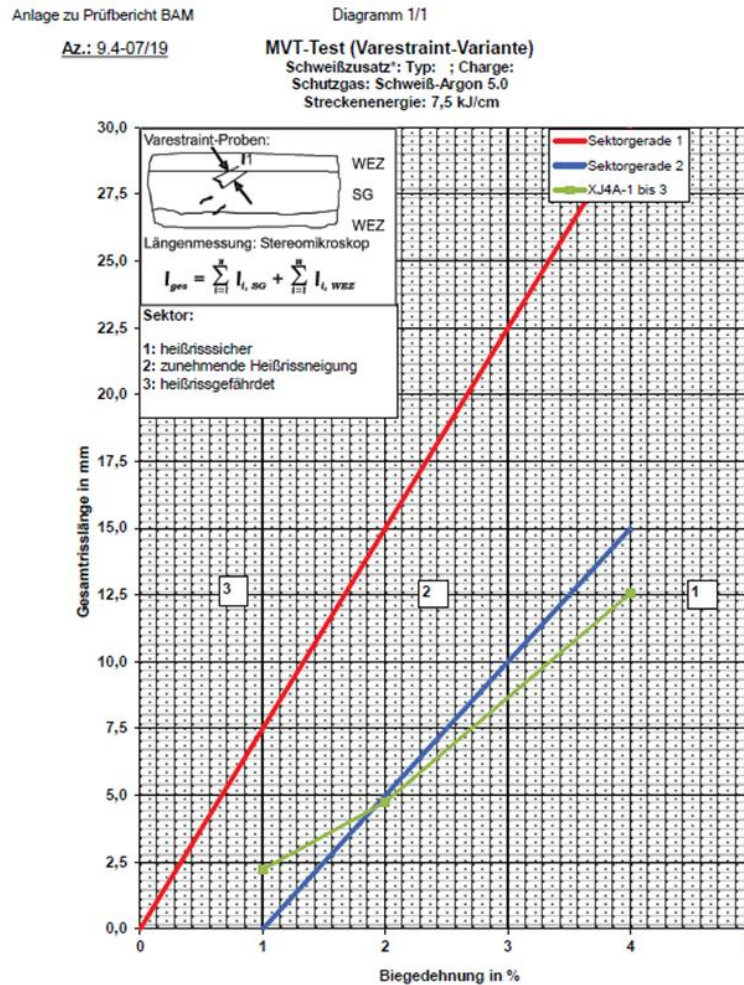


Abb. 3: Prüfergebnis des MVT Test zur Bestimmung der Heißrissneigung einer Thermanit 17/15 TT MAG Schweißgutprobe

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der geschweißten Verbindung in diversen Schweißpositionen sind der Tabelle 5 zu entnehmen. Da die MAG Schweißstromquellen i.d.R. mit Standardkennlinien für gängige Schweißzusätze wie beispielweise G 19 9 L Si oder G 19 12 3 L Si etc. gemäß DIN EN ISO 14343-A ausgerüstet sind, ist im Fall der im Beitrag vorgestellten Drahtelektroden/Schutzgaskombination die Rücksprache mit dem Hersteller der Stromquelle ratsam. Die Vorgaben für die Erstellung einer Schweißanweisung für die t-MAGp Schweißung unterscheiden sich nicht grundsätzlich von jenen, die für das t-MAGp Schweißen von anderen vollaustenitischen Drahtelektroden einzuhalten sind. Wichtig hierbei ist es die korrekte Wärmeleitung beim Schweißen zu beachten. D. h. Zwischenlagentemperaturen von max. 100 °C und Energieeinträge (ohne Wirkfaktor η) unter 12 kJ/cm sind empfehlenswerte Vorgaben, die sich durch Anwendung der Strichraupentechnik beim Schweißen gut realisieren lassen. Teilmechanisierte MAG Pulsschweißungen mit Massivdrähten, die in Zwangslagen ausgeführt werden unterscheiden sich hinsichtlich der Abschmelzleistung gravierend von sog. PA (Wannen) Position. Die in Tabelle 5 aufgeführten Ergebnisse wurden mit einer Thermanit 17/15 TT Drahtelektrode \varnothing 1,2 mm, Drahtvorschub 8,7 m/min in der PA Position geschweißt. Bei Schweißanweisungen für die PC (quer) oder PF (steigend) Position reduzieren sich die Drahtvorschubgeschwindigkeiten auf ca. 6 bzw. 4-4,5 m/min bei gleichem Drahtelektrodendurchmesser. Dieser Sachverhalt ist natürlich auch seitens der Anpassung von Kennlinien der Schweißstromquelle zur berücksichtigen, um auch in den handwerklich anspruchsvollen Schweißpositionen eine hohe Prozessstabilität zu erzielen. Die hohe Nahtqualität, die mit der Drahtelektrode / Schutzgaskombination erzielt werden kann, lässt sich auch anhand von metallografischen Untersuchungen mittels Lichtmikroskop anschaulich darstellen.

Die Bilder 4 bis 6 zeigen die Ansicht der Decklage und Makroschliff aus den in Tabelle 5 ausgewerteten Prüfstück Nummern ZP17 bis ZP1BP.

Tabelle 5: *Typische mechanisch-technologische Eigenschaften von MAG Schweißungen mit Thermanit 17/15 TT in diversen Schweißpositionen mit dem Grundwerkstoff 1.5662 - QT640, t = 15 mm*

Schweiß- position	T _{Prüf} °C	Probe RZ/FZ	R _{p0,2} MPa	R _m Mpa	A ₅ %	Z %	Bruch- lage	KV _{2,-196°C} J
PA	RT	ZP17*	505	716	33	61	SG	82
PC		ZP19		736			GW	102
PF		ZP1A	nb	727	nb		GW	96
PE		ZP1B		736			GW	79

*) Schweißgut
nb nicht bestimmt



Abb. 4: Übersichtsdarstellung der Probe ZP19, Decklage in PC und zugehörigem Makroschliff

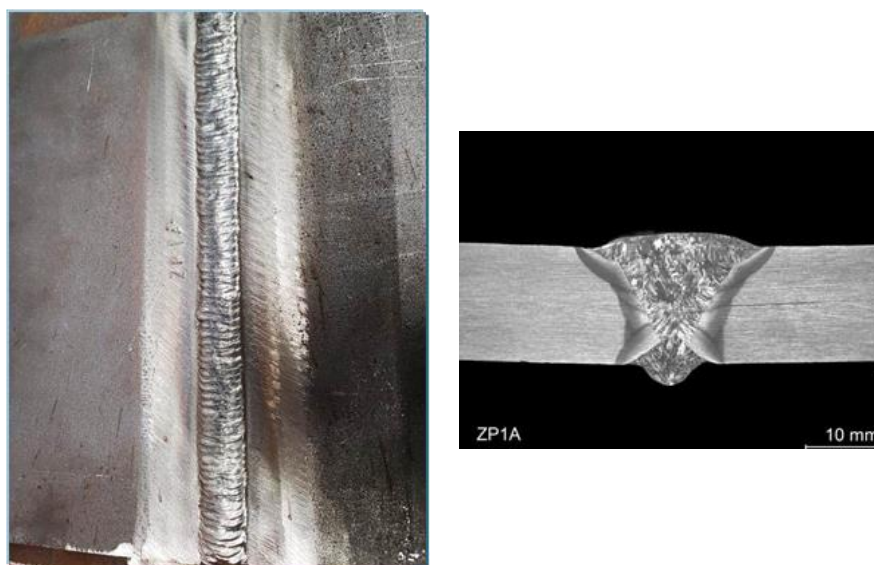


Abb. 5: Übersichtsdarstellung der Probe ZP1A, Decklage in PF und zugehörigem Makroschliff

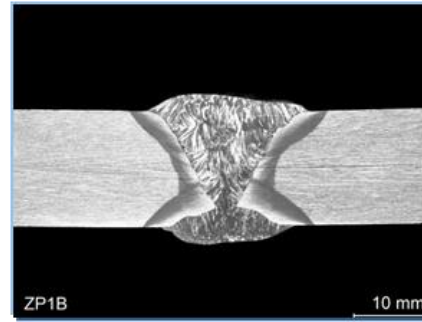


Abb. 6: Übersichtsdarstellung der Probe ZP1B, Decklage in PE und zugehörigem Makroschliff

Die hier diskutierten Schweißungen und Untersuchungsergebnisse sind u.a. Bestandteil von Eignungsprüfungen für abnahmepflichtige Druckgeräte und Anwendungen in maritimen Bereichen. Die Arbeiten zur Erweiterung bzw. Erhöhung der Werkstoffkennwerte in dem vorhandenen VdTÜV Kennblatt Nr. 02890.09 der MAG Drahtelektrode Thermanit 17/15 TT sind abgeschlossen. Die Erteilung des erweiterten VdTÜV Kennblattes wird in Kürze erwartet.

Für das Schweißen von 9 % Ni Stählen innerhalb des DNV Regelwerkes ist der Geltungsbereich des DNV Type Approval auszugsweise in der Abb. 7 aufgeführt.

TYPE APPROVAL CERTIFICATE

This is to certify:
That the Wire/Gas combination

with trade name
Thermanit 17/15 TT / Ar + 5%He + 5%N2 + 0,05%CO2

Manufacturer
voestalpine Böhler Welding Germany GmbH
Hamm, Germany

is found to comply with
DNV GL rules for classification – Ships
DNV GL class programme DNVGL-CP-0069 – Type approval – Welding consumables

with this approval

Grade	- MS
Current	DC(+)
Approved diameter	1.2 mm
Positions	All, except vertical-downwards
Remarks	For GMAW of VL 1.5Ni up to VL 9Ni Impact test at -196°C Also for fillet welding Gas: ISO 14175: Z-ArHeNC-5/5/0,05 like CRONIGON® Ni30 Yield strength of all weld metal: min. 490 MPa

Product(s) approved by this certificate is/are accepted for installation on all vessels classed by DNV GL.

Issued at Hamburg on 2019-11-27

This Certificate is valid until 2024-10-21.
 DNV GL local station: Essen

Approval Engineer: Dietmar Liebich

for DNV GL
 Digitally Signed By: Hachmoeller, Ludger
 Location: DNV GL Hamburg, Germany
 Signing Date: 2019-11-27 , on behalf of

Thorsten Lohmann
 Head of Section

Abb. 7: Auszug DNV Type Approval für das Schweißen von 9 % Ni Stählen in maritimen Anwendungen

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Auswahl von Schweißzusätzen für die Gruppe der nickelmartensitischen Stählen wird wesentlich durch die sehr unterschiedlichen mechanisch-technologischen Eigenschaften von Grund- und Schweißzusatzwerkstoffen beeinflusst.

Das t-MAGp Schweißen unter Verwendung eines Schutzgases, welches die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes gezielt einstellt, ist eine praktikable Möglichkeit die o. a. Diskrepanz zu mindern. Stickstoff fördert bei hochlegierten, austenitischen Werkstoffen neben der Beständigkeit gegen lokale Korrosionsarten, auch die Festigkeitseigenschaften, was im vorgestellten Fallbeispiel die vorrangige Auswirkung ist.

Hieraus ergeben sich technologische und wirtschaftliche Vorteile für den Anwender. Zum einen können Apparatebauer sowie Werftbetriebe, die den Schweißzusatz beispielsweise für LPG Projekte mit 5 % Ni Stählen bis ca. -150 °C Anwendungstemperatur bereits erfolgreich einsetzen, mit geringem Aufwand den höheren Anforderungen bei LNG Projekten mit Prüftemperaturen bis -196 °C gerecht werden.

Die diskutierte Vorgehensweise das Schutzgas beim MAG Schweißen in die Sicherstellung von mechanisch-technologischen Eigenschaften einzubeziehen, bietet zudem für den Konstrukteur von kryogenen Anlagen die Festigkeitseigenschaften des verwendeten Grundwerkstoffs effizienter zu nutzen. Die höhere Streckgrenze und Zugfestigkeit des reinen Schweißgutes liefern günstigere Vergleichsspannungen und gestatten daher eine Auslegung von Bauteilen mit dünneren Wanddicken und folglich höherer Nutzlast.

Eine besonders wirtschaftliche konstruktive Gestaltung wäre die Kombination mit dem Grundwerkstoff ASTM A 645 Gr. B und Schweißzusatz Thermanit 17/15 TT. Da diese Grundwerkstoffe mit sehr hohen Mindeststreckgrenzen ausgeliefert werden, sind Abminderungsfaktoren aufgrund des verwendeten Schweißzusatzes besonders gravierend. Ein geringerer Abminderungsfaktor aufgrund der Schweißnaht und die Einsparung des Legierungselementes Nickel beim Grundwerkstoff ASTM A 645 Gr.B im Vergleich zu den klassischen 9% Ni Stählen definieren die wirtschaftliche Auslegung von kryogenen Anlagen.

5. Schrifttum

- [1] Das Schweißen von 9% Ni Stahl Nickel-Informationsbüro GmbH, Düsseldorf. 1963.
- [2] DIN EN 10028-4 Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen Teil 4: Nickellegierte kaltzähe Stähle
- [3] ASTM A 553: Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, Quenched and Tempered 7, 8, and 9 % Nickel.
- [4] ASTM A 645: Standard Specification for Pressure Vessel Plates, 5 % and 5 ½ % Nickel Alloy Steels, Specially Heat Treated.
- [5] Druckschrift der voestalpine Grobblech GmbH: Nickel steel plates for LNG and LPG industry
- [6] C.W. Marschall, R.F. Hehemann, A.R. Troiano, The Characteristics of 9% Ni low Carbon Steel ASM Transact. Vol. 55, 1962.
- [7] ASTM A 353: Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, Double-Normalized and Tempered 9 % Nickel.
- [8] DIN EN ISO 4063: Schweißen und verwandte Prozesse – Liste der Prozesse und Ordnungsnummern
- [9] voestalpine Böhler Welding Group GmbH Einfluss von stickstoffhaltigen Schutzgasen auf mechanisch-technologische Eigenschaften von austenitischen Schweißzusätzen – unveröffentlicht.
- [10] DIN EN 14532-1: Schweißzusätze – Prüfverfahren und Qualitätsanforderungen Teil 1: Grundprüfungen und Konformitätsbewertung von Schweißzusätzen für Stahl, Nickel und Nickellegierungen.
- [11] ISO/TR 17641-3:2005: Destructive tests on welds in metallic materials – Hot cracking tests for weldments – Arc welding processes - Part 3: Externally loaded tests.
- [12] DIN EN ISO 15792-1: Schweißzusätze - Prüfverfahren Teil 1: Herstellung von Schweißgutprüfstücken und -proben an Stahl, Nickel und Nickellegierungen.



Ultima-TIG

Die Ultima-TIG ist das ultrapräzise und effiziente stationäre Nassschleifgerät für Wolframelektroden mit einem Durchmesser bis maximal 4,0 mm.



Ultima-TIG-S

Die Ultima-TIG-S ist das präzise und effiziente stationäre Nassschleifgerät für Wolframelektroden mit einem Durchmesser bis maximal 8,0 mm.



Ultima-TIG-Cut

Das Modell Ultima-TIG-Cut bietet gleich zwei Funktionen: Präzises Schleifen und Kürzen von Wolframelektroden mit einem Durchmesser bis maximal 4,0 mm.



AutoGrind Digital

AutoGrind Digital ist ein Modul für die Ultima-TIG Serie. Es sorgt durch einen automatischen Vorschub für ein einheitliches und präzises Schleifen.



Stumpfschleifer

Der Stumpfschleifer ist ein Modul, passend für die gesamte Ultima-TIG Serie. Er eliminiert die Gefahr eines Abschmelzens der geschliffenen Elektrodenspitze.



Neutrix

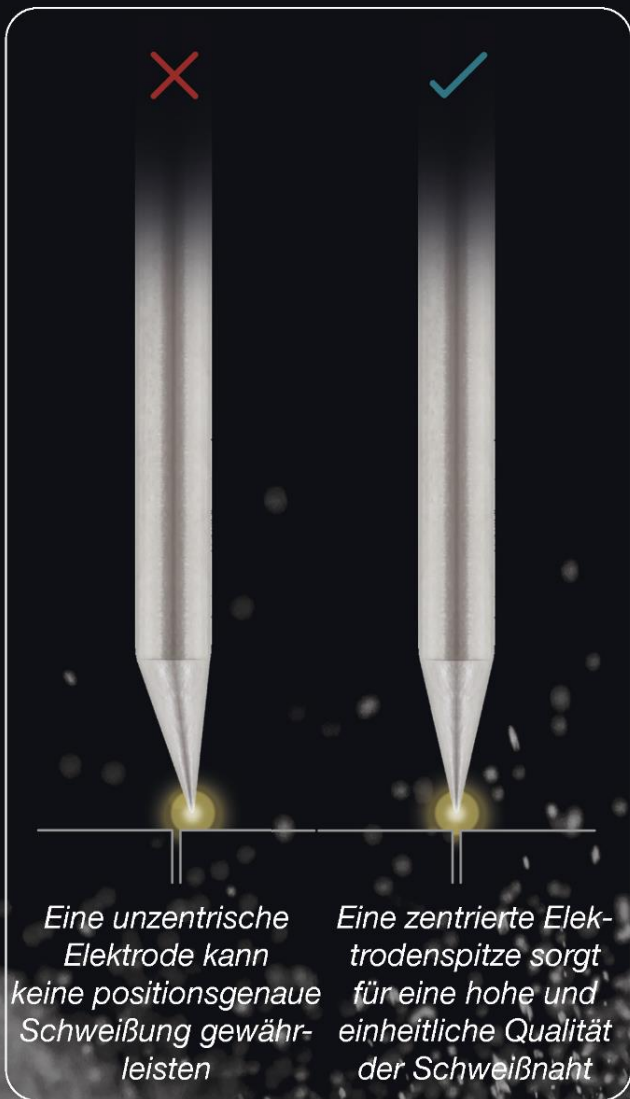
Das tragbare Neutrix Schleifgerät lässt sich einfach mitnehmen und außerhalb der Werkstatt verwenden. Mit ihm lassen sich Wolframelektroden mit einem Durchmesser bis maximal 4,0 mm schleifen.

Hochwertig und kostengünstig

- ✓ Sicheres Schleifen für die Anwender
- ✓ Verschwendung bei Wolframelektroden minimieren
- ✓ Schweißeffizienz und -qualität verbessern



Präzisionsschleifen von Wolframelektroden - Teil des **Geheimnisses**



Perfekte Spitze

Optimaler tip

Exakte Länge

>8mm

inelco
grinders

www.inelco-grinders.de

Potentiale der drahtbasierten additiven Fertigung mit dem Elektronenstrahl

B. Baufeld, Gilching

1. Einleitung

Der industrielle Einsatz von additiv gefertigten, metallischen Bauteilen steigt stetig. Die Hauptgründe dafür sind folgende:

1. Die Realisierung von Bauteilgeometrien, die mit traditionellen Herstellungsmethoden gar nicht, oder nur zeit- und kostenintensiv erzielt werden können.
2. Die Reduktion von Grundmaterialverbrauch und mechanischer Verarbeitung durch die endkonturnahe Herstellung von Halbzeugen, beziehungsweise Bauteilen.
3. Die Bereitstellung von Halbzeugen, die nicht auf dem Markt erhältlich sind oder eine sehr große Lieferzeit haben.
4. Die Kombination unterschiedlicher Materialien, gegebenenfalls mit gradierten Eigenschaften.
5. Der Einsatz einer Hybridbauweise, die auf dem additiven Aufbau komplexer Strukturen auf einfachen Geometrien basiert.
6. Die Möglichkeit zur Reparatur von hochwertigen Bauteilen.

Zurzeit sind etwa 18 unterschiedliche Technologien für die additive Fertigung von metallischen Bauteilen in der Entwicklung. Von diesen können fünf als soweit technologisch ausgereift bezeichnet werden, dass sie für den industriellen Einsatz in Frage kommen [1]. Dies sind Pulverbettmethoden und Technologien mit Materialauftrag durch gerichtete Energieeinbringung (DED: directed energy deposition) [2]. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, sind der Laser, der Lichtbogen/Plasma und der Elektronenstrahl mögliche Energiequellen. Als Ausgangsmaterial kommt Pulver oder Draht zum Einsatz.

Tabelle 1: Industriereife Technologien für die additive Fertigung von Metallbauteilen

Bezeichnung des Verfahrens	Technologie	Energiequelle	Materialform
Laser beam powder bed fusion LB-PBF	Pulverbett	Laser	Pulver
Electron beam powder bed fusion EB-PBF	Pulverbett	Elektronenstrahl	Pulver
Laser-DED	DED	Laser	Draht/Pulver
Wire arc additive manufacturing WAAM	DED	Lichtbogen/Plasma	Draht
Wire electron beam additive manufacturing WEBAM	DED	Elektronenstrahl	Draht

Pulverbett und DED bedienen dabei in der Regel unterschiedliche Märkte, da die Pulverbettmethoden detailreichere und kleinere Bauteile, aber mit niedrigeren Produktionsraten als die DED-Methoden liefern. DED dagegen wird bevorzugt bei größeren Bauteilen und Halbzeugen eingesetzt, wobei gegebenenfalls eine mechanische Endbearbeitung sinnvoll sein kann.

Obwohl der Einsatz des Elektronenstrahls für die drahtbasierte additive Fertigung bereits vor etwa 20 Jahren in Berichten von der NASA vorgestellt wurde [3; 4], sind WAAM und Laser-DED generell wesentlich bekannter im industriellen Einsatz. Daher soll in diesem Dokument das Potential von WEBAM im Vergleich zu den anderen DED-Technologien diskutiert werden.

2. WEBAM

Alle DED-Technologien verwenden eine Energiequelle, um zugeführtes Material durch Schmelzen aufzutragen [2] (Abb. 1). Dabei wird das Bauteil schichtweise durch eine Relativbewegung der Materialzuführung zu einer Grundplatte beziehungsweise einem Grundkörper aufgebaut. Dies erfolgt in der Regel

durch Linearbewegung, Drehung und/oder Kippung der Grundplatte/Grundkörper bei statischer Materialzuführung (Abb. 2a). Allerdings gibt es auch Lösungen, bei denen die, mit dem Energiefokus gekoppelte, Materialzuführung bewegt wird und die Grundplatte statisch ist.

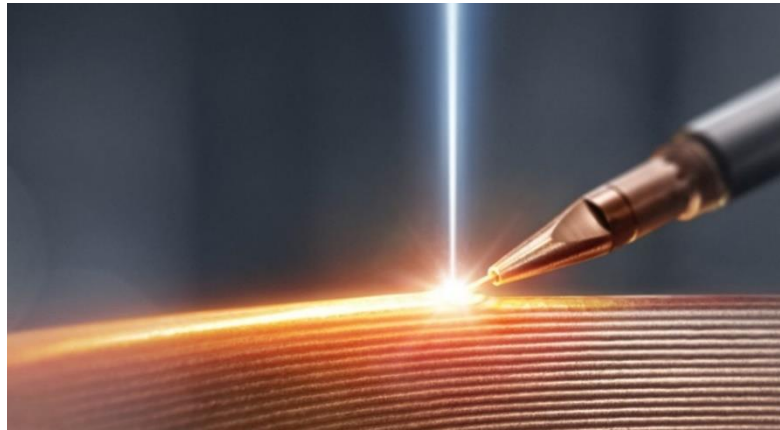


Abb. 1: Darstellung des WEBAM-Prozesses mit angedeutetem Elektronenstrahl (von oben) und Drahtzuführung

Im Falle von WEBAM wird ein Elektronenstrahl als Energiequelle verwendet, der senkrecht auf die Prozesszone auftrifft (Abb. 1). Das Besondere an WEBAM ist, dass der Prozess wegen starker Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit Gasmolekülen in der Regel im Hochvakuum erfolgen muss.

Ein Vorteil von WEBAM ist die leichte und schnelle Steuerung des Strahls durch elektromagnetische Felder, ein Vorgang der vergleichbar mit der Funktion von Röhrenfernsehgeräten ist. Da eine gesteuerte Zuführung von Pulver mittels Blasens im Vakuum nicht möglich ist, muss das Material in Form von Draht eingebracht werden (Abb. 2b). Eine detaillierte Beschreibung des WEBAM-Prozesses kann in der Referenz [5] gefunden werden.

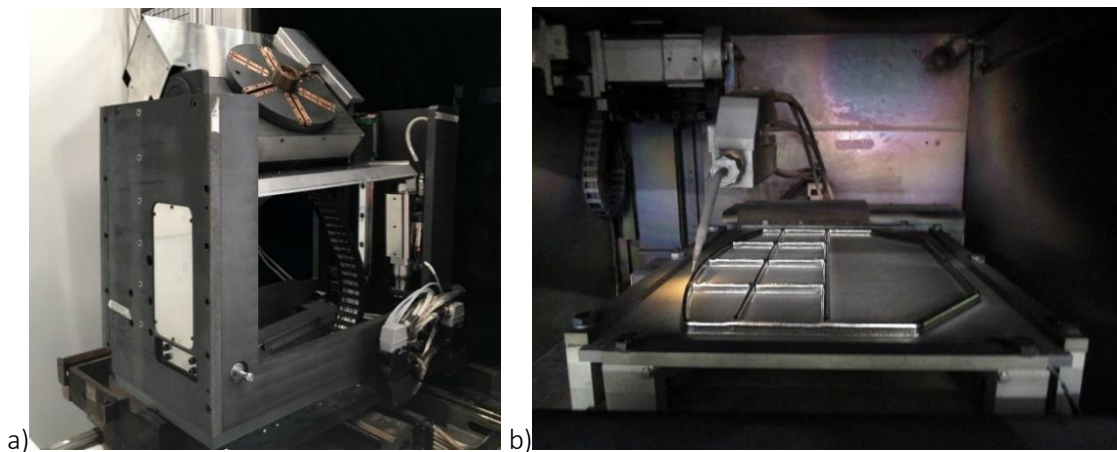


Abb. 2: a) Dreh-/Kipp-/Hubtisch, b) Blick in das Innere der WEBAM-Anlage. Der Drahtförderer und ein doppelseitiges Ti6Al4V Bauteil auf einer Platte mit den Maßen 500 mm x 400 mm x 10 mm

3. Anlagen und Betriebskosten

WEBAM ist eine relativ teure Technik, deren Anwendung nur bei hochwertigen Produkten mit entsprechenden Qualitätsansprüchen gerechtfertigt ist. Dabei führt insbesondere die erforderliche Hochvakuumtechnologie zu erhöhten Kosten. Zu beachten ist jedoch, dass bei reaktionsstarken Metallen auch WAAM und Laser-DED vielfach eine Schutzgaskammer mit Vakuumtechnik eingesetzt werden muss.

Bei den Energiequellen ist WAAM deutlich günstiger als WEBAM und Laser-DED. Die Kosten für Hochleistungslaser sind mit denen für Elektronenstrahlkanonen vergleichbar.

Einen großen Anteil der Anlagenkosten ist den Vorrichtungen für präzise Bauteil- beziehungsweise Energiequellenmanipulation und der Sicherheitstechnik zuzuschreiben. Diese Kosten sind bei allen drei DED-Technologien in vergleichbarer Höhe.

Bei den Betriebskosten überzeugt die Elektronenstrahltechnologie mit der Effizienz des Energieeintrags im Prozess. Außerdem benötigt sie durch den Einsatz im Hochvakuum kein Schutzgas, das bei den anderen Technologien zu zusätzlichen Kosten führt. Optische Verschleißteile müssen bei den Betriebskosten nicht berücksichtigt werden.

4. Materialien

Die Stärken der WEBAM-Technologie im Vergleich zu Konkurrenztechnologien liegen insbesondere bei folgenden Materialien:

4.1. Metalle mit hoher Oxidationsaktivität

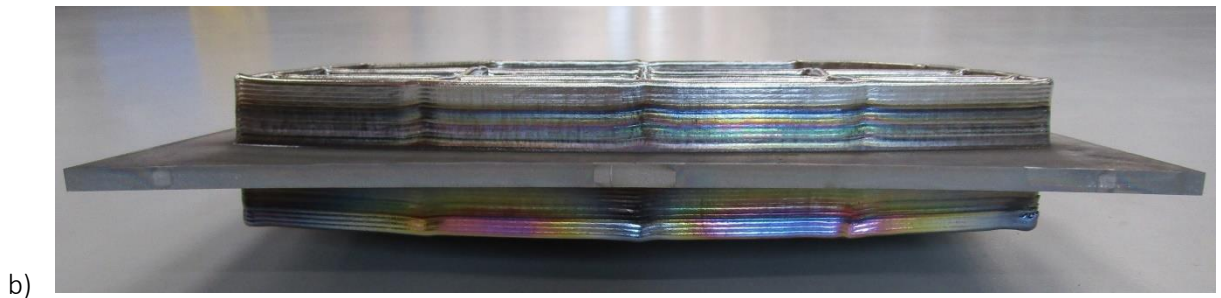
Eine Kontamination der Schmelze durch Luftmoleküle kann bei WEBAM selbst für Refraktärmetalle ausgeschlossen werden, da der Prozess im Hochvakuum stattfindet. Insbesondere in wichtigen Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt, Nukleartechnik und der chemischen Industrie wird diese Eigenschaft bei beispielsweise Titanlegierungen und Zirkalloy geschätzt.

Additiv gefertigte Klammern aus Ti6Al4V werden bereits in der Luftfahrtindustrie eingesetzt. Abb. 3a ist ein Beispiel für eine mit dem WEBAM-Verfahren hergestellte Klammer. Die Bauzeit betrug hierbei 70 Minuten. Bedenkt man, dass solche Bauteile bislang aus dem Vollen gefräst wurden, ist es einleuchtend, dass die additive Fertigung aufgrund des reduzierten Metallabfalls ökologisch, aber auch ökonomisch sinnvoll sein kann.

Abb. 3b zeigt eine Stegstruktur, die auf beiden Seiten einer Titanplatte aufgebaut wurde (in Abb. 2b ist diese Stegstruktur von oben zu sehen). Sie ist eine Vorstufe zur Entwicklung von Bauteilen aus der Luftfahrt. Auch hier wird das Endprodukt bisher aus dem Vollmaterial gefräst.



a)



b) *Abb. 3: Beispiele für Titanbauteile a) Klammer für die Luftfahrtindustrie (nach der mechanischen Bearbeitung), b) Steg-Struktur auf einer 500 mm x 400 mm x 10 mm Platte*

4.2. Metalle mit hohem Schmelzpunkt

Auf Grund der hohen Energiedichte des Elektronenstrahls können auch Metalle mit hohem Schmelzpunkt wie beispielsweise Wolfram, Tantal (Abb. 4), Molybdän, Niob und Vanadium gut mit der WEBAM-Technologie verarbeitet werden.



Abb. 4: WEBAM Halbschale aus Tantal, mechanisch bearbeitet (Mit freundlicher Genehmigung von Nuclear AMRC)

4.3. Metalle mit hoher Lichtreflexionsrate

Ein großer Markt insbesondere im Bereich der Energietechnik, der Mobilität und der Raumfahrt existiert für Produkte aus Kupfer. WAAM und Laser-DED mit konventionellen Lasern, letztere auf Grund der hohen Lichtreflexion bei Kupfer, haben Schwierigkeiten bei der additiven Fertigung dieses Materials. Der Elektronenstrahl hingegen erzielt auch bei Kupfer einen hohen Energieeintrag und damit die gewünschte Effizienz.

Abb. 5a zeigt ein vereinfachtes Modell eines Raketenmotors aus Kupfer. Dieses Bauteil wurde mit einer Aufbaurrate von 2,0 kg/h erzeugt. Die Oberfläche wurde nicht mechanisch behandelt und veranschaulicht die hohe Oberflächenqualität des Produkts. Dieses Modell wurde aus drei Einzelteilen zusammengebaut und mit dem Elektronenstrahl geschweißt.

Abb. 5b zeigt eine Vorstudie für Anwendungen im Bereich der Energietechnik. Mit einer Aufbaurrate von 2,0 kg/h wurde Kupfer auf die Mantelfläche eines Stahlrings aufgetragen. Die Dicke der Aufpanzerung beträgt 15 mm. Dabei wurde eine gute mechanische Anbindung der Kupferlage erzielt.

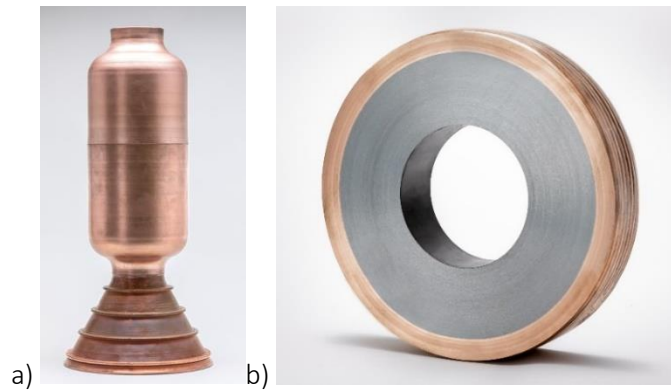


Abb. 5: a) Vereinfachtes Modell eines Raketenmotors (Höhe: 650 mm, maximaler Durchmesser: 295 mm), b) Kupfer-Aufpanzerung auf einen Stahlring (Äußerer Durchmesser Stahlring 200 mm)

5. Energiedichtevertellung

Ein Vorteil von WEBAM gegenüber Laser-DED und WAAM ist die wesentlich größere Flexibilität in der Kontrolle des Energieeintrags. Bei Laser-DED wird in der Regel das Gebiet des Energieeintrags mittels entsprechender Defokussierung des Laserstrahls erzielt, wobei die Energieverteilung häufig eine Gauß- oder Top-Hat-Vertellung ist. Modifikationen dieser Energieverteilung sind nur schwer möglich, gegebenenfalls durch zusätzliche Linsen- oder Spiegelsysteme. Bei WEBAM dagegen kann die Energieverteilung mittels Oszillation des Strahls leicht kontrolliert werden. Mit einer definierten Einstellung der Amplituden dieser Oszillation kann die Breite der Schmelze eingestellt werden. Die Figur der Oszillation definiert die entsprechende Energiedichtenverteilung. Abb. 6 zeigt die Beispiel-Figur „kleiner Fisch“ bei einer Frequenz von 1 kHz. Diese Figur führt zu einer Energiekonzentration in der Mitte, die das Aufschmelzen des Drahts unterstützen soll. Die größere Amplitude des Fisches gibt die Breite des Schmelzbades vor.

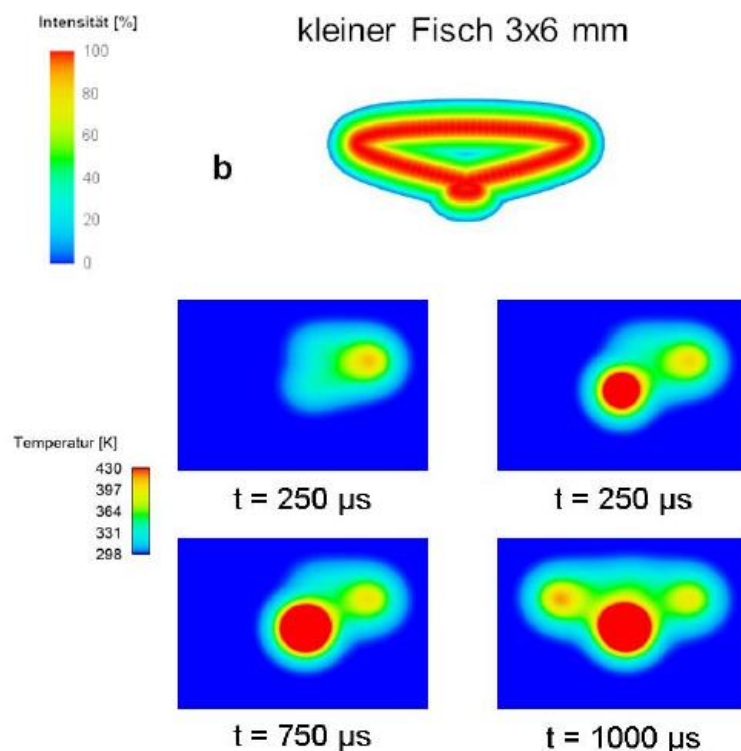


Abb. 6: Intensitätsverteilung und zeitlicher Ablauf der Energieeinbringung für die Oszillation „kleiner Fisch“ (Mit freundlicher Genehmigung von NMF)

Die Energiedichte-Verteilung ist maßgeblich für die Ausbildung der Schmelzraupe verantwortlich, da die aus ihr resultierende Temperaturverteilung zum Beispiel die Eindringtiefe der Schmelze in die Basis, die Marangoni-Konvektion und den Dampfdruck des geschmolzenen Metalls beeinflusst. Abb. 7 stellt zwei Querschliffe der ersten Lage eines Auftrags dar, die mit zwei unterschiedlichen Oszillationsfiguren bei sonst gleichen Prozessparametern gefertigt wurden. Es ist deutlich, dass bei gleicher Schmelzraupenbreite das Schmelzvolumen und die Raupenkrümmung unterschiedlich sind. Damit ist eine Kontrolle der Schmelzraupenbildung durch die eingesetzte Oszillationsfigur gegeben. Diese Möglichkeit rechtfertigt weitergehende Forschungsaktivitäten. Erste Untersuchungen in diese Richtung wurden bereits mit Hilfe einer Fluid-Dynamik-Simulation ausgeführt. Diese verspricht eine zusätzliche Kontrolle der Qualität von WEBAM Bauteilen in der Zukunft.

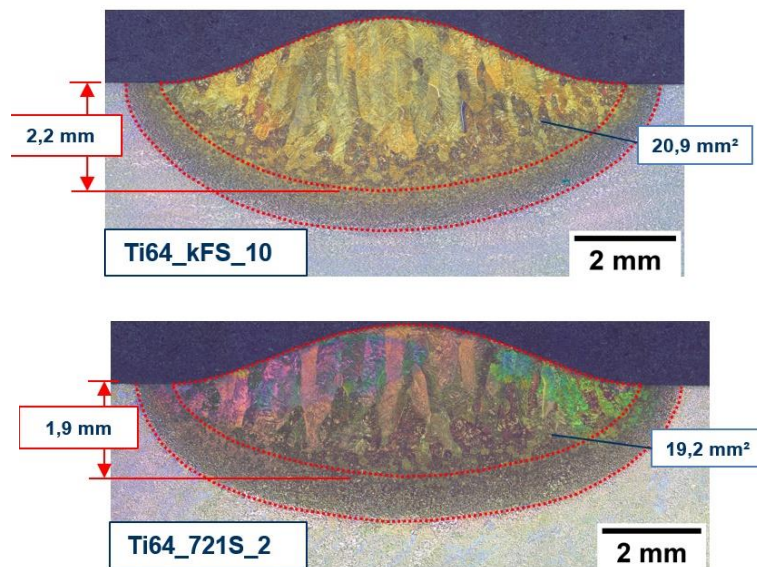


Abb. 7: Querschliffe der ersten WEBAM Lage von Ti6Al4V bei zwei unterschiedlichen Oszillationsfiguren und ansonsten gleichen Parametern (Mit freundlicher Genehmigung von NMF)

6. Zusammenfassung

Die drahtbasierte additive Fertigung mit dem Elektronenstrahl ist in der Lage Produkte mit hohen Qualitätsansprüchen und aus Materialien, bei denen andere Technologien Schwierigkeiten haben, bereitzustellen. Dabei sind insbesondere Materialien mit hoher Oxidationsaktivität, mit hoher Schmelztemperatur und mit hoher Lichtreflexion zu nennen. Darüber hinaus verspricht die konkurrenzlose Kontrolle des Energieeintrags die Möglichkeit einer verbesserten Oberflächenqualität.

7. Referenzen

- [1] AMPower Insights (Ed.), Additive Manufacturing, New metal technologies, 2020.
- [2] ISO, Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology (ISO/ASTM 52900:2015(E)), 2016.
- [3] K. Taming, R.A. Hafley, Electron beam freeform fabrication: A rapid metal deposition process, Proceedings of the 3rd Annual Automotive Composites Conference (2003).
- [4] K. Taming, R.A. Hafley, Electron Beam Freeform Fabrication for Cost Effective Near-Net Shape, NATO/RTOAVT-specialists meeting on cost effective manufacture via net shape processing (2006).
- [5] B. Baufeld, S. Schönfelder, T. Löwer, Wire electron beam additive manufacturing at pro-beam, in: IEBW - International Electron Beam Welding Conference 2021, 2021, pp. 93–99.

1. Einleitung

Das Schweißplattieren mit Schweißzusätzen aus korrosionsbeständigen NiCrMo-Legierungen ist ein etabliertes Verfahren zum Schutz von thermischen Verwertungsanlagen vor Hochtemperaturkorrosion, -erosion und -abrasion. Die für diese Anwendung am meisten verwendeten Vertreter sind die Ni-legierten Drahtelektroden S Ni 6625 (NiCr22Mo9Nb) und S Ni 6686 (NiCr21Mo16W4). Als Verfahren zum Schweißplattieren von Flossenrohrwänden und Überhitzerrohren werden in der Industrie bevorzugt das MSG-CMT-Schweißen oder das MSG-Schweißen mit Impulslichtbogen eingesetzt. Beide Technologien generieren eine geringe Aufmischung des Substrates bei hoher Abschmelzleistung sowie glatte und gleichmäßige Nahtoberflächen. Erzielbare Schichtdicken variieren zwischen 0,8 mm bis 3 mm je nach eingesetzter Technologie und Anzahl der aufgeschweißten Lagen. [1]

Die Zugabe eines zusätzlichen Drahtes als Heißdraht ermöglicht nicht nur eine Steigerung der Abschmelzleistung, sondern ermöglicht auch eine gezielte Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes, wenn der Zusatzdraht aus einer anderen Legierung als der Hauptdraht besteht. Somit ergibt sich neben der Erhöhung der Produktivität auch die Möglichkeit einer gesteigerten Korrosionsbeständigkeit durch individuell an die Bedürfnisse angepassten Legierungen.

Für die Nutzung dieser Technologie bedeutet die Zuführung einer zweiten stromdurchflossenen Drahtelektrode jedoch eine Zunahme von möglichen Einstellparametern und damit eine Steigerung der Komplexität. Die statistische Versuchsplanung ermöglicht die Bildung eines empirischen Modells, mit welchem die Haupteinflussgrößen bestimmt und Vorhersagen zu Schweißergebnissen getroffen werden können. [2] Mit einer Zielgrößenoptimierung lassen sich die optimalen Schweißparameter für jedes Drahtverhältnis identifizieren. Der Beitrag stellt ausgewählte Ergebnisse dieser Parameteroptimierung für das Herstellen einlagiger Schweißplattierungen auf gekühlten Überhitzerrohren in Abhängigkeit verschiedener Drahtverhältnisse (Masseanteil von Heißdraht zur Drahtelektrode) vor. Zudem wird das Potential des Einsatzes verschiedener Drahtelektroden für eine gezielte Legierungseinstellung erörtert.

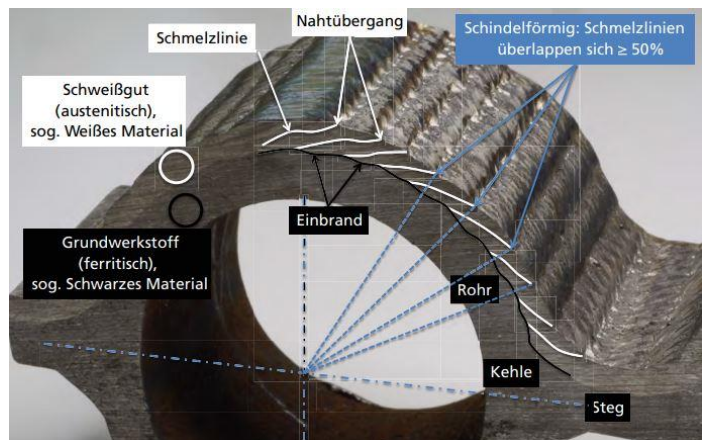


Abb. 1: Aufbau einer auftragsgeschweißten Flossenrohrwand [1]

2. Versuchsaufbau

Das Auftragsschweißen erfolgte mit dem MAG-Impulslichtbogenprozess mit Heißdrahtzuführung unter Verwendung von S Ni 6625 als Hauptdrahtelektrode und S Ni 6686 als Heißdrahtelektrode. Beide Drahtelektroden besitzen einen Durchmesser von $\varnothing 1,2$ mm. Die chemische Zusammensetzung beider Materialien zeigt Tabelle 1. Beide Drahtelektroden verfügen über hohe Cr- und Mo-Anteile S Ni 6625. Während S Ni 6625 darüber hinaus mit ca. 4 % Nb legiert ist, um bei höheren Einsatztemperaturen Nb-Karbide zu bilden, enthält S Ni 6686 ca. 3,3 % Wolfram. Das kostenintensive Wolfram wirkt korrosionschemisch ähnlich wie Molybdän und trägt ebenfalls stark zur Mischkristallverfestigung bei. Bei hohen Einsatztemperaturen können sich bei entsprechendem C-Angebot auch W-Karbiden bilden.

Tabelle 1: Chemische Analyse der Drahtelektroden nach DIN EN ISO 18274 und bestimmt mittels Button Melt Technik und Spektralanalyse (AES)

Drahtelektrode		Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	W	C	Si	Mn
S Ni 6625	DIN EN ISO 18274	>58	20-23	≤5,0	8-10	3,0-4,5	-	≤0,10	≤0,50	≤0,5
	Button AES	64	22,5	0,14	8	4,2	-	0,01	0,08	0,005
S Ni 6686	DIN EN ISO 18274	>49	19-23	≤5,0	15-17	-	3,0-4,4	≤0,01	≤0,08	≤1,0
	Button AES	59	21,5	0,32	14,8	-	3,3	0,008	0,12	0,26

Die aus der Verwendung zweier nicht artgleicher Drahtelektroden resultierende Mischungsreihe ist in Tabelle 2 dargestellt und kann über die Variation der Drahtvorschubgeschwindigkeiten beider Drähte gezielt eingestellt werden. Die Abb. 2 stellt exemplarisch die Zusammensetzung eines Mischschweißgutes aus 50 % S Ni 6625 und 50 % S Ni 6686 dar. In der Zusammensetzung ist zusätzlich der Anteil an den aufgemischten Substratwerkstoff berücksichtigt. Hierbei handelt es sich um ferritische Rohre mit dem Abmaßen Ø 60,3x5 mm aus P235GH. Je nach eingesetzten Schweißverfahren liegt der Anteil an mit aufgemischten Substratwerkstoff bei ca. 10 %-15% für das Impulslichtbogenverfahren und ca. 5 % für den CMT-Schweißprozess. [1] Um eine große Bandbreite an auswertbaren Ergebnissen zu erzielen, wurden die Zusammensetzungen der Mischungsreihe stufenweise in 10 % Schritten von HD-Anteil variiert.

Tabelle 2: Zusammensetzung der Mischungsreihe

Mischung	1	2	3	4	5
S Ni 6686 [%]	10	20	30	40	50
S Ni 6625 [%]	90	80	70	60	50
P235GH [%]	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15

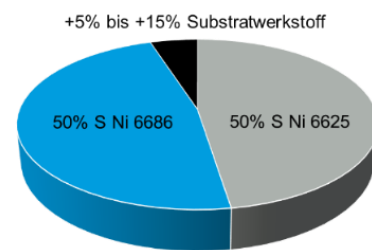


Abb. 2: Zusammensetzung eines 50 % / 50 % Mischschweißgutes

Abb. 3 zeigt den verwendete Schweißversuchsstand, bestehend aus der Schweißstromquelle EWM Titan XQ 500 puls DW, der Heißdrahtzuführung EWM tigSpeed drive 45 hotwire sowie dem vollmechanisierten Brennerführungssystem. Das Rohr wird in einem Dreibackenfutter eingespannt und rotiert, während sich der Brenner auf einer Linearführung entlang der Längsachse des Rohres bewegt. Die Kombination aus Rotation und Längsvorschub führt zu einer einlagigen Schweißnaht, die sich spiralförmig mit einer Überlappung von ca. 50 % um das Rohr windet.

Die Zuführung des Heißdrahtes erfolgt - wie in Abb. 4 dargestellt - in einem Winkel von 47 ° zum Brenner stechend in das Schmelzbad. Der ebenfalls in der Abb. gezeigte Fokuspunkt beschreibt den Schnittpunkt der beiden Drahtelektroden. Die Distanz zwischen Fokuspunkt und Rohroberfläche wird nachfolgend als Abstand A bezeichnet und ist von zentraler Bedeutung für die Prozessstabilität. Über den Abstand A wird festgelegt, ob der Heißdraht primär vom Lichtbogen ab- oder vom Schmelzbad aufgeschmolzen wird. Zur Minimierung der Aufmischung erfolgt eine Kühlung des Rohres mit 25 °C bis 30 °C temperierten Wasser. Bei Schweißen findet das Schutzgas ISO 14175 – Z – ArHeHC – 30/2/0,05 Einsatz, welches speziell für Nickelbasislegierungen entwickelt wurde und seither eine weite Verbreitung erfährt. Dieser Versuchsaufbau wurde der industriellen Praxis nachempfunden und wird in ähnlicher Art und Weise bei den Herstellern von auftraggeschweißten Flossenrohrwänden und Überhitzerrohren eingesetzt.

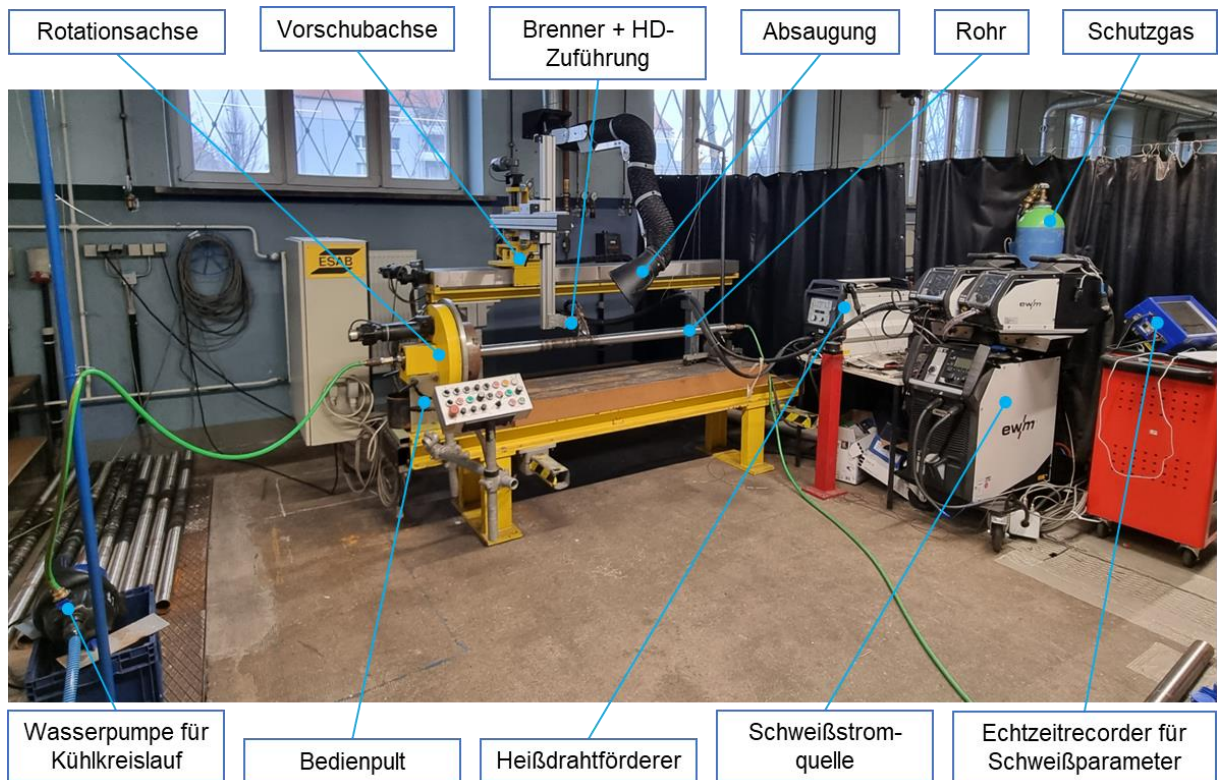


Abb. 3: Versuchsstand zum Schweißplattieren wassergekühlter Rohre

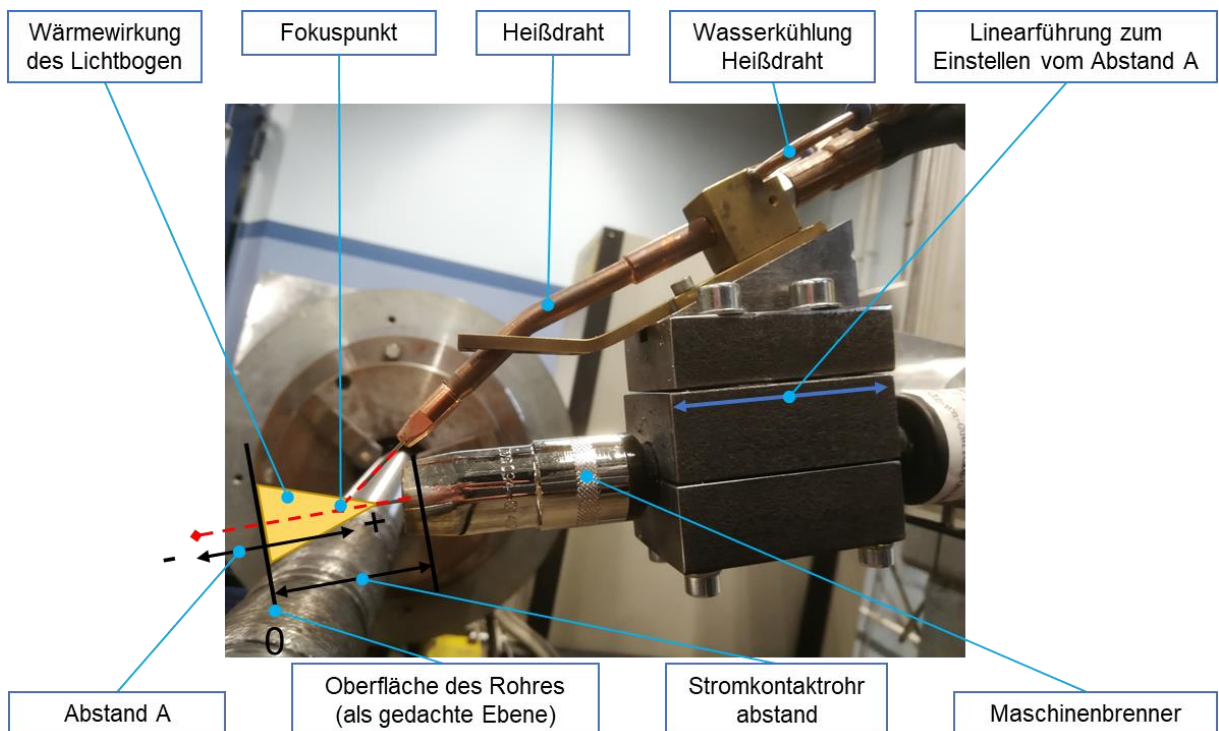


Abb. 4: Detail der Heißdrahtzuführung am Maschinenbrenner

3. Statistische Versuchsplanung (DoE) zur effizienten Inbetriebnahme komplexer Prozesse

Die Verwendung eines zusätzlichen Heißdrahtes und damit einer weiteren Stromquelle stellt den Anwender vor die Hürde eines komplexer werdenden Prozesses der mehr Einstellgrößen und weitere Einflussfaktoren bietet. Die wichtigsten zusätzlichen Einstellgrößen, die durch Verwendung eines Heißdrahtes hinzukommen, sind:

- Zuführungswinkel
- Abstand A
- Heißdrahtstrom
- Stick-Out
- Drahtvorschubgeschwindigkeit und
- Drahtdurchmesser des Heißdrahtes.

Um diesen Schweißprozess optimal sowie zeit- und kosteneffizient einzustellen wurde eine systematische Methodik entwickelt, welche auch die statistische Versuchsplanung (DoE) mit einbezieht.

Im ersten Schritt werden hierfür die Zielgrößen definiert. Diese sind für die vorgestellte Anwendung ein qualitätsgerechtes äußeres Nahtbild und ein möglichst kurzschlussfreier Lichtbogen. Denkbar sind auch weitere quantitativ erfassbare Zielgrößen, wie beispielsweise der Aufmischungsgrad, die Abschmelzleistung oder die Schichtdicke. Im zweiten Schritt werden alle Einflussfaktoren unter Anwendung eines Ursachen-Wirkungs-Diagrammes nach ISHIKAWA [5] erfasst und sortiert. Auf diese Weise erhält der Anwender eine übersichtliche Darstellung aller Einflussfaktoren.

Auf Grundlage von Kenntnissen und Erfahrungen erfolgt anschließend die Einteilung dieser Zielgrößen in beeinflussbare und nicht beeinflussbare sowie in relevante und nicht relevante Einflussfaktoren. Dieser Schritt ist notwendig, um den Versuchsaufwand im Vorfeld zu minimieren. Für die relevanten beeinflussbaren Einstellgrößen wird anschließend mit Hilfe einer DoE-Software ein Versuchsplan erstellt. [3] Dieser Versuchsplan erzeugt einen Versuchsraum wie Abb. 5, links exemplarisch dargestellt.

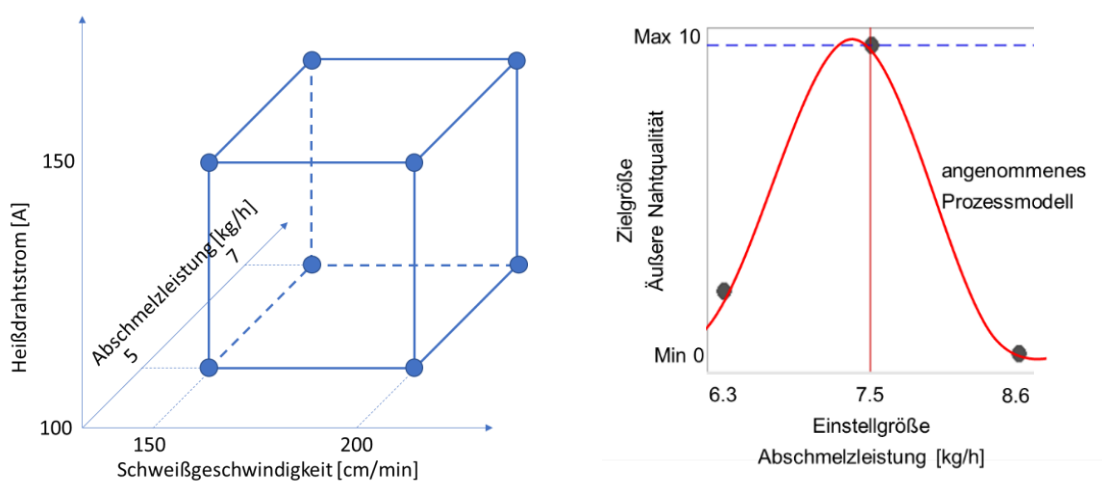


Abb. 5: Versuchsraum mit 3 Faktoren und 2 Stufen (links) und Optimierungsdiagramm für die äußere Nahtqualität in Abhängigkeit der Abschmelzleistung (rechts)

Zur optimalen Gestaltung des Versuchsplanes, kann es sinnvoll sein, in Vorversuchen beispielsweise die Grenzen des Versuchsraumes besser abzuschätzen oder irrtümlich für relevant gehaltene Einflussfaktoren auszusortieren. Für diesen Zweck existieren spezielle Vorversuchspläne - sogenannte Screeningpläne mit minimierter Versuchsanzahl. [4] Des Weiteren ist es oftmals sinnvoll den ursprünglich vollfaktoriellen auf einen teil-faktoriellen Versuchsplan zu kürzen. Der sich daraus ergebene Verlust an Informationen über Abhängigkeiten höherer Ordnung ist für die meisten Anwendungen irrelevant. Mit Hilfe dieser Optimierungen am Versuchsplan ist es möglich, bis zu 6 Einstellgrößen mit jeweils bis zu 3 Stufen in Versuchsplänen mit weniger als 30 Versuchen darzustellen. Dies ist ausreichend um einen Schweißprozess in seiner Gesamtheit zu erfassen.

Nach dem vollständigen Abschweißen des Versuchsplans (siehe exemplarisch Abb. 6) und dem Vermessen der Zielgrößen, wertet die DoE Software die Ergebnisse aus und erstellt ein empirisches mathematisches Modell des Prozesses.



Abb. 6: Komplett abgeschweißter Versuchsplan auf 2 m langem Rohrstück mit 24 plattierten Segmenten

Aus diesem Modell können dann die eigentlichen Ergebnisse der DoE, die Optimierungsdiagramme, abgeleitet werden. Aus diesen lassen sich dann die optimalen Prozesswerte (Abb. 5, rechts) sowohl für die einzelnen Einstellgrößen-Zielgrößen-Abhängigkeiten als auch für eine gewichtete Überlagerung aller Zielgrößen ablesen. Dies ermöglicht eine zielgerichtete Einstellung des Prozesses hin zum gewünschten Ergebnis und eröffnet darüber hinaus ein tiefgreifendes Verständnis der Abhängigkeiten der einzelnen Schweißprozessparameter.

4. Wirtschaftliches Potenzial beim Heißdrahtplattieren

Mit den aus der DoE abgeleiteten optimalen Parametern sind anschließend längere Rohrsegmente mit den in Tabelle 1 aufgeführten Mischungsverhältnissen plattiert worden. Der steigende Anteil an Heißdraht erforderte eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit beider Drähte (Haupt- und Heißdraht) (Abb. 7).

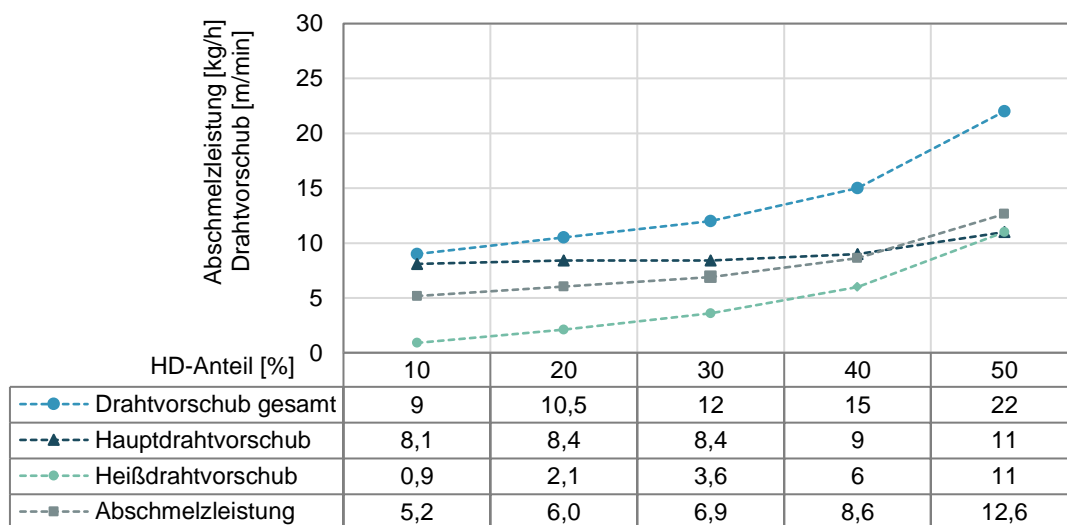


Abb. 7: Abschmelzleistung und Drahtvorschub beim Plattieren mit Heißdraht

Die Summe aus den Vorschüben von Haupt- und Heißdraht ergibt den gesamten Drahtvorschub, der hier bei maximal 22 m/min liegt. Es wären noch höhere Werte erreichbar, jedoch ist dies durch die höchstmögliche Schweißgeschwindigkeit (Drehzahl) der genutzten Anlage begrenzt. Gegenüber dem alleinigen MSG-Impulslichtbogenprozess ($v_{Dr} = 8,4$ m/min, Draht- $\varnothing = 1,2$ mm) ergibt sich eine Steigerung der Abschmelzleistung um 160 % ($4,9$ kg/h \Rightarrow $12,6$ kg/h).

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen plattierte Rohrsegmente mit verschiedenen HD-Anteilen.

Die Prüfung der Schweißplattierungen erfolgte mit Visuell Testing (VT), Penetration Testing (PT), Seitenbiegeprüfung nach DIN EN ISO 5173:2012, chemischer Analyse, Härteprüfung und Metallographie.

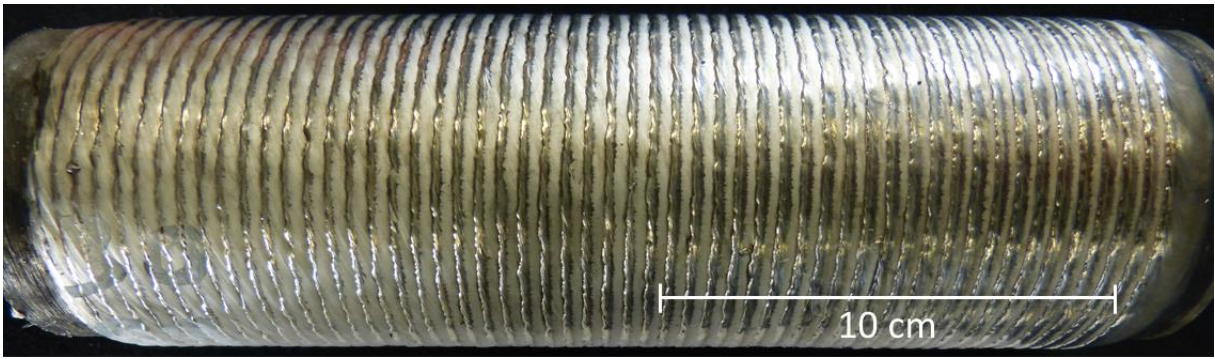


Abb. 8: Plattiertes Rohrsegment mit 70 % S Ni 6625 und 30 % HD-Anteil aus S Ni S Ni 6686

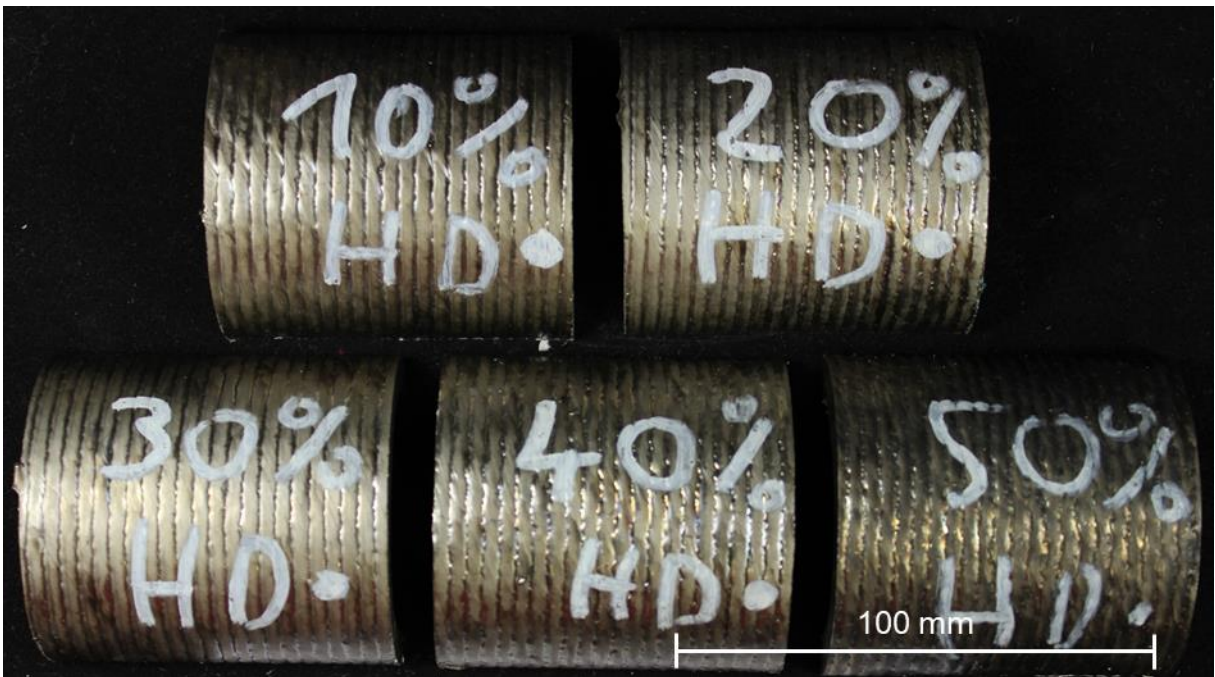


Abb. 9: Plattierte Rohrsegmente mit verschiedenen HD-Anteilen (Hauptdraht: S Ni 6625 und Heißdraht: S Ni S Ni 6686)

Alle Plattierungen waren frei von Anzeigen und somit frei von äußeren Nahtunregelmäßigkeiten, wie Heißrissen, Bindefehler oder Poren. Ab 40 % HD-Anteil wird der Nahtübergang jedoch unregelmäßiger. Durch Einsatz einer Schleppegasdüse lässt sich die sekundäre Nahtoxidation z. B. bei 40 % und 50 % HD reduzieren. Mit steigendem Heißdrahtanteil und damit steigender Abschmelzleistung erhöht sich bei einer konstant eingehaltenen Nahtüberlappung von 50 % erwartungsgemäß auch die Plattierungsdicke an (Abb. 10). Durch Veränderung der Nahtüberlappung ist diese Größe jedoch in einen weiten Bereich frei einstellbar insofern das äußere Nahtbild sich nicht negativ verändert.

Bei allen nach dem zuvor beschriebenen Versuchsaufbau durchgeführten Schweißungen zog die Erhöhung des Heißdrahtanteils eine erhebliche Reduzierung der Aufmischung mit dem Grundwerkstoff nach sich (Abb. 11). Die Berechnung des Aufmischungsgrades erfolgte dabei mit folgender Formel:

$$\Phi_{\text{chemisch}} = \frac{Fe_{\text{Cladding}} - Fe_{\text{SZW}}}{Fe_{\text{GW}} - Fe_{\text{SZW}}} * 100 \quad [\%] \quad [6]$$

Fe_{Cladding}: Fe-Gehalt der Plattierung in wt%

Fe_{SZW}: Fe-Gehalt beider Drahtelektroden in wt%

Fe_{GW}: Fe-Gehalt des Grundwerkstoffes in wt%

Bei einer Zugabe von 10 % Heißdraht liegt der Aufmischungsgrad bei ca. 7 %, während er sich bei 40 % Heißdrahtzugabe auf <0,1 % reduziert. Das entspricht einem Niveau, das sonst nur mit zweilagigen Schweißungen erreicht werden kann. Ermöglicht wird dies, weil dem Schmelzbad durch den Heißdraht Wärmeenergie entzogen wird.

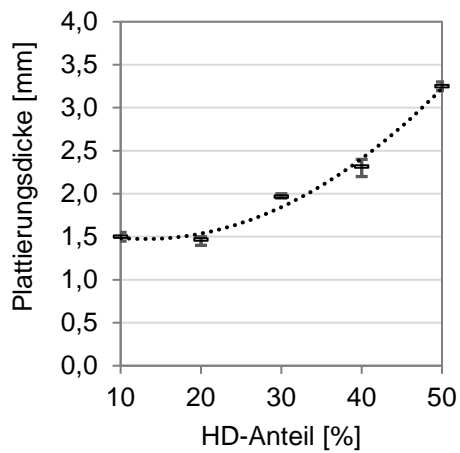


Abb. 10: Abschmelzleistung beim Plattieren mit Heißdraht

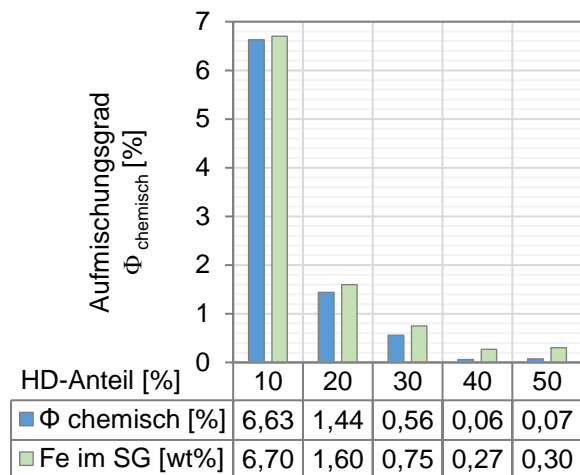


Abb. 11: Aufmischungsgrad beim Plattieren mit Heißdraht

Zur Bestimmung des Eisenanteils der Plattierung wurden das Rohr plattgedrückt und ca. 0,3 mm der Nahtoberfläche abgefräst. Auf der abgefrästen Fläche erfolgte dann die Spektralanalyse. Trotz des geringen Aufmischungsgrades zeigt die Seitenbiegeprüfung keinerlei Anbindungsfehler zwischen Substrat und Auftragschweißung. Für die metallographischen Querschliffe wurden separate Proben auf dem Rohr gefertigt, die aus metallographischen Präparationsgründen (Breite der Einbettmasse) aus vier Schweißraupen bestehen. Diese Querschliffe waren frei von Poren oder Bindefehlern. Die Ergebnisse der Mikrohärtemessungen zeigt Abb. 12. Die höchste Härte tritt im Schweißgut auf. Ein Einfluss der chemischen Analyse durch den veränderten HD-Anteil ist jedoch nicht erkennbar.

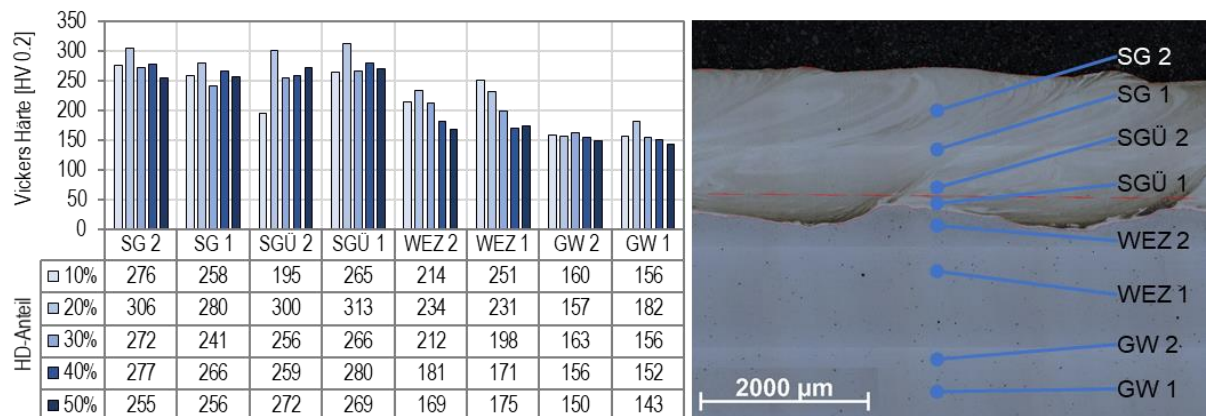


Abb. 12: Mikrohärtete im Schweißgut (SG), Übergang Schweißgut zum Grundwerkstoff (SGÜ), in der Wärmeinflusszone (WEZ) des GW und im Grundwerkstoff (GW) in Abhängigkeit des HD-Anteils

Unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse ist aktuell eine Auftragschweißung mit 30 % bis 40 % HD-Anteil als optimal anzusehen, da bei noch höhere HD-Anteil die Drahtvorschubeinrichtungen an ihre mechanischen Fördergrenzen kamen, was zu Prozessbeeinträchtigungen führte.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das Auftragschweißen mit Heißdraht bietet hervorragende Perspektiven die Produktivität vorhandener Prozesse zu verbessern. Über erste industrielle Umsetzungen wurde bereits in [7] berichtet. Die dafür notwendige Anlagentechnik ist kommerziell breit verfügbar und hat niedrige Investitionskosten. Mit dem hier beschriebenen Versuchsaufbau lassen sich optimalerweise einlagige Schweißungen mit 30 % bis 40 % HD-Anteil herstellen, welche eine 2,0 bis 2,5 mm dicke Plattierung erzeugen und einen Aufmischungsgrad von unter 0,6 % (<0,75 %wt Fe) aufweisen. Die glatte Nahtoberfläche zeugt von der hohen Qualität der Schweißung. Die größte Hürde bei der Implementierung dieses Prozesses ist die Inbetriebnahme. Die Vielzahl möglicher Einstell- und Einflussgrößen erfordert entweder eine große Erfahrung in diesem Bereich oder ein strukturiertes und methodisches Vorgehen bei der Parameterfindung. Im besten Fall verfügt der Anwender über beides. Die Methode der statistischen Versuchsplanung (DoE) ist ein Werkzeug um besonders effizient, optimale Ergebnisse zu erzielen. Dabei ist die DoE in Ihrer Anwendbarkeit nicht nur auf Schweißprozesse beschränkt, sondern kann auch auf viele weitere Prozesse übertragen werden.

Der weitere Vorteil des MSG-Schweißens mit Heißdraht besteht auch darin, dass nicht nur zwei artgleiche, sondern wie in dem vorgestellten Beispiel auch artähnliche Drahtelektroden zeitgleich verarbeitet werden können. Dies ermöglicht eine gezielte Beeinflussung des Gefüges, der Korrosionsbeständigkeit und der mechanisch-technologischen Eigenschaften.

6. Schrifttum

- [1] Herzog T 2019 Status und Zukunft des Cladding Energie aus Abfall ed S Thiel et al (Neuruppin: Thome-Kozmiensky Verlags GmbH) pp 521–38
- [2] Siebertz K, van Bebber D and Hochkirchen T Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE) (VDI-Buch) (Berlin, Heidelberg: Springer)
- [3] Minitab Inc Minitab
- [4] Minitab GmbH Screening-Versuchspläne <https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/screening-designs/> (accessed 12 Jan 2022)
- [5] Ishikawa, K.: Guide to Quality Control: Industrial engineering and technology 2nd edn (Asian Productivity Organization), Gebundene Ausgabe – 1. Januar 1986.
- [6] Dilthey U 1994 Schweißtechnische Fertigungsverfahren: Schweiß- und Schneidtechnologien 2nd edn (Berlin, Heidelberg: Springer): S. 181
- [7] Studte, H.-J.: Möglichkeiten zur Erhöhung der Abschmelzleistung durch den Einsatz von Heißdraht beim MAG-Auftragschweißen. Schweißen im Anlagen- und Behälterbau. DVS- Berichte Band 333 (2017) S. 74-76 (ISBN 978-3-945023-99-0).

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 21.346 B / DVS-Nr. 01.3280 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf, wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Fronius

Trans Steel

3500

4000 Pulse

5000

5000 Pulse

Infinite applications
to unleash your
welding potential

Hohe Fertigungsgeschwindigkeit
und breites Einsatzspektrum

 Steel Transfer
Technology

 Pulse
Technology



Mehr Informationen finden Sie unter:
www.fronius.com/TransSteel

Die **MIG/MAG** Schweißfunktion

Puls Schweißen kontrolliert und schnell

Mit der neuen TransSteel 4000 Pulse und TransSteel 5000 Pulse hält nun auch der Impuls-Lichtbogen Einzug in die TransSteel Geräteserie. Kontrolliertes Schweißen im Bereich des Überganglichtbogens sowie bestmögliche Schweißbarkeit beim Aluminiumschweißen gehören somit zur Grundausstattung.

Sonder-4-Takt-Betrieb für einen stabileren Lichtbogen

Die Betriebsart „Sonder-4-Takt-Betrieb“ eignet sich besonders für das Schweißen im höheren Leistungsbereich. Im Sonder-4-Takt-Betrieb erfolgt der Schweißstart mit geringerer Leistung. Somit lässt sich der Lichtbogen einfacher stabilisieren.

SynchroPulse Nahtschuppung für Aluminiumlegierungen

Die Option „SynchroPulse“ wird für Schweißverbindungen mit Aluminiumlegierungen empfohlen, bei denen hinsichtlich der Optik eine Nahtschuppung gewünscht ist. Dieser Effekt wird über die Schweißleistung erzielt, welche zwischen zwei Arbeitspunkten wechselt.



SynchroPulse funktioniert im Standard Synergic und Pulse Synergic Mode – jedoch nur bei TransSteel 4000 und 5000 Pulse.

Reused Steels-Wiederverwendende Stähle – Aktuelle Entwicklungen in der DIN EN 1090-Normenreihe

R. Schasse, Barleben

1. Einleitung und Ansatz

In der zurückliegenden jüngeren Vergangenheit rücken vermehrt Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekte in den Fokus der Öffentlichkeit. Dies gilt auch, und insbesondere, für die industrielle Fertigung. Damit sind etwa 20 Jahre nach Einführung der ersten Umweltzertifizierungen für Gebäude und Tragwerke, betrachtet über deren gesamten Lebenszyklus hinweg, diese Themen endgültig im täglichen Wirtschaftsleben angekommen. In zunehmendem Maße stellen derartige Themen ausschlaggebende Argumente im Zuge des Entscheidungsprozesses der Bauherren für eine bestimmte Bauweise oder der Auftragsvergabe dar.



Abb. 1: Kraftwerk Espenhain 1989 (Quelle: <https://www.fotocommunity.de/photo/espenhain-ddr-1989-bernd-wilster/42140277>)

Ein weiterer Schritt in diese Richtung ist die Thematik der Reused Steels bzw. der wiederverwendenden Stähle. Die Grundgedanken dieser Thematik sowie den aktuellen Stand der Normung soll in diesem Beitrag kurz und im Überblick dargestellt werden.

Das Thema der Wiederverwendenden Stähle geht auf eine Initiative der EU zurück. Im Zusammenhang mit den sogenannten „European Green Deal“ ist das Konzept der „Wiederverwendenden Stähle“ entwickelt worden. Der „European Green Deal“ stellt einen „Fahrplan“ für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union dar, um bis zum Jahr 2050 eine nachhaltige Wirtschaft aufzubauen und zu installieren. Dabei geht es keineswegs nur um eine rein idealistische Betrachtungsweise. Vielmehr ist es Ansinnen der EU eine ressourcenschonende und zugleich, eine im internationalen Vergleich, wettbewerbsfähige Wirtschaft in den einzelnen Mitgliedsstaaten zu implementieren bzw. umzustrukturieren. Denn, nach verschiedenen Erhebungen, stehen etwa 35% der gesamten Müllproduktion innerhalb der EU im Zusammenhang mit der Bauwirtschaft. Zudem werden ca. 40 %-50 % der weltweit abgebauten

Rohstoffe der Bauindustrie verwendet [2].

Oberste Prämisse dabei ist es die Nettoimmission von Treibhausgasen bis zum Jahr 2050 zu eliminieren. Zudem soll das wirtschaftliche Wachstum von der Nutzung neuer Ressourcen entkoppelt werden (Stichwort: Kreislaufwirtschaft; siehe zudem Abb. 2). Dabei soll die wirtschaftliche Entwicklung in keinem EU-Staat rückständig bleiben. Denn, nur wenn die unterschiedlichen Regionen innerhalb der EU einen vergleichbaren Lebens- und Arbeitsstandard vorweisen können, hemmt dies Migrationsbewegungen aus wirtschaftlichen Gründen und vermeidet damit letztendlich die Entvölkerung einzelner Regionen.

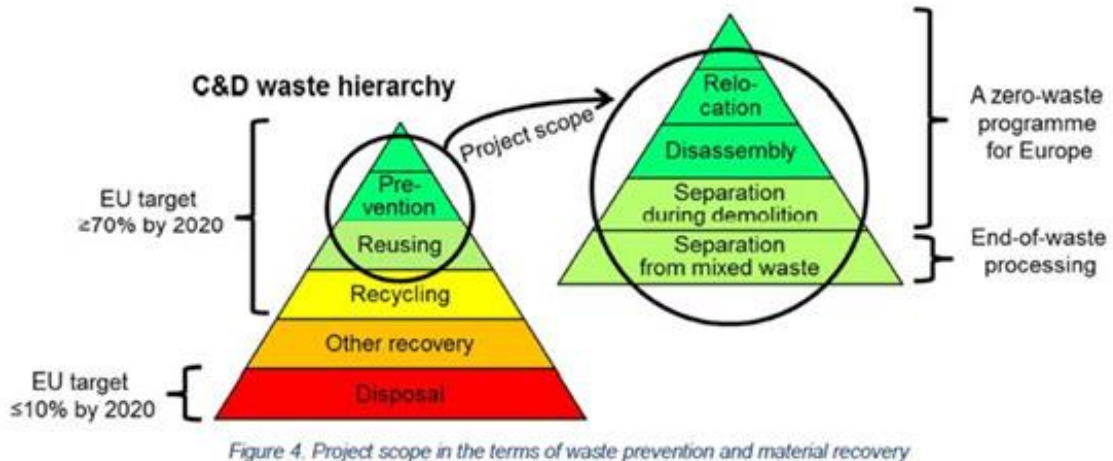


Abb. 2: Ansatz der EU-Projekte für die Vermeidung von Müll und der Wiederverwendung von Materialien (Quelle: <https://www.steelconstruct.com/eu-projects/progress/>)

2. Der EU-Progress

Der EU-Progress [2] stellt eine Studie hinsichtlich der möglichen Wiederverwendung bereits verbauter Stahltragwerke dar und betrachtet dabei Aspekte der Bestandsaufnahme eines Tragwerks, erforderlicher Bauteil- und Materialuntersuchungen, der Demontage sowie Dokumentationen. Auch der mit fast 400 Seiten recht beträchtliche Umfang des Dokuments kann nicht darüber hinwegtäuschen, dass es nur ein erster Anstoß sein kann.

Zielstellungen des EU-Progress sind dabei Vorgaben zur Qualitätsverifizierung wiederzuverwendender Stähle herauszuarbeiten sowie eine Systematisierung der Bauweisen vorzunehmen. Mittels Publikationen, Workshops und Arbeitshilfen soll die Bauweise der wiederzuverwendenden Stähle gefördert werden. Zudem sollen Methoden entwickelt werden, die die Erfassung des positiven Umwelteinflusses, aus ersparten Immissionen im Vergleich zu einer Neuwalzung, und die Refinanzierung transparent darstellen. Ferner sollen, ganz im Sinne der Digitalisierung, Unterstützungen für den IFC-Standard für die BIM-Modelle bereitgestellt werden.

Der EU-Progress teilt zunächst einmal die Wiederverwendung von Stählen für Tragwerke in drei mögliche Anwendungsfälle ein. Diese wären:

- die Wiederverwendung des Tragwerks am selbigen Ort und gleichem Nutzungszweck
- die Wiederverwendung des Tragwerks am selbigen Ort mit verändertem Nutzungszweck
- die Wiederverwendung des Tragwerks anderen Orts (also mit Demontage) und gleichem oder verändertem Nutzungszweck

Grundlegend neu ist der Gedanke nicht. Denn bereits nach dem 2. Weltkrieg wurden vielfach Brücken und andere Tragwerke/Tragwerksteile geborgen und entweder an selbiger Stelle oder anderen Ort mit gleichem, wie dem vorherigen, oder eben auch mit verändertem Nutzungszweck verwendet. Neu an der beabsichtigten Vorgehensweise der EU ist deren systematische und umfassende Anwendung unter normativ geregelten technischen „Spielregeln“. Beispiele der genannten Anwendungszwecke können den nachfolgenden Darstellungen, Abb. 3 bis Abb. 5, entnommen werden.



Abb. 3: Wiederverwendung des Tragwerks am selben Ort und mit gleichem Nutzungszweck



Abb. 4: Wiederverwendung eines Tragwerks mit „Demontage und Zwischenlagerung“



Abb. 5: Wiederverwendung von Tragwerksteilen anderen Orts und mit verändertem Nutzungszweck

Entscheidende inhaltliche Vorgabe des EU-Progress ist nun, dass die demontierten (und aufbereiteten) Vormaterialien über eine Online-Plattform dem Handel und somit dem Markt wieder zugeführt werden sollen.

Darüber hinaus sieht das Dokument einige Einschränkungen vor. So sollen Tragwerke aus Stählen vor 1970 sowie Tragwerke mit vormaliger schwingender Beanspruchung nicht betrachtet werden. Zudem sollen Bauteile, die extremen Lasten, signifikanten Verformungen oder hohen Temperaturen ausgesetzt waren, davon ausgenommen werden. In welchen Größenordnungen extreme Lasten, hohe Temperaturen bzw. signifikanten Verformungen einzustufen sind, bleibt im EU-Progress allerdings un spezifiziert. Des Weiteren wird ein Querschnittsverlust in Form von 5 % Materialdickenverlust infolge Korrosion zugestanden. Das Dokument soll Anwendung finden für Tragwerke und Tragwerksteile bis zur Schadensfolgeklasse CC 3.

Im Weiteren werden die Tragwerksteile, entsprechend der verfügbaren Dokumentenlage, klassifiziert (siehe Abb. 6). Für die Tragwerke und Tragwerksteile, welche den Klassen A oder B zugeordnet werden können, soll zudem bei erneuter Inverkehrbringung eine CE-Kennzeichnung durch den neuen Inverkehrbringer (i.d.R. sind das die Stahlbauunternehmen) vorgenommen werden.

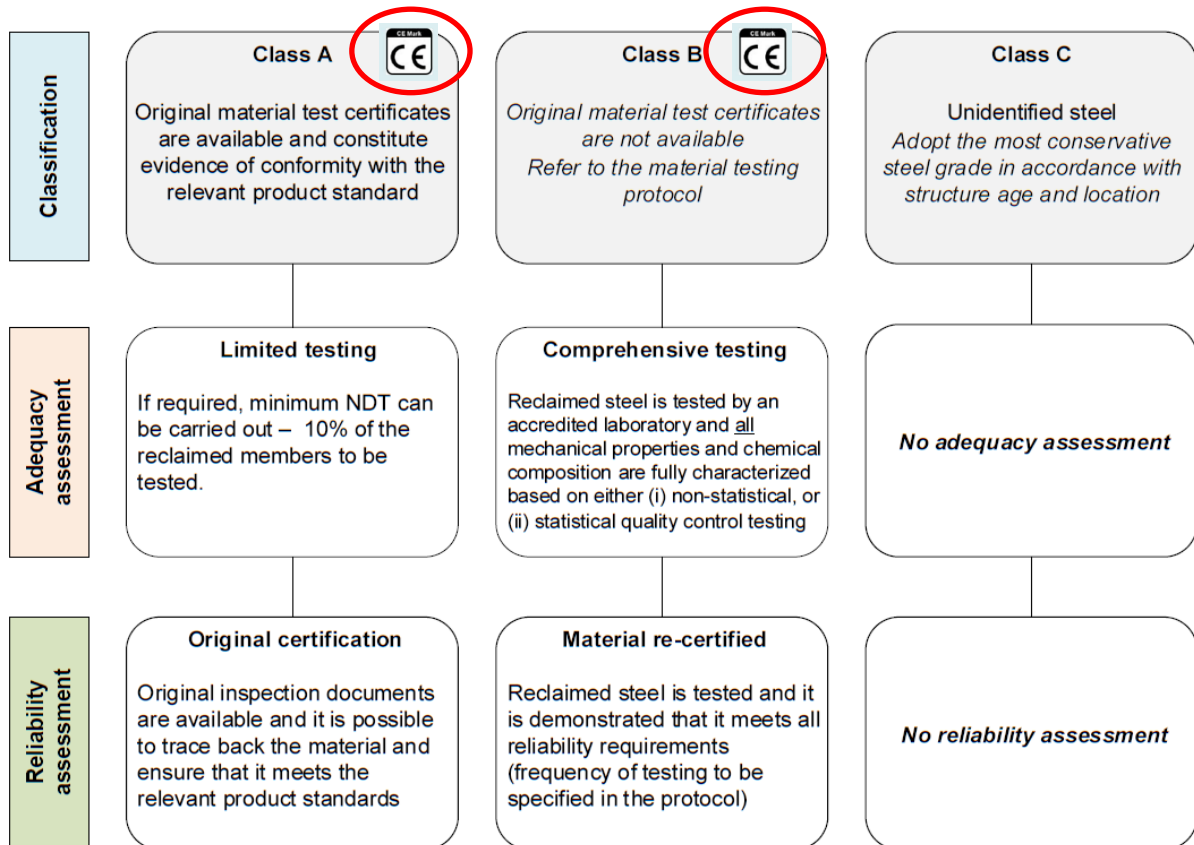


Abb. 6: Klassifikation der Tragwerke/Tragwerksteile Wiederverwendender Stähle

In der Klasse A sind Materialzeugnisse und eine Bauteildokumentation des ursprünglichen Bauezeitpunktes vorhanden. Innerhalb dieser Baugruppen sollen 10 % der Bauteile oder Bauteilanschlüsse einer zerstörungsfreien Prüfung (zFP) unterzogen werden. Auf eine 100 %-ige Sichtprüfung der Bauteile und der etwaigen erkennbaren Vorschädigung infolge zeit- oder nutzungsabhängiger Veränderungen wird in der Klasse A nicht abgestellt. Die Prüfverfahren der zFP-Methoden sind freigestellt.

Bei Bauteilen die der Klasse B zugeordnet werden müssen, ist keine entsprechende Bauteil- oder Materialdokumentation vorhanden. Gegensätzlich zu der Klasse A sind hierbei zerstörungsfreie Materialuntersuchungen für alle Bauteile vorgesehen. Zudem eine chemische Analyse und die Bestimmung von Zugfestigkeiten bzw. Streckgrenzen. Allerdings sollen letztere Kennwerte zerstörungsfrei gewonnen werden. Das Gesamttragwerk soll dabei in Baugruppen, wie etwa Stützen, Riegel oder Pfetten, unterteilt werden. Zerstörende Prüfungen sind dagegen nur mit Stichprobencharakter vorgesehen (Schadensfolgeklassen CC 1 und CC 2 - 1 Bauteil, Schadensfolgeklasse CC 3 - 3 Bauteile).

Klasse C umfasst Bauteile, für welche hinsichtlich des verwendeten Materials oder jeweiligen „Lebensgeschichte“ des Tragwerks keine Informationen vorliegen. Hier sind individuell abzustimmende Untersuchungen vorgesehen. Diese Vorgehensweise entspricht damit in etwa der Vorgehensweise, wie sie gegenwärtig auch von sorgfältig planenden Bauherren im Zusammenhang mit der Umnutzung von Gebäuden oder der Wiederverwendung von Tragwerksteilen Anwendung findet. Die Herstellung der Konformität zu den Anforderungen aktueller Regelwerke, wie EN 1090-2, und damit der Signierung mit dem CE-Kennzeichen ist für Bauteile der Klasse C nicht vorgesehen.

3. Kritikpunkte

Grundlegend ist die Idee der Wiederverwendenden Stähle zu begrüßen. Dennoch gibt es nach Auffassung des Autors eine Reihe von Kritikpunkten, die für eine spätere Umsetzung nicht ignoriert werden können. Andernfalls bestünde die Gefahr der Ablehnung aus der breiten Masse der potentiellen Anwender (den Herstellern von Stahltragwerken) heraus oder gar von Seiten der Deutschen Bauaufsichtsbehörden.

Ein erster Kritikpunkt betrifft die Anwendbarkeit des EU-Progress auch für Bauteile der Schadensfolgeklasse CC 3. Damit einhergehend könnten auch Tragwerke der Ausführungsklasse EXC 3 aus den wiederverwendenden Stählen hergestellt werden. Da Tragwerke oder Tragwerksteile der Ausführungsklasse EXC 3 einem besonderen Sicherheitsbedürfnis unterliegen bzw. den schwingend beanspruchten Tragwerken zugeordnet werden, steht dies im eklatanten Widerspruch von möglicherweise „vorgeschiedigten“ Materialien. Über die Verwendung für Tragwerke/Tragwerksteile der Ausführungsklasse EXC 2 hinaus sollte daher Abstand genommen werden. Weiter könnten unter der Schadensfolgeklasse CC 2 auch seismisch beanspruchte Tragwerke Anwendung finden. Auch dieser Anwendungsbereich sollte für die wiederverwendenden Stähle infolge unbekanntem Vorschädigungsgrades ausgeschlossen werden.

Vollständig unbeachtet bleibt im EU-Progress die Berücksichtigung der in den 1970-er und 1980-er Jahren noch häufig verwendeten unberuhigt vergossenen Stähle. Bei den heutigen Werkstoffen ist die Problematik nicht mehr üblich und die Inhalte der technischen Anwendungsregelwerke enthalten dahingehend kaum noch entsprechende Vorgaben. Die schweißtechnische Verarbeitung kann daher bei Nichtbeachtung problematisch sein.

Ferner werden die vorgesehenen Materialuntersuchungen sowohl nach Anzahl als auch nach den zu ermittelten Kennwerten für wiederverwendende Stähle für nicht ausreichend gehalten. Im Zusammenhang mit Alterung spielt der Duktilitätsabbau von Stählen eine hervortretende Bedeutung. Unbedingte Beachtung sollte den noch vorhandenen Dehnungs- und Zähigkeitseigenschaften mit Kennwerten wie Bruchdehnung und Brucheinschnürung gewidmet werden. Zudem sollten zwingend Kerbschlagarbeitswerte ermittelt werden. Darüber hinaus müssten zwingend die vorhandenen Gehalte an Stickstoff und Phosphor ermittelt und bewertet werden. Dies Vorgänge und Gefahrenquellen sind im EU-Progress nicht genügend berücksichtigt worden.

Außerhalb jeglicher Betrachtungen seitens der Ersteller des EU-Progress sind unterschiedlich zulässige Fertigungsmethoden aus den Jahren seit 1970 (wie z.B. die TGL-Normen) und in den verschiedenen europäischen Nationalstaaten. Diese können in Teilbereichen keineswegs mit den heutigen Fertigungsanforderungen der EN 1090-2 in Übereinstimmung gebracht werden. Insofern könnte demnach auch für die Klasse A und Klasse B keine Konformität erklärt und das CE-Kennzeichen vergeben werden. Allenfalls Tragwerke, welche nach 2014 und bereits unter den Anforderungen der damaligen EN 1090-2 gefertigt wurden, könnten als wiederverwendete Stähle gleichfalls mit einem CE-Kennzeichen versehen werden.

Weiter ist das ausschließliche Vertrauen auf vorhandene Materialzeugnisse für Tragwerke, die damit der Klasse A zugeordnet werden, sehr kritisch zu betrachten. Nach aktueller Rechtsauffassung wird mit den Materialzeugnissen nur die Einhaltung von normativen Mindestwerten zum Zeitpunkt der Herstellung bestätigt. Dies kann auch nur der Erzeuger der Vormaterialien vornehmen, da seinerseits der Prozess der werkseigenen Produktionskontrolle beherrscht wird. Nachfolgend, im ersten Produktionsprozess wurden aber bereits Veränderungen (thermischer Zuschnitt, Flammrichten usw.) vorgenommen. Die Art, der Umfang und die Umsetzung dieser Maßnahmen sind für gewöhnlich nicht ausreichend dokumentiert.

Die zeit- und nutzungsabhängigen Änderungen von Materialeigenschaften finden keine Berücksichtigung. Auf die mögliche oder auch nicht gegebene Übertragbarkeit historischer Materialprüfungen auf heutige Prüfergebnisse muss im EU-Progress zwingend eingegangen werden. Beispielsweise wurden Kerbschlagarbeitswerte in den 1970er Jahren an Proben mit einem eingebrachten runden Kerb (KU-

Proben) ermittelt, heutzutage aber an Proben mit einem eingebrachten spitzen Kerb (KV-Proben). Damit einhergehend werden, infolge unterschiedlicher Belastungen der Werkstoffproben im Kerbschlagbiegeversuch, gänzlich andere und nicht miteinander vergleichbare Ergebnisse erhalten. Ein schlichter Zahlenvergleich führt hier zu Fehlinterpretationen und zur Annahme von falschen Voraussetzungen.

Zudem besitzen die Materialzeugnisse nur eine chargenbezogene Gültigkeit. Derartiges spiegelt der vorgesehene geringe Prüfumfang des EU-Progress nicht wieder. Aus unseren langjährigen Erfahrungen in Bezug auf Werkstoffuntersuchungen und besonders auch Schadensfalluntersuchungen sowie der Bauwerksprüfung halten wir das Vertrauen auf historische Dokumente für sehr bedenklich und können nur davon abraten. Für gewöhnlich sind bei weitem nicht alle erforderlichen Informationen zur Lebensgeschichte des Bauwerks den Bestandsunterlagen zu entnehmen. Ferner wurden in der Vergangenheit nicht alle Schadensfälle, Umbaumaßnahmen, Reparaturmaßnahmen, aus denen sich werkstoffliche oder bauliche Vorschädigungen ergeben können, nach den heutigen Erfordernissen dokumentiert. Und wer garantiert, dass die Unterlagen überhaupt vollständig sind? Die Haftung für eventuelle Vorschäden liegt bei dem nachfolgenden und erneuten Inverkehrbringer, da er ein fehlerhaftes, gefährliches Produkt auf dem Markt bereitgestellt hat.

Es gibt noch weitere Kritikpunkte, wie den Umgang mit erkannten und nicht erkannten (inneren) Schweißnahtunregelmäßigkeiten, der plastischen Vorschädigung von Werkstoffen (Fry'sche Spannungslinien) oder der zulässigen Querschnittsreduktion infolge Abrostung, die für massive Zugstäbe eine größere prozentuale Flächenreduzierung darstellt, als es der zusätzliche Sicherheitsfaktor für wiederzuverwendende Stähle berücksichtigt.

Auf all diese einzelnen Aspekte kann jedoch im Rahmen dieses Kurzbeitrages, welcher nur einen ersten Überblick geben soll, nicht eingegangen werden. Zusammenfassend kann jedoch festgestellt werden, dass, würde der EU-Progress genauso wie dargelegt umgesetzt werden, die Stahlbauunternehmen als erneute Inverkehrbringer von Tragwerken mit wiederzuverwendenden Stählen ein unkalkulierbares Produkthaftungsrisiko eingehen würden. Die Fehlerhaftigkeit des Produktes wäre von Beginn an indiziert.

4. Ausblick

Auch wenn in Europa erste Referenzprojekte mit wiederzuverwendenden Stählen nach dem EU-Progress bereits erstellt worden sind, so ist es gegenwärtig dennoch ein früher Zeitpunkt bis zur Einführung eines verbindlichen neuen Regelwerks. Der EU-Progress stellt dahingehend einen der ersten Schritte dar. Gegenwärtig erfolgt zudem die Erarbeitung von nationalen technischen Dokumenten unter maßgeblicher Beteiligung nationaler Bauaufsichtsbehörden, welche auf die Bemessung und notwendige Materialuntersuchungen abzielen [3], [4]. Darüber hinaus wurden die genannten Kritikpunkte an die entsprechenden europäischen Normungsgremien gerichtet. Dort wurden diese einerseits dankend aufgenommen und andererseits Einladungen für kommende Arbeitssitzungen ausgesprochen.

5. Literatur

- [1] Sitzungsprotokoll ECCS TC 9 vom 25.02.2021.
- [2] EU-Progress Final Report 2020.
- [3] NA 005-08-14-AA, N 2191, CEN/TC 135/WG 2 N 471 „Technical requirements for the execution of steel structures“ CEN-TS_1090-xxx_(E)_Reuse of steel vom 04.02.2022.
- [4] Protokoll gemeinsame Sitzung NA 005-08-14-AA und NA 005-08-16-AA vom 14.03.2022.



Betker & König

Schweißtechnik-Fachhandel

GmbH



30 JAHRE JUBILÄUM

NÄCHSTE GENERATION

Seit 30 Jahren sind wir in zweiter Generation zuverlässiger Partner unserer Kunden in Industrie und Handwerk.

Wir freuen uns mit Ihnen gemeinsam die Zukunft zu gestalten.



UNSER TEAM

Unser motiviertes Team von 26 Mitarbeitern aus Verkauf, Service und Anwendungstechnik arbeitet Hand in Hand um Sie bestmöglich bei der Realisierung Ihrer Aufgaben zu unterstützen.



QUALITÄT

schweißt zusammen

BRINGEN SIE IHRE REAKTIONSFÄHIGKEIT UND KREATIVITÄT AUF EIN NEUES LEVEL

LINC-CUT® S 1020w & 1530w

PLUG & PLAY SYSTEM FÜR DAS PLASMASCHNEIDEN

- Komplettes Schneidsystem mit hoher Qualität. Alle Komponenten von einem Hersteller
- 2 Jahre Garantie
- Luft-Plasmaschneiden
- Für Baustahl und Edelstahl
- Bleche bis 1000 x 2000 mm, 1500 x 3000 mm
- Kompakte Maschine mit geringem Platzbedarf
- Schnelle Installation mit minimalem Lernaufwand für den Bediener
- Betriebsbereit innerhalb von weniger als einer Stunde nach Lieferung und Installation

Anwender

- Kleine Metallfertigungsbetriebe
- Blechverarbeitende Unternehmen
- Hersteller von Sonderfahrzeugen
- Prototypenbau
- Bildung und Ausbildung
- Hobbyanwender & Künstler

Preis ab **29.900,- €**
zuzüglich MwSt



Maschine	Artikelnummer	Maße (mm)	Schneidbereich (mm)	Gewicht (kg)	Wasserfüllmenge (l)	Strombedarf	Erdung
LINC-CUT® S 1020w	AS-CM-LCS1020WF125	1900x3200 x1600*	1000x2000	650	260	230V/4A 1Ph 50/60Hz HMI und CNC controller	Vorbereitung für Erdung der Maschine durch Dritte
LINC-CUT® S 1530w	AS-CM-LCS1530WF125	2400x4200 x1600*	1500x3000	850	490		

*Fügen Sie eine Mindestsicherheitszone zu diesen Abmessungen hinzu: 800 mm für Bedienerzugangsbereiche, Maschine auf Betonplatte aufgestellt, Ebenheit der Platte ± 10 mm, Höhenunterschied 30 mm (5 mm / m max)

Produktname	Versorgungsspannung	Nennausgangsstrom	Leistungsbedarf	Ausgangsbereich (A)	Erforderlicher Luftdruck (Bar)	Luftdurchsatz (l/min)	H x B x T (mm)	Gewicht (kg)
FlexCut™125 CE	400 VAC 3Ph 50/60Hz	125A/175V /100%	100% 40A	20-125	6,21-8,27	260	526x 311x648	53,5

- Der Wassertisch ermöglicht es, den beim Schneiden freigesetzten Staub aufzufangen.
- Die austretenden Restgase bleiben unterhalb der Expositionsgrenzwerte unter Werkstattbedingungen mit ausreichenden Abmessungen zur Lüftererneuerung und einer durchschnittlichen effektiven Schnittzeit von 2 Stunden.
- Tragfähigkeit angepasst an das Plattenformat 1000 x 2000 oder 1500 x 3000 mm in der Dicke 20 mm.
- Tragfähigkeit 25 mm auf halber Fläche.



Betker & König
Schweißtechnik-Fachhandel GmbH

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

Autorenverzeichnis

Dr. Bernd Baufeld, pro-beam additive GmbH, Gilching
Bernd.Baufeld@pro-beam.com

Silvio Freese, ArcelorMittal Bremen GmbH, Bremen
silvio.freese.sf@gmail.com

Bernd Hoberg, voestalpine Böhler Welding Group GmbH, Düsseldorf
Bernd.Hoberg@voestalpine.com

Christian Judex, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
christian.judex@ovgu.de

Prof. Sven Jüttner, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
sven.juettner@ovgu.de

Juliane Osmont, ENGMAR SARL, Bouguenais, Frankreich
juliane.osmont@engmar.fr

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

Christian Paul, Carl Cloos Schweißtechnik GmbH, Haiger
Christian.Paul@cloos.de

Alois Plozner, voestalpine Böhler Welding Group GmbH, Düsseldorf
Alois.Plozner@voestalpine.com

Lorenz Riehl, ESAB Welding & Cutting GmbH, Zweigstelle Langenfeld
lorenz.riehl@esab.de

Dr. René Schasse, Schweißtechnische Lehranstalt Magdeburg gGmbH, Barleben
schasse@sl-magdeburg.de

Dr. Manuela Zinke, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
manuela.zinke@ovgu.de

Posterbeiträge

Erweiterung des Konstitutionsschaubildes für hoch Mn-haltige Stähle in Mischschweißverbindung durch Gefährdungsbereiche (AiF IGF 20.244 BR/1 / FOSTA P 1413 B, Laufzeit: 01/2020 bis 10/ 2022).

Validierung von Methoden zur Vermeidung von Liquid Metal Embrittlement an realitätsnahen Prinzipbauteilen (IGF 21.483 BG / FOSTA P 1488, Laufzeit: 11/2020 bis 04/ 2023).

Generatives MSG-Schweißen zur geometrischen Modifikation von Aluminium-Druckgussbauteilen – MSGGenerAI (IGF 21.541 BR / DVS-Nr. 03.3316, Laufzeit: 01/2021 bis 06/ 2023).

Werkstoffliche Charakterisierung verschiedener Automobilstähle (B. Sc. Alexandra Löwenstein, ausgestellt zur Ladies Night for Women in Engineering Sciences).

Erweiterung des Konstitutionsschaubildes für hoch Mn-haltige Stähle in Mischschweiß- verbindung durch Gefährdungsbereiche (FOSTA P 1413 B / AiF IGF 20.244 BR/1)

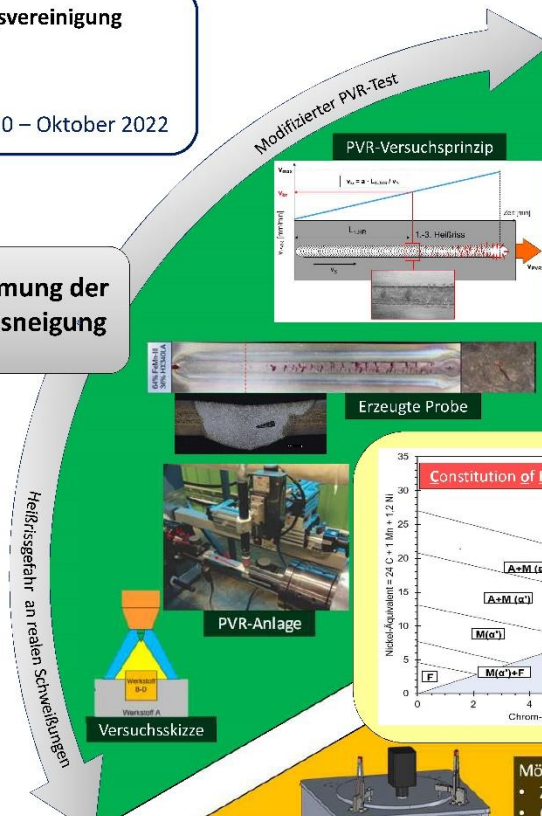
F. Urban, M. Zinke, S. Jüttner

Forschungsvereinigung
FOSTA

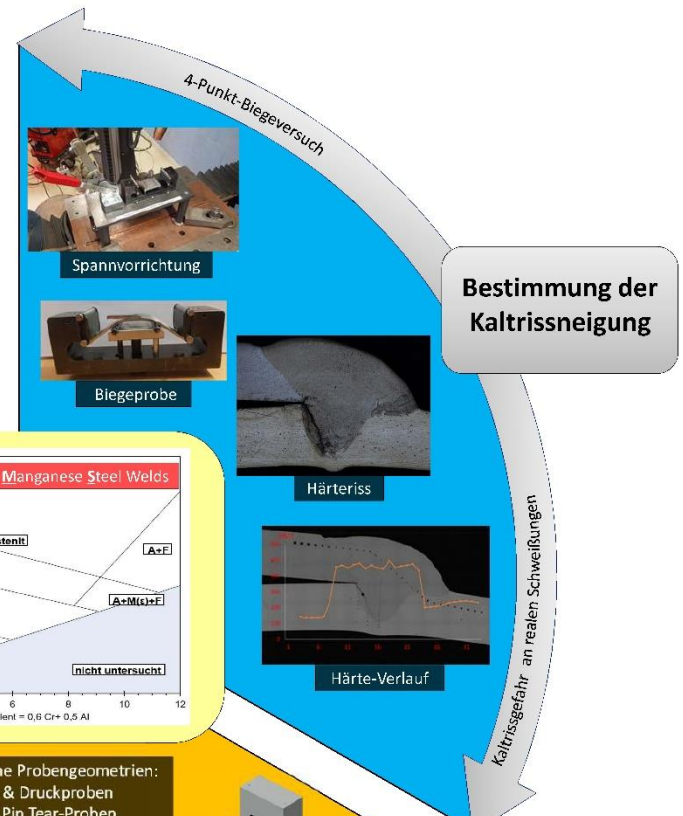
Laufzeit

Januar 2020 – Oktober 2022

Bestimmung der
Heißrissneigung

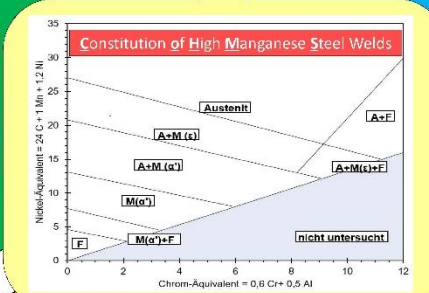


Heißrissgefahr an realen Schweißungen



Bestimmung der
Kaltrissneigung

Kaltrissgefahr an realen Schweißungen



Herstellung schweißgutäquivalenter
Proben mittels Induktionsschmelzofen

CPT-Prüfung

Kleinsterbschlagbiege-Prüfung



Untersuchungsgegenstand	Erweiterung des COHMS-Diagramms um Gefährdungsbereiche analog den Gefährdungsbereichen nach Bystram im Schaeffler-Diagramm (Heißrissanfälligkeit, Härterissanfälligkeit, Kornwachstum, σ -Versprödung)
Schweißprozess	MSG-CMT, WIG-Schweißung & induktives Umschmelzen
Werkstoffe	X40MnVA19-1; X40CrVA19-2; X30MnCrN16-14; 22MnB5; HX340LAD
Zusatzwerkstoffe	G3Si1; LIP20; G18 8Mn

Das IGF-Vorhaben IGF-20.244 BR/1 / FOSTA-P-1413 "Erweiterung des Konstitutionsschaubildes für hoch Mn-haltige Stähle in Mischschweißverbindung durch Gefährdungsbereiche" der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wird am IWF der OvGU- Magdeburg durchgeführt.



Forschungsvereinigung
Stahlanwendung e. V.



Gefördert durch:
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



INSTITUT FÜR
WERKSTOFF- &
FÜGETECHNIK

Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg
Institut für Werkstoff und Fügetechnik
Lehrstuhl Fügetechnik
Universitätsplatz 7
39106 Magdeburg

M.Sc. Florian Urban / florian.urban@ovgu.de
Dr.-Ing. Manuela Zinke / manuela.zinke@ovgu.de
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner / sven.juttner@ovgu.de

Validierung von Methoden zur Vermeidung von Liquid Metal Embrittlement an realitätsnahen Prinzipbauteilen (IGF 21483 BG / P 1488)

M. Meyerdierks², V. Schreiber², Ch. Böhne¹, G. Seitz³, S. Jüttner², G. Meschut¹, M. Rethmeier³

Forschungsvereinigung

FOSTA – Forschungsvereinigung
Stahlanwendung e. V.

Laufzeit

11.2020 – 04.2023

Forschungseinrichtungen

LWF¹
IWF²
Fraunhofer IPK³

Widerstands- punktschweißen

LWF



WPS-Prinzipbauteil

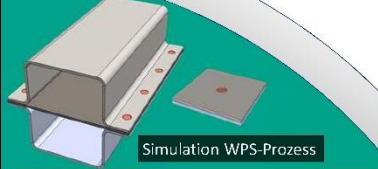


Querschnitt WPS-Verbindung
mit LME-Riss

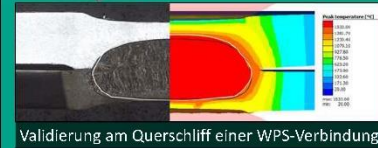


Tragverhalten Prinzipbauteil

WPS-Prozesssimulation



Simulation WPS-Prozess

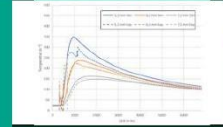


Validierung am Querschnitt einer WPS-Verbindung

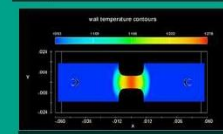
Numerische Simulation

Fraunhofer
IPK

INSTITUT
PRODUKTIONSANLAGEN UND
KONSTRUKTIONSTECHNIK



Temperatur-Zeit-Kurven WPS



Simulation Gleeble-Prozess

Zielsetzung

- Korrelation zwischen Gleeble® Prüfverfahren und WPS basierendem Prüfverfahren
- Bewertung der Effektivität von Methoden zur LME Vermeidung an realitätsnahen Prinzipbauteilen
- Kenntnis über Auswirkungen von LME Rissen auf das Tragverhalten von realitätsnahen Prinzipbauteilen



LME-Bewertung

Gleeble*3500

Fließkurvenermittlung



Gleeble-Zugprobe mit LME-Rissen

Thermomechanische physikalische Simulation

IWF
INSTITUT FÜR
WERKSTOFF- &
FÜGETECHNIK



SCAN ME

Nächste
PA-Sitzung
06.10.2022

Untersuchungsgegenstand

Liquid Metal Embrittlement
(dt. Flüssigmetallversprödung)

Schweißprozess

Widerstandspunktschweißen

Werkstoffe

CR850Y1180T-DH-EG53/53-U
CR5-GI40/40-U

Liquid Metal Embrittlement

- Infiltration der Korngrenzen eines Stahlwerkstoffes durch den im Schweißprozess verflüssigten Zinküberzug
- Bildung makroskopisch sichtbarer Risse als Folge

Das IGF-Vorhaben 21483 BG / FOSTA P 1488 "Validierung von Methoden zur Vermeidung von Liquid Metal Embrittlement an realitätsnahen Prinzipbauteilen" der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wird am IWF, LWF und IPK Fraunhofer durchgeführt.



Forschungsvereinigung
Stahlanwendung e. V.



Gefördert durch:
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Werkstoff- und Fügetechnik
Lehrstuhl Fügetechnik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg



Universität Paderborn
Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik
Pohlweg 47-49
33098 Paderborn



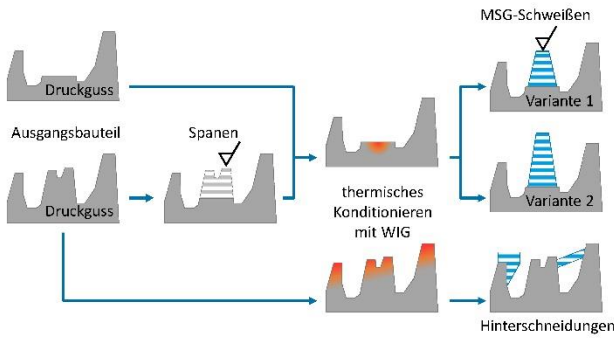
Fraunhofer-Institut
Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik
IPK
Perseusstraße 8-9
10587 Berlin

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner / sven.juttner@ovgu.de
M.Sc. Vincent Schreiber / vincent.schreiber@ovgu.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut / gerson.meschut@lwf.uni-paderborn.de
M.Sc. Christoph Böhne / christoph.boehne@lwf.uni-paderborn.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier / michael.rethmeier@ipk.fraunhofer.de
M.Sc. Georg Seitz / georg.seitz@ipk.fraunhofer.de

Generatives MSG-Schweißen zur geometrischen Modifikation von Aluminium-Druckgussbauteilen – MSGenerAl



Technologiekonzept

Ausgangsbauteil	Aluminium-Druckguss
ggf. Spanen	nicht benötigte Bereiche entfernen
WIG-Schweißen	Oxidschicht aufbrechen, Guss entgasen & vorwärmen
generatives MSG-Schweißen	neuen Geometrie endkonturnah aufbauen



Anwendungsbeispiele

- Prototypen & Produktderivate durch Modifikation von Serienbauteilen
- Herstellung komplexer Geometrien mit Hinterschnidungen
- Gradientenwerkstoffe mit räumlich veränderter Legierungszusammensetzung

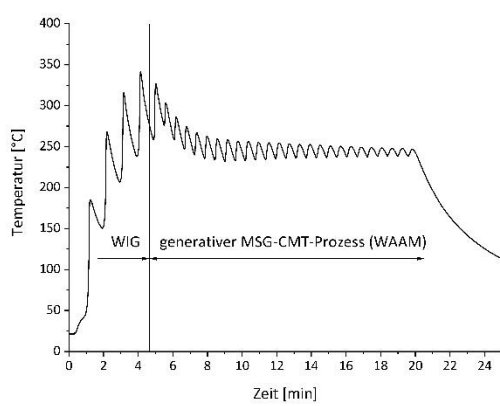
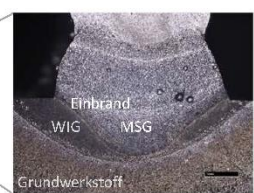
Werkstoffe

	naturhart	aushärtbar
Grundwerkstoffe	AlSi9Mn	AlSi10MnMg
Zusatzwerkstoffe	AlSi12 (4047)	AlMgSi0,5 (6063) AlSi10Mg (4046)



Untersuchungsgegenstände

- Lagenaufbauverhalten
- Einbrandsituation WIG & MSG
- Poren & Bindefehler
- Temperatureinfluss auf Werkstoffeigenschaften



t-T-Diagramm: Temperaturverlauf im Aluminium-Druckguss während des Aufbaus der Probe im Schlibbild



Projekt: MSGenerAl
Beginn: 01.01.2021
Ende: 30.06.2023
IGF-Nr.: 21541 BR
DVS-Nr.: 03.3316

Werkstoffliche Charakterisierung verschiedener Automobilstähle

Alexandra Löwenstein (B.Sc.), Martin Meyerdieks (M.Sc.), Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner



Motivation & Zielsetzung

- Motivation**
- Stetig wachsende Ansprüche an Sicherheit und Klimafreundlichkeit in der Automobilindustrie
 - Entwicklung und Einsatz neuer Stahlsorten
 - Stähle unterscheiden sich in ihrem mikrostrukturellen Aufbau und chemischer Zusammensetzung
 - Unterschiedliche mechanisch technologische Eigenschaften (z. B. Festigkeit, Umformvermögen, Härte)
 - Eigenschaftsprofil und Aufbau beeinflussen Verarbeitungsprozesse (z. B. thermische und mechanische Fügeprozesse)
- Zielsetzung: Charakterisierung des Ausgangszustands**
- Chemische Zusammensetzung
 - Verteilung und Vorkommen unterschiedlicher Phasen
 - Mechanisch technologische Eigenschaften
 - Morphologie der metallischen Überzüge

Versuchswerkstoffe

- Dualphasenstähle
 - Komplexphasenstähle
 - TRIP – Stähle (TRansformation Induced Plasticity)
 - Unterschiedliche Arten von Zinküberzügen (Elektrolytische Verzinkung, Feuerverzinkung)
 - Werkstoffe weisen unterschiedliche Phasen auf
 - Unterschiedliche Phasen besitzen unterschiedliche Eigenschaften
- Dualphasenstahl**

• Zwei Phasen

$\alpha + < 20\% M$

α – Ferrit
M – Martensit

Komplexphasenstahl

• Mehrere Phasen

$\alpha + B + M$

B – Bainit
M – Martensit

TRIP-Stahl

$\alpha + \gamma + B$

γ – Restaustenit
- Phase = homogener räumlicher Bereich der Materie [1]

Methodenauswahl

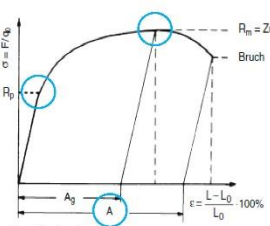
Was?	Warum?
Mechanische Kennwerte	Beschreiben das Verhalten des Werkstoffs unter Einwirkung einer mechanischen Belastung
Chemische Zusammensetzung	Massenanteile der Elemente beeinflussen das Materialverhalten und können je nach Charge in einem zulässigen Rahmen variieren
Mikrostruktur	Zeigt das Vorkommen und die Verteilung der unterschiedlichen Phasen
Überzug	Überzugsdicke, Überzugsart sowie ggf. Übergangsschichten zwischen Grundwerkstoff und Überzug beeinflussen Verarbeitungsprozesse

- Zugversuch:** Normierte Proben in einer Zugprüfmaschine eingespannt und mit einer definierten Geschwindigkeit bis zum Bruch gezogen
- Atomemissionsspektrometrie:** Entzinkte und gereinigte Probenoberfläche angeregt; Wellenlänge des dabei ausgesendeten Lichts spezifisch für jedes Element gemessen und ausgewertet
- Lichtmikroskopie:** Präparierte Proben bezüglich Phasen und Überzug unter gewöhnlichem Lichtmikroskop betrachtet (bis zu 1000-fache Vergrößerung)
- Rasterelektronenmikroskopie:** Elektronenstrahl tastet präparierte Oberfläche ab; Auswertung der Verteilung der Phasen und Aussage zum lokale Auftreten chemischer Elemente (bis zu 15000-fache Vergrößerung)
- Gravimetrie:** Zink-Überzug wird chemisch abgetragen; Bestimmen der Überzugsdicke durch Massenvergleich vor und nach dem chemischen Abtrag

Durchführung und Auswertung

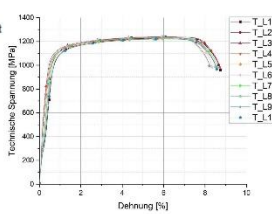
Zugversuch nach DIN EN ISO 6892 – 1

Theoretische Grundlage

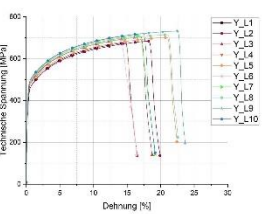


Idealisiertes Spannungs-Dehnungs-Diagramm nach [2]

Ergebnisdiagramme aus Zugversuch nach DIN EN ISO 6892 – 1



Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Komplexphasenstahls (n=10)



Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines TRIP-Stahls (n=10)

Auswertung und Fazit

- Große Streuung der ermittelten Bruchdehnungswerte bei 4 von 8 Werkstoffen
- Geforderte Werte für Bruchdehnung nur bei einem untersuchten Werkstoff erreicht
- Risse an Probenkanten im Prüfbereich detektiert

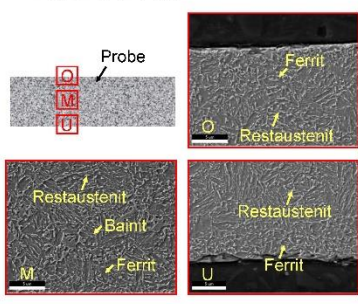
Folgeuntersuchungen

- Lichtmikroskopische Untersuchung der Bruchflächen und der Risse am Probenrand
- Rauheitsmessung auf den Schnittkanten/-oberflächen der Probe (eventuell Kerbwirkung)
- Wiederholung einzelner Zugversuche ausgewählter Versuchswerkstoffe
- Analyse der Prüfbedingungen
- Ableitung von Optimierungspotenzialen

- Abgleich gemessener mechanischer Kennwerte mit Richtwerten gemäß VDA 239 – 100 Werkstoffblatt
 - E-Modul
 - Zugfestigkeit R_m
 - Dehngrenze R_p
 - Bruchdehnung A

Rasterelektronenmikroskopie

Mikrostrukturanalyse



Gefügeanalyse eines TRIP-Stahls an unterschiedlichen Messpunkten

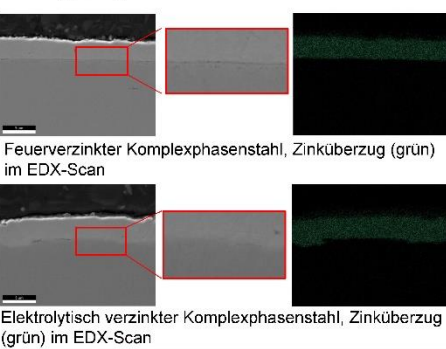
Auswertung und Fazit

- Abnahme der harten Phasen zum Rand
- Bestimmung der Phasen z. T. schwierig

Folgeuntersuchungen

- Farbätzung nach Klemm (Klemm-I) als mögliche Ergänzung zur besseren Unterscheidung der Phasen

Überzugsanalyse



Elektrolytisch verzinkter Komplexphasenstahl, Zinküberzug (grün) im EDX-Scan

Auswertung und Fazit

- Dunkle Linie zwischen Grundwerkstoff und Überzug bei feuerverzinkten Stählen
- Hinweis auf mögliche intermetallische Phase α -Fe(Zn)
- Versuchswerkstoffe mit Feuerverzinkung weisen erwartungsgemäß neben Zink auch Aluminium im Überzug auf
- Bei elektrolytisch verzinkten Versuchswerkstoffen keine weiteren Elemente nachweisbar

QUELLEN:
[1] Abbildung nach W. Skolaut, Hg., *Maschinenbau: Ein Lehrbuch für das gesamte Bachelor-Studium*, 2. Aufl. Springer Viewig, 2018.
[2] *Metallische Werkstoffe - Zugprüfung: Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2019)*, DIN EN 6892 - 1, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Jun. 2020.

Vorankündigung

Die nächste

Schweißtechnische Fachtagung

findet statt am:

11. Mai 2023

im IGZ Innovations- und Gründerzentrum GmbH
in der Steinfeldstraße 3
in 39179 Barleben.

**Schweißtechnische
Lehranstalt Magdeburg**
Gemeinnützige GmbH



DVS VERBAND
DVS BV-MAGDEBURG



IWF INSTITUT FÜR
WERKSTOFF- &
FÜGETECHNIK

www.dvs-magdeburg.de

ISBN 978-3-948749-20-0
Copyright ©2022