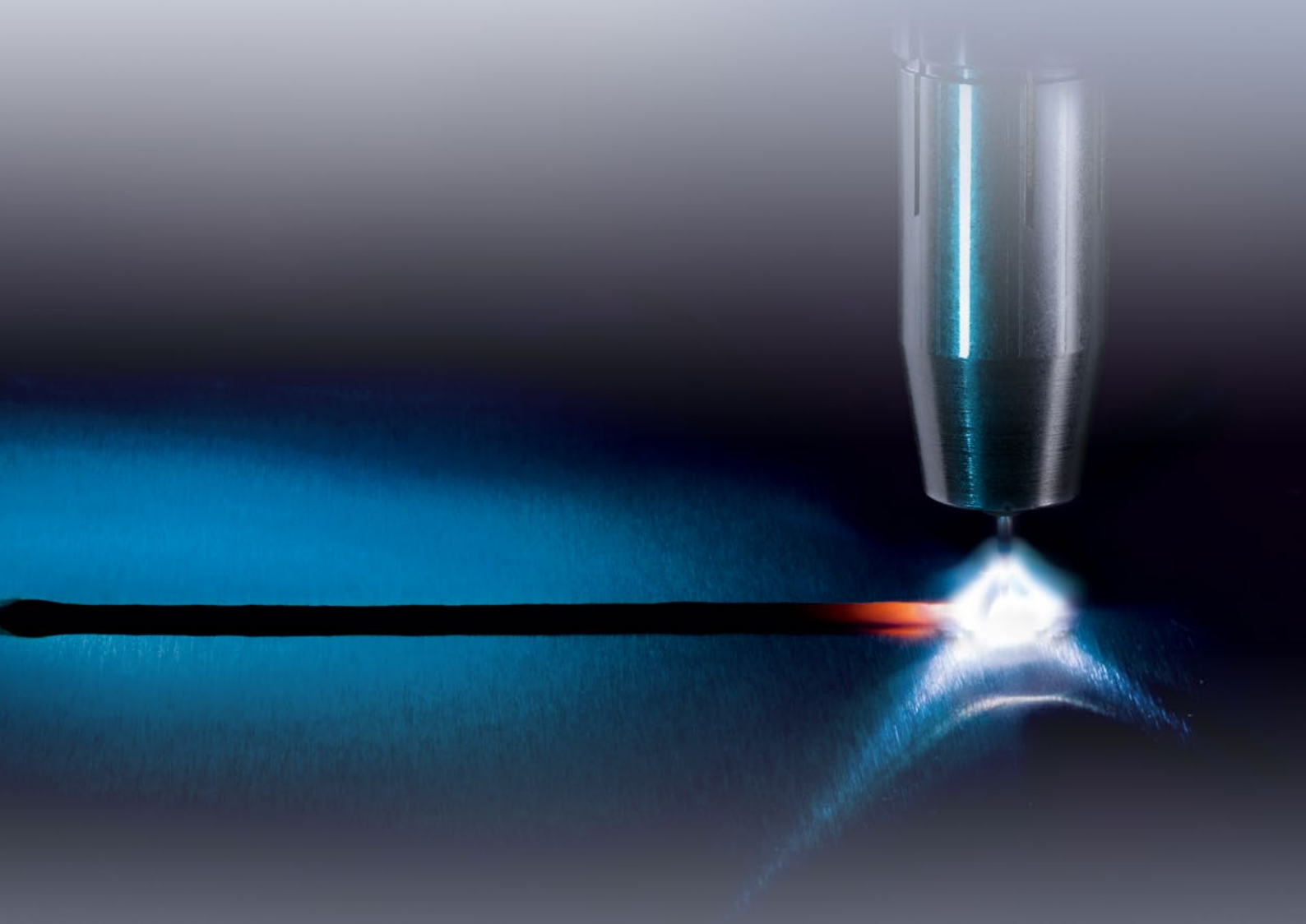


MIG/MAG

_____ **MIG / MAG**

SCHWEISSLEXIKON



INHALTSVERZEICHNIS

1.	Vorwort	4
2.	Das Verfahren	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Stromart	5
3.	Zusatzwerkstoff und Hilfsstoffe	5
3.1	Drahtelektrodensorten	5
3.2	Technische Lieferbedingungen für Drahtelektroden und Fülldrahtelektroden	7
3.3	Schutzgase	8
3.4	Eigenschaften des Schweißgutes	11
4.	Fugenvorbereitung	11
4.1	Fugenformen	11
4.2	Anbringen der Fugenflanken	11
4.3	Badsicherungen	12
4.4	Formieren	13
5.	Schweißgeräte	13
5.1	Schweißstromquellen	14
5.2	Drahtvorschubgeräte	17
5.3	Schlauchpaket und Brenner	18
5.4	Steuerung	19
6.	Werkstoffübergang beim MIG/MAG-Schweißen	21
6.1	Lichtbogenbereiche	21
6.2	Kurzlichtbogen	21
6.3	CO ₂ -Lichtbogenprozess (Langlichtbogen)	22
6.4	Sprühlichtbogen	22
6.5	Übergangslichtbogen	23
6.6	Impulslichtbogen	23
6.7	Sonderformen des Werkstoffübergangs	24
7.	Einstellen der Schweißparameter	25
7.1	Einstellen bei konventionellen Schweißgeräten	25
7.2	Synergetische Einstellung von Schweißprozessen	26
7.3	Stabilisierung / Regelung der MIG/MAG-Prozesse	27

8. Durchführen des Schweißens	29	12.3 Schweißen von Füll- und Decklagen von un- und niedriglegiertem Stahl	50
8.1 Zünden des Lichtbogens	29	12.4 Schweißen von Kehlnähten mit tiefem Einbrand an un- und niedriglegiertem Stahl	52
8.2 Brennerführung	30	12.5 Schweißen mit konstantem Einbrand und konstanter Leistung an un-, niedrig- und hochlegiertem Stahl	54
8.3 Beenden des Schweißens	30	12.6 Schweißen unter Verwendung von 100% CO ₂ an un- und niedriglegiertem Stahl	55
8.4 Schweißparameter	30	12.7 Schweißen von Vollanschlüssen bei Kehlnähten an un-, niedrig- und hochlegiertem Stahl	56
8.5 Neue Verfahren und Prozesse	34	12.8 Schweißen in Zwangspositionen ohne Tannenbaumtechnik an un-, niedrig- und hochlegiertem Stahl	58
a) Das Schweißverfahren Impulslichtbogen	34	12.9 Schweißen und Löten von Dünnblechen aus un-, niedrig-, hochlegiertem Stahl und verzinkten Blechen	60
b) Die Schweißprozesse EWM forceArc / forceArc puls	35	12.10 Schweißen von Füll- und Decklagen an hochlegiertem Stahl	62
c) Die Schweißprozesse coldArc XQ / coldArc puls XQ	36	12.11 Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen	64
d) Die Schweißprozesse rootArc XQ / rootArc puls XQ	36	12.12 Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen in Zwangspositionen ohne Tannenbaumtechnik	65
e) Der Prozess superPuls	37	12.13 Schweißen von Aluminium-Überlappnähten	66
f) Position Weld	37	12.14 Schweißen von Aluminium-Kehlnähten	67
g) Regelverfahren EWM wiredArc	37	12.15 Auftragschweißen	68
h) Der Schweißprozess acArc puls XQ	37	13. Schrifttum	70
i) Der Schweißprozess MIG/MAG-Tandem	38	Impressum	70
8.6 Möglichkeiten des Mechanisierens	39		
9. Arbeitssicherheit	39		
10. Besonderheiten verschiedener Werkstoffe	41		
10.1 Un- und niedriglegierte Stähle	42		
10.2 Hochlegierte Stähle und Nickelbasislegierungen	43		
10.3 Aluminium und Aluminiumlegierungen	44		
10.4 Sonstige Werkstoffe	45		
11. Anwendung des MIG/MAG-Schweißens	45		
11.1 Fertigungsbranche	45		
11.2 Anwendungsbeispiele	46		
12. Schweißprozesse	47		
12.1 Übersicht	47		
12.2 Wurzelschweißen an un- und niedriglegiertem Stahl	48		

1. Vorwort

Das MIG/MAG-Schweißen (Bild1) ist eines der jüngeren Lichtbogenschweißverfahren. Es stammt aus den USA, wo es 1948 erstmals angewendet wurde. Kurze Zeit später kam es nach Europa. Beim MIG/MAG-Schweißen wurden zunächst inerte Gase wie Helium verwendet sowie Argon, das nur geringe Mengen an aktiven Bestandteilen (z. B. Sauerstoff) enthält. Deshalb hieß das Verfahren abgekürzt S.I.G.M.A.-Schweißen („Shielded Inert Gas Metal Arc“). In Russland wurde ab 1953 anstelle der teuren, inerten Gase mit Kohlendioxid (CO₂) ein aktives Gas zum Schweißen genutzt. Das war möglich, weil es inzwischen auch höher legierte Drahtelektroden gab. Sie gleichen den höheren Abbrand beim heißeren Aktivgasschweißen aus und sichern die Materialqualität.

Das MIG/MAG-Schweißen ist heute in fast allen metallverarbeitenden Branchen, vom Handwerksbetrieb bis zum industriellen Großbetrieb, sehr beliebt. Es ist an sich schon teilmechanisiert und lässt sich mit wenig Aufwand auch vollmechanisiert oder

automatisiert anwenden. Diese Broschüre klärt über die Besonderheiten des Verfahrens auf und gibt Hinweise für die zweckentsprechende Anwendung.

2. Das Verfahren

2.1 Allgemeines

Der nach EN 14610 für Europa gültige Oberbegriff für alle Lichtbogenschweißverfahren, bei denen eine Drahtelektrode unter Schutzgas abgeschmolzen wird, ist „gasgeschütztes Metall-Lichtbogenschweißen“ (Prozess-Nr. 13). In Deutschland war der Oberbegriff früher Metall-Schutzgasschweißen. Die Norm erklärt das Verfahren wie folgt: „Ein Lichtbogen brennt zwischen dem Werkstück und der abschmelzenden Drahtelektrode“. Nach Art des verwendeten Schutzgases wird weiter unterteilt in Metall-Inertgasschweißen (MIG), Prozess-Nr. 131, wenn inerte Gase (z. B. Argon, Helium) verwendet wird, und Metall-Aktivgasschweißen (MAG), Prozess-Nr. 135, wenn aktive Gase (Mischgase, wie z. B. Argon mit CO₂ oder O₂ im Gemisch) eingesetzt werden.



Bild 1: Manuelles MIG/MAG-Schweißen

Weitere Varianten sind in EN 14610 Fülldrahtschweißen mit aktivem Gasanteil (Prozess-Nr. 136) und Fülldrahtschweißen mit inertem Gas (Prozess-Nr. 137).

Beim MIG/MAG-Schweißen (Bild 2) wird eine Drahtelektrode (5) von der Spule durch einen Vorschubmotor zugeführt und unmittelbar

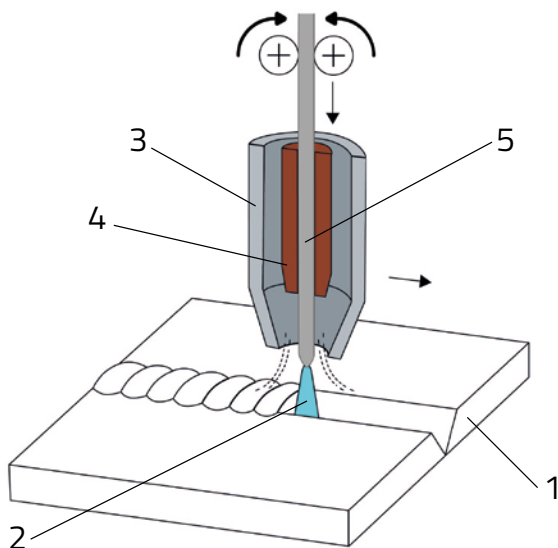


Bild 2: Prinzip des Metall-Schutzgasschweißens (MIG/MAG)

vor dem Austritt aus dem Brenner durch die Stromdüse (4) elektrisch kontaktiert und gespeist. So kann der Lichtbogen (2) zwischen Drahtelektrodenende und Werkstück (1) brennen. Das Schutzgas strömt aus der Schutzgasdüse (3) aus, die die Drahtelektrode konzentrisch umgibt. Dadurch werden Lichtbogen und Schweißgut vor den atmosphärischen Gasen Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff geschützt. Das Schutzgas hat neben der Schutzfunktion noch weitere Aufgaben. Es bestimmt die Zusammensetzung der Lichtbogenatmosphäre, beeinflusst deren elektrische Leitfähigkeit und damit auch die Schweißereigenschaften. Daneben beeinflusst das Schutzgas durch Zu- und Abbrandvorgänge die chemische Zusammensetzung des entstehenden Schweißguts. Es hat also auch eine metallurgische Wirkung.

2.2 Stromart

Von neueren Ausnahmen abgesehen, wird das MIG/MAG-Schweißen mit Gleichstrom, ggf. in gepulster Form, ausgeführt. Dabei liegt der Pluspol der Stromquelle an der Elektrode (Drahtspitze) und der Minuspol am Werkstück. Bei einigen wenigen Fülldrähten (z. B. selbstschützenden Fülldrähten) wird mit umgekehrter Polarität geschweißt. In jüngerer Zeit wird für sehr spezielle Anwendungsfälle, z. B. zum MIG-Schweißen sehr dünner Aluminiumbleche, auch Wechselstrom mit besonderer Kennlinie eingesetzt.

3. Zusatzwerkstoff und Hilfsstoffe

3.1 Drahtelektrodenarten

Drahtelektroden für das MIG/MAG-Schweißen von unlegierten Stählen und Feinkornbaustählen sind in EN 14341 genormt. Die Norm unterscheidet nach der chemischen Zusammensetzung elf Sorten von Schweißdrahtsorten. Sie enthält auch solche Schweißdrahtsorten, die nur in anderen Ländern Europas üblich sind. In Deutschland werden aus der Zusammenstellung in Tabelle 1 für unlegierte Stähle vor allem die Sorten G2Si1, G3Si1 und G4Si1 verwendet. Sie enthalten in der genannten Reihenfolge zunehmend Silizium (Si) und Mangan (Mn). Der jeweilige Anteil beträgt dabei im Mittel 0,65 bis 0,9 % Silizium und 1,10 bis 1,75 % Mangan. Für Feinkornstähle kommen auch die Sorten G4Mo, G3Ni1 und G3Ni2 zur Anwendung (Bild 3).

EN 17632 enthält Fülldrahtelektroden zum Schweißen dieser Stähle. Nach der Zusammensetzung der Füllung werden hier Rutiltypen, basische Typen und Metallpulvertypen (Bild 4) unterschieden. Neben den Fülldrähten zum MIG/MAG-Schweißen sind in EN 17632 auch selbstschützende Fülldrähte genormt, die ohne zusätzlich zugegebenes Schutzgas verschweißt werden. Drahtelektroden für das Schweißen warmfester Stähle

Tabelle 1: Beispiel Drahtelektrode



Tabelle 1a

Kennziffer für die Festigkeit und Dehnungseigenschaften des Schweißgutes			
Kennziffer	Mindeststreckgrenze ¹ (N/mm ²)	Zugfestigkeit (N/mm ²)	Mindestbruchdehnung ² %
35	355	440-570	22
38	380	470-600	20
42	420	500-640	20
46	460	530-680	20
50	500	580-720	18

¹ Es gilt die untere Streckgrenze (R_{el}). Bei nicht eindeutiger Streckgrenze ist die 0,2 % (R_{p0,2}) anzuwenden.
² Messlänge ist gleich dem fünffachen Probendurchmesser.

Tabelle 1b

Kennzeichen für die Kerbschlagarbeit	
Kennzeichen	Temperatur für Mindestkerbschlagarbeit 47 J (°C)
Z	Keine Anforderung
A	+ 20
0	0
2	- 20
3	- 30
4	- 40
5	- 50
6	- 60

Tabelle 1c

Kennzeichen für das Schutzgas	
Kennzeichen	Bedeutung
M	Wenn die Einteilung mit dem Schutzgas EN 439-M2, Mischgas ohne Helium, durchgeführt worden ist.
C	Wenn die Einteilung mit Schutzgas EN 439-C1, Kohlendioxid, durchgeführt worden ist.

Tabelle 1d

Kurzzeichen für die chemische Zusammensetzung von Drahtelektroden									
Kurzzeichen	Chemische Zusammensetzung in % (m/min) ^{1, 2, 3}								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	Ti und Zr
G0	Jede andere vereinbarte Zusammensetzung								
G2Si1	0,06-0,14	0,5-0,8	0,9-1,3	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
G3Si1	0,06-0,14	0,7-1,0	1,3-1,6	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
G4Si1	0,06-0,14	0,8 1,2	1,6-1,9	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
G3Si2	0,06-0,14	1,0-1,3	1,3-1,6	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
G2Ti	0,04-0,14	0,4-0,8	0,9 -1,4	0,025	0,025	0,15	0,15	0,05-0,2	0,05-0,25
G3Ni1	0,06-0,14	0,5-0,9	1,0-1,6	0,02	0,02	0,8-1,5	0,15	0,02	0,15
G2Ni2	0,06-0,14	0,4-0,8	0,8-1,4	0,02	0,02	2,1-2,7	0,15	0,02	0,15
G2Mo	0,08-0,12	0,3-0,7	0,9 -1,3	0,02	0,02	0,15	0,4-0,6	0,02	0,15
G4Mo	0,06-0,14	0,5-0,8	1,7-2,1	0,025	0,025	0,15	0,4-0,6	0,02	0,15
GG2Al	0,08-0,14	0,3-0,5	0,9-1,3	0,025	0,025	0,15	0,15	0,35-0,75	0,15

¹ Falls nicht festgelegt: Cr ≤ 0,15, CU ≤ 0,35 und V ≤ 0,03. Der Anteil an Kupfer im Stahl plus Umhüllung darf 0,35 % nicht überschreiten.
² Einzelwerte in der Tabelle sind Höchstwerte.
³ Die Ergebnisse sind auf dieselbe Stelle zu runden wie die festgelegten Werte unter Anwendung von ISO 31-0, Anhang B, Regel A.



Bild 3: MAG-Schweißen im Schienenfahrzeugbau

sind in DIN EN 21952, Fülldrahtelektroden für diese Stähle in EN 17634 genormt. Die Drahtelektroden reichen von der mit Molybdän legierten Variante über Drähte mit 1 %, 2,5 %, 5 % und 9 % Chrom bis zur Drahtelektrode mit 12 % Chrom. Weitere Legierungselemente sind Vanadium und Wolfram. Fülldrahtelektroden sind lieferbar mit bis zu 5 % Chrom-Anteil.

Drahtelektroden zum Schweißen nichtrostender und hitzebeständiger Stähle sind in DIN EN 14343 genormt, Fülldrahtelektroden für diese Stähle in DIN EN 17633. Die Normen unterscheiden Zusätze für martensitisch/ferritische Chromstähle, austenitische Stähle, ferritisch/austenitische Stähle und vollaustenitische, hochkorrosionsbeständige Stähle sowie spezielle und hitzebeständige Typen.

Für Drahtelektroden zum Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen liegt eine entsprechende Euronorm vor: EN ISO 18273.

3.2 Technische Lieferbedingungen für Drahtelektroden und Fülldrahtelektroden

Drähte, Stäbe und Drahtelektroden zum Schutzgasschweißen werden durch Kaltziehen hergestellt, Fülldrahtelektroden bei bestimmten Herstellungsverfahren auch durch Kaltwalzen oder Falzen.

Genormte Durchmesser und zulässige Grenzmaße für Drahtelektroden und Fülldrahtelektroden finden sich in EN 544. Die Durchmesser reichen von 0,6 bis 4,0 mm. Bei Massivdrähten zum MIG/MAG-Schweißen sind die gebräuchlichsten Durchmesser 0,8 mm, 1,0 mm, 1,2 mm und 1,6 mm. Die Fülldrähte beginnen meist erst bei 1,0 mm Durchmesser. Dafür werden sie aber auch noch in dickeren Abmessungen wie 2,4 oder 3,2 mm benutzt.

Unlegierte und niedriglegierte Drahtelektroden kommen in der Regel mit verkupferter Oberfläche zum Einsatz. Die Verkupferung

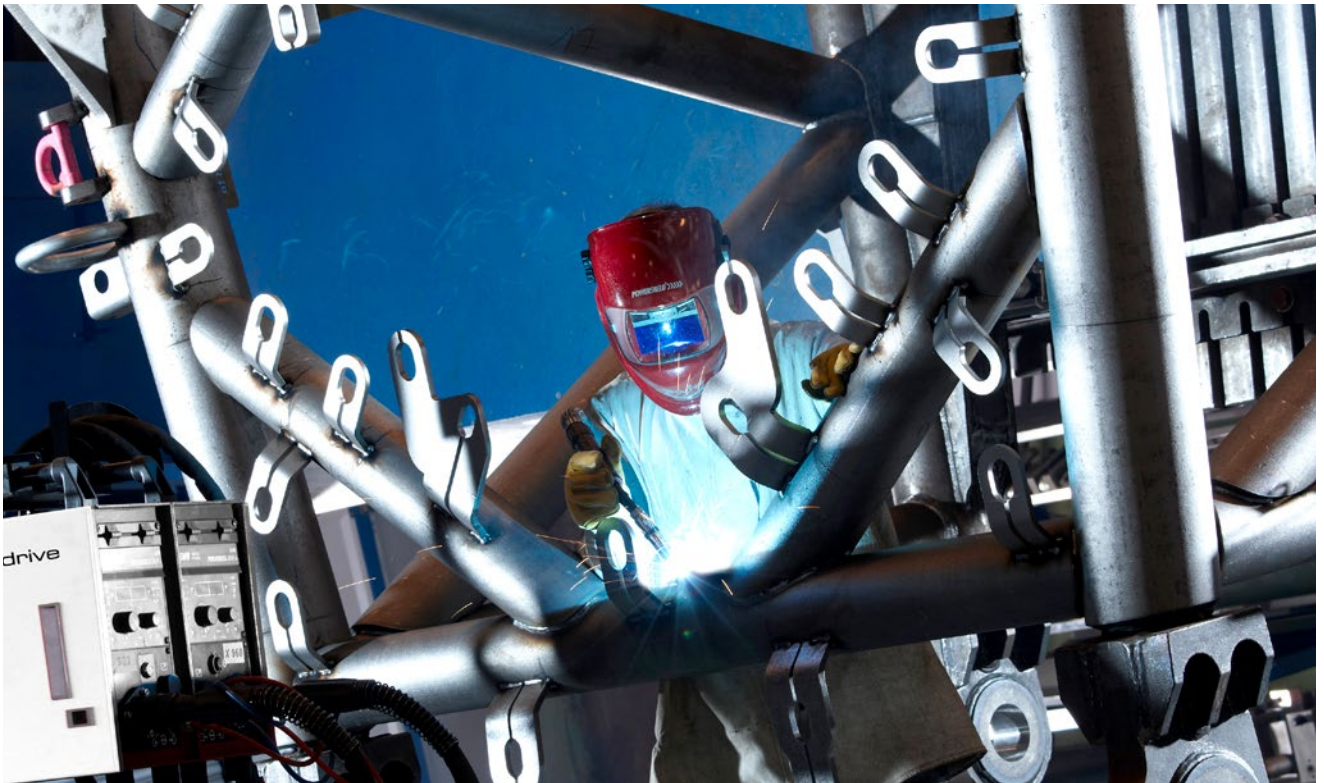


Bild 4: MSG-Schweißen hochfester Stähle im Kranbau mit Fülldrähten

dient dem Korrosionsschutz, verringert den Gleitwiderstand beim Fördern und verbessert die Stromkontaktierung. Fülldrahtelektroden können nur verkupfert werden, wenn sie einen geschlossenen Mantel ohne Spalt besitzen. Hochlegierte Drähte lassen sich nicht galvanisch oder im Bad verkupfern. Sie werden mit weißblinker Oberfläche geliefert. Auch Schweißdrähte aus Aluminium kommen mit blanker Oberfläche zum Einsatz. Weil sich in die weiche Oberfläche des Aluminiums Ziehmittel eindrücken können, die später beim Schweißen zur Porenbildung führen, wird bei Qualitätsdrähten vor dem Fertigtziehen ein Schälzug durchgeführt.

Drahtförmige Schweißzusätze zum Schutzgasschweißen werden auf Haspel-, Dorn- oder Korbspulen geliefert. Daneben gibt es Großbinde wie Fass-Spulen.

Weiterführende Informationen: Handbuch EWM-Schweißzusatzwerkstoffe

3.3 Schutzgase

Schutzgase zum MIG/MAG-Schweißen finden sich in EN 14175. In dieser Norm sind alle

Schutzgase zum Lichtbogen-Schweißen und -Schneiden genormt. Die Schutzgase werden in sieben Gruppen und jeweils in weitere Untergruppen unterteilt (Tabelle 2).

Die Gruppe R enthält Argon-Wasserstoff-Gemische, die eine reduzierende Wirkung haben. Die Gase der Gruppe R1 finden neben Argon und Helium Anwendung beim WIG- und Plasmaschweißen, die Gase der Untergruppe 2 mit höherem Wasserstoffgehalt (H) dagegen beim Plasmaschneiden und zum Wurzelschutz (Formiergase).

In der Gruppe I sind die inerten Gase zusammengefasst, darunter Argon (Ar) und Helium (He) sowie Argon/Helium-Gemische. Sie werden beim WIG-, MIG-, und Plasmaschweißen eingesetzt sowie zum Wurzelschutz.

In der großen M-Gruppe, die weiter in M1, M2 und M3 unterteilt ist, sind die Mischgase zum MAG-Schweißen zusammengefasst. Auch hier gibt es in jeder Gruppe drei bzw. vier Untergruppen. Die Gase sind von M11 bis M33 nach ihrem Oxidationsverhalten geordnet. M11 verhält sich schwach oxidierend, M33 ist am stärksten oxidierend. Hauptbe-

Tabelle 2: Einteilung der Schutzgase für Lichtbogenschweißen und -schneiden (EN 14175)

Kurzbezeichnung ¹		Komponenten in Volumenprozent						übliche Anwendung	Bemerkungen
Gruppe	Kennzahl	oxidierend		inert		reduzierend	reaktions-träge		
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂		
R	1			Rest ²		> 0 bis 15		WIG, Plasmaschweißen, Plasmaschneiden, Wurzelschutz	
	2					> 15 bis 35			
I	1			100				MIG, WIG, Plasmaschweißen, Wurzelschutz	
	2				100				
	3			Rest	> 0 bis 95				
M1	1	> 0 bis 5		Rest ²		> 0 bis 5		MAG	
	2								
	3		> 0 bis 3						
	4	> 0 bis 5							
M2	1	> 5 bis 25		Rest ²				MAG	
	2		> 3 bis 10						
	3	> 0 bis 5							
	4	> 5 bis 25	> 0 bis 8						
M3	1	> 25 bis 50		Rest ²				MAG	
	2		> 10 bis 15						
	3	> 5 bis 50	> 8 bis 15						
C	1	100		Rest ²				stark oxidierend	
	2	Rest	> 0 bis 30						
F	1			Rest ²			100	Plasmaschneiden, Wurzelschutz	
	2					> 0 bis 50	Rest		reduzierend

¹ Wenn Komponenten zugemischt werden, die nicht in der Tabelle aufgeführt sind, so wird das Mischgas als Spezialgas und mit dem Buchstaben S bezeichnet.

² Argon kann bis zu 95 % durch Helium ersetzt werden.

standteil dieser Gase ist Argon. An aktiven Komponenten sind Sauerstoff (O₂) oder Kohlendioxid (CO₂) bzw. Sauerstoff und Kohlendioxid (Dreikomponenten-Gase) zugemischt.

In der Reihe der Gase zum MAG-Schweißen folgen in der Gruppe C das reine Kohlendioxid und ein Kohlendioxid-Sauerstoffgemisch.

Letzteres hat allerdings in Deutschland kaum Bedeutung. Die Gase der Gruppe C sind am stärksten oxidierend, weil das CO₂ bei der hohen Temperatur des Lichtbogens zerfällt. Dabei entstehen neben Kohlenmonoxid auch große Mengen Sauerstoff.

Tabelle 3: Bezeichnungsbeispiel für eine Draht / Schutzgas-Kombination nach DIN EN 440

Kennziffer für die Festigkeits- und Dehnungseigenschaften des Schweißgutes			
Kennziffer	Mindeststreckgrenze N/mm ²	Zugfestigkeit N/mm ²	Mindestbruchdehnung %
35	355	440 bis 570	22
38	380	470 bis 600	20
42	420	500 bis 640	20
46	460	530 bis 680	20
50	500	560 bis 720	18

EN 440 – G 46 3 M G3Si1

Bezeichnungsbeispiel für eine Draht /
Schutzgas-Kombination nach DIN EN 440

Kennziffer für die Kerbschlagarbeit des Schweißgutes	
Kennziffer	Temperatur für Mindestkerb- schlagarbeit 47 J °C
Z	keine Anforderungen
A	+20
0	0
2	-20
3	-30
4	-40
5	-50
6	-60

In der Gruppe F finden sich schließlich Stickstoff (N) und ein Stickstoff-Wasserstoff-Gemisch. Beide Gase können beim Plasmaschneiden und Formieren verwendet werden. Neben dem Oxidationsverhalten ändern sich mit der Zusammensetzung des Gases auch die elektrischen und physikalischen Eigenschaften im Lichtbogenraum und damit die Schweißigenschaften. Durch den Zusatz von Helium zu Argon verändern sich u. a. der Energieumsatz im Lichtbogenprozess und die Wärmeeinbringung in das Werkstück. Das führt zu einem energiereicheren Lichtbogen und damit zu einem besseren Einbrandverhalten.

Werden aktive Komponenten (O₂, CO₂) bei Mischgasen zugemischt, werden beim Abschmelzen der Drahtelektrode u. a. feinere Tropfen gebildet und das Schmelzbad zeigt ein besseres Fließverhalten. Auch der Energieumsatz im Lichtbogen erhöht sich. Daraus

resultiert ein besseres Einbrandverhalten: Der bei argonreichem Schutzgas typische fingerförmige Einbrand in der Nahtmitte wird mit aktiven Gasanteilen breiter.

Die benötigte Schutzgas-Durchflussmenge eines MIG/MAG-Systems liegt gemäß einer Faustregel bei 10 bis 12 Liter/Minute pro Millimeter Drahtdurchmesser. Brenner mit kleinen Gasdüsenöffnungen benötigen etwas weniger, Brenner mit großen Düsenöffnungen etwas mehr Gasdurchsatz. Weil Aluminium beim MIG-Schweißen zu hoher Oxidation neigt, werden die Durchflussmengen etwas höher eingestellt, bei Ar/He-Mischgasen wegen der geringen Dichte von Helium sogar merklich höher.

Das aus Flasche oder Ringleitung zur Verfügung stehende Gas wird zunächst im Druck reduziert. Die eingestellte Durchflussmenge kann an einem Manometer, das zusammen

mit einer Staudüse justiert ist, oder an einem Durchflussmengenmesser mit Schwebekörper abgelesen werden. Moderne Schweißgeräte verfügen bisweilen über elektronische Gas-Regelventile. Auf den Einfluss der Schutzgase auf den Schweißprozess wird später bei der Beschreibung der verschiedenen Lichtbogenarten noch näher eingegangen.

3.4 Eigenschaften des Schweißgutes

Bei der Auswahl einer Draht-Schutzgas-Kombination als Schweißzusätze für unlegierte Stähle und Feinkornbaustähle geht es in erster Linie darum, die Eigenschaften des Grundwerkstoffs bei Festigkeit und Zähigkeit auch im Schweißgut zu erreichen. Dazu bietet die EN 14341 Hilfen an. Ähnlich wie bei Stabelektroden gibt es ein Bezeichnungssystem, aus dem die Mindestwerte von Streckgrenze und Bruchdehnung, sowie die Festigkeit und die Kerbschlagarbeit des Schweißgutes entnommen werden können. Das Bezeichnungssystem wird in Tabelle 3 veranschaulicht.

Im gewählten Beispiel wird eine Drahtelektrode G3Si1 unter Mischgas (M) verschweißt. Das Schweißgut dieser Draht-Schutzgas-Kombination hat eine Mindeststreckgrenze von 460 N/mm² („46“), eine Zugfestigkeit von 530 bis 680 N/mm² und eine Mindestdehnung von 20 %. Eine Kerbschlagarbeit von 47 Joule wird bis zu einer Temperatur von -30 °C („3“) erreicht. Ein ähnliches System gibt es auch zur Charakterisierung von Fülldrahtelektroden in EN 17632.

Bei den warmfesten Stählen, den korrosions- und hitzebeständigen Stählen und bei Aluminiumwerkstoffen gilt die Regel, dass das Schweißgut möglichst artgleich dem zu schweißenden Grundwerkstoff oder etwas höher legiert sein soll, um die erforderlichen Werkstoffeigenschaften zu erreichen. Für Drahtelektroden und Fülldrahtelektroden warmfester und korrosions- bzw. hitzebeständiger Stähle finden sich Angaben über die Mindestwertevon Streckgrenze, Zugfestigkeit, Dehnung und Kerbschlagarbeit des Schweiß-

gutes in tabellarischer Form in den entsprechenden Normen. Diese Werte sind aber nicht Bestandteil des Bezeichnungssystems.

Eine Drahtelektrode zum MAG-Schweißen des warmfesten Stahles 13 CrMo 4.5 hat nach EN 21952 die Bezeichnung EN 21952 - G CrMo1Si.

Eine Drahtelektrode zum MAG-Schweißen des korrosionsbeständigen CrNi-Stahles mit der Werkstoffnummer 1.4302 hat nach EN 14343 folgende Bezeichnung: EN 14343 - G 19 9 L.

Die Bezeichnung einer Drahtelektrode zum MIG-Schweißen des Werkstoffes AlMg 5 lautet EN 18273 - G AlMg5Mn.

Weiterführende Informationen:
Handbuch EWM-Schweißzusatzwerkstoffe

4. Fugenvorbereitung

4.1 Fugenformen

Bild 5 zeigt die wichtigsten Fugenformen, die beim MAG-Schweißen von Stahl zur Anwendung kommen.

Weil der Prozess ein so gutes Einbrandverhalten zeigt, können bei Nähten mit Stegen (I-, Y,- DY- Nähten) im Vergleich zum E-Hand-Schweißen größere Blechdicken ohne Ausfugen durchgeschweißt werden. Bei größeren Materialdicken empfiehlt sich aber ein Ausfugen von der Rückseite, um Fehler zu vermeiden. Die Steghöhe richtet sich nach der anwendbaren Stromstärke.

Weil Aluminiumwerkstoffe Wärme besser ableiten, sind bei größeren Dicken größere Öffnungswinkel von 70 bis 90 Grad ratsam.

4.2 Anbringen der Fugenflanken

Fügekanten werden bei un- und niedriglegierten Stählen in der Regel durch autogenes Brennschneiden angeschrägt. Hochlegierte Stähle und die Metalle, die mit dem MIG-Verfahren geschweißt werden (z. B. Aluminium),

können mit dem Plasmastrahl schmelzgeschnitten werden. Die Oxidationen, die beim thermischen Trennen entstehen, müssen nicht unbedingt entfernt werden. In Sonderfällen kann es dennoch notwendig werden. Auf die Besonderheiten des Werkstoffs Aluminium in dieser Hinsicht wird an anderer Stelle noch näher eingegangen.

Bei speziellen Anforderungen und geringen Toleranzen kann auch ein mechanisches Bearbeiten der Fugenflanken empfohlen werden. Das gilt besonders für Rohr-Stumpfstöße. Bei der mechanisierten Fertigung kommen die modernen Möglichkeiten des Präzisionsplasmaschneidens oder des Laserstrahlschneidens zum Tragen.

4.3 Badsicherungen

Beim manuellen Arbeiten beobachtet der Schweißer den Schweißvorgang und kann durch Einstellung der richtigen Stromstärke, der Stellung des Lichtbogens in der Fuge und der Schweißgeschwindigkeit eine gleichmäßige Wurzellage erreichen, selbst wenn der Spalt variiert. Beim vollmechanischen Schweißen müssen dagegen alle Größen, von Schweißfugengeometrie und eingestelltem Spalt bis zu den richtigen Schweißparametern mit Schweißgeschwindigkeit und Abschmelzleistung, passend gewählt sein. Um das Wurzelschweißen zu erleichtern, werden deshalb beim maschinellen Schweißen oft Badsicherungen verwendet (Bild 6).

Wenn der Wurzelspalt nicht zu sehr variiert, können Wurzelstege als natürliche Badsicherung dienen, z. B. bei I- oder Y-Fugen (interne Badsicherungen). Abhängig von der Steghöhe müssen die Parameter beim Schweißen der ersten Lage so gewählt werden, dass der Steg nicht vollständig aufgeschmolzen wird. Der verbleibende Rest des Stegs kann dann beim Schweißen der Gegenlage, mit oder ohne Ausfugen, erfasst werden.

Künstliche (externe) Badsicherungen beste

Fugenformen nach EN 9692-1		
Stoßart	Werkstückdicke (mm)	Skizze
I-Naht	einseitig 3-8 beidseitig < 8	
V-Naht	einseitig 3-10 mit Gegenlage 3-40	
Y-Naht	einseitig 5-40 mit Gegenlage > 10	
X-Naht	beidseitig > 10	
U-Naht	einseitig >12 mit Gegenlage > 12	
V-Naht	einseitig 3-10 mit Gegenlage 3-30	
Kehlnaht-T-Stoß	einseitig > 2	
Kehlnaht-Eckstoß	einseitig > 2 beidseitig > 3	
Kehlnaht-Überlappstoß	einseitig > 2	
Kehlnaht-Doppelkehlnaht	beidseitig > 2	

Bild 5

hen z. B. aus Metall. Bei den meisten Metallen und Legierungen wird Kupfer verwendet; die Unterlage darf nicht angeschmolzen werden. Auch Keramikunterlagen werden inzwischen in zahlreichen Varianten als Badsicherung angeboten. Die Unterlage soll das spontane Durchfallen des Schweißgutes an kritischen Stellen verhindern. So wird das schmelzflüssige Metall aufgefangen und eine korrekte Wurzelraupe gebildet. Die Badsicherung formt auch die Unterseite der Wurzellage. Dazu ist sie meist mit einer Nut versehen.

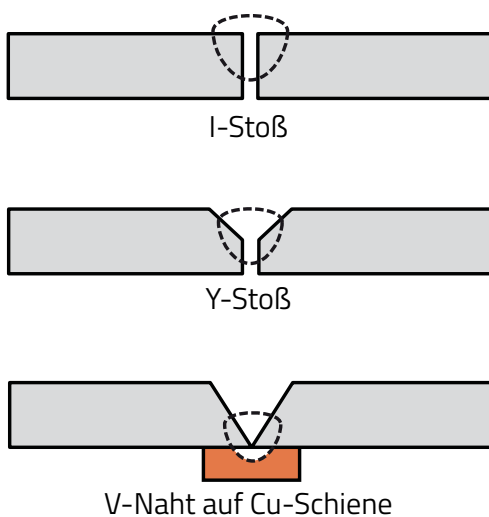


Bild 6: Typische Fugenformen und Badsicherungen beim maschinellen MSG-Schweißen

4.4 Formieren

Unter Formieren ist die Zugabe von Schutzgas an die Nahrückseite zu verstehen. Sie verhindert, dass der hoch erhitze Werkstoff dort unmittelbar der Atmosphäre ausgesetzt ist (Oxidation). Das ist beim WIG- und MIG/MAG-Schweißen* meist unverzichtbar, damit die Wurzel nicht wieder ausgefugt werden muss. Beim MAG-Schweißen von Wurzellagen ist das Formieren häufig nicht erforderlich. Hier kommt es auf das verwendete Material an.

Das Formieren verhindert oder vermindert zumindest die Bildung von Oxidationen und Anlauffarben auf der Wurzelrückseite. Das ist z. B. beim Schweißen von korrosionsbeständigen Stählen wichtig, denn die oxidierten Bereiche der Schweißverbindung werden anfälliger für Korrosion. Sie müssen ggf. nach dem Schweißen durch Bürsten, Strahlen oder Beizen entfernt werden.

Beim Schweißen von Rohren werden die Enden der Rohre versperrt; das Formiergas muss kontrolliert in den Innenraum einströmen. Beim Schweißen von Blechen strömt es aus Öffnungen der Badsicherung aus.

Als Formiergas können Argon oder ein Argon/Wasserstoff-Gemisch verwendet werden. Vielfach können aber auch die preiswerten Formiergase der Gruppe F in DIN EN 14175 eingesetzt werden. Sie bestehen z. B. aus einem Wasserstoff/Stickstoff-Gemisch. Auch reiner Stickstoff kann unter bestimmten Umständen zum Formieren verwendet werden.

5. Schweißgeräte

Geräte zum MIG/MAG-Schweißen bestehen aus der Stromquelle, der Steuerung und dem Drahtvorschubgerät mit Schlauchpaket und Brenner. Für verschiedene Anwendungsfälle können diese als Kompaktgeräte oder als Dekompaktgeräte mit externem Drahtvorschubgerät zum Einsatz kommen.

Beim Kompaktgerät (Bild 7) sind Stromquelle, Steuerung und Drahtvorschubgerät in einem Gehäuse untergebracht. Der Operationsradius entspricht der Länge des Brennerschlauchpaketes, meist 3 bis 5 Meter. Dementsprechend kommen Kompaktgeräte hauptsächlich an festen Arbeitsplätzen, z. B. in Schweißkabinen oder an Fertigungsbandern, zum Einsatz.

Bei dekompakten Geräten (Bild 8) befindet sich der Drahtvorschubantrieb separat in einem Gehäuse und ist über ein Zwischenschlauchpaket mit der Stromquelle und der

Steuerung verbunden. Das Drahtvorschubgerät kann zum Werkstück transportiert werden. Dadurch kann sich der Operationsradius um bis zu 40 Meter gegenüber dem Kompaktgerät vergrößern. Universalgeräte werden deshalb meist an wechselnden Arbeitsplätzen und auf Baustellen eingesetzt. Bild 9 zeigt das MIG/MAG-Multiprozess-Inverter-Impulsschweißgerät Titan XQ puls mit Expert-2.0-Steuerung in der Stromquelle und HP-XQ-Steuerung im Drahtvorschubgerät.

5.1 Schweißstromquellen

Die Schweißstromquelle hat die Aufgabe, den Schweißprozess mit der benötigten elektrischen Energie zu versorgen. Dazu gehört, dass die hohe Spannung des Netzes auf ungefährliche und für das Schweißen sinnvolle Werte herabgesetzt wird; zugleich wird die benötigte hohe Stromstärke zur Verfügung gestellt. Da beim MIG/MAG-Schweißen, von Ausnahmen abgesehen, nur Gleichstrom verwendet wird, kommen als Stromquellen nur Gleichrichter-Geräte bzw. Inverter zur Anwendung.

Der sog. Schweißgleichrichter besteht aus dem Netztransformator und einem nachgeschalteten Gleichrichtersatz (sog. Dioden). Während der Transformator die hohe Spannung und niedrige Stromstärke des Versorgungsnetzes in elektrische Leistung mit niedriger Spannung (10 bis 50 V) und hoher Stromstärke (50 bis 500 A) umwandelt, richtet der Gleichrichtersatz den vom Trafo gelieferten Wechselstrom bzw. Drehstrom in Gleichstrom um.

Für unterschiedliche Schweißaufgaben werden unterschiedliche Ströme und Spannungen benötigt. Daher müssen die Stromquellen einstellbar sein. Bei einfachen Geräten zum MIG/MAG-Schweißen werden dazu Windungsanzapfungen am Transformator mit einem Stufenschalter umgeschaltet.

Bild 10 zeigt das Prinzip eines stufengeschalteten Gerätes.



Bild 7: Kompaktes, stufengeschaltetes MIG/MAG-Schweißgerät mit integriertem Drahtantrieb



Bild 8: Dekompaktes, stufengeschaltetes MIG/MAG-Schweißgerät mit separatem Drahtantrieb und Wasserkühlung



Bild 9: MIG/MAG-Multiprozess-Inverterschweißgerät Titan - XQ

Durch Abgreifen von mehr oder weniger Windungen der Primärspule verändert sich das Übersetzungsverhältnis des Trafos und damit die Spannung auf der Sekundärseite.

Bei etwas aufwändigeren Stromquellen wird der Strom im Gleichrichterteil mit einem steuerbaren Gleichrichter (sog. Thyristoren) verstellt. Bild 11 zeigt das Schema einer solchen Anlage.

Durch entsprechendes Ansteuern der Thyristoren werden mehr oder weniger große Teile der Wechselstromhalbwellen genutzt. Dadurch verändert sich die Schweißspannung. Diese relativ einfache Technik ist inzwischen überholt.

Modernere MIG/MAG-Geräte sind mit Invertern als Stromquellen ausgestattet. Der Inverter ist eine elektronisch gesteuerte und geregelte, primär getaktete Stromquelle. Nachdem über Jahrzehnte analoge und sekundär getaktete elektronische Stromquellen verwendet wurden, hat sich die Entwicklung inzwischen auf solche primär getakteten Geräte konzentriert. Sie nutzen ein völlig anderes Arbeitsprinzip als konventionelle Stromquellen (Bild 12).

Die vom elektrischen Versorgungsnetz gelieferte Leistung (Spannung, Strom, 50 Hz) wird zunächst über einen Diodensatz gleichgerichtet und danach durch schnell

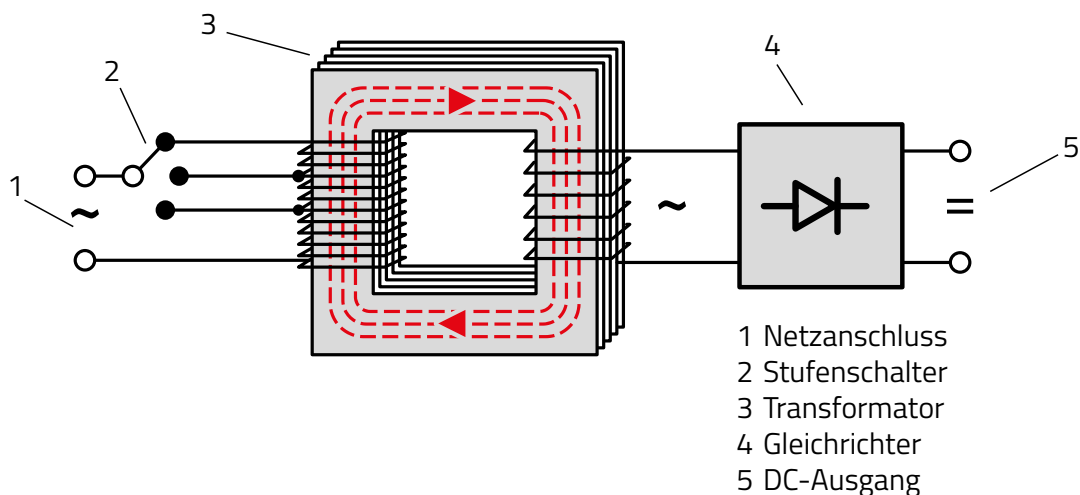


Bild 10: Prinzip einer Schweißstromquelle mit Stufenschaltung

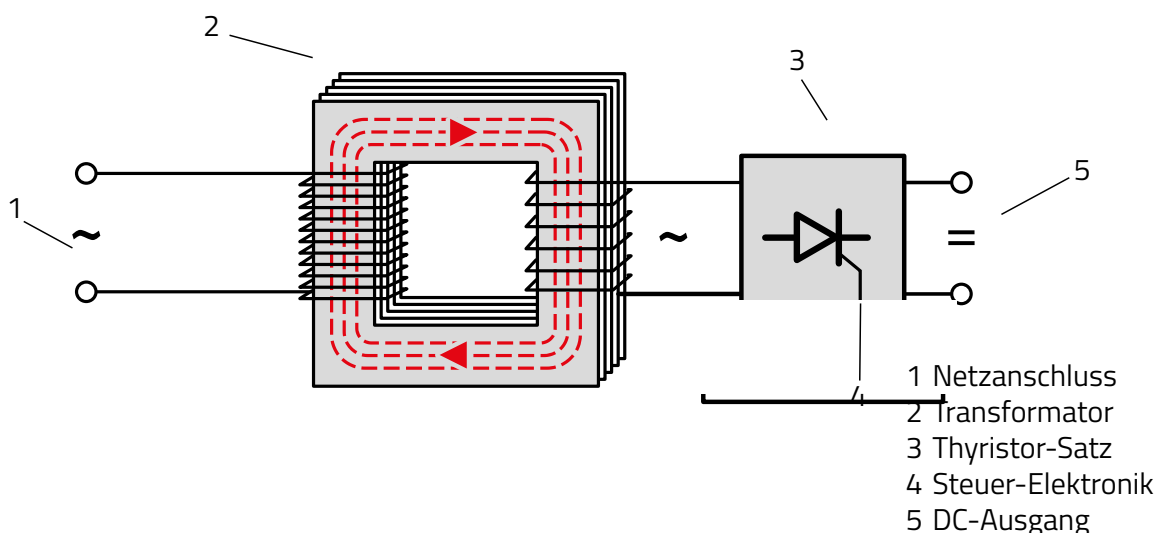


Bild 11: Prinzip einer stufenlosen Schweißstromquelle mit Thyristor-Steuerung

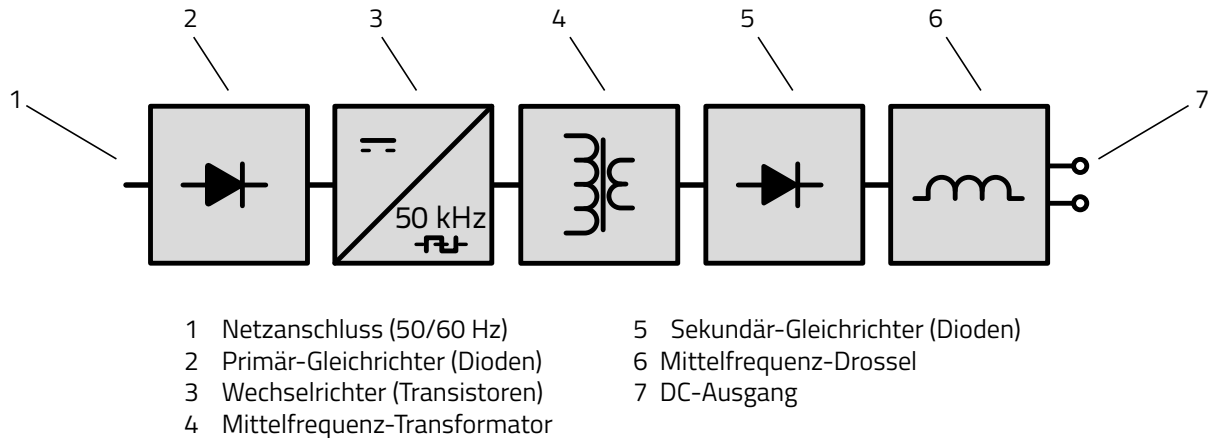


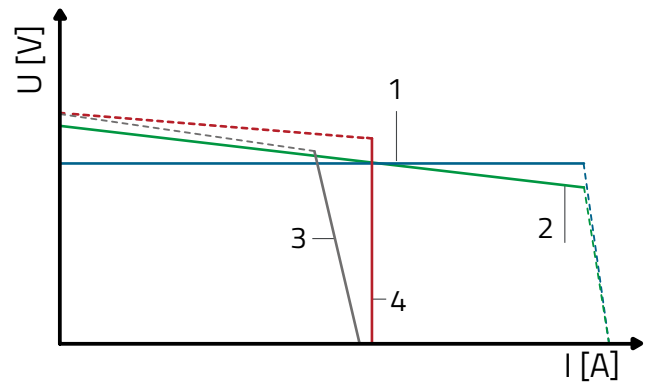
Bild 12: Blockschaubild einer modernen Inverter-Stromquelle

les Umschalten in kurze Blöcke zerteilt. Dieses so genannte „Takten“ erledigen schnell arbeitende elektronische Schalter, die IGBT-Transistoren.

Die ersten transistorisierten Inverter arbeiteten mit Taktfrequenzen von etwa 20 kHz. Inzwischen sind mit weiterentwickelten Transistor-Schaltern Frequenzen von bis zu 100 kHz möglich.

Nach dem schnellen Umschalten („Takten“) der Leistung auf der Primärseite wird diese auf die sekundärseitig erforderliche Leistung bei hoher Stromstärke und niedriger Spannung transformiert. Hinter dem Trafo entsteht eine etwa rechteckförmige Wechselspannung, die anschließend wieder gleichgerichtet wird (Dioden). Die hohe Schaltfrequenz hält die erforderliche Masse des bei hoher Frequenz arbeitenden Trafos sehr klein; sie ist stark von der Schaltfrequenz abhängig. So ist es möglich, Leichtgewichtsstromquellen mit hohem Wirkungsgrad herzustellen.

Bei modernen Schweißgeräten werden viele Funktionen, die bei konventionellen Stromquellen mit üblichen Komponenten der Elektrotechnik wie Widerstände, Drosseln, Kondensatoren und Schaltern erreicht werden, durch die Steuerung elektronisch gelöst. Die Steuerung dieser Stromquellen ist deshalb mindestens ebenso wichtig wie das Leistungsstück. Um die Ausgangsleistung zu ver-



- 1 Konstantspannungskennlinien
- 2 flach fallende Kennlinien
- 3 steil fallende Kennlinien
- 4 Konstantstromkennlinien

Bild 13: U/I-Kennlinien

stellen, wird z. B. bei getakteten Quellen das Verhältnis zwischen den Ein-/Ausschalt-Zeiten bei niedrigsten Verlusten verändert. Um impulsförmige Stromverläufe zu erzeugen, wird das Verhältnis der Ein-/Ausschalt-Zeiten durch die Steuerung zyklisch verändert. Auf ähnliche Weise kann der Strom auch beim Start und beim Stopp des Schweißvorgangs beliebig hoch- bzw. heruntergefahren werden.

Die Invertertechnik machte die präzise geregelte Stromquelle möglich, die von der Schweißtechnik schon lange gefordert worden war. Ein elektronischer Regler misst als Kontrollgerät permanent Schweißstrom und -spannung und vergleicht diese Werte

mit den eingestellten Sollwerten. Ändern sich die aktuellen Istwerte, z. B. durch unerwünschte Veränderungen im Schweißablauf, so regelt die Steuerung innerhalb einiger Mikrosekunden (typ. 0,1 ms) korrigierend nach. Auf ähnliche Weise kann u. a. auch der Kurzschlussstrom im Schweißprozess auf sinnvolle Werte begrenzt werden. Aus der beschriebenen Technologie ergeben sich deutlich bessere Wirkungsgrade bei minimalen Leerlaufverlusten und ein sehr guter $\cos(\phi)$ der Invertergeräte.

Das elektrische Verhalten der hier diskutierten Schweißgeräte („Quellen“) ist im einfachsten Fall durch die Form bzw. Lage der U/I-Kennlinie des Gerätes gekennzeichnet. Es kann eine Konstantspannungskennlinie sein oder eine sog. Konstantstromkennlinie. Dazwischen ist grundsätzlich jede andere Form einer U/I-Kennlinie von flach fallend bis steil fallend machbar (siehe Diagramm in Bild 13). Diese, auch „statische Kennlinie der Quelle“ genannte, Beschreibung hat einen wichtigen Einfluss auf den Betrieb und die Stabilität eines jeden Lichtbogenprozesses.

5.2 Drahtvorschubgeräte

Im Drahtvorschubgerät bewegt sich die Drahtelektrode durch Drahtvorschubrollen in wählbarer Geschwindigkeit auf den Lichtbogenprozess zu. Sie wird dabei von der Spule abgezogen und durch das Schlauchpaket geschoben. An dessen Ende befindet sich der Schweißbrenner. Die Drahtvorschubrollen werden durch einen Gleichstromtriebemotor angetrieben, der sich in der Umdrehungsgeschwindigkeit stufenlos verstellen lässt.

Bei modernen Geräten, die einen geregelten Schweißprozess gestatten, wird die Motordrehzahl und damit die Drahtvorschubgeschwindigkeit durch einen Drehzahlgeber gemessen und belastungsunabhängig präzise geregelt.

Beim MIG/MAG-Schweißen sind in der Regel – je nach Drahtdurchmesser – Drahtvorschub-

geschwindigkeiten zwischen 1 und 20 m/min üblich, bei Hochleistungsvarianten bis zu 30 m/min.

Der Drahtvorschubantrieb muss die Oberfläche der Drahtelektrode schonend behandeln. Die Drahtvorschubrollen müssen deshalb einen ausreichend großen Durchmesser besitzen, damit die Flächenpressung der Drahtoberfläche nicht zu groß wird.

Gegenüber einem 2-Rollen-Antrieb kann bei 4-Rollen-Antrieben der Draht mit geringerem Anpressdruck und trotzdem schlupffrei gefördert werden. Bei 4-Rollen-Antrieben werden vielfach alle Rollen miteinander verzahnt und gemeinsam von einem (leistungsstarken) Motor angetrieben.

Bild 14 gestattet einen Blick in ein Drahtvorschubgerät mit 4-Rollen-Antrieb. Dabei ergibt sich eine 3-Punkt-Auflage des Drahtumfangs zwischen den Rollen, die bei optimaler Traktion oberflächenschonend ist. Bei Fülldrähten werden häufig gerändelte Rollen und bei weichen Drähten U-Nut-Rollen verwendet (Bild 15).

Eine schonende Behandlung der Drahtoberfläche ist wichtig, weil Drahtabrieb (Metallpartikel) mit ins Schlauchpaket gefördert wird und es so nach kurzer Zeit verstopfen



Bild 14: Modernes Drahtvorschubgerät mit 4-Rollenantrieb

kann. Verstärkter Metallabrieb entsteht auch, wenn die Drahtvorschubrollen verschlissen oder beschädigt sind. Ihr Zustand muss deshalb regelmäßig kontrolliert werden. Neue Drahtvorschubrollen müssen frei von Graten an und in den Nuten sein.

Die Andruckkraft der Drahtvorschubrollen ist einstellbar und muss abhängig vom Drahttyp nach Angaben des Geräteherstellers gewählt werden (Skala an den Druckhülsen).

5.3 Schlauchpaket und Brenner

Das Schlauchpaket, das den MIG/MAG-Brenner mit dem Schweißgerät bzw. dem Drahtvorschubgerät verbindet, enthält alle notwendigen Versorgungsleitungen: die Schweißstromleitung, die Schutzgasleitung, den Drahtzuführungsschlauch und die Steuerleitung. Bei Anlagen, die für höhere Stromstärken ausgelegt sind, gehören auch die Kühlwasserzuführung und -rückführung dazu.

Bei wassergekühlten Brennern liegt die Stromleitung in der Wasserrückführung. Der Querschnitt der Leitung ist somit geringer und das Schlauchpaket leichter und flexibler als bei Brennern ohne Wasserkühlung. Der Drahtführungsschlauch besteht beim Schweißen von un- und niedriglegiertem Stahl aus einer Drahtführungsspirale. Werden Drahtelektroden aus Chrom-Nickel-Stahl sowie aus Aluminium und anderen

Metallen verwendet, wird dafür ein Schlauch aus verschleißfestem Kunststoff (z. B. Teflon) benutzt. Kunststoffführungen haben einen günstigeren Reibungskoeffizienten als Stahl. Mit der Steuerleitung können Steuerungssignale vom Brenner aus an die Steuerung versendet werden. Am Brennerhandgriff befindet sich der Brennertaster, mit dem die zum Schweißen notwendigen Funktionen gesteuert werden können.

Die Bilder 16-18 zeigen einige gebräuchliche Brennertypen. Am häufigsten werden gebogene Brenner (Bild 16) verwendet. Sie besitzen ein geringes Gewicht und der Lichtbogen erreicht die Schweißstelle meist gut. Eine besondere Technik bietet der Brenner in Bild 17 durch die integrierte Fernbedienung im Griff.

Ein weiterer Brennertyp ist der Push-Pull-Brenner (Bild 18). Beim Push-Pull-Antrieb zieht ein im Brennerhandgriff montierter Drahtvorschubmotor die Drahtelektrode, während der Antrieb, der sich im Gerät befindet, den Draht ins Schlauchpaket schiebt. Damit lassen sich selbst weiche und dünne Drähte sicher fördern. Ein Push-Pull-Antrieb wird auch häufig bei Roboteranlagen und bei mechanisierten Schweißanlagen eingesetzt, um die Drahtelektrode über große Wege sicher transportieren zu können. Beide Antriebe müssen mit elektronischen Mitteln synchronisiert werden.



z. B. UNI-Rollen für \varnothing 1 mm bis 1,2 mm mit V-Nut (blau/rot) für Edelstahl, Stahl



z. B. \varnothing 1 mm mit U-Nut (blau/gelb): für Aluminium



z. B. \varnothing 1 mm mit V-Nut, gerändelt (blau/orange): für Fülldraht

Bild 15: Drahtantriebsrollen mit unterschiedlichen Nut-Geometrien



Bild 16: Standard-MIG/MAG-Brenner zum manuellen Schweißen



Bild 17: MIG/MAG-Brenner mit integriertem Display



Bild 18: MIG/MAG-Brenner mit Push-Pull-Antrieb und wechselbarem Brennerhals

An Roboteranlagen werden inzwischen auch kleinbauende, leistungsstarke Drahtantriebssysteme am Roboterhandgelenk genutzt, die die Drahtelektrode ohne weitere Antriebstechnik über einen reibungsarmen Förderweg direkt aus einem Drahtfass fördern.

Bild 19 zeigt das Schnittbild eines modernen Brenners.

Der Stromübergang von der Stromdüse auf die Drahtelektrode ist wegen der hohen Spitzenströme (400 bis 600 A) nicht unkritisch. Eine zuverlässige Kontaktierung und damit ein störungsfreier und reproduzierbarer Schweißprozess sind nur möglich, wenn der Draht eine blanke, metallische Oberfläche zeigt und – aufgrund seiner Krümmung („Dressur“) oder durch brennerseitige Maßnahmen – an die Stromdüseninnenbohrung („Zwangskontakt“) angedrückt wird. Bei Störungen an dieser Stelle blockiert die Drahtbewegung meist kurzzeitig und unregelmäßig und beeinträchtigt den Schweißprozess damit erheblich.

5.4 Steuerung

An der Steuerung des Schweißgerätes können verschiedene Funktionen eingestellt werden. So kann von 2-Takt- auf 4-Takt-Betrieb umgestellt werden. Dazu kann eine Einschleichgeschwindigkeit der Drahtelektrode beim Zünden und eine Rückbrandzeit des Lichtbogens beim Beenden des Schweißens eingestellt werden. Durch die einstellbare niedrige Geschwindigkeit der Drahtelektrode beim Zünden wird der Zündvorgang sicherer, weil der zu Beginn noch schwach auf dem kalten Werkstoff brennende Lichtbogen durch den nachdrückenden Draht nicht sofort wieder erstickt wird. Die eingestellte Rückbrandzeit verhindert ein Festbrennen der Elektrode im Endkrater. Dafür wird die Drahtförderung schon etwas eher abgeschaltet als der Schweißstrom. Ist die Rückbrandzeit allerdings zu lang eingestellt, kann der Draht an die Stromdüse zurück- und dort festbrennen. Ein weiteres

Höher dimensionierte Querschnitte bei Stromdüse und Schraubsockel stellen eine optimale Wärmeableitung bei hoher Belastung sicher.

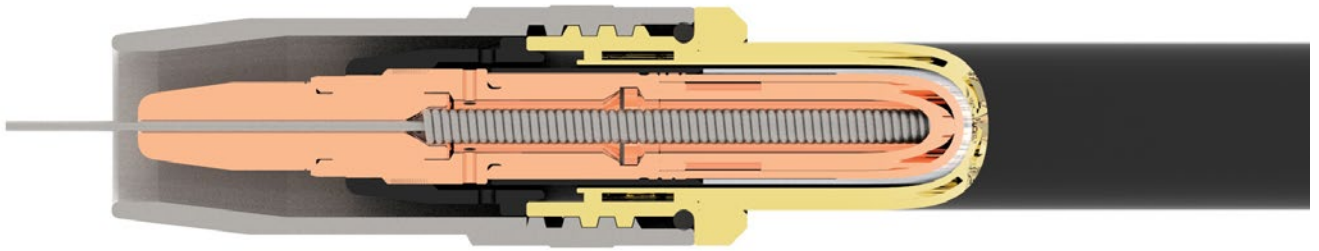


Bild 19: Schnittbild eines MIG/MAG-Schweißbrennerkopfes

Programm kann verhindern, dass nach dem Beenden des Schweißens ein zu großer Tropfen am Drahtende zurückbleibt, der beim erneuten Zünden stören würde. Hier wird der am Draht gebildete Tropfen unmittelbar vor dem Beenden des Schweißens durch einen Stromimpuls abgelöst. Moderne MIG/MAG-Anlagen gestatten auch ein rampenförmiges Hochfahren des Stromes zu Beginn und ein entsprechendes Absenken am Ende der Schweißnaht.

Eine weitere Funktion, die Softstart-Technik, zündet mit niedrigem Strom und reversierender Drahtbewegung und macht so einen spritzerarmen und zuverlässigen Prozessbeginn möglich.

Mit sogenannten Verfahrensumschaltungen zwischen Lichtbogenarten mit erhöhter oder niedriger Wärmeeinbringung lassen sich Schweißnähte auf unterschiedlichste Weise umsetzen und gestalten.

Der Schweißstromkreis in den Leitungen zwischen Gerät und Lichtbogenort besitzt bestimmte Werte für den Ohm'schen Widerstand und die Induktivität. Sie sind abhängig von Kabellänge, Querschnitt und Geometrie der Verlegung und verändern unter Umständen die Kurvenformen von Strom und/oder Spannung und damit die Schweißergebnisse. Moderne Anlagen sind in der Lage, die Werte Widerstand und Induktivität der Leitungen zu ermitteln und deren Einflüsse zu kompensieren. Damit werden reproduzierbare

Schweißergebnisse sichergestellt.

Inverterschweißgeräte der aktuellen Generation können an Netzspannungen in einem erweiterten Bereich um die Nennspannung von bis zu -25% / $+20\%$ arbeiten und erleichtern damit den Betrieb an unterschiedlichen Einsatzorten. Veränderungen der Netzspannung in dem genannten Bereich haben keine Auswirkungen auf den Schweißprozess.

Die Geräte haben dank der modernen Elektronik einen hohen Wirkungsgrad während des Schweißens und einen geringen Energieverbrauch in Leerlaufphasen. Dazu schalten diese Geräte bei längerem Stillstand die Kühlkreislaufpumpe und den Gerätelüfter aus, so dass der Energieverbrauch im Standby sehr niedrige Werte annimmt.

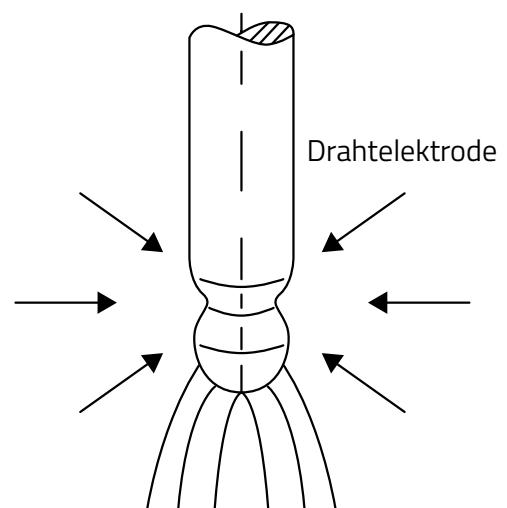


Bild 20: Schema der Wirkung des Pincheffektes [1]

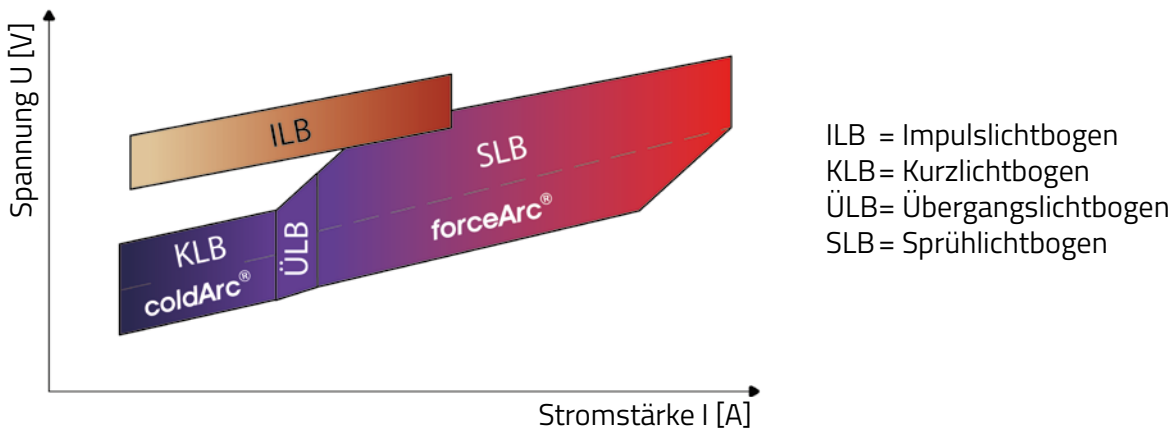


Bild 21: Lage der Arbeitsbereiche

Mit der elektronischen Anmeldefunktion kann verhindert werden, dass Unbefugte das Gerät starten oder eingestellte Parameter verstellen können.

In kritischen Anwendungsfällen sollten Schweißdaten laufend aufgezeichnet und bestimmte Parameter überwacht werden. Im Verbund zahlreicher aktiver Schweißgeräte können die Daten in einem Netzwerk zentral zusammenfließen. Die Mikrorechnersysteme moderner Schweißgeräte sind dazu in der Lage (siehe ewm Xnet).

Weiterführende Informationen: www.ewm-group.com/sl/prospekte

6. Werkstoffübergang beim MIG/MAG-Schweißen

6.1 Lichtbogenbereiche

Je nach eingestellten Schweißparametern und verwendetem Schutzgas stellen sich beim MIG/MAG-Schweißen unterschiedliche Werkstoffübergangsformen, die Lichtbogenbetriebszustände, ein. Dabei wirken sowohl physikalische Phänomene wie Oberflächenspannung und Viskosität der Metallschmelze, Schwerkraft und Plasmaströmung, als auch elektrische Kräfte wie die Lorentzkraft mit. Besonders die letztgenannte elektromagnetische Kraft hat einen dominierenden Einfluss auf Tropfenübergänge, die im freien Flug erfolgen. Die Lorentzkraft, hier auch Pinch-Effekt genannt, resultiert aus dem

umgebenden Magnetfeld und ist eine radial nach innen gerichtete Kraft (Bild 20). Sie schnürt das schmelzflüssige Elektrodenende ein und „kneift“ einzelne Tropfen von diesem „ab“ (engl. to pinch = abkneifen).

DIN 1910-4 unterscheidet und beschreibt die in Tabelle 4 aufgeführten Lichtbogenarten.

Die bei gleichförmigem Strom typischen Werkstoffübergangsformen treten teils im unteren Leistungsbereich, d. h. bei niedrigen Stromstärken und Spannungen, teils im mittleren bzw. im oberen Leistungsbereich auf.

Bild 21 zeigt schematisch ihre Lage im U/I-Diagramm.

Der Impulslichtbogen steht über einen sehr breiten Leistungsbereich hinweg zur Verfügung.

6.2 Kurzlichtbogen

Der Kurzlichtbogen tritt im unteren Leistungsbereich bei niedrigen Stromstärken und Lichtbogenspannungen auf. Sein Name beschreibt nicht nur, dass es sich hier um einen geometrisch kurzen Lichtbogen handelt, sondern er wird auch wegen der Art des Tropfenübergangs Kurz(schluss)lichtbogen genannt. Bild 22 zeigt die Stationen des Tropfenübergangs.

Unter Einfluss der Lichtbogenwärme bildet sich am Elektrodenende ein kleiner Tropfen (a), der dank des kurzen Lichtbogens durch

Tabelle 4

Lichtbogenarten nach DIN 1910-4	
Benennung	Werkstoffübergang
Sprühlichtbogen	feinst- bis feintropfig > praktisch kurzschlussfrei
Langlichtbogen	grob tropfig > nicht kurzschlussfrei
Kurzlichtbogen	feintropfig > im Kurzschluss
Impulslichtbogen	Tropfengröße und Tropfenfrequenz einstellbar > praktisch kurzschlussfrei

die Drahtbewegung schon bald Kontakt mit dem Schmelzbad bekommt. Es entsteht ein Kurzschluss: Der Lichtbogen erlischt (b). Der Tropfen wird durch die Oberflächenspannungen vom Schmelzbad aufgenommen. Danach zündet der Lichtbogen wieder (c). Dieser Vorgang wiederholt sich in nicht regelmäßigen Abständen je nach verwendetem Schutzgas ca. 20 bis 100 Mal in der Sekunde. Während der Kurzschlussphase steigt der Strom verzögert an. Wegen der geringen Größe des Tropfens ist die Kurzschlussphase kurz und es kommt nicht zu übermäßig hohen Stromspitzen. Die Anstiegsgeschwindigkeit des Stromes wird bei konventionellen Stromquellen durch eine angepasste Drossel im Schweißstromkreis auf sinnvolle Werte begrenzt. Damit wird der Lichtbogen nach dem Kurzschluss sanft und ohne wesentliche Spritzerbildung wiedergezündet. Bei Inverterschweißgeräten verhindert die elektronische Steuerung/Regelung (Software) flexibel, dass der Strom im Tropfenkurzschluss überhöht ansteigt.

Der Kurzlichtbogen ist ein relativ „kalter“ Prozess mit niedriger umgesetzter elektrischer Leistung, geringem Einbrand und zähfließender Schmelze. Er tritt unter allen Schweißschutzgasen auf und eignet sich besonders zum Schweißen von Wurzellagen, von dünnen Blechen und in Zwangslagen.

6.3 CO₂-Lichtbogenprozess (Langlichtbogen)

Der besondere CO₂-Lichtbogen tritt im mittleren und oberen Leistungsbereich auf, wenn mit reinem CO₂ oder unter hoch CO₂-haltigen Mischgasen geschweißt wird. Kennzeichnend sind Tropfen mit großem Volumen und vermehrtem Spritzerauswurf. Der tiefe Einbrand reduziert in bestimmten Anwendungen die Bindefehlergefahr.

Der CO₂-Lichtbogenprozess wird in Europa selten eingesetzt.

6.4 Sprühlichtbogen

Unter Argon und argonreichen Mischgasen umhüllt der Lichtbogen am Tropfenansatz das untere Elektrodenende, so dass sich der Pinch-Effekt bei ausreichender Stromstärke optimal einstellen kann. Das Drahtende schnürt sich dabei ein; einzelne Tropfen wer-

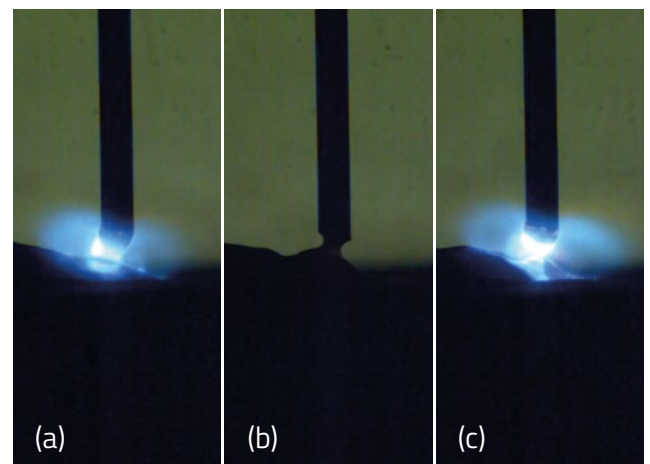


Bild 22: Tropfenübergang beim Kurzlichtbogen



Bild 23: Tropfenübergang beim Sprühlichtbogen

den von der Elektrode abgelöst (Bild 23). Der Werkstoffübergang ist dabei kurzschlussfrei und spritzerarm.

Der Sprühlichtbogen tritt bei argonreichen Schutzgasen im oberen Leistungsbereich auf. Bei dieser Lichtbogenart bildet sich ein großes, heißes Schmelzbad, so dass der Prozess normalerweise nicht für Zwangslagenschweißungen (PC-PF, Bild 25) geeignet ist.

6.5 Übergangslichtbogen

Zwischen dem Kurzlichtbogen einerseits und dem Sprüh- oder Langlichtbogen andererseits stellt sich der Übergangslichtbogen ein. Dafür ist ein gemischter Werkstoffübergang, teils im Kurzschluss, teils im freien

Flug, typisch. In diesem Bereich bilden sich verstärkt Spritzer, auch unter argonreichen Mischgasen. Die Wärmeeinbringung und Einbrandtiefe liegen im Mittelfeld zwischen den oben genannten Prozessen (Bild 24). Wenn möglich, wird dieser Lichtbogen vermieden.

6.6 Impulslichtbogen

Kennzeichen des Impulslichtbogens ist ein von der Stromquelle erzwungener schneller, regelmäßiger Wechsel zwischen Phasen mit hoher und Phasen mit niedriger Leistung.

Parameter sind bei dieser Lichtbogenbetriebsart, je nach „Modulation“ (Regelung statt „Regel-Prinzip“) der Stromquelle, die Drahtvorschubgeschwindigkeit, der Grundstrom oder die Grundspannung, der Impulsstrom oder die Impulsspannung, die Impulsdauer und die Impulsfrequenz. Wie Bild 26 zeigt, löst sich unter Einwirkung des Pinch-Effekts in der Impulsphase jeweils ein Tropfen von der Elektrodenspitze ab, sofern die Parameter korrekt gewählt sind. Es kommt so zu einem regelmäßigen, feintropfigen und spritzerarmen Schweißprozess.

Der Impulslichtbogen ist nahezu über dem gesamten Leistungsbereich einsetzbar und bei niedrigen und mittleren Strömen auch bedingt für das Schweißen in Zwangslagen geeignet.

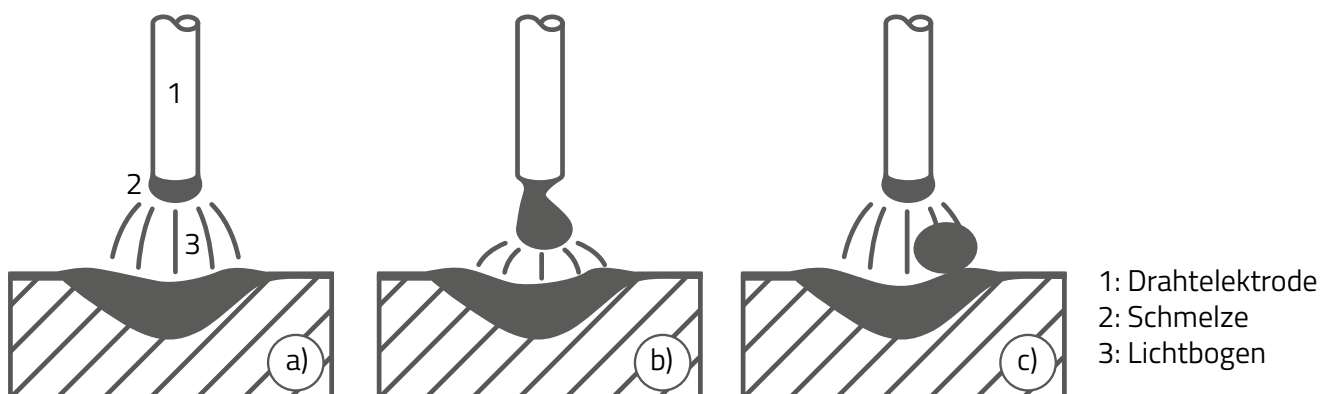


Bild 24: Tropfenübergang beim Übergangslichtbogen

6.7 Sonderformen des Werkstoffübergangs

Neben den vorher beschriebenen Standardlichtbogenarten gibt es Sonderformen, die erst in den vergangenen Jahren mehr in den Vordergrund getreten sind.

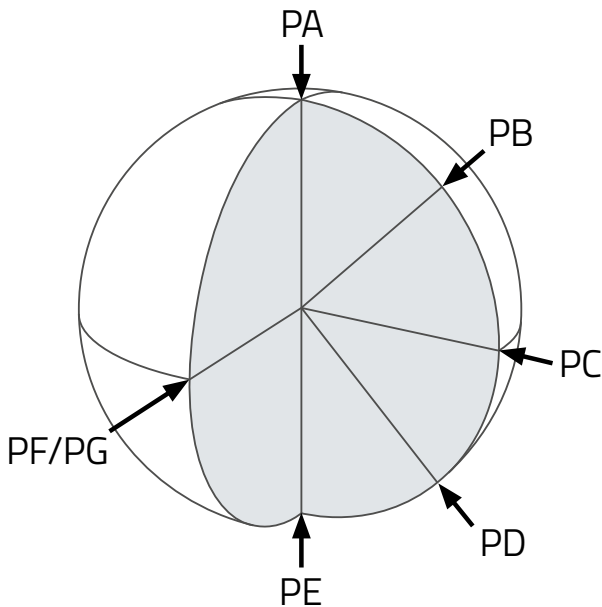


Bild 25: Schweißpositionen nach DIN EN 6947

Bei Stromstärken, die über denen des konventionellen Sprühlichtbogens liegen – also bei Drahtvorschubraten beim 1,2 mm-Draht z. B. von mehr als 18 m/min – tritt unter Mischgasen der Hochleistungsprühlichtbogen auf. Dieser bringt allerdings einen so tiefen, unter Umständen schneidenden, Einbrand, dass dadurch Fehler in der Naht auftreten können.

Werden die freie Drahtlänge und die Spannung erhöht, beginnt der Lichtbogen in diesem Leistungsbereich zu rotieren und der Einbrand verbreitert sich. Der rotierende Lichtbogen wird eingesetzt, wenn die Abschmelzleistung gesteigert werden soll. Auch wenn die Schweißgeschwindigkeit für Füll- und Decklagen bei Stumpfnähten und für Kehlnähte an dickwandigen Bauteilen erhöht werden soll, kommt der rotierende Lichtbogen zum Einsatz. Die Gefahr der Porenbildung durch Gasverwirbelung ist dabei hoch; der Prozess ist mit großer Vorsicht zu benutzen.

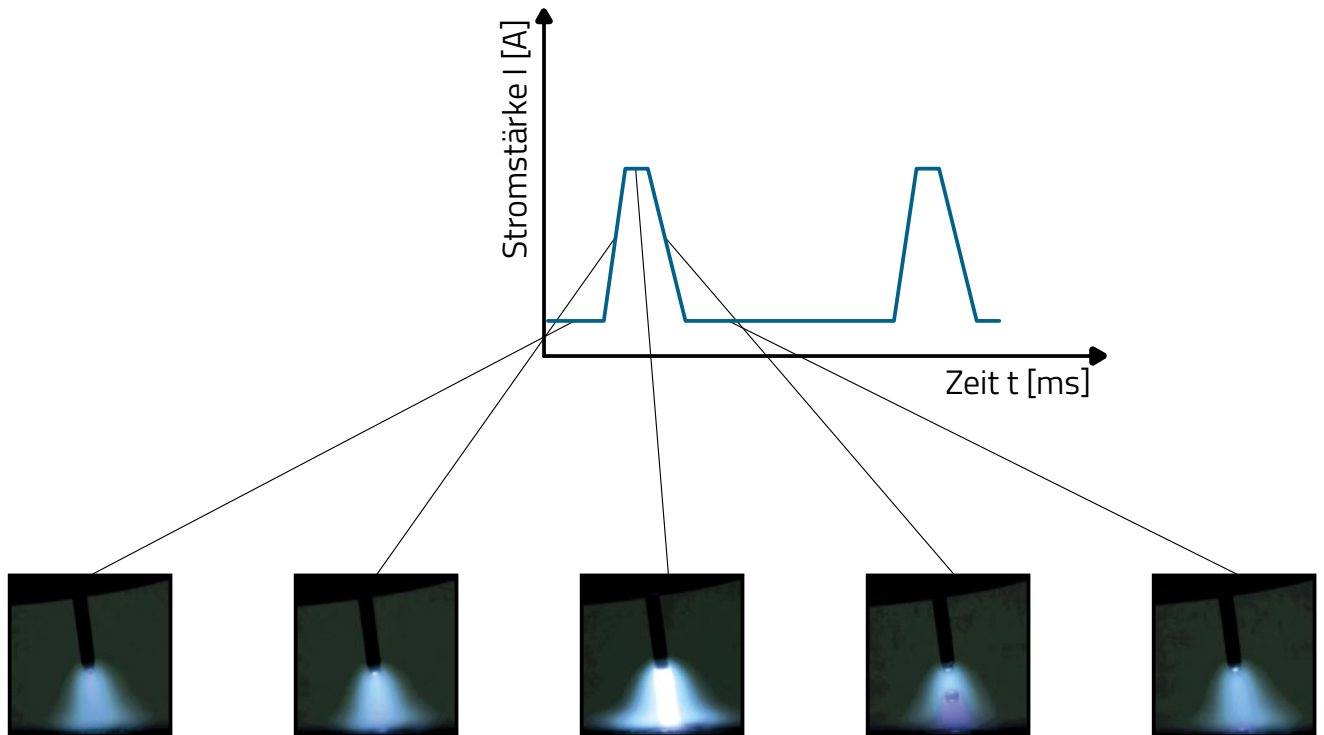


Bild 26: Tropfenübergang beim Impulslichtbogen

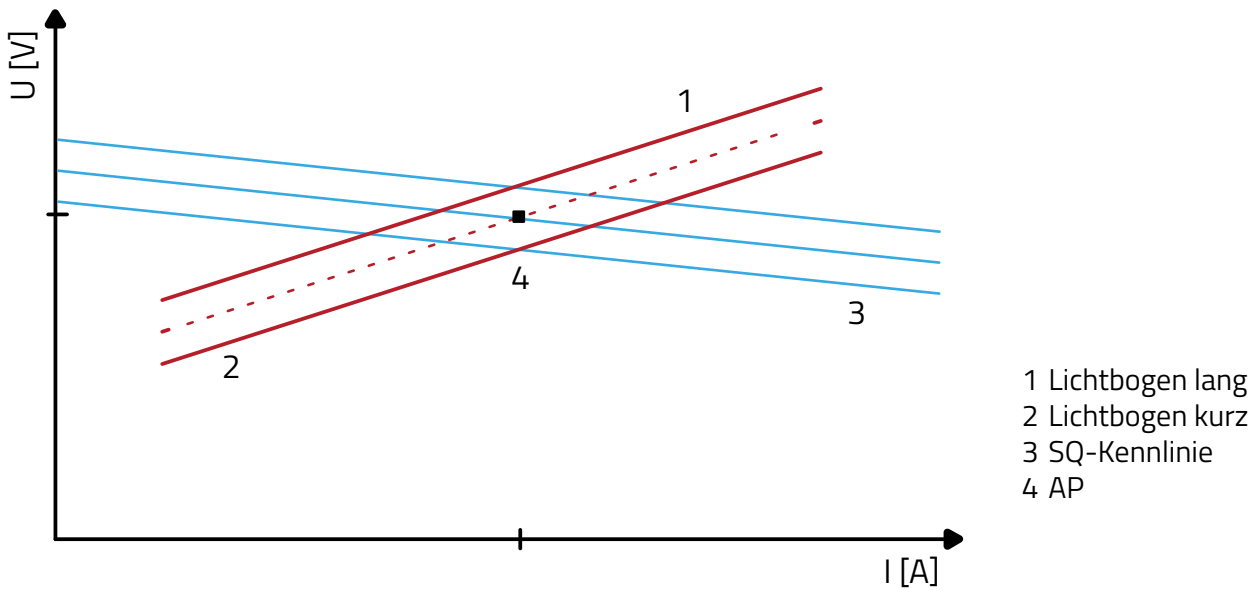


Bild 27: Lichtbogenbereiche beim MIG/MAG-Schweißen

Der Hochleistungskurzlichtbogen ist ein Prozess mit einem Werkstoffübergang im typischen Kurzschlussübergangsbereich. Er tritt bei Stromstärken im Bereich des konventionellen Sprühlichtbogens, aber wesentlich niedrigerer Lichtbogenspannung, auf.

Die genannten Hochleistungsvarianten des MIG/MAG-Schweißens werden, von Ausnahmen abgesehen, nur vollmechanisiert angewendet.

7. Einstellen der Schweißparameter

7.1 Einstellen bei konventionellen Schweißgeräten

Im Gegensatz zum E-Hand-Schweißen und zum WIG-Schweißen sind zur Einstellung von MIG/MAG-Anlagen zwei Stellvorgänge notwendig. Das wird am Beispiel der relativ einfachen Einstellung eines stufengeschalteten Gerätes (Schweißgleichrichter) erläutert.

Für das MIG/MAG-Schweißen werden Konstantspannungsquellen oder – in den meisten Fällen – solche mit flach fallender U/I-Kennlinie eingesetzt. Die in etwa gewünschte Spannung wird deshalb durch Einstellen

einer bestimmten Kennlinie (Stufe) an den Grob- und Feinstufenschaltern des Schweißgerätes gewählt. Zusammen mit einer dazu passenden, einzustellenden Drahtvorschubgeschwindigkeit wird eine günstige Lichtbogenlänge erreicht. Bild 27 zeigt, wie sich die Lage des Arbeitspunktes ändert, wenn die Einstellungen der Stromquelle und der Drahtvorschubgeschwindigkeit verändert werden.

Der Arbeitspunkt (AP) ist der Schnittpunkt zwischen der eingestellten Quellenkennlinie und der Lichtbogenkennlinie. Er ist durch die Stromstärke $I_s(\text{AP})$ und die Spannung $U_s(\text{AP})$ gekennzeichnet. Wird die Drahtvorschubgeschwindigkeit erhöht, so verkürzt sich der Lichtbogen und der Arbeitspunkt wandert auf der Quellenkennlinie nach rechts – die Stromstärke steigt. Wird die Drahtfördergeschwindigkeit verringert, wandert der AP dagegen nach links. So kann über das Potentiometer für den Drahtvorschub die gewünschte Stromstärke eingestellt werden. Mit der höheren Drahtgeschwindigkeit verkürzt sich allerdings der Lichtbogen. Damit er nicht zu kurz wird, muss gleichzeitig die Spannung entsprechend angehoben werden

Für eine höhere Spannung muss am Stufen-schalter eine höher liegende Kennlinie eingestellt werden, ist eine Verringerung der Lichtbogenspannung gewünscht, eine niedrigere. Üblicherweise verlaufen die Quellenkennlinien fallend. Wird also ein gewünschter Parameter verstellt, verändert sich der andere ebenfalls geringfügig. Nur bei Konstantspannungsquellen (waagerechte SQ-Kennlinie) gibt es diese gegenseitige Beeinflussung nicht.

Für optimale Verhältnisse beim Schweißen darf der Lichtbogen weder zu kurz noch zu lang sein. Bei einem zu kurzen Lichtbogen gibt es häufig Tropfenkurzschlüsse und damit Spritzer. Die Kurzschlüsse sind an einem typischen knatternden Geräusch zu erkennen, das vom Lichtbogen ausgeht. Mit zunehmender Länge des Lichtbogens steigt die Gefahr, dass Umgebungsluft in den Lichtbogenbereich eintritt. Damit wird u. a. die Gefahr von Poren und Einbrandkerben größer. Den zu langen Lichtbogen erkennt der Schweißer optisch sowie am zischenden Geräusch des Lichtbogens. Der Bereich günstiger Arbeitspunkte läuft in etwa diagonal durch das U/I-Diagramm. Das ist der Arbeitsbereich, in dem geschweißt werden sollte. In Bild 28 sind

die Arbeitsbereiche für eine Si/Mn-legierte Stahl-Drahtelektrode und zwei verschiedene Mischgase dargestellt.

Alle Arbeitspunkte innerhalb der skizzierten Arbeitsbereiche führen zu günstigen Schweißbedingungen. Nach unten herausfallende Arbeitspunkte bedeuten zu kurze Lichtbögen, oberhalb liegende Arbeitspunkte führen zu überlangen Lichtbögen. Die Arbeitsbereiche gelten immer nur für eine bestimmte Kombination von Drahtelektroden- und Schutzgastyp.

Beim Schweißen mit der Impulslichtbogen-Technik ist der Werkstoffübergang weitgehend kurzschlussfrei. Bei niedrigen und mittleren Stromstärken verschieben sich die Bereichsgrenzen hier zu etwas höheren Lichtbogenspannungen.

7.2 Synergetische Einstellung von Schweißprozessen

Die Bedienung moderner Schweißgeräte wird durch die Vielfalt der Funktionen und Parameter immer schwieriger. An modernen MIG/MAG-Geräte lassen sich Schweißparameter jedoch ganz einfach einstellen.

Diese Entwicklung begann schon vor Jahr-

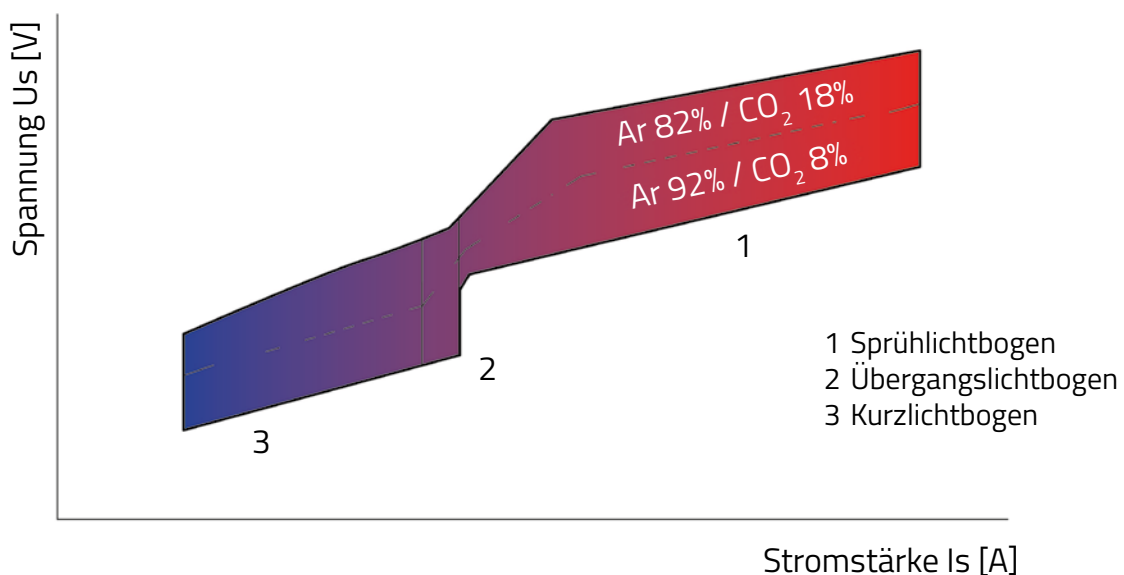


Bild 28: Arbeitsbereiche für zwei Argon-Mischgase

zehnten mit der sog. „Einknopfbedienung“, bei der über nur einen Drehknopf die Leistung durch eine stufenlose Kennlinienverstellung der Quelle (Spannung) und gleichzeitig die Drahtvorschubgeschwindigkeit passend verstellt werden konnte. Über einen optionalen zweiten Knopf war eine gewisse Korrektur des Arbeitspunktes möglich.

Inzwischen gehört es zum Standard vieler MIG/MAG-Geräte, wie z. B. den EWM-Multiprozessgeräten Titan XQ, Phoenix puls, Taurus Synergic S oder Picomig Synergic / puls (Bild 29), dass die an sich komplizierte Einstellung moderner Gerätetechnik wesentlich einfacher wird. Die idealen „Arbeitskennlinien“ für häufige Schweißaufgaben sind im Gerät gespeichert. Der Bediener des Geräts stellt mittels Tipptasten oder durch Auswahl in entsprechenden Menüs nur noch den sogenannten JOB ein. Dazu gehören der zu schweißende Werkstoff, der gewünschte Drahtdurchmesser, das Material des Drahts oder Schweißzusatzwerkstoffs und das angeschlossene Schutzgas. Damit ist die vorprogrammierte, ideale Arbeitskennlinie für die Schweißaufgabe („Synergic-Kennlinie“) aufgerufen. Die Leistung lässt sich nun an einem Potentiometer / Spannungskorrektur (in Volt) stufenlos einstellen. Für individuelle Wünsche zur günstigsten Lichtbogenlänge steht ein Korrekturknopf zur Verfügung. Die Bilder 30 und 31 zeigen Steuerungen moderner Schweißanlagen, die viele weitergehende Einstellungen gestatten.

7.3 Stabilisierung / Regelung der MIG/MAG-Prozesse

MIG/MAG-Lichtbogenprozesse bleiben nicht von sich aus stabil: Die Zuführgeschwindigkeit der Drahtelektrode und die Spannung müssen grundsätzlich gleich sein. Nur so kann ein Gleichgewicht von freier Drahtlänge und Lichtbogenlänge gehalten werden. Dazu müssen bestimmte Voraussetzungen gelten: Üblicherweise wird die Drahtzuführgeschwindigkeit beim MIG/MAG-Schweißen

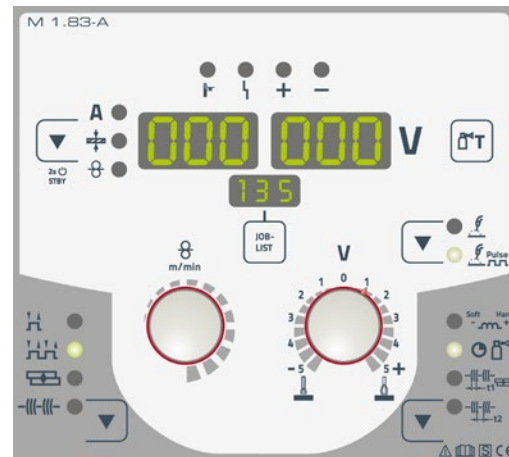


Bild 29: Bedienung Picomig

konstant gehalten (siehe Kapitel Drahtvorschubgeräte). Liefert das Schweißgerät eine stabile Spannung – also Konstantspannungsverhalten? oder eine flach fallende U/I-Kennlinie (siehe Bild 27) – an den Lichtbogenprozess, kann ein „einfacher“ Lichtbogenprozess (z. B. im Sprühlichtbogenbetrieb) das Gleichgewicht von freier Drahtlänge und Lichtbogenlänge selbst stabil halten. Äußere Störungen, z. B. durch Abstandsänderungen, werden zwar nicht komplett eliminiert, aber der Schweißprozess bleibt grundsätzlich stabil.

Das ist im folgenden Diagramm (Bild 32) anschaulich erläutert: Durch eine von außen einwirkende Abstandsänderung zwischen Brenner und Werkstück (a->b) verschiebt sich die Lichtbogenprozess-Kennlinie im U/I-Diagramm nach rechts; es entsteht ein neuer Arbeitspunkt AP2 bei vergrößertem Schweißstrom. Der höhere Strom führt zu einer stärkeren Abschmelzleistung des Drahtes. Dadurch wird wiederum der Lichtbogen länger. Er bildet mit der kürzeren freien Drahtlänge ein neues Gleichgewicht. Wird der ursprüngliche Abstand zwischen Brenner und Werkstück wieder erreicht (b->c), stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Draht- und Lichtbogenlänge wie unter (a) ein. Der Arbeitspunkt liegt wieder auf AP1.

Die beschriebenen Ausgleichsvorgänge laufen im Zehntel-Sekunden-Bereich ab. Der



Bild 30: Bedienung eines synergieprogrammierten MIG/MAG-Gerätes (High-Tech)

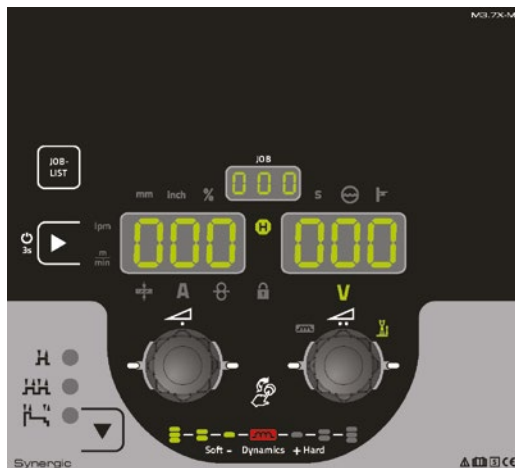


Bild 31: Bedienung eines synergieprogrammierten MIG/MAG-Gerätes (Standard)

Vorgang wird in der Schweißtechnik (nicht ganz korrekt) als „innere Regelung“ oder (besser) als „innerer Selbstausgleich“ bezeichnet. Weist das Schweißgerät dagegen eine steil fallende oder Konstantstromkennlinie? auf, wie sie in anderen Schweißverfahren (z. B. WIG) verwendet werden, ist ein stabiler MIG/MAG-Prozess nicht möglich. Es kann keine oder keine ausreichende Stromveränderung I entstehen.

Kurze Unterbrechungen des Lichtbogens durch Tropfenübergänge im Kurzschluss (zwischen Drahtspitze und Schmelzbad), wie sie z. B. in den Prozessen „Kurzlichtbogen“ und „Übergangslichtbogen“ auftreten, werden durch eine angepasste Drossel (Induktivität) abgefangen. Sie verhindert, dass der

Strom im Schweißstromkreis übermäßig ansteigt; der Schweißprozess wird so nicht gestört (siehe Bild 32). Verkürzt sich der Abstand, reagiert der Prozess u. a. mit häufigeren Tropfenübergängen, vergrößert sich der Abstand, mit geringeren. So bleibt der Prozess stabil, solange die Abstandsänderungen nicht ruckartig auftreten.

Beim Lichtbogenschweißen mit Impulstechnik (siehe Bild 26) ist die Stabilisierung komplizierter, denn die Grundphasen müssen mit niedriger Leistung über eine steile Kennlinie stromgeregelt betrieben werden. Damit entfällt die Stabilisierung in diesen Phasen. In vielen Fällen werden die (kurzen) Pulsphasen über eine flache Kennlinie spannungsgeregelt betrieben. So kann die prozesseigene „innere“ Stabilisierung wirken.

Dieses einfache Verfahren der Stabilisierung versagt bei niedrigen Pulsfrequenzen mit langen Grundphasen ohne Stabilisierung genauso wie bei NE-Drahtwerkstoffen. Stattdessen wird hier der gesamte Pulsprozess stromgeregelt betrieben: Er läuft über steile Quellenkennlinien in allen Phasen. Das Gleichgewicht zwischen freier Drahtlänge und Lichtbogenlänge muss dann allerdings über eine komplizierte, elektronisch unterstützte Regelung hergestellt werden. Diese Technik misst permanent Strom und Spannung und nutzt Informationen am Schweißprozess. Dabei legt sie ein Lichtbogenmodell zugrunde. Der mittlere Schweißstrom wird, abhängig von den Messergebnissen, in geeigneter Form verstellt. So wird ungewollten Veränderungen im Prozess entgegengewirkt.

Die Parameter dieses Lichtbogenmodells sind abhängig von Werkstoffen, Schutzgasen, Betriebsarten, Arbeitsbereichen und vielen weiteren Einflussgrößen. Die Hersteller der Schweißgeräte ermitteln diese Parameter mit großem Aufwand in ihren Laboren und lassen sie in die auf Mikrorechner basierenden Elektroniksysteme einfließen (siehe hierzu auch Kapitel 7.2 – Synergic-Programmierung).

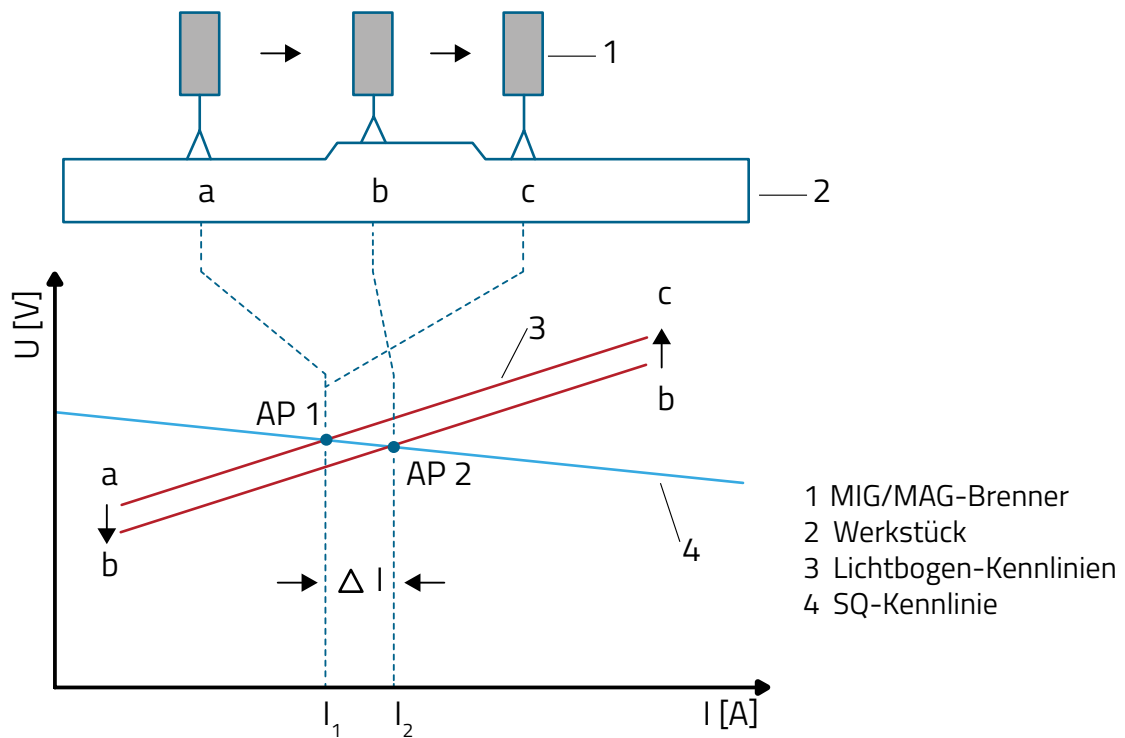


Bild 32: Stabilisierung der Lichtbogenlänge (Delta-I-Regelung)

8. Durchführen des Schweißens

Der MIG/MAG-Schweißer braucht eine gute Ausbildung, sowohl im praktischen Schweißen, als auch bei den theoretischen Besonderheiten des Verfahrens. Sie sind im Folgenden beschrieben:

8.1 Zünden des Lichtbogens

Wurde die Brennergastaster betätigt, setzt sich die Drahtelektrode (mit verminderter Geschwindigkeit, sog. „Einschleichgeschwindigkeit“) in Bewegung. Gleichzeitig wird die Stromzufuhr gestartet und das Schutzgas beginnt zu strömen. Beim Berühren der Drahtspitze auf der Werkstückoberfläche entsteht ein erster Kontakt, über den sofort ein hoher Strom fließt. Wegen der hohen Stromdichte an der Elektrodenspitze wird an der Berührungsstelle Material hoch erhitzt. Das ist die Voraussetzung für die Bildung eines Lichtbogens. Wenn der Lichtbogen stabil brennt, wird automatisch auf die vorgewählte Drahtvorschubgeschwindigkeit hochgeschaltet. Moderne Schweißgeräte

unterstützen den gewünschten, wiederholbaren Ablauf des an sich kritischen Zündvorgangs mit Elektronik.

Das Zünden sollte normalerweise nicht außerhalb der Fuge und möglichst an Stellen erfolgen, die später wieder aufgeschmolzen werden. An nicht überschweißten Zündstellen können sich u.U. Risse bilden.

Gelegentlich versagt der oben beschriebene optimale Zündvorgang und es gibt eine kurz aufeinander folgende Mehrfachzündung mit knallenden Geräuschen und wegfliegenden Drahtstücken. Das ist ein deutliches Zeichen für Fehler in folgenden Bereichen: dicke oxidierte Kugel am Drahtende, schlecht leitende Werkstückoberfläche, Wackelkontakte zwischen Werkstück und Masseanschluss, Defekte / Unterbrechungen in den Schweißkabeln oder Brennerleitungen, falsch gewählte Schweißparameter oder falsch gewählte Einschleichgeschwindigkeit (sofern manuell einstellbar). Auch eine ungeeignete Kontaktierung der Drahtelektrode

in der Stromdüse des Brenners, z. B. durch Abnutzung, kann u. a. zu Zündschwierigkeiten führen.

8.2 Brennerführung

Der Brenner wird in Schweißrichtung etwa 10° bis 20° geneigt und kann schleppend oder stechend geführt werden (Bild 33). Der Abstand zwischen dem freien Drahtende

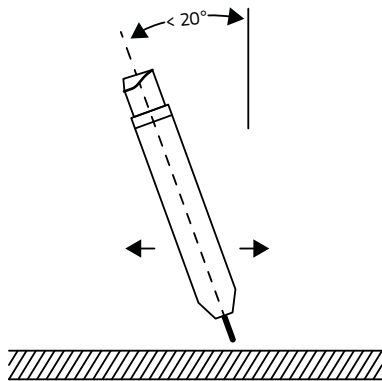


Bild 33: Anstellung des Brenners in Schweißrichtung

und dem Werkstück, also der Unterkante der Stromdüse und dem Ansatzpunkt des Lichtbogens, sollte etwa 10 bis 12 Mal Drahtdurchmesser [mm] betragen. Bei einem zu stark geneigten Brenner besteht die Gefahr, dass Luft in das Schutzgas eingewirbelt wird und Fehler entstehen können. Stechende Brennerführung ist in der Regel beim Schweißen mit Massivdrähten üblich, schleppende Führung beim Einsatz von Schlackeführenden Fülldrähten. Leicht schleppend wird der Brenner generell in der Position PG geführt. Fallnahtschweißen (Pos. PG, fallend) kommt hauptsächlich bei dünneren Blechen vor. Bei dickerem Material besteht die Gefahr, dass durch vorlaufendes Schweißgut Bindefehler entstehen. Diese Bindefehler können auch in anderen Positionen auftreten, wenn mit zu geringer Schweißgeschwindigkeit geschweißt wird. Breites Pendeln sollte deshalb, von der Position PF (steigend) abgesehen, möglichst vermieden werden.

8.3 Beenden des Schweißens

Am Ende der Naht darf der Lichtbogen nicht plötzlich abgeschaltet und der Brenner weggezogen werden. Vor allem bei dickeren Blechen können so in großvolumigen Rauten tiefe Endkrater entstehen. Deshalb ist es günstiger, den Lichtbogen langsam vom Bad abzuziehen oder ein Endkraterfüllprogramm einzustellen, wenn es das verwendete Schweißgerät hergibt. Dazu sollte eine gewisse Nachströmzeit des Schutzgases eingestellt werden, damit das letzte, noch flüssige Schweißgut unter der Schutzgasabdeckung erstarren kann. Das ist aber nur wirksam, wenn der Brenner auch eine Zeitlang am Ende der Naht verweilt.

8.4 Schweißparameter

Die untere Grenze der möglichen Anwendung des MIG/MAG-Verfahrens liegt bei Stahl bei etwa 0,5 mm und bei Aluminiumwerkstoffen bei etwa 1 mm Materialdicke.

Wurzellagen und Dünobleche werden meist mit dem (weiterentwickelten) Kurzlichtbogenverfahren oder im unteren Leistungsbe- reich des Impulslichtbogens geschweißt. Für Füll-, Deck- und Gegenlagen an dickeren Blechen wird mit höherer Leistung der Sprüh- oder Impulslichtbogen eingestellt.

Richtwerte für geeignete Schweißdaten zum Schweißen von Stumpf- und Kehlnähten können den Tabellen 5 bis 9 entnommen werden.

Die Strom- und Spannungswerte, die dem Schweißer zur Information dienen, können an den eingebauten Messinstrumenten oder Displays abgelesen werden. Beim Impulsschweißen zeigen die Anzeigeeinstrumente den (arithmetischen) Mittelwert von Stromstärke und Schweißspannung an. Er resultiert aus Impuls- und Grundphase bei ein- gestellter Pulsfrequenz. Die Tabellen können deshalb auch als Richtwerte für das MIG/MAG-Impulsschweißen dienen. Sind keine Messgeräte eingebaut, kann ggf. mit externen Messgeräten gearbeitet werden.

Tabelle 5

Richtwerte für das MAG-Schweißen von Stumpfnähten an un- und niedriglegiertem Stahl. Drahtelektrode: G3Si1/G4Si1 – Schutzgas: Mischgas M2.1 – Werte nach [1] und [2]										
Blechedicke mm	Fugenform	Öffnungswinkel °	Stegabstand mm	Position	Drahtelektrode Durchm. mm	Drahtvorschub m/min	Stromstärke Ampere	Lichtbogen- spannung Volt	Lage	
1,0	I	-	0	PA	0,8	3,8	70	18	1	
2,0					1,0	4,3	125	19		
4,0			1,5	PG	0,8	7,1	130			
			2,0	PA	1,0	4,8	135	20		
6,0	V	50	2,0	2,5		PG	5,4	160	19	
				PA	1,0	4,3	125	19	2	
						8,4	205	22	1	
				PG	1,2	4,7	130	19	2	
5,4	170	20	1							
8,0	V	50	2,0	PA	1,2	3,1	135	18	1	
						8,1	270	28	2	
				PF	1,0	3,7	100	17	1	3
									2	
10,0	V	50	2,5	PA	1,2	3,2	135	19	1	
						9,0	290	28	2	
				PF	1,0	4,5	120	18	3	1
									2	
15,0	V	50	3,0	PA	1,2	3,2	130	19	1	
									2	
									3	
				PF	1,2	3,2	130	19	3	4
									5	
									1	
20,0	V	50	3,0	PA	1,2	4,2	160	20	2	
									3	
				PA	1,2	3,8	140	19	1	2
									3	
PA	1,2	9,5	310	29	4	5				
					6					

Tabelle 6

Richtwerte für das MAG-Schweißen von Stumpfnähten an nicht rostendem CrNi-Stahl 1.4541. Drahtelektrode: G199L – Schutzgas: Mischgas M1.2 – Werte nach [2]									
Blechedicke mm	Fugenform	Öffnungswinkel °	Stegabstand mm	Position	Drahtelektrode Durchm. mm	Drahtvorschub m/min	Stromstärke Ampere	Lichtbogen-spannung Volt	Lage
1,0	I	-	0	PG	0,8	4,0	70	15	1
2,0			1,5	PA		3,5	100	16	
4,0			2,0	PG		4,0	105	17	
6,0			2,5	PA		1,0	4,3	115	
8,0	V	60	2,0		3,4		95	26	2
					10,0		200	16	1
					4,4		110	26	2
12,0					10,0		200	17	1
					1,2		3,0	110	17
				8,0		250	28	3	
	4								

Tabelle 7

Richtwerte für das MIG-Schweißen von Stumpfnähten an Aluminiumwerkstoffen. Drahtelektrode: GRAIMg5 – Schutzgas: Argon – Schweißposition PA – Werte nach [1] und [2]										
Blechedicke mm	Fugenform	Öffnungswinkel °	Steghöhe mm *)	Drahtelektrode Durchm. mm	Drahtvorschub m/min	Stromstärke Ampere	Lichtbogen-spannung Volt	Lage		
2,0	I	-	2,0	0,8	5,0	110	20	1		
4,0			4,0	1,2	3,1	170	22			
6,0			70	1,5	1,6				6,0	26
8,0	6,8	220				2				
10,0	Y	60				2,0	1,6	6,2	200	1
								6,0	170	24
			7,2	230	G					
12,0			1,2	1,5	1,2		13,7	240	26	1
							12,2	220		2
							15,6	250	28	G

*) ohne Stegflächenabstand G= Gegenlage

Tabelle 8

Richtwerte für das MAG-Schweißen von Kehlnähten an un- und niedriglegiertem Stahl. Drahtelektrode: G3Si1/G4Si1 – Schutzgas: Mischgas M2.1 Werte nach [1]						
a-Maß mm	Position	Drahtelektrode Durchm. mm	Drahtvorschub m/min	Stromstärke Ampere	Lichtbogen-spannung Volt	Lagenzahl
1,0	PA/PB	0,8	3,8	65	17	1
	PG					
2,0	PA/PB		7,3	130	19	
	PG					
3,0	PB	1,0	10,6	215	23	
	PG					
4,0	PA/PB		10,7	220	23	
5,0	PB	1,2	9,5	300	29	
6,0						
8,0	PB	1,2	9,5	300	29	
	PF	1,0	4,8	130	19	2
10,0	PB	1,2	9,5	300	29	3
	PF		4,2	165	19	2

Tabelle 9

Richtwerte für das MAG-Schweißen von Kehlnähten an nichtrostendem CrNi-Stahl 1.4541. Drahtelektrode: G 19 9 L – Schutzgas: Mischgas M1.2 Werte nach [2]						
a-Maß mm	Position	Drahtelektrode Durchm. mm	Drahtvorschub m/min	Stromstärke Ampere	Lichtbogen-spannung Volt	Lagenzahl
2,0	PB	0,8	6,5	100	17	1
	PG		7,0	110	18	
3,0	PB	1,0	9,0	200	24	
	PG		8,8	195	22	
4,0	PB		10,4	220	26	
5,0		1,2	8,0	250	28	
6,0						

Die normale Berechnung der Streckenergie $E_s = U_s \cdot I_s \cdot \eta / v_s$ [kJ/mm] aus den o.g. Mittelwerten führt bei Impuls- und Kurzlichtbogen-Prozessen zu nennenswerten Fehlern; auch Spannungsabfälle auf den Schweißkabeln müssen berücksichtigt werden. Nur die korrekte elektronische Berechnung der Leistung, wie sie in den EWM-Multimatrix- und Titan-XQ-Schweißgeräten angeboten wird, liefert bei allen Prozesstypen und Systemen fehlerfreie Angaben. Die Werte für thermische Wirkungsgrade, etwa von MIG/MAG-Prozessen, werden in der Schweißtechnik pauschal mit 0,8 angesetzt; abhängig vom gewählten Prozesstyp gibt es kleinere Differenzen (siehe EN 1011-1).

Wird die Streckenergie bestimmt, liefern sog. T8/5-Messungen unter Umständen bessere Ergebnisse, um den evtl. kritischen Wärmeeintrag beim Schweißen wärmeempfindlicher Werkstoffe zu bestimmen. Diese Messungen sind meist relativ einfach durchzuführen: Die Zeit des Temperaturabfalls in der Naht (Wärmeeinflusszone, WEZ) von 800 auf 500 °C wird mit einem Thermoelement-Messsystem bestimmt. Die Werkstofflieferanten machen in ihren Datenblättern Angaben zu empfohlenen Zeiten, die – abhängig von Blechdicken und Nahtgeometrien – zu

günstigen Gefüge- und Festigkeitszuständen führen (typ. 5...20s).

Auf der Basis einer mehrdimensionalen Wärmeausbreitungsberechnung können moderne Schweißgeräte-Steuerungen T8/5-Werte ermitteln und nach Schweißende anzeigen (z. B. EWM-Titan XQ-Gerät mit Expert-XQ-Steuerung).

Weiterführende Informationen: <https://www.ewm-group.com/de/titan-xq.html>

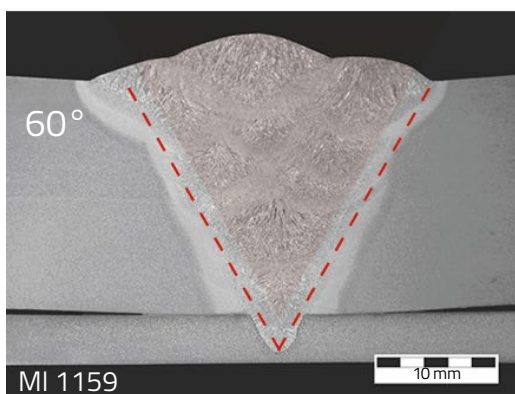
8.5 Neue Verfahren und Prozesse

a) Der Schweißprozess Impulslichtbogen

Durch zyklisches Umschalten von niedriger Lichtbogenleistung zu hoher Lichtbogenleistung im Millisekunden-Bereich wird eine synchrone Tropfenablösung bewirkt. Das Verfahren kann von niedrigen über mittlere bis zu hohen Drahtgeschwindigkeiten eingesetzt werden, wobei die Impulsfrequenz zwischen 20 und 400 Hz (Impulse pro Sekunde) variiert wird.

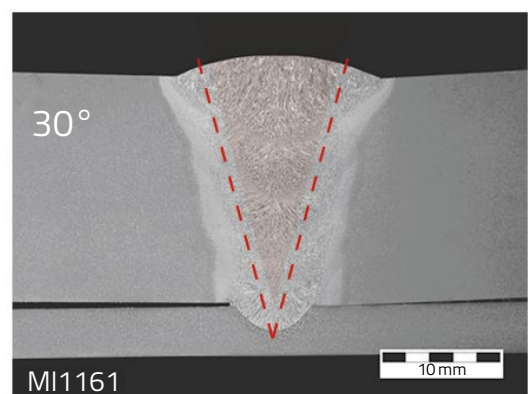
Die steuernde und regelnde Elektronik garantiert in allen Bereichen ein stabiles Lichtbogenverhalten. Beim Schweißen unlegierter Stähle müssen argonreiche Schutzgase eingesetzt werden (> 80% Ar).

Standard-Sprühlichtbogen



11 Raupen

forceArc® XQ



5 Raupen
50% kürzere Schweißzeit
MI1161

Bild 34: Vergleich von V-Nähten im Standard-Verfahren zu EWM forceArc-Technik (t = 20 mm)

Durch die superPuls-Technik sind bei Aluminium gleichmäßige Nähte an dünnen Blechen und geschuppte Nähte an dickeren Blechen gleichermaßen möglich.

Die hinterlegten Synergieprogramme im Schweißgerät machen die Einstellung und Bedienung einfach, sauberer und spritzerärmer.

Weiterführende Information: Gerätekatalog, www.ewm-group.com/de -> EWM Lichtbogenfilm: Impulslichtbogen Alu

b) Die Schweißprozesse EWM forceArc XQ / forceArc puls XQ

Allg. Bezeichnung nach DVS MB 0973-1: Modifizierter Sprühlichtbogen

Wie oben bereits beschrieben, können mit der Sprühlichtbogen-Funktion bei hohen Drahtvorschubgeschwindigkeiten große Abschmelzleistungen erzielt werden. Die damit verbundenen hohen Ströme sichern einen günstigen Einbrand; allerdings wird hier meist ungewollt hohe Wärme in das Werkstück eingebracht. Das bringt in Bezug auf Streckenenergie und Verzug Nachteile. Werden moderne Elektronik und weiterentwickelte Prozessregelung eingesetzt, können bei höheren Strömen die Lichtbogenlänge und damit die Wärmeeinbringung deutlich reduziert werden. So erreicht die Einbrandtiefe hohe Werte. Ein solcher Prozess mit „forcierter Lichtbogen“ kann bei größeren Blechdicken ungewöhnlich tief eindringen und die Flanken hervorragend erfassen. Schnelle Regeleingriffe der elektronischen Steuerung verhindern die bei kurzen Lichtbögen normalerweise auftretende starke Spritzerbildung.

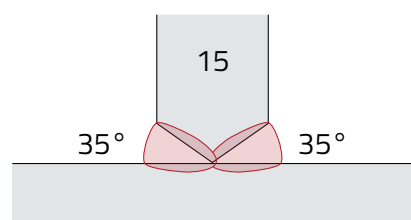
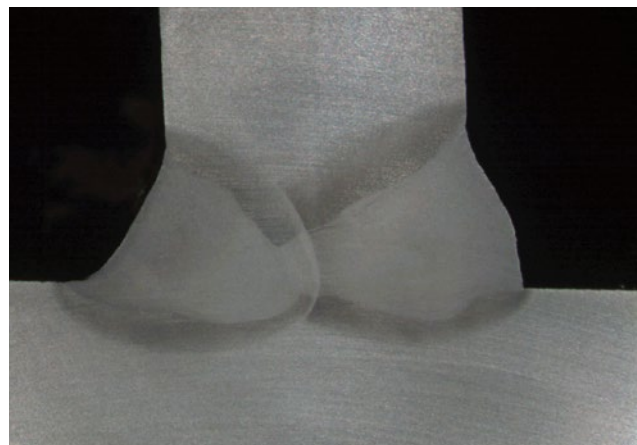
Die Bilder aus der EWM-Produktübersicht MIG/MAG (<https://www.ewm-group.com/de/innovation-forschung/schweissverfahren-mig-mag.html> -> forceArc) zeigen deutlich, dass mit dem tiefen Einbrand und dem richtungsstabilen Lichtbogen bei der Nahtvorbereitung wesentlich engere Fugen beherrscht

werden können (30° anstelle 60°); Wurzel- und Flankenerfassung sind hervorragend. Es müssen deutlich weniger Lagen geschweißt werden. Die Schweißzeit ist kürzer – eine Halbierung ist möglich –, Material wird erheblich eingespart und durch die geringere Wärmeeinbringung gibt es weniger Verzug (Bild 34). (-> Zitate aus der o.g. forceArc-Website)

Dank des kurzen Lichtbogens gibt es weniger Einbrandkerben und Spritzer. Stickout-Längenänderungen werden elektronisch ausgeglichen; besonders lange Drahtenden in engen Fugen werden beherrscht.

Der typische tiefe Einbrand führt beim Schweißen von Kehlnähten an dicken Blechen zu besonders günstigen Anschlussquerschnitten ohne kritische Randkerben, wie sie für dynamisch hoch belastete Konstruktionen gefordert werden.

Die Bilder in der o.g. EWM-Produktübersicht „forceArc“ zeigen auch den ungewöhnlich tiefen Einbrand an Kehlnähten bei hoher Blechdicke. So können an beidseitig



S355, 15 mm, Öffnungswinkel 35°

Bild 35: Vollanschluss durch Einsatz der forceArc-Technik

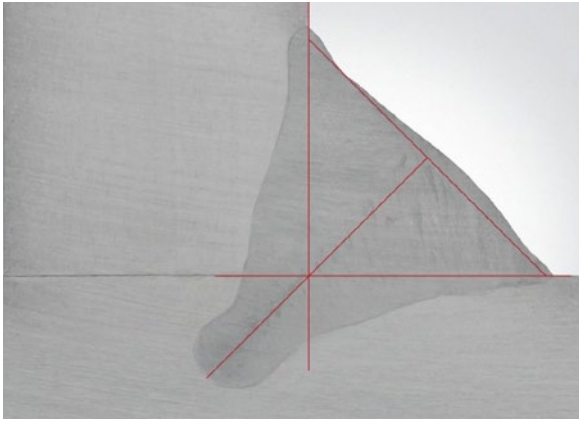


Bild 36: a-Maß und Einbrand bei forceArc puls

geschweißten Nähten Vollanschlüsse sicher erreicht werden (Bild 35).

Der Prozess forceArc ist einsetzbar an un-, niedrig- und hochlegierten Stählen sowie an hochfesten Feinkornstählen und kann manuell oder automatisiert betrieben werden.

In der Variante forceArc puls kann bei vergleichsweise längerem Lichtbogen kontrolliert Wärme eingebracht werden. Das ist u. a. beim Schweißen von Decklagen sinnvoll, damit die Flanken bei geringer Nahtwölbung weich anfließen. Ein Anwendungsbeispiel zeigt Bild 36. (<https://www.ewm-group.com/de/innovation-forschung/schweissverfahren-mig-mag.html> -> forceArc puls).

c) Die Schweißprozesse coldArc XQ / coldArc puls XQ

Allg. Bezeichnung nach DV SMB 0973-1: Geregelter, spritzerarmer Kurzlichtbogenprozess
Der Kurzlichtbogen ist beim Werkstoffübergang vom Draht zum Schmelzbad kurzschlussbehaftet und bringt somit niedrige Wärme ein (Bild 22). Lichtbogenbrennphasen wechseln sich mit Kurzschlussphasen zyklisch ab. Beim coldArc-Prozess wird der Stromanstieg im Lichtbogen-Kurzschluss durch elektronische Steuerungstechnik (EWM Rapid Current Control Technologie) begrenzt. Der Kurzschluss wird aufgelöst, indem die feine Brücke aus flüssigem Metall getrennt wird. Dadurch entsteht jedoch eine

Leistungsspitze, die wegen ihrer hohen Plasmadrücke unvermeidlich Spritzer erzeugt. Der coldArc XQ-Prozess unterdrückt diese kritische Leistungsspitze mit hohem technischem Aufwand im Schweißgerät und senkt damit den Spritzerauswurf auf ein Minimum. Das macht diesen Prozess für Sichtnähte wertvoll.

Die besonders niedrige Wärmeeinbringung reduziert Verzug und Anlauffarben. Mit dem kälteren Schmelzbad können große Wurzelspalte hervorragend überbrückt werden. Schweißen oder MIG-Löten in Zwangslagen werden deutlich leichter.

Der Prozess coldArc XQ ist einsetzbar an un-, niedrig- und hochlegierten Stählen sowie an hochfesten Feinkornstählen und kann manuell oder automatisiert betrieben werden.

In der Variante coldArc puls XQ kann zusätzliche Wärme kontrolliert eingebracht werden. So kann die Naht besser benetzt oder verbreitert werden, z. B. für Zwischen- und Decklagen im Übergangsbereich.

Durch Zuschalten von Positionweld bzw. superPuls und den automatischen Wechsel zwischen coldArc XQ und coldArc puls XQ wird ein ausgezeichnetes, unkompliziertes Schweißen in steigender Position ohne „Tannenbaum-Technik“ möglich.

Weiterführende Information: <https://www.ewm-group.com/de/innovation-forschung/schweissverfahren-mig-mag.html>

d) Die Schweißprozesse rootArc XQ / rootArc puls XQ

Der wärmeminimierte, richtungsstabile Kurzlichtbogen arbeitet im niedrigen Leistungsbereich und ist ideal zum Wurzelschweißen in unterschiedlichen Positionen. Mit der neuen RCC-Invertertechnologie (Rapid Current Control) wurde der Schweißprozess rootArc XQ noch einmal optimiert. Der Lichtbogen ist druckvoll und richtungsstabil und schmilzt die Kanten des Werkstücks gut auf. So überbrückt er Spalte perfekt, erfasst die

Flanken sicher und ist optimal fürs Wurzel-schweißen in jeder Position.

Im Vergleich zum E-Hand- und WIG-Schweißen kann mit höherer Geschwindigkeit geschweißt werden; auch die Abschmelzleistung ist höher. Die Nahtoberfläche ist flach und glatt, was Nacharbeit spart. Bei Bedarf kann die Wärmeeinbringung durch Pulsüberlagerung steigen (superPuls). Unter anderem über die Brenntaste kann im laufenden Prozess zwischen beiden Versionen umgeschaltet werden. Der Schweißprozess wird bei manuellen und mechanisierten Anwendungen eingesetzt.

Weiterführende Information: <https://www.ewm-group.com/de/innovation-forschung/schweissverfahren-mig-mag.html>

e) Der Schweißprozess superPuls

Allg. Bezeichnung nach DVS MB 0973-1: Kombinierte Prozessvarianten

Es ist sinnvoll, unterschiedliche Prozesse zu kombinieren, wenn eine anspruchsvolle Schweißaufgabe mit einem Prozess nicht optimal gelöst werden kann. Zwei unterschiedliche Prozesse können in der superPuls-Funktion angewählt werden; das Schweißgerät wechselt rhythmisch zwischen beiden Prozessen und zwischen zwei Leistungsniveaus.

Im Fall von coldArc XQ- und Impulslichtbogen-Technik erzeugt die Impulslichtbogenphase die notwendige Wärme, um die Fugenflanken einer Naht in Zwangsposition anzuschmelzen. Die folgende Kurzlichtbogenphase lässt das entstandene Schmelzbad schnell erstarren.

Dadurch ergibt sich u. a. eine sehr gleichmäßige Schuppung der Naht – sehr vorteilhaft beim Aluminium-Schweißen –, eine niedrige Wärmeeinbringung und ein einfaches Modellieren der Naht. Steignähte können sehr gut beherrscht werden. Die Umschaltparameter werden automatisch proportional zur Prozessleistung angepasst.

f) Positionweld

Positionweld kombiniert die bewährten EWM-Prozesse für sicheren Einbrand und gleichmäßiges Nahtaussehen in Zwangspositionen: beim steigenden Schweißen kann der Brenner gerade – ohne Tannenbaumtechnik – geführt werden. So kann schneller und mit weniger Wärme geschweißt werden. Parameter müssen nicht aufwendig gefunden werden; die Schweißleistung muss lediglich an die jeweilige Blechdicke angepasst werden.

Weiterführende Information: <https://www.ewm-group.com/de/innovation-forschung/schweissverfahren-mig-mag.html>

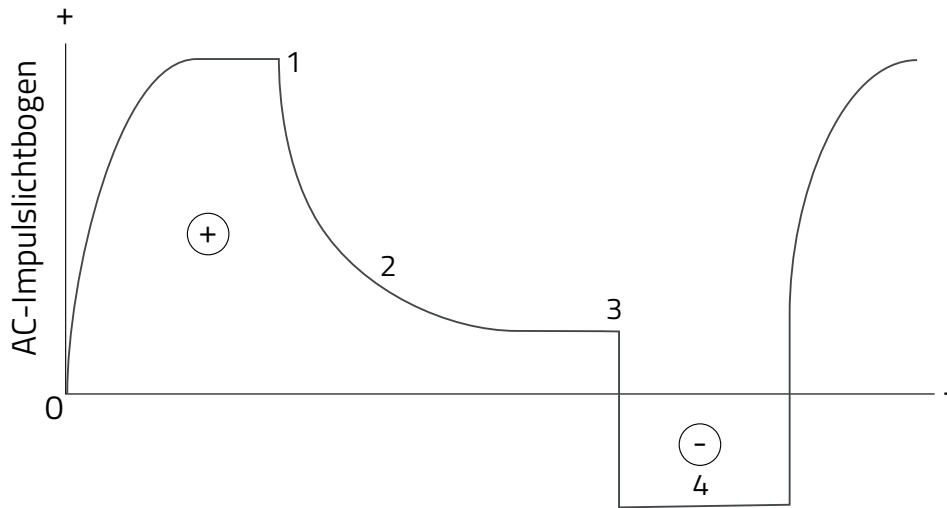
g) EWM wiredArc - Schweißen mit konstantem Einbrand

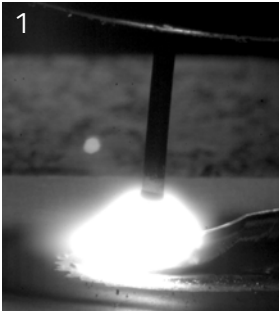
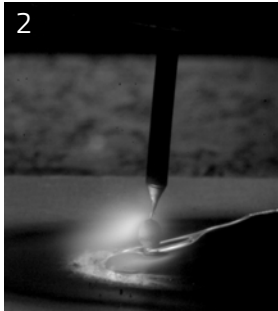
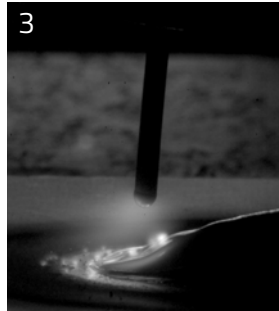
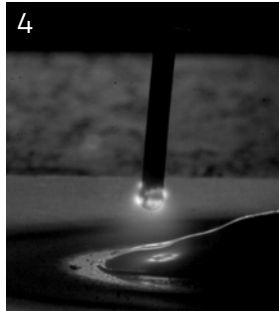
Die besonders beim manuellen MIG/MAG-Schweißen unvermeidlichen Abstandsänderungen zwischen Brenner und Werkstück führen bei den klassischen Prozessen durch Änderung der Stickout-Länge (freies Drahtende) zu einer spürbaren Stromänderung. Bei größer werdendem Abstand verringert sich der Schweißstrom deutlich und die Einbrandtiefe wird geringer. Die Nahtqualität ist gefährdet. EWM wiredArc hilft dabei, die unerwünschten Stromänderungen durch aktiven, elektronischen Eingriff in den Drahtvorschub auszugleichen. Die Einbrandtiefe wird also bei Bauteilen mit schwer zugänglichen Stellen, bei denen eine Abstandsänderung unumgänglich ist, konstant gehalten.

Weiterführende Informationen: <https://www.ewm-group.com/de/innovation-forschung/schweissverfahren-mig-mag.html>

h) Der Schweißprozess acArc puls XQ

Beim Schweißprozess acArc puls XQ wechselt die Polarität im Prozessverlauf zwischen Positiv (Impuls) und Negativ. Möglich macht das die schnelle digitale Stromregelung durch die neue EWM RCC (Rapid Current Control)-Invertertechnologie.



⊕ Positive Phase			⊖ Negative Phase
			
Tropfenbildung in der Pulsphase	Tropfenablösung nach der Pulsphase	Grundstromphase	Reinigung und Vorwärmung des Drahtes in der negativen Phase

Der Schweißprozess acArc puls XQ

Da die Polarität zwischen Werkstück und Schweißdraht wechselt, verlagert sich die Wärme vom Material auf den Schweißzusatzwerkstoff. Die Wärme am Werkstück wird minimiert. So können auch dünne Aluminiumbleche perfekt geschweißt werden. Zudem werden Luftspalte hervorragend überbrückt.

Das Prinzip: In der positiven Pulsphase bildet sich der Tropfen und löst sich kurz vor der anschließenden Grundstromphase ab. Während der negativen Phase wird der Draht gereinigt und vorgewärmt. Der nächste Tropfen wird in der anschließenden Positiv-Phase abgelöst.

Neben Schweißrauchemissionen und Schmauchspuren werden so auch Magnesium-Oxide stark reduziert. Saubere, glän-

zende Schweißnähte sind das Ergebnis. Der Schweißprozess acArc puls XQ wird im manuellen und automatisierten Bereich eingesetzt.

i) Der Schweißprozess MIG/MAG-Tandem

Um die Leistung zu steigern, wird seit Jahren ein MSG-Tandem-Schweißprozess eingesetzt. Hier werden zwei MSG-Prozesse innerhalb eines großen (ovalen) Brenners dicht hintereinander angeordnet. Die beiden Stromkreise sind untereinander elektrisch isoliert und werden aus zwei Stromquellen und zwei Drahtantrieben versorgt. Dieses Schweißverfahren kann nur vollmechanisiert oder automatisiert – z. B. durch Einsatz von Robotern – betrieben werden. Damit lassen sich besonders hohe Schweißgeschwindigkeiten an dünnen Blechen und hohe

Abschmelzleistungen an dicken Blechen realisieren. Das Verfahren ist beim Stahl- und beim Aluminium-Schweißen einsetzbar.

8.6 Möglichkeiten des Mechanisierens

Beim teilmechanischen MIG/MAG-Schweißen werden Schweißzusatz und Schutzgas bereits mechanisiert zugegeben; auch die Lichtbogenlänge wird automatisch geregelt. Nur die Schweißfortschrittsbewegung wird manuell vorgenommen. Eine Vollmechanisierung ist mit einfachen Mitteln möglich: Der Brenner wird eingespannt und in Schweißgeschwindigkeit mit einem Fahrwagen über das Werkstück bewegt. Alternativ wird der Brenner stationär aufgehängt und z. B. ein rotationssymmetrisches Bauteil in einer Drehvorrichtung unter dem Brenner bewegt. Die gleichförmige Bewegung stellt grundsätzlich eine hohe und reproduzierbare Nahtqualität sicher. Allerdings muss die Brennerspitze in der realen Fuge mithilfe geeigneter Maßnahmen genau geführt werden (Bild 37).

Der MIG/MAG-Prozess ist auch für schwierige Mechanisierungsaufgaben geeignet, wenn z. B. mehrere Brenner gleichzeitig an einem Werkstück schweißen. Nicht umsonst ist das MIG/MAG-Schweißen deshalb auch das Verfahren, das mit Abstand am häufigsten beim Lichtbogenschweißen mit Industrierobotern zum Einsatz kommt.



Bild 37: Vollmechanisches MSG-Orbitalschweißen

Weiterführende Information:
Katalog Schweißtechnisches Zubehör,
www.ewm-group.com/sl/prospekte

9. Arbeitssicherheit

Gemäß der Vorgaben aus der Gefahrstoffverordnung und dem jetzigen technischen Stand des Arbeitsschutzes beim Schweißen müssen entstehende Schweißbrauche abgesaugt werden.

Durch den Einsatz von modernen innovativen EWM Schweißprozessen kann die Emission von schädlichen Schweißbrauchen deutlich reduziert werden.

Wissenschaftliche Untersuchungen machen deutlich, dass die digital modifizierten innovativen Prozesse coldArc®, forceArc® und forceArc puls® die Schweißrauchemissionen signifikant verringern und die Gefährdung für Schweißer und Bediener deutlich reduzieren. Diese Erkenntnisse finden Anwendung auch in der BGI 593 – Schadstoffe beim Schweißen und bei verwandten Verfahren.

Der coldArc®-Prozess entwickelt bis zu 75 % weniger Emissionen bei gleicher Abschmelzleistung als der Kurzlichtbogenprozess (Bild 38). forceArc® kann die Emissionen aufgrund des höheren Schweißrauchniederschlags auf der Werkstückoberfläche um bis 40% reduzieren (Bild 39).

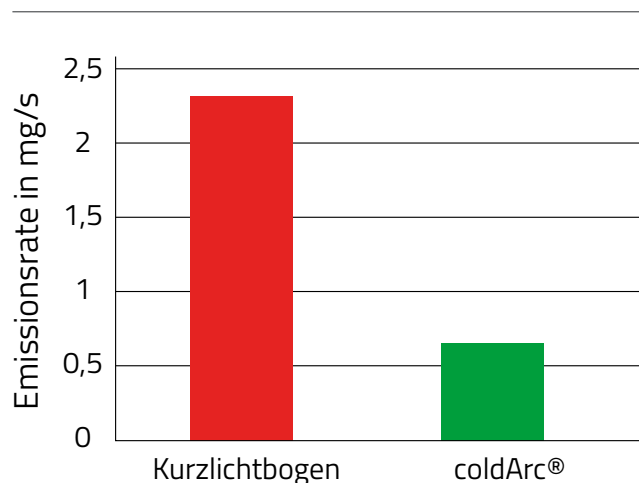


Bild 38: Emissionsrate coldArc®

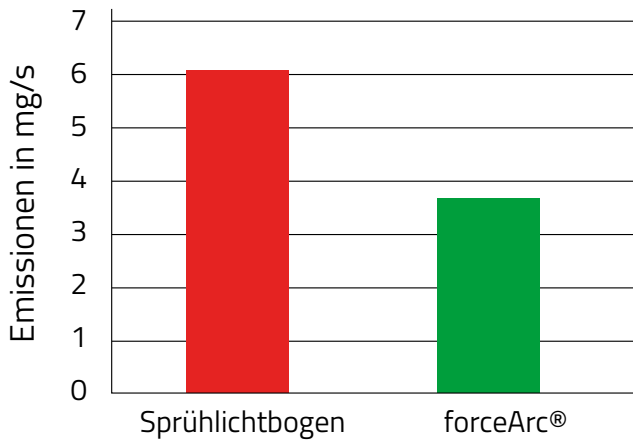


Bild 39: Emissionen forceArc®

Beim Schweißen von hochlegierten (CrNi) Werkstoffen sinkt die Emissionsrate von forceArc puls® um das 4,5-fache im Vergleich zum Impulslichtbogen (Bild 40) – ein wesentlicher Beitrag zum Gesundheitsschutz des Schweißers.

Der Schweißer muss sich ferner vor der Strahlung des Lichtbogens und vor elektrischen Gefahren schützen. Gegen die infrarote und die intensive ultraviolette Strahlung trägt der MIG/MAG-Schweißer in der Regel einen Kopfschirm, der ihm beide Hände freihält. In diesen Schutzschild ist der Schweißerschutzfilter integriert. Diese Filter sind

nach DIN EN 169 genormt. Es gibt verschiedene Schutzstufen, die auf dem Glas dauerhaft lesbar aufgebracht sein müssen. Beim MIG/MAG-Schweißen werden, je nach angewandter Stromstärke, Filter der Schutzstufen 8 bis 15 eingesetzt. Dabei gehört die Stufe zu 8 den geringeren Strömen; 15 ist den höheren Stromstärken zugeordnet.

Die ultraviolette Strahlung schädigt schon nach kurzer Einwirkzeit die Haut. Daher muss die Schutzkleidung den Körper vollständig abdecken.

Die höchste elektrische Gefährdung geht von der Leerlaufspannung aus. Das ist die höchste Spannung, die an der eingeschalteten Stromquelle zwischen den Anschlussbuchsen anliegt, wenn der Lichtbogen nicht brennt. Nach dem Zünden des Lichtbogens ist die Spannung wesentlich geringer, beim MIG/MAG-Schweißen etwa zwischen 15 bis 40 Volt. Nach der UVV VBG 15 dürfen Stromquellen für Gleichstrom im normalen Betrieb einen Scheitelwert der Leerlaufspannung von max. 113 Volt aufweisen. Bei Wechselstromanlagen, die in speziellen Fällen beim MIG/MAG-Schweißen eingesetzt werden, beträgt dieser Wert ebenfalls 113 Volt.

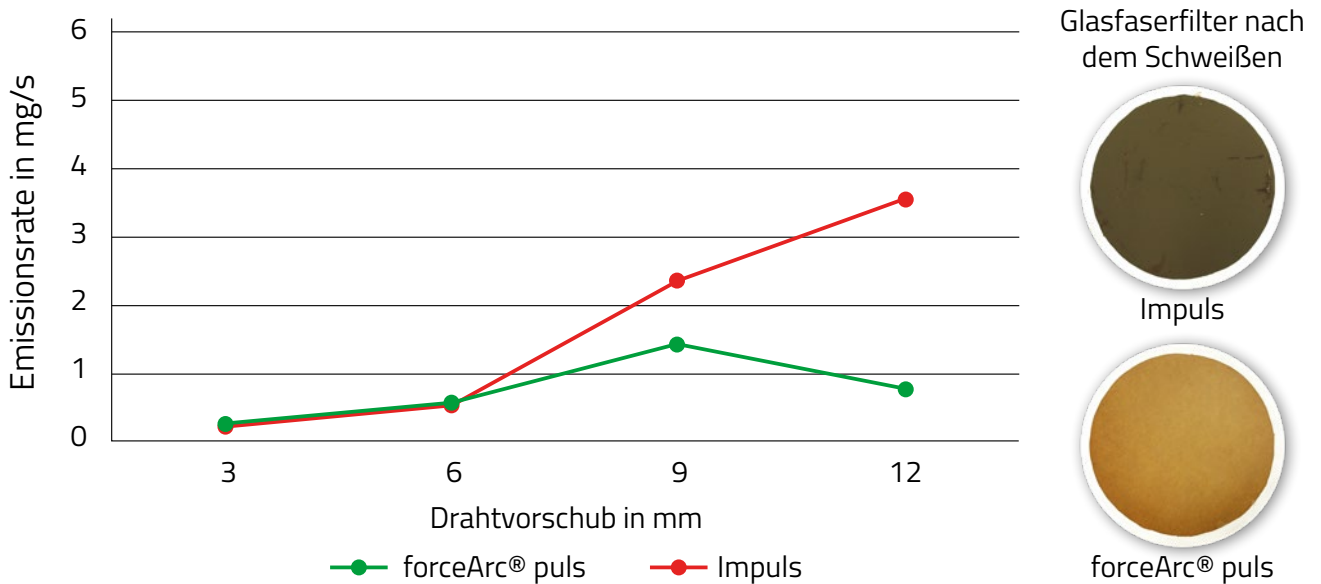


Bild 40: Emissionsraten in Abhängigkeit vom Drahtvorschub bei forceArc puls® und Impuls



Bild 41: MAG-Schweißen im Stahlbau

Der Effektivwert ist jedoch auf max. 80 Volt begrenzt. Bei erhöhter elektrischer Gefährdung, wie beim Schweißen in engen Räumen oder auf großen Eisenmassen, gelten herabgesetzte Werte für Wechselstrom (z. B. ein Scheitelwert von 68 Volt und ein Effektivwert von 48 Volt). Neuere Schweißstromquellen, die diese Forderung erfüllen, tragen nach DIN EN 60974-1 das Zeichen „S“. Ältere Stromquellen können dagegen noch mit „K“ (Gleichstrom) oder „42 V“ (Wechselstrom) gekennzeichnet sein. Gegen elektrische Schläge schützt sich der Schweißer mit unbeschädigten Schweißer-Handschuhen aus Leder, gut isolierender Arbeitskleidung und entsprechendem Schuhwerk am wirkungsvollsten vor Stromschlägen.

Der Schweißer sollte darüber aufgeklärt sein, dass nach dem Start des Schweißgerätes über den Brennerschalter die Leerlaufspannung (> 60V) und während des Schweißens die Arbeitsspannung (15...40V) an der Drahtelektrode sowie an der Stromdüse anliegen. Auch die Drahtspule und der Antrieb im Drahtvorschubgerät führen diese Spannung. Im Schweißbetrieb können Spritzer, die in die Gasdüse eindringend, in ungünstigen Fällen eine Verbindung zwischen Stromdüse und

Gasdüse herstellen. Sie wird damit spannungsführend. Berührt die Gasdüse dann das am Masseanschluss liegende Bauteil, kann es zu einem zerstörenden Kurzschlussstrom kommen.

In den meisten Fällen besteht eine Verbindung zwischen dem Bauteil, das am Masseanschluss liegt, und einem geerdeten System (Schutzleiter PE). Berührt die spannungsführende Drahtspitze nun beliebige Metallteile des umgebenden Systems, fließt ein vom Schweißgerät getriebener hoher Strom, der unmittelbar zerstörende Wirkung hat. Schutzleitersysteme sind hier stark gefährdet und müssen an Schweißarbeitsplätzen von einer Elektrofachkraft regelmäßig geprüft werden!

10. Besonderheiten verschiedener Werkstoffe

Es wurde schon gesagt, dass das MIG/MAG-Verfahren sich für das Schweißen einer großen Palette von Werkstoffen eignet. Im Folgenden werden einige Besonderheiten behandelt, die sich bei den verschiedenen Werkstoffen ergeben.



Bild 42: MIG-Aluminium-Schweißen

10.1 Un- und niedriglegierte Stähle

Un- und niedriglegierte Stähle werden unter Mischgasen M1, M2, M3 oder seltener unter reinem Kohlendioxid geschweißt (Bild 40). Wegen der geringeren Spritzerbildung, vor allem im oberen Leistungsbereich, dominieren in Europa aber die Mischgase. Diese Stähle lassen sich im Allgemeinen in guter Qualität mit dem MAG-Verfahren schweißen. Eine Ausnahme bilden hochkohlenstoffhaltige Sorten, wie E 360 (früher St 70), mit ca. 0,45 % Kohlenstoff. Der große Einbrand des Prozesses bewirkt, dass das Schweiß-

gut durch Vermischung relativ viel Kohlenstoff aufnimmt. Dadurch besteht die Gefahr, dass es zu Heißbrissen kommt. Alle Maßnahmen, die den Einbrand und damit die Vermischung reduzieren, schaffen hier Abhilfe. Dazu zählen niedrige Stromstärken ebenso wie Schweißen auf dem etwas vorlaufenden Schweißgut. Dabei muss die Gefahr von Bindefehlern beachtet werden.

Poren in der Schweißnaht entstehen durch unterschiedliche Ursachen wie eingeschleuste Luft durch mangelhafte Schutzgasabdeckung, Ausgasungen aus Verschmutzungen oder Restfeuchte der Werkstücke.

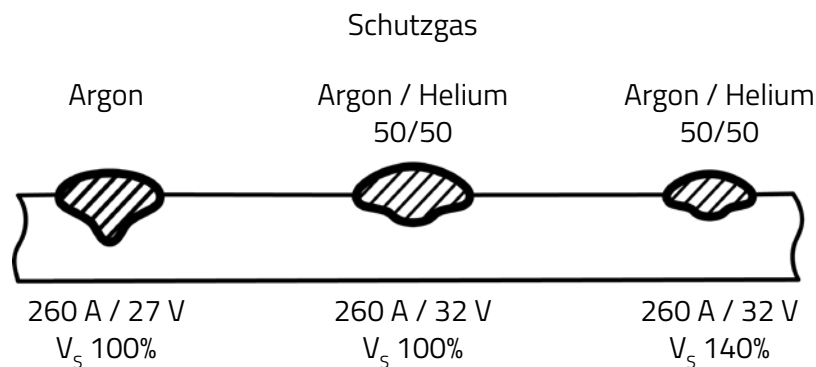


Bild 43: Einbrandprofil bei verschiedenen Schutzgasen. Werkstoff : AlMg3, Draht-Dm. 1,6mm

Ist die Schutzgasmenge korrekt eingestellt, verhindert das Poren. Spritzer in der Schutzgasdüse oder Instabilitäten des Prozesses sollten vermieden werden. Sie können zu Verwirbelungen des Schutzgasstromes und damit zu Poren führen. Kohlendioxid als Schutzgas macht den Prozess unempfindlicher gegen Porenbildung: Bei Mischgasen nimmt die Empfindlichkeit mit steigendem CO₂-Gehalt ab. Einzelne Poren sind meist unkritisch. Größere Ansammlungen sind zu vermeiden (siehe auch DVS MB 0913).

10.2 Hochlegierte Stähle und Nickelbasislegierungen

Auch diese Werkstoffgruppe lässt sich prinzipiell mit dem MIG/MAG-Prozess gut schweißen. Als Schutzgase für hochlegierte Stähle werden Argon/Sauerstoff-Gemische mit 1-5% Sauerstoff (M11) oder Argon mit CO₂-Gehalten bis zu 2,5 % (M12) verwendet. Oxidationen, die nach dem Schweißen auf und

neben der Naht zurückbleiben, sind beim Schweißen korrosionsbeständiger Stähle ein bedeutender Nachteil. Sie müssen vollständig abgebürstet, gebeizt oder gestrahlt werden, bevor das Bauteil in Betrieb geht, denn sie verschlechtern die Korrosionsbeständigkeit. Der Säuberungsaufwand ist bei MAG-geschweißten Nähten größer als beim E-Hand-Schweißen. Dort verhindert die Schlackenabdeckung auch noch bei höheren Temperaturen, dass Sauerstoff mit der Nahtoberfläche in Berührung kommt. Ein Teil der wirtschaftlichen Vorteile des teilmechanischen Schweißens kann deshalb durch die höheren Nacharbeitungskosten wieder verloren gehen. CO₂-haltige Mischgase verhalten sich in dieser Hinsicht etwas günstiger als O₂-haltige. Sie werden deshalb zunehmend verwendet. Ist der Kohlendioxidanteil im Schutzgas allerdings zu hoch, führt das im Lichtbogen zerfallende Gas zur Aufkohlung und zur Oxidation des Schweißgutes und



Bild 44: MAG-Schweißen eines LKW-Aufliegers



Bild 45: MAG-Schweißen eines Trichters aus CrNi-Stahl

damit zu einer geringeren Korrosionsbeständigkeit. Der zulässige CO_2 -Gehalt ist deshalb auf max. 5 % begrenzt.

Beim Schweißen korrosionsbeständiger Stähle muss jede Überhitzung vermieden werden. Dabei wird Chromkarbid ausgeschieden, was den Stahl spröde und anfälliger für Korrosion machen kann. Überlegierter Zusatzwerkstoff kann diesen Effekt kompensieren. Die Wärmeeinbringung muss kontrolliert und dem Werkstoff eventuell in Abkühlpausen zwischendurch die Gelegenheit zum Zwischenabkühlen geboten werden. Bei den Werkstoffen aus der Gruppe der vollaustenitischen Stähle vermeidet „kaltes“ Schweißen auch Heißrisse.

Da austenitische Stähle durch Wasserstoff nicht verspröden, können dem Argon zur Leistungssteigerung (Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit) auch einige Prozent Wasserstoff beigemischt werden. Wegen der Porengefahr sollte der H_2 -Gehalt aber nicht über 5 % liegen. Duplexstähle, eine Zweiphasenstruktur aus Austenit und Ferrit, bilden mit Wasserstoff dagegen mehr Risse. Nickelbasislegierungen werden in der Regel

unter Argon MIG-geschweißt. Bei Reinnickel und einigen Legierungen können geringe Wasserstoffzusätze die Oberflächenspannungen verringern und so die Nahtzeichnung verbessern.

10.3 Aluminium und Aluminiumlegierungen

Aluminiumwerkstoffe werden grundsätzlich MIG-geschweißt (Bild 42, Seite 42).

Als Schutzgas wird im Regelfall Argon (100 %) verwendet. Weil Aluminium Wärme sehr gut ableitet, ist der Zusatz von Helium hier besonders wirkungsvoll. Helium verbessert, wie bereits erwähnt, u. a. die Wärmeeinbringung in das Werkstück. Der Einbrand wird tiefer und breiter, wie es schematisch in Bild 43 (Seite 42) gezeigt wird.

Wo der tiefere Einbrand nicht gebraucht wird, z. B. beim Schweißen dünner Bleche, kann entsprechend schneller geschweißt werden. Weil der Werkstoff Wärme gut leitet, müssen dickere Querschnitte von Aluminium vorgewärmt werden. Das wärmere Schweißgut hat so mehr Zeit zum Entgasen, was den ausreichenden Einbrand sichert und die

Porenanfälligkeit verringert. Bei Verwendung von heliumhaltigen Schutzgasen – üblich sind Gehalte von 25 oder 50 % – muss nur gering oder – bei geringeren Wanddicken – überhaupt nicht vorgewärmt werden. Das gleicht den höheren Preis der heliumhaltigen Gase teilweise wieder aus.

Die hochschmelzende Oxidhaut kann beim MIG-Schweißen leicht auf dem Bad beseitigt werden, weil der Pluspol an der Elektrode liegt (kathodische Reinigung). Dennoch ist es ratsam, die Oxidschichten auf dem Werkstück unmittelbar vor dem Schweißen durch Schaben oder Bürsten zu entfernen, denn sie sind hygroskopisch und bringen Wasserstoff ins Schweißgut. Wasserstoff ist neben eingewirbelter Luft die Hauptursache für Porenbildung beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen. Ist Aluminium flüssig, kann Wasserstoff relativ leicht darin gelöst werden. Im festen Zustand ist dieses Gas dagegen fast gar nicht im Metall löslich. Jeglicher Wasserstoff, der beim Schweißen aufgenommen wurde, muss deshalb das Schweißgut vor der Erstarrung verlassen, wenn keine Poren auftreten sollen. Das ist vor allem bei dickeren Querschnitten nicht immer möglich. Schädlich ist besonders Feuchtigkeit auf den Werkstücken in kalter Umgebung. Gänzlich porenfreie Nähte sind deshalb, gerade bei größeren Wanddicken, bei Aluminiumwerkstoffen nicht zu erreichen. Die günstige Wirkung einer Vorwärmung wurde bereits erwähnt.

Bei Si-Gehalten von etwa 1 % bzw. Mg-Gehalten von etwa 2 % neigen AlMg- und AlSi-Legierungen zu Heißrissen beim Schweißen. Dieser Legierungsbereich sollte durch Auswahl des Schweißzusatzes vermieden werden. Meist verhält sich die nächst höherlegierte Drahtelektrode besser als eine artgleiche.

10.4 Sonstige Werkstoffe

Außer den genannten Werkstoffen werden Kupfer und Kupferlegierungen in nennenswertem Maße mit dem MIG-Verfahren

geschweißt. Reinkupfer muss wegen der großen Wärmeleitfähigkeit relativ hoch vorgewärmt werden, um Bindefehler zu vermeiden.

Das Schweißgut von Bronzedrähten, z. B. solchen aus Aluminium- oder Zinnbronze, besitzt gute Gleiteigenschaften. Es wird deshalb für Auftragschweißungen an Gleitflächen verwendet. Bei diesen Schweißungen auf Eisenwerkstoffen muss der Einbrand durch geeignete Maßnahmen möglichst gering gehalten werden, da Eisen in Kupfer nur schlecht löslich ist. Es wird in Form von Kügelchen im Schweißgut eingeschlossen und vermindert so die Gebrauchseigenschaften.

Ähnlich sind die Bedingungen beim MIG-Löten. Dieses Verfahren wird z. B. zum Verbinden verzinkter Bleche im Automobilbau eingesetzt. Als Zusätze werden Drahtelektroden aus Silizium- oder Zinnbronze verwendet. Der niedrigere Schmelzpunkt dieser Bronzen verringert die Zinkverdampfung. Es entstehen weniger Poren; der Schutz durch die Zinkschicht bleibt bis nahe an die Naht heran und auch auf der Rückseite der Bleche erhalten. Auch hier sollte möglichst kein Einbrand in den Stahlwerkstoff hinein entstehen. Die Bindung sollte, wie beim Hartlöten, nur durch Diffusions- und Adhäsionskräfte erfolgen. Das wird durch angepasste Schweißparameter und eine besondere Brennerhaltung erreicht, durch die der Lichtbogen ausschließlich auf dem flüssigen Schmelzbad brennt.

11. Anwendung des MIG/MAG-Schweißens

11.1 Fertigungszweige

Der Anteil des Verfahrens liegt unter allen Lichtbogenschweißverfahren nach einer neueren Statistik bei ca. 80 %.

Es gibt kaum einen Industriezweig, in dem das MIG/MAG-Schweißen nicht angewendet wird. Hauptanwendungsgebiete sind

der Fahrzeugbau, wo z. B. Kraftfahrzeuge, Lokomotiven und Schienenfahrzeuge gefertigt werden. Hier wird zunehmend auch der Werkstoff Aluminium verwendet. Weiter wird es im Stahl- und Brückenbau, im Schiffbau und im Maschinenbau eingesetzt. Im Kran- und Baggerbau werden zunehmend höherfeste Stähle verwendet. Dafür eignet sich das MAG-Verfahren besonders, denn das Schweißgut besitzt einen niedrigen Wasserstoffgehalt. Deshalb entstehen keine Kaltrisse. Etwas unterrepräsentiert ist das MAG-Schweißen im Kessel-, Apparate- und Rohrleitungsbau. Dort werden wegen der geforderten ausgezeichneten Gütewerte des Schweißgutes vielfach noch basische Stabelektroden verschweißt oder im Unterpulververfahren gearbeitet.

Aber nicht nur in der Industrie, sondern auch im Handwerk findet sich kaum eine Werkstatt, in der nicht MAG-geschweißt wird. Dies trifft sowohl auf Kfz-Werkstätten als auch auf Schlossereien und kleine Stahlbaubetriebe zu.

11.2 Anwendungsbeispiele

Einige ausgesuchte Anwendungsbeispiele

sollen abschließend den zweckmäßigen Einsatz des MIG/MAG-Prozesses verdeutlichen.

Bild 41 (Seite 41) zeigt die Anwendung des MAG-Schweißens im Stahlbau. An Trägern, wie sie im Bild zu sehen sind, kommen an den Ecken Kehlnähte oder Doppel-HV-Nähte vor. Bei längeren Trägern müssen auch Stumpfnähte quer zur Hauptbelastungsrichtung geschweißt werden. Sie müssen besonders fehlerfrei sein; das ist gesondert festgelegt.

Bild 44 (Seite 43) zeigt das MAG-Schweißen eines LKW-Aufliegers aus Stahl. Damit der Schweißer problemlos alle zu schweißenden Stellen erreichen kann, wurde das Drahtvorschubgerät an einem beweglichen Auslegerarm montiert.

Um die Qualität der Schweißnähte zu sichern, wird bei modernen EWM Schweißgeräten die Qualitätsmanagement Software Xnet 2.0 verwendet. Damit kann zwischen Soll- und Ist-Werten verglichen werden. Dies zeigt Bild 45 (Seite 44) bei dem das MAG-Schweißen eines Trichters aus CrNi-Stahl angewendet wird.

Damit die relativ weichen Aluminiumdrähte ohne Schwierigkeiten gefördert werden, wird hier sinnvollerweise mit einem Push-Pull-Antrieb geschweißt.



12. Schweißprozesse

12.1 Übersicht

a) Schweißen von un- und niedriglegiertem Stahl

- Wurzelschweißen _____ rootArc® XQ
- Schweißen von Füll- und Decklagen _____ forceArc puls® XQ
- Schweißen von Kehlnähten mit tiefem Einbrand _____ forceArc puls® XQ
- Schweißen unter Verwendung von 100% CO₂ _____ coldArc® XQ / rootArc® XQ

b) Schweißen von un-, niedrig- und hochlegiertem Stahl

- Schweißen von Vollanschlüssen bei Kehlnähten _____ forceArc puls® XQ
- Schweißen in Zwangspositionen ohne Tannenbaumtechnik _____ Positionweld
- Schweißen mit konstantem Einbrand und konstanter Leistung _____ wiredArc® XQ / wiredArc® puls XQ

c) Schweißen und Löten von un-, niedrig- und hochlegiertem Stahl und verzinkten Blechen

- Schweißen und Löten von Dünnblechen _____ coldArc® XQ

d) Schweißen von hochlegiertem Stahl

- Schweißen von Füll- und Decklagen _____ forceArc puls® XQ

e) Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen

- Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen _____ Impulslichtbogen XQ
- Schweißen in Zwangspositionen ohne Tannenbaumtechnik _____ Positionweld
- Schweißen von Aluminium-Überlappnähten _____ acArc puls XQ
- Schweißen von Aluminium-Kehlnähten _____ acArc puls XQ + Positionweld

f) Auftragschweißen

- Cladding, Hartauftragen

12.2 Wurzelschweißen an un- und niedriglegiertem Stahl

Schweißprozess: rootArc® XQ

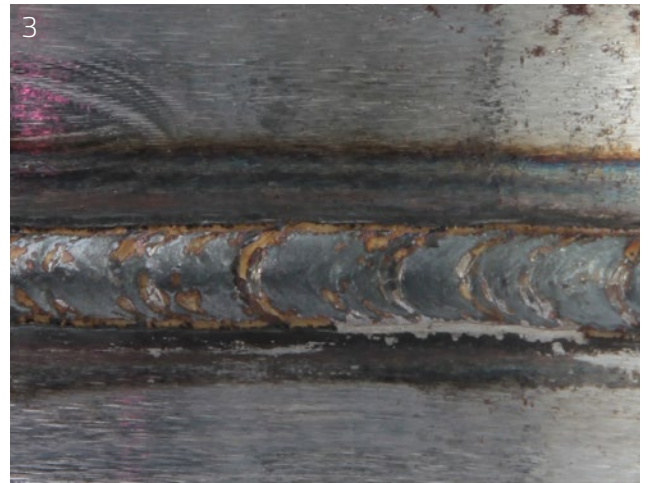
Vorteile:

- Perfekte Spaltüberbrückung
 - Gute Wurzel­ausprägung und sichere Flanken­erfassung
 - Hoher Lichtbogendruck für das Wurzelschweißen in allen Positionen
 - Hohe Schweißgeschwindigkeit und Abschmelzleistung im Vergleich zum WIG- oder E-Hand-Schweißen
 - Spritzerarmer Prozess
- Schnelle digitale Regelung des Prozesses, leicht zu führen und zu kontrollieren
 - Verwendung handelsüblicher Schweißbrenner ohne zusätzliche Drahtbewegung
 - Schweißen auch bei langen Schlauchpaketen ohne zusätzliche Spannungsmessleitung durch RCC-Leistungsmodul (Rapid Current Control)
 - Für manuelle und mechanisierte Anwendungen
 - Flache, glatte Nahtoberfläche und nahezu spritzerfreier Prozess für weniger Nacharbeit

Wurzelschweißung mit Luftspalt, ohne Badstütze



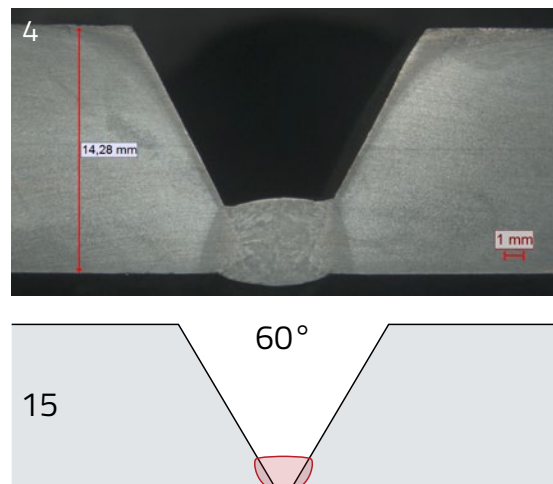
1
Nahtvorbereitung einer Wurzelschweißung am Rohr, 60° Öffnungswinkel mit 3 mm Luftspalt



3
Wurzel

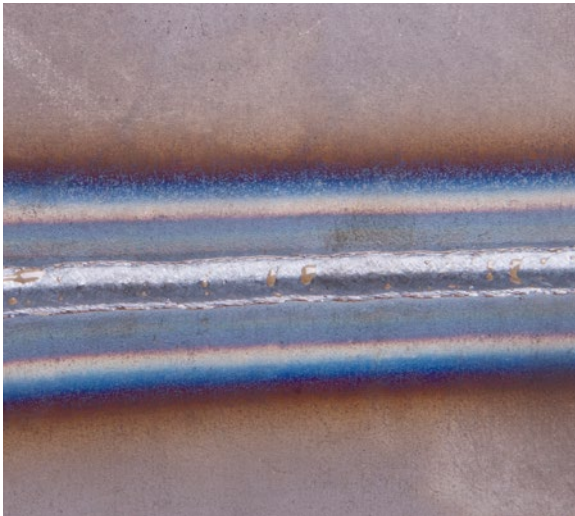


2
Vorderseite

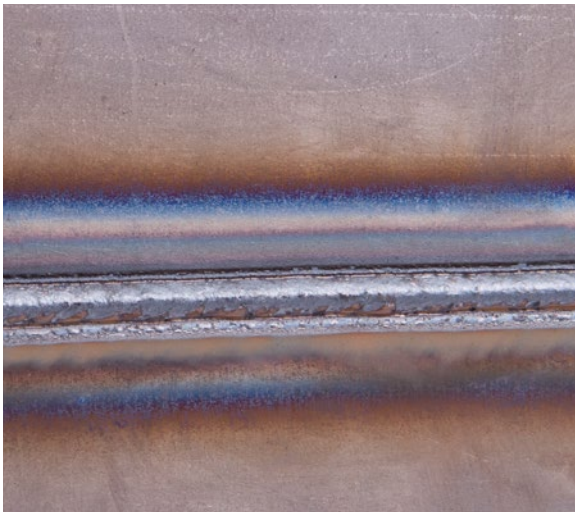


4
Rohrschweißung, Wandstärke 15 mm, Öffnungswinkel 60°

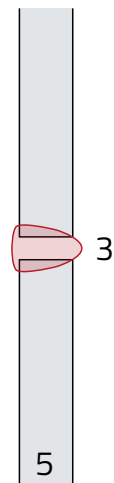
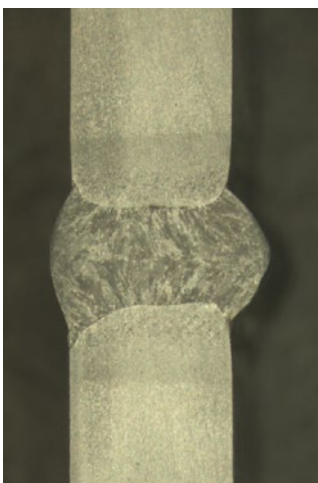
Wurzelschweißung PC mit Luftspalt,
ohne Badstütze



Vorderseite

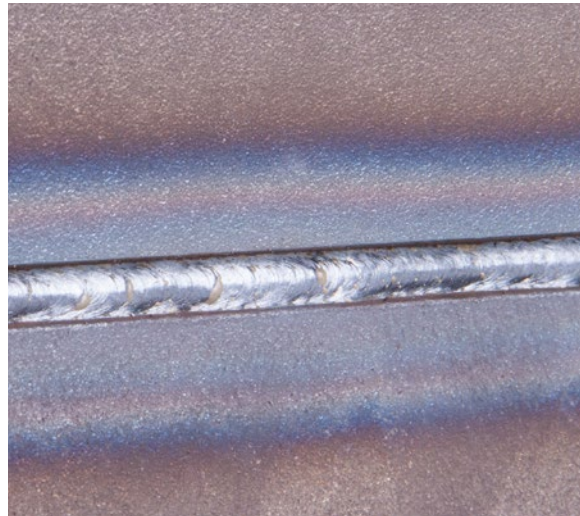


Wurzel

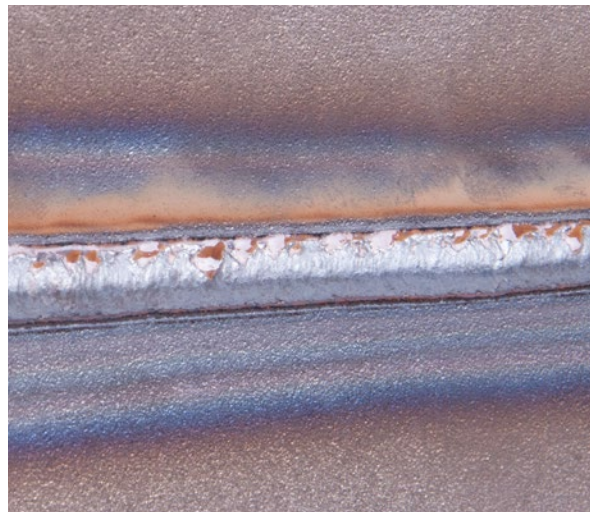


Blechdicke 5 mm
Luftspalt 3 mm

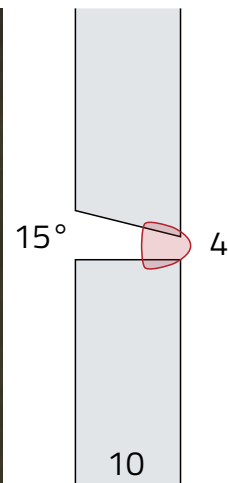
Wurzelschweißung PC mit Luftspalt,
ohne Badstütze



Vorderseite



Wurzel



Blechdicke 10 mm, Fase einseitig
15 Grad, Luftspalt 4 mm

12.3 Schweißen von Füll- und Decklagen von un- und niedriglegiertem Stahl

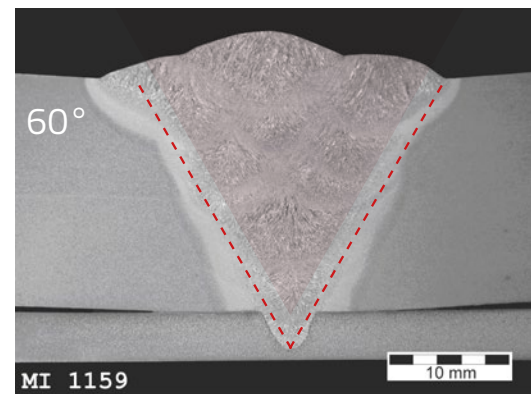
Schweißprozess: forceArc puls® XQ

Vorteile:

- Leicht erlernbar auch für den ungeübten Schweißer durch schnelle digitale Regelung des Prozesses, nahezu spritzerfrei, Reduzierung von Einbrandkerben
- Hervorragende Wurzel- und Flankenerfassung durch tiefen Einbrand
- Modifizierter, wärmeminimierter, richtungsstabiler Impulslichtbogen
- Reduzierung des Schweißnahtvolumens möglich, Potential für mehr als 50% kürzere Schweißzeiten in der Produktion, manuell und automatisiert
- Perfektes Schweißen auch mit sehr langen Drahtenden (Stickout)
- Hervorragende Spaltüberbrückung auch im hohen Leistungsbereich
- Hervorragende Benetzung der Materialoberfläche, glatte Nahtoberfläche auch bei stark oxidierten oder verschmutzten Blechen
- Qualifiziert durch Verfahrensprüfungen (Prozessnr. 135) nach DIN EN ISO 15614-1

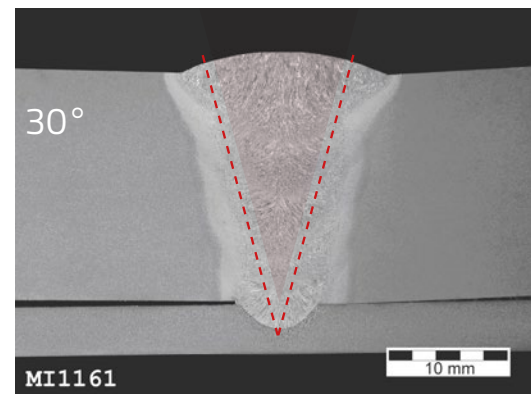
Das Schweißen mit reduziertem Nahtvolumen wurde von unabhängigen Instituten mehrmals untersucht und bestätigt. Die EWM-Schweißprozesse forceArc® XQ und forceArc puls® XQ ermöglichen eine Verkürzung der Schweißzeiten im Vergleich zum Standard-Sprühlichtbogenverfahren um bis zu 50%. Durch einen reduzierten Öffnungswinkel werden Ressourcen geschont bei gleichzeitig unveränderten mechanisch-technologischen Eigenschaften.

Standard-Sprühlichtbogen



11 Raupen

forceArc® XQ

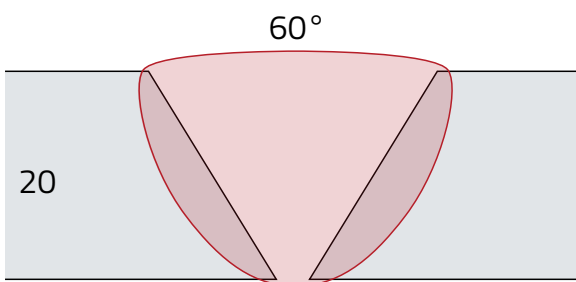
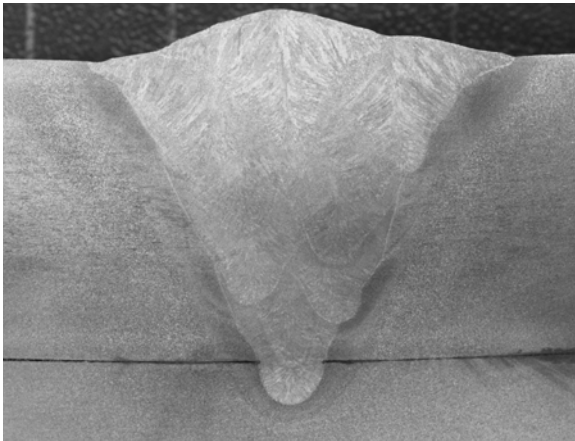


5 Raupen
50% kürzere Schweißzeit

Unveränderte mechanisch-technologische Eigenschaften

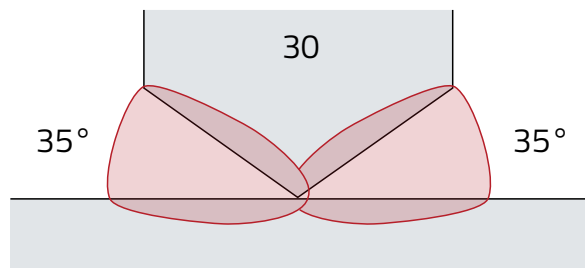
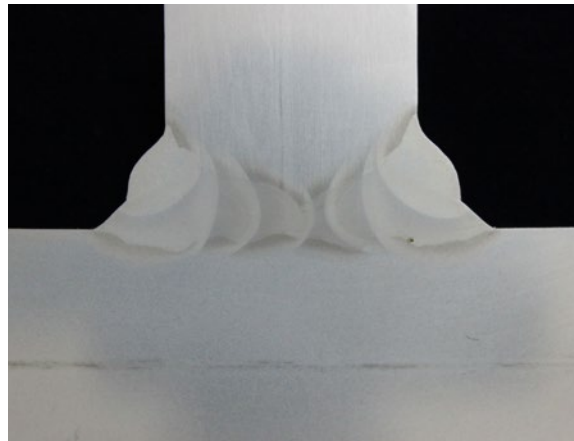
Einen vollständigen Fachbericht, der die Vorteile aufzeigt, finden Sie im Internet unter dem folgenden Link: www.ewm-group.com/sl/fachbericht

Vollanschluss, einseitig geschweißter Stumpfstoß bei reduziertem Öffnungswinkel



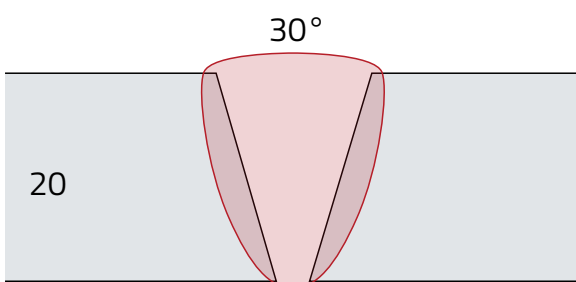
S355, 20 mm, Öffnungswinkel 60°
9 Schweißraupen, Standard-Sprühlichtbogen

Vollanschluss, beidseitig geschweißter T-Stoß

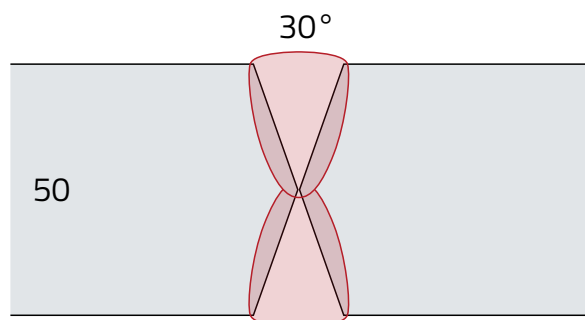
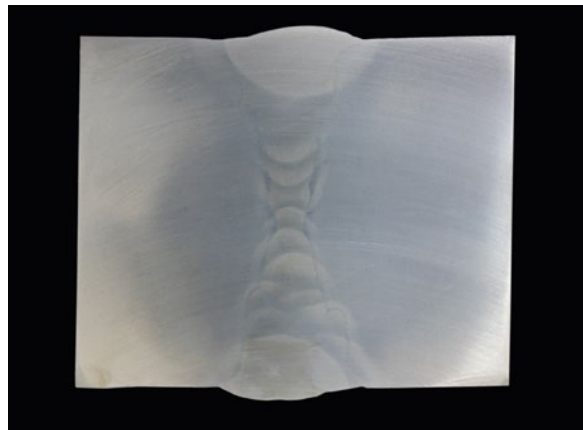


S235, 30 mm, Öffnungswinkel 35°
8 Schweißraupen

Vollanschluss, beidseitig geschweißter Stumpfstoß



S355, 20 mm, Öffnungswinkel 30°
4 Schweißraupen, forceArc puls[®] XQ



S355, 50 mm, Öffnungswinkel 30°
15 Schweißraupen

12.4 Schweißen von Kehlnähten mit tiefem Einbrand an un- und niedriglegiertem Stahl

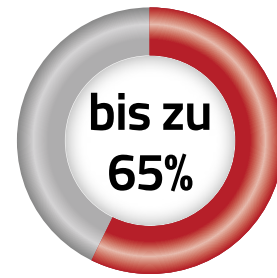
Schweißprozess: forceArc puls® XQ

Vorteile:

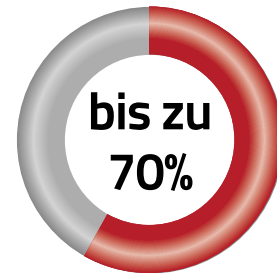
- Reduzierung der Anzahl von Schweißlagen bei Kehlnähten
- Hervorragende Wurzel- und Flankenerfassung durch tiefen Einbrand
- Modifizierter, wärme-minimierter, richtungsstabiler Sprühlichtbogen
- Perfektes Schweißen in schmalen Fugen auch mit sehr langen Drahtenden (Stickout)
- Schnelle Ausregelung von Stickoutlängenveränderungen, Stickoutlängen bis zu 40 mm prozesssicher
- Verlagerung der Kräfte in das Bauteilinnere durch den tiefen Einbrand, kleineres Nahtvolumen durch große wirksame Nahtdicke nach DIN EN ISO 17659:2005-09, kleinere Wärmeeinbringung in das Bauteil
- Qualifiziert durch Verfahrensprüfungen (Prozessnr. 135) nach DIN EN ISO 15614-1
- Schnelle digitale Regelung des Prozesses, leicht erlernbar und direkt einsetzbar unabhängig vom Brenneranstellwinkel

Weitere Informationen

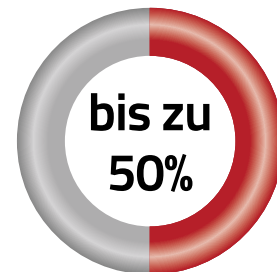
www.ewm-group.com/sl/forcearctitan



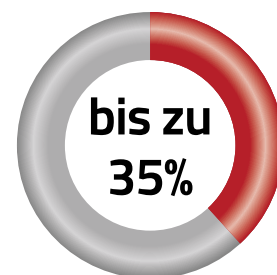
Energieersparnis



Reduzierte Fertigungszeit
(Schweißen, Nacharbeit)



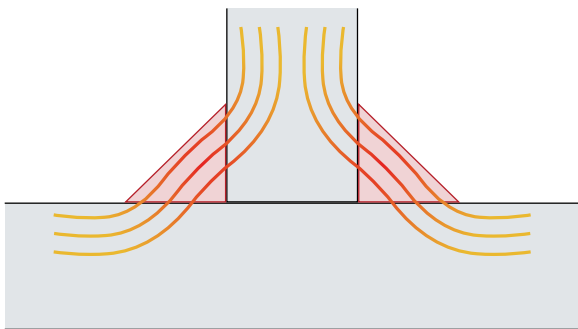
Niedrigere Materialkosten



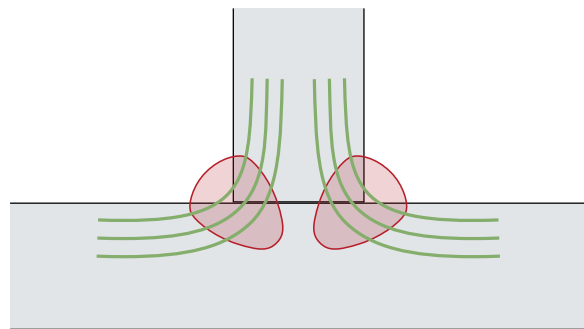
Geringere Schweißrauchemissionen

Schweißen mit tiefem Einbrand nach DIN EN 1090

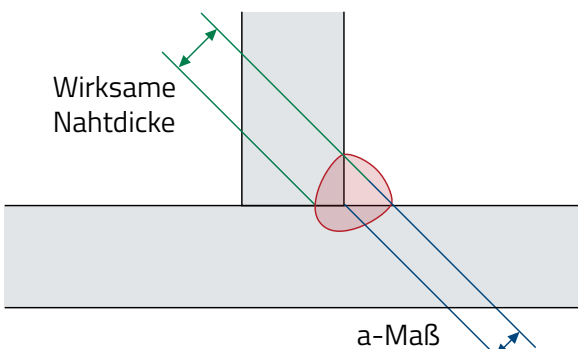
Der forceArc puls[®] XQ Prozess ermöglicht durch die Berücksichtigung der wirksamen Nahtdicke bei Kehlnähten einlagige Schweißungen bis $a = 8$ mm gegenüber $a = 5$ mm bei Verfahren ohne tiefen Einbrand.



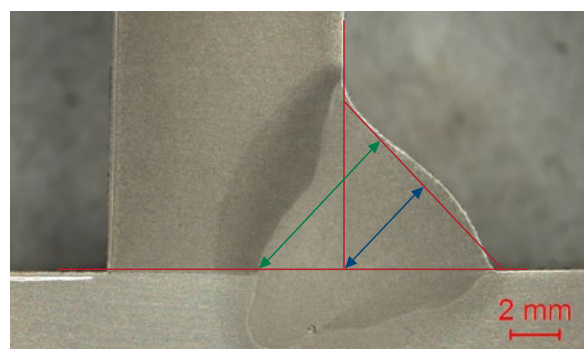
Kraftfluss bei Standardkehlnähten



Besserer Kraftfluss durch tiefen Einbrand

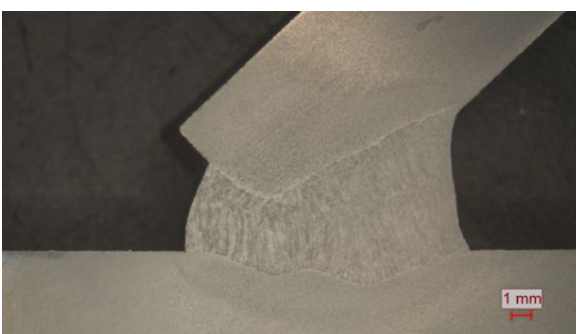
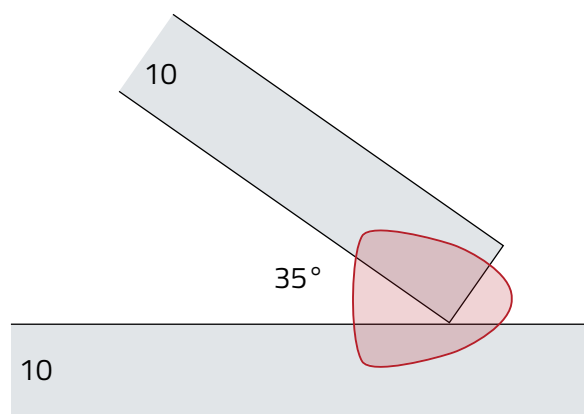
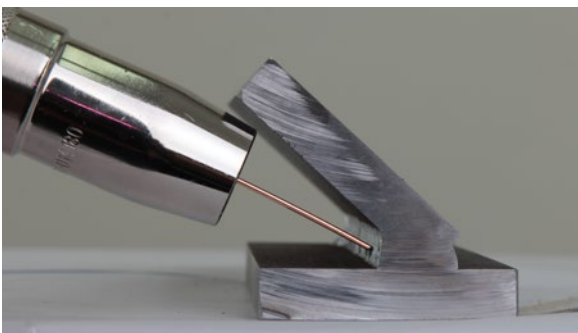


Definition wirksame Nahtdicke nach DIN EN ISO 17659;2005-09



S355, 10 mm, wirksame Nahtdicke von 8 mm nach DIN EN ISO 17659:2005-09

Schweißen mit tiefem Einbrand bei langem Stickout



Blechdicke Stegblech 10 mm, Öffnungswinkel 35°

12.5 Schweißen mit konstantem Einbrand und konstanter Leistung an un-, niedrig- und hochlegiertem Stahl
 Schweißprozesse: wiredArc® XQ / wiredArc® puls XQ

Vorteile:

- Schweißprozess mit konstant hoher Einbrandtiefe unabhängig von der Änderung des freien Drahtendes (sog. Stickout)
- Nahezu spritzerfreies Schweißergebnis durch schnelle digitale Regelung des Schweißprozesses
- Die digitale Prozessregelung bietet einen konstanten Schweißstrom
- Die Streckenenergie und Wärmeeinbringung bleiben nahezu konstant trotz Änderungen des freien Drahtendes
- Möglichkeit zur Reduzierung des Nahtöffnungswinkels und somit des Schweißnahtvolumens

- Flache, gleichmäßige Nahtoberfläche und nahezu spritzerfreier Prozess für weniger Nacharbeit
- Leicht zu erlernen und zu kontrollieren

Standard

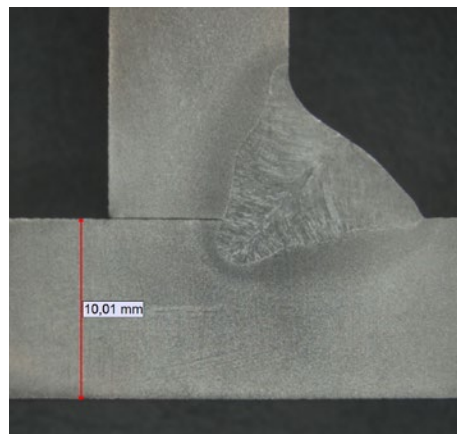
Eine Änderung des freien Drahtendes (sog. Stickout) verursacht bei Standard-Schweißprozessen (Bild 43) eine Änderung der Einbrandtiefe. Besonders das Schweißen mit länger werdendem Stickout kann zu einer nicht ausreichenden Erfassung des Wurzelfußpunktes (Bindefehler) führen.

wiredArc XQ

Mit dem EWM wiredArc XQ (Bild 44) bleibt der Einbrand bei einer Änderung des freien Drahtendes (sog. Stickout) konstant. Die innovative Regelung hält den Schweißstrom und die Wärmeeinbringung nahezu konstant.

Bild 43: Standard-Schweißprozess

12 mm Stickout



30 mm Stickout

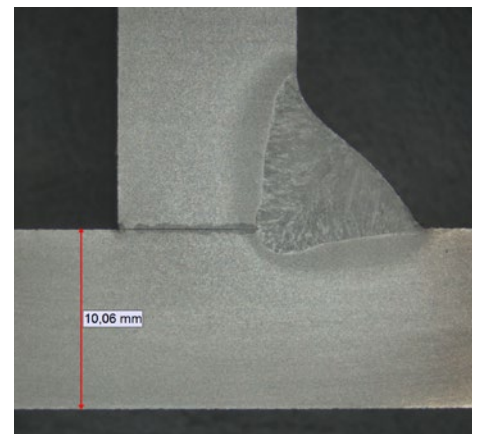
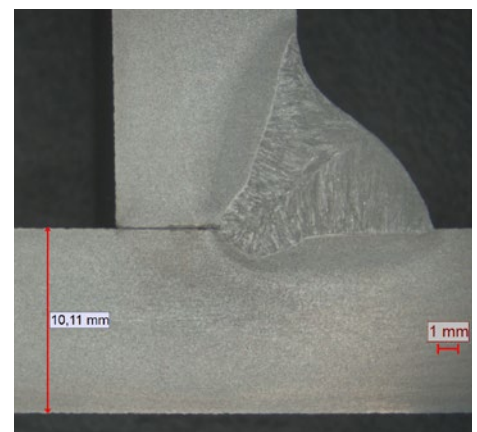
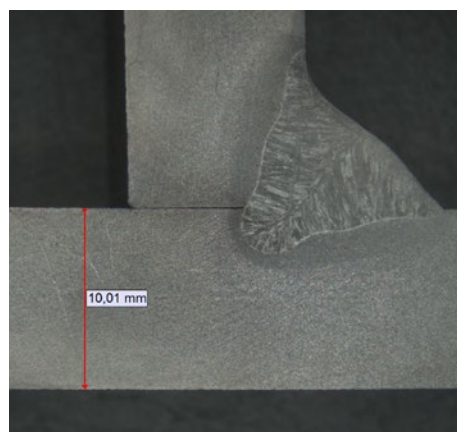


Bild 44: wiredArc XQ



12.6 Schweißen unter Verwendung von 100% CO₂ an un- und niedriglegiertem Stahl

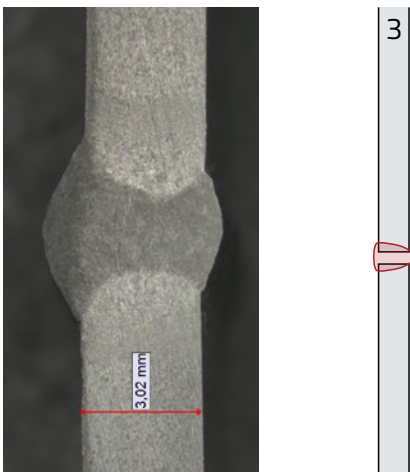
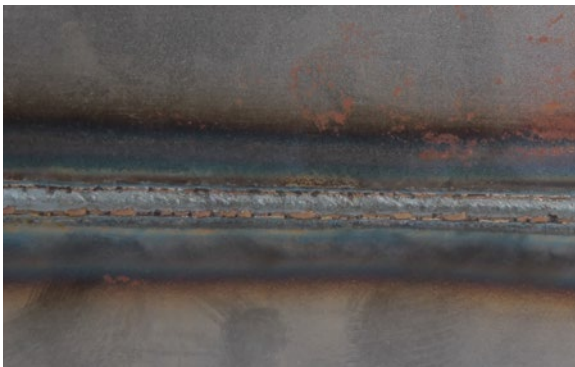
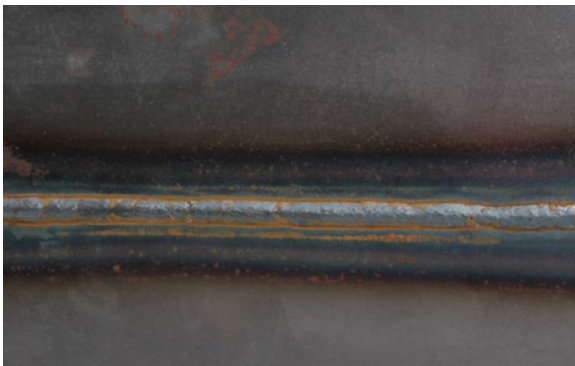
Schweißprozesse: coldArc[®] XQ / rootArc[®] XQ / Standard

Vorteile:

- Digital geregelter Prozess für einen spritzerarmen Tropfenübergang, dank RCC-Leistungsmodul (Rapid Current Control)

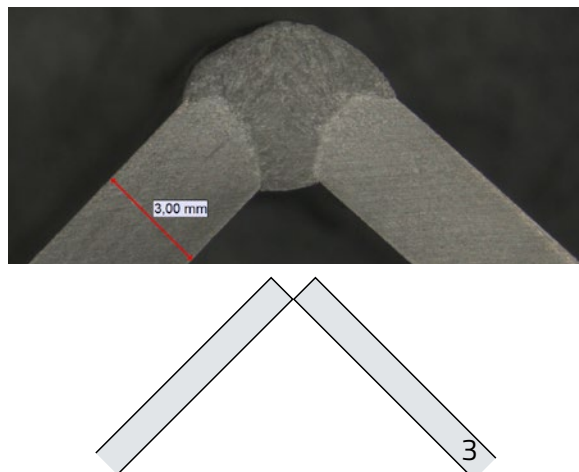
- Schnelle Prozessregelung durch den Einsatz modernster Mikroelektronik
- Spritzerreduziertes Schweißen, wie bei Mischgas
- Schweißen auch bei langen Schlauchpaketen ohne zusätzliche Spannungsmessleitung durch RCC-Leistungsmodul (Rapid Current Control)
- Leicht zu führen und zu kontrollieren

Wurzelschweißung PC mit Luftspalt, ohne Badstütze



S355, Blechdicke 3 mm, mit G3Si1 im Durchmesser 1,2 mm unter 100 % CO₂

Wurzelschweißung PA mit Luftspalt, ohne Badstütze



S355, Blechdicke 3 mm, mit G3Si1 im Durchmesser 1,2 mm unter 100 % CO₂

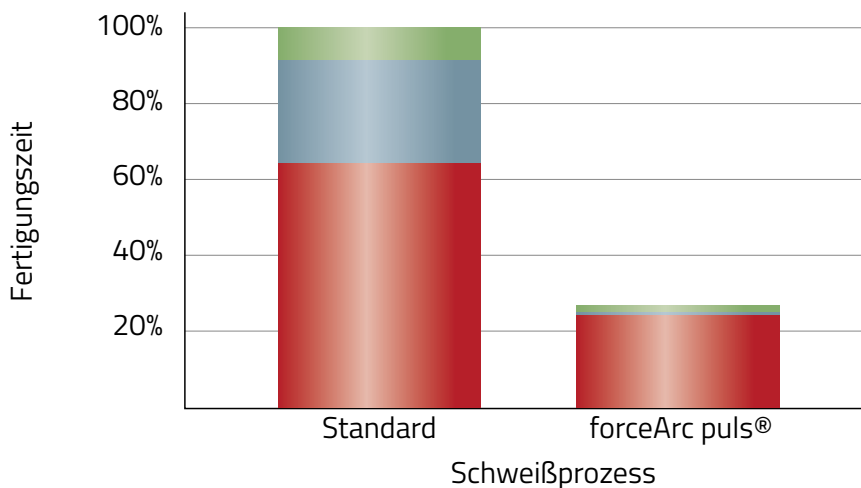
12.7 Schweißen von Vollanschlüssen bei Kehl­nähten an un-, niedrig- und hoch­legiertem Stahl

Schweißprozess: forceArc puls® XQ

Vorteile:

- Gute Spaltüberbrückung auch im hohen Leistungsbereich, leicht erlernbar und direkt einsetzbar
- Erheblich geringere Schweißrauch-Emissionen gegenüber dem Schweißen mit Impulslichtbogen
- Sicherer Vollanschluss auch ohne Luftspalt, daher montagefreundlich
- Reduzierung des Nahtöffnungswinkels möglich, dadurch kleineres Schweißnahtvolumen und Verminderung der Raupenanzahl ermöglicht hohe Kosteneinsparung
- Beidseitig geschweißte Vollanschlüsse im Stumpf- oder der Wurzelgegenseite ohne Ausschleifen oder Ausfugen der Wurzelgegenseite
- Hervorragende Wurzel- und Flankenerfassung durch tiefen Einbrand
- Hohe Prozessstabilität beim Schweißen auf dem Schmelzbad sogar mit kleinem Nahtöffnungswinkel
- Perfektes Schweißen auch mit sehr langen Drahtenden (Stickout)
- Auch in engen und schmalen Fugen mit sehr langen Drahtenden
- Schnelle Ausregelung von Stickoutlängenveränderungen, Stickoutlängen bis zu 40 mm prozesssicher

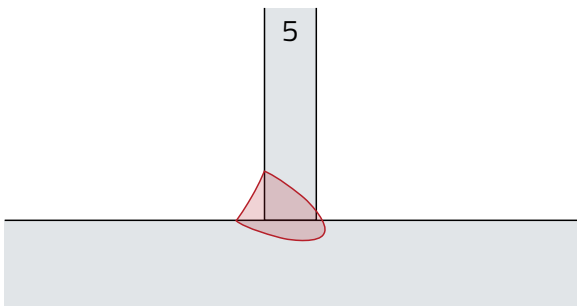
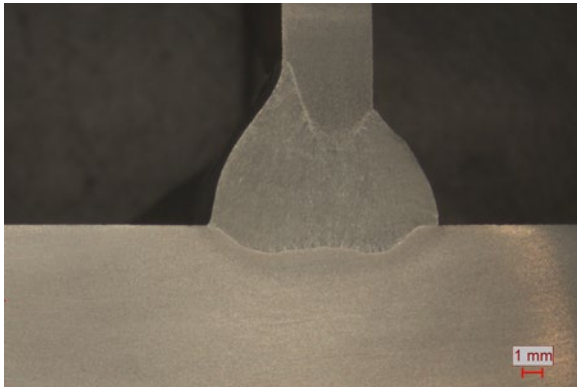
Zeitersparnis durch den Einsatz von forceArc puls® XQ in der Produktion



- Montage
- Strahlen, Schleifen
- Schweißen

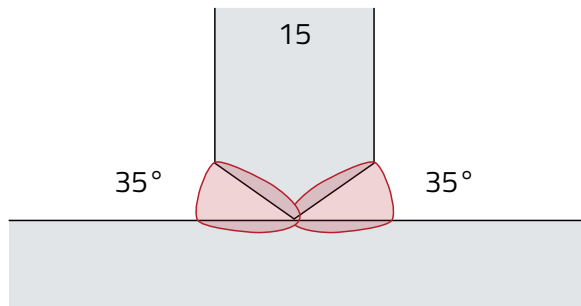
Weitere Informationen
www.ewm-group.com/sl/ersparnis

Einseitig geschweißte Kehlnaht



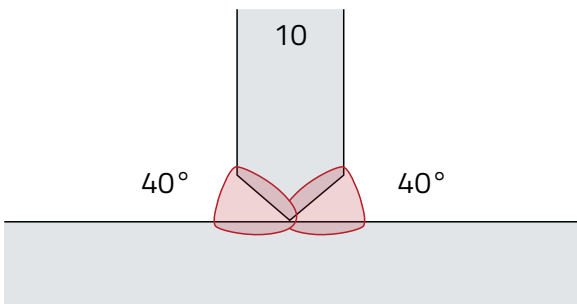
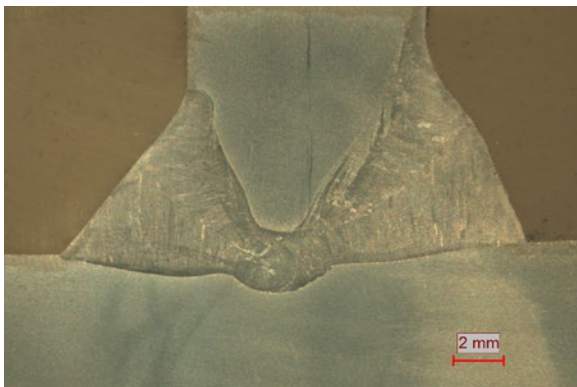
S355, 5 mm auf 10 mm

Vollanschluss beidseitig geschweißt



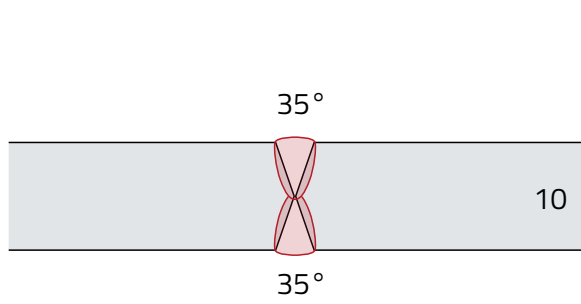
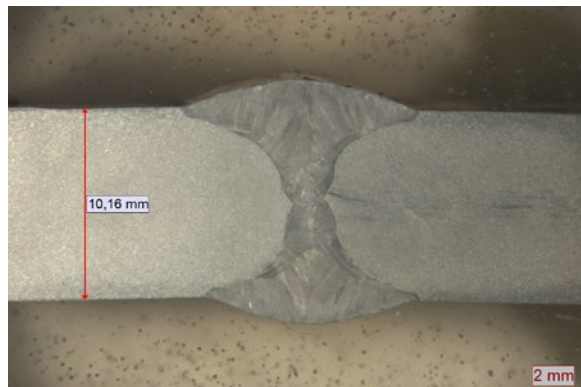
S355, 15 mm, Öffnungswinkel 35°

Vollanschluss beidseitig geschweißt



1.4301, 10 mm, Öffnungswinkel 40°

Vollanschluss beidseitig geschweißt



1.4301, 10 mm, doppelseitiger Vollanschluss am Stumpfstoß mit einem Öffnungswinkel von 35°

12.8 Schweißen in Zwangspositionen ohne Tannenbaumtechnik an un-, niedrig- und hochlegiertem Stahl

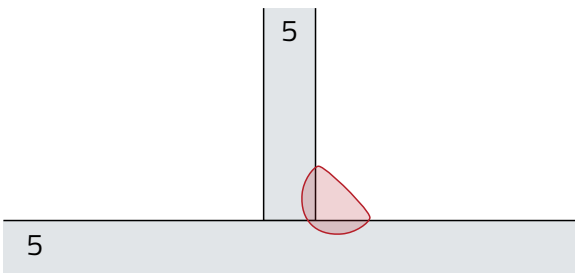
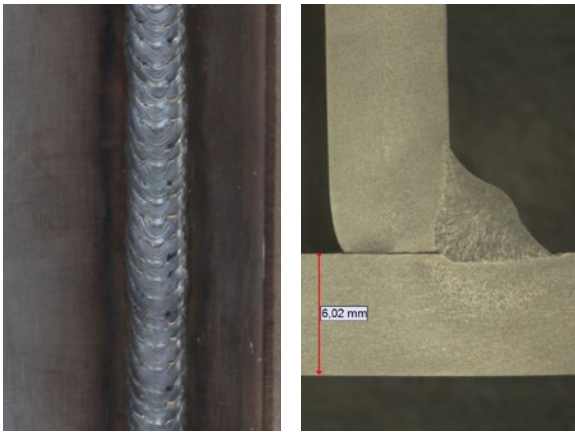
Schweißprozess: Positionsweld

Vorteile:

- Hohe Schweißgeschwindigkeiten im Vergleich zu der traditionellen Tannenbaumtechnik
 - Konzentrierter digital modifizierter Impulslichtbogen
 - Nahezu spritzerfreies Schweißergebnis durch schnelle digitale Regelung des Schweißprozesses
 - Ab Werk optimal eingestellter Wechsel zwischen niedriger und hoher Schweißleistung
- Wärmeminimierter Prozess mit niedrigerer Lichtbogenleistung und Streckenenergie
 - Flache, gleichmäßig geschuppte Nahtoberfläche und nahezu spritzerfreier Prozess für weniger Nacharbeit
 - Einfach einzustellen und leicht zu führen

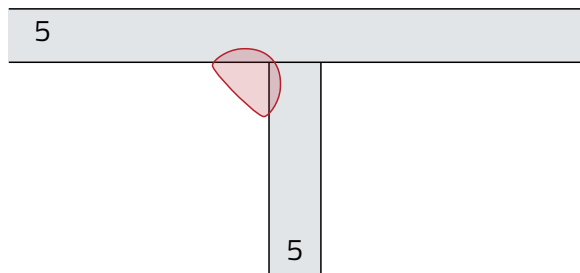
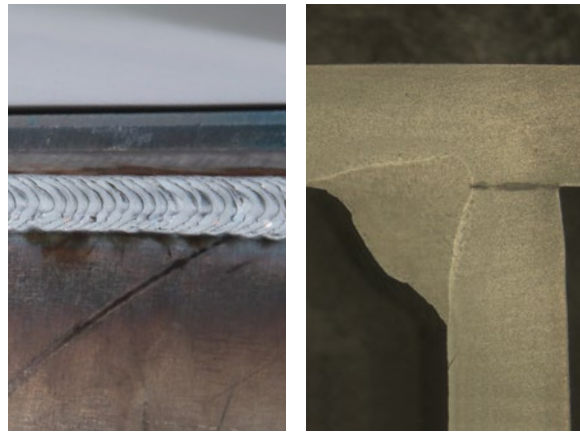


Steignaht, lineare Brennerführung ohne Tannen-
baumtechnik



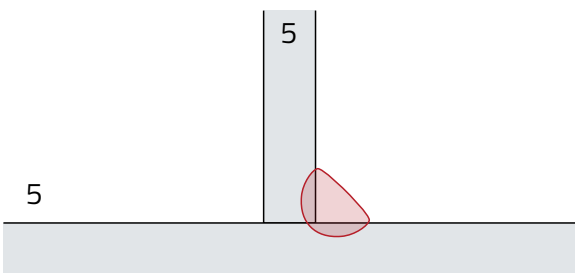
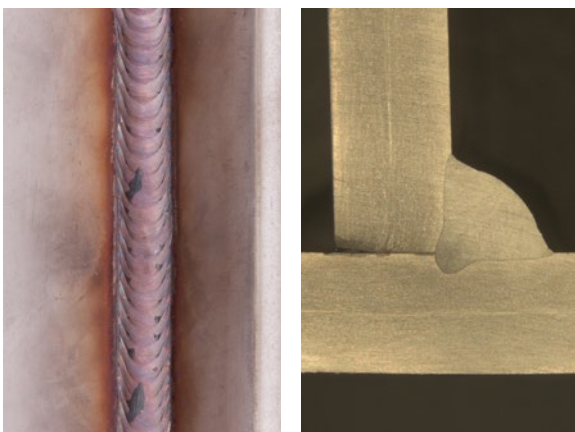
S355, Blechdicke 5 mm

Überkopfschweißen, einfaches
Handling



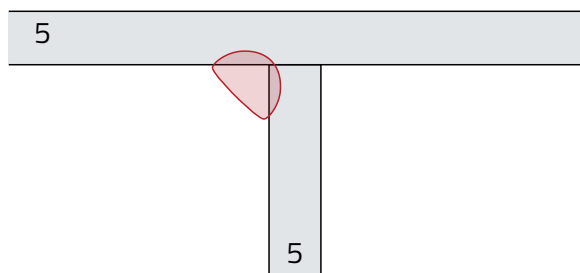
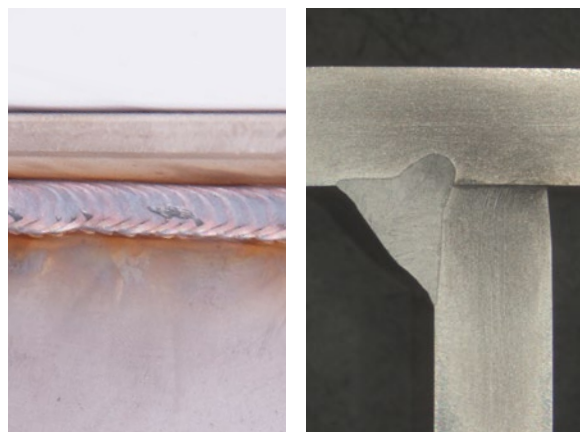
S355, Blechdicke 5 mm

Steignaht, lineare Brennerführung ohne Tannen-
baumtechnik



1.4301 Blechdicke 5 mm

Überkopf schweißen, einfaches Handling



1.4301 Blechdicke 5 mm

12.9 Schweißen und Lötten von Dünnsblechen aus un-, niedrig-, hochlegiertem Stahl und verzinkten Blechen

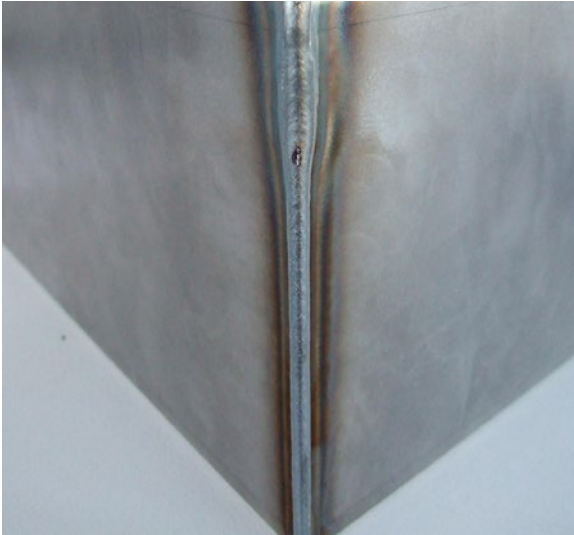
Schweißprozesse: coldArc® XQ / coldArc® puls XQ

- Schweißen auch bei langen Schlauchpaketen ohne zusätzliche Spannungsmessleitung durch RCC-Leistungsmodul
- Minimale Spritzerbildung, minimaler Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit

Vorteile:

- Wärmeminimierung durch digital gesteuerten Tropfenübergang im Kurzschluss, dank RCC-Leistungsmodul (Rapid Current Control)
- Flache, glatte Nahtoberfläche und nahezu spritzerfreier Prozess, weniger Anlauffarben und Verzug reduziert die Nacharbeit, ausgezeichnete Benetzung der Oberflächen beim Lötten
- Kein Durchfallen der Schmelze, sichere Flankenerfassung auch mit Kantenversatz
- Optimal eingestellte Prozessleistung, ruhiger und stabiler Schweißprozess
- Schnelle digitale Regelung des Prozesses, leicht zu führen und zu kontrollieren

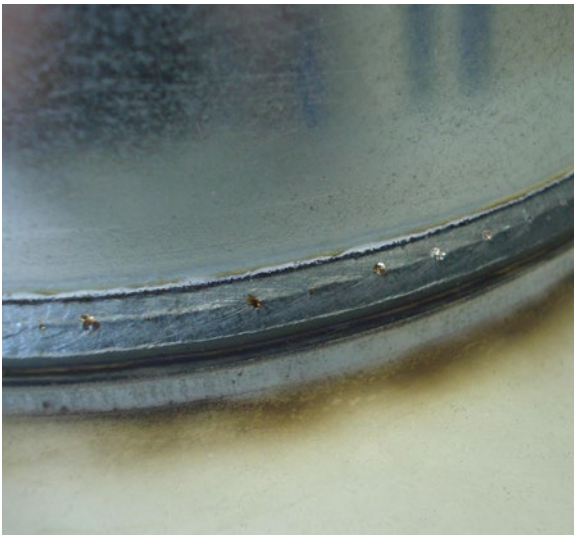




Schweißen von unlegierten Blechen



Schweißen von hochlegierten Blechen



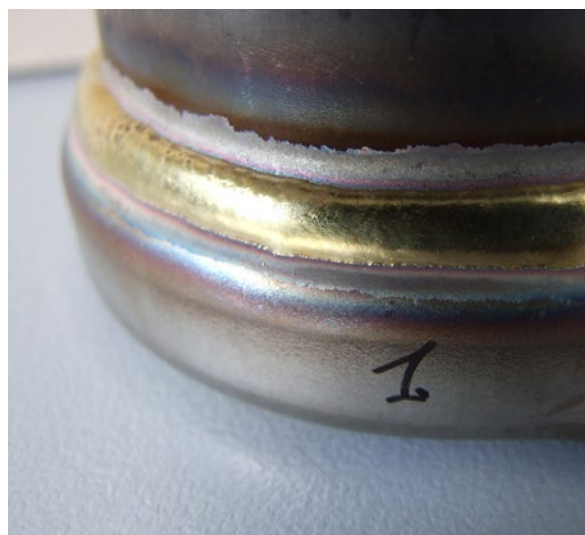
Schweißen von verzinkten Blechen



Löten von verzinkten Blechen



Löten von hochfesten Blechen z. B. Usibor[®]



Löten von hochlegierten (CrNi) Blechen

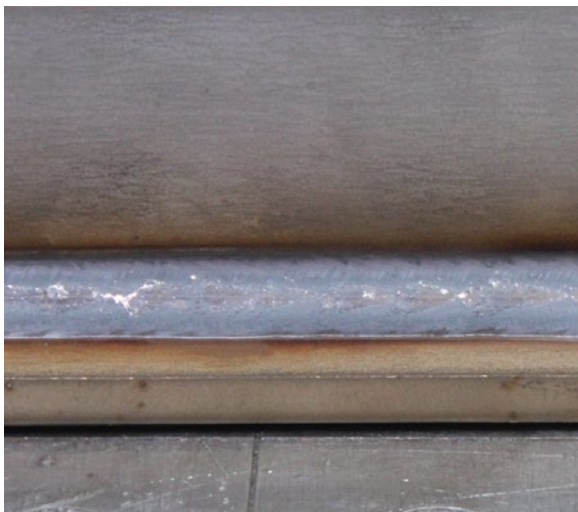
12.10 Schweißen von Füll- und Decklagen an hochlegiertem Stahl
Schweißprozess: forceArc puls® XQ

Vorteile:

- Konzentrierter digital modifizierter Impulslichtbogen
 - Nahezu spritzerfreies Schweißergebnis durch schnelle digitale Regelung des Schweißprozesses
 - Weniger Schweißrauch-Emissionen im Vergleich zum Impulslichtbogenschweißen
 - Wärmeminimierter Prozess mit niedrigerer Lichtbogenleistung und Streckenenergie im Vergleich zum Impulslichtbogen um bis zu 20% reduziert
 - Möglichkeit zur Reduzierung des Nahtvolumens durch kleinere Nahtöffnungswinkel beim Mehrlagenschweißen
 - Symmetrisch ausgebildete Kehlnähte mit maximal erreichbarer Nahtdicke (a-Maß)
 - Geringe Zwischenlagentemperatur / Reduzierung von Nebenzeiten
 - Flache, glatte Nahtoberfläche und nahezu spritzerfreier Prozess für weniger Nacharbeit, minimale Anlauffarben
- Schnelle digitale Regelung des Prozesses, leicht zu führen und zu kontrollieren
 - Konstante Nahtoberfläche bei unterschiedlichen Brennerstellungen
 - Bis zu 30 % Gesamtkosteneinsparung
 - Senkung von Lohn-, Schweißzusatzmaterial-, Schutzgas- und Energiekosten
 - Verkürzung der Produktionszeit
 - Bis zu 15 % niedrigere Wärmeeinbringung
 - Weniger Nacharbeit (Richten, Schleifen, Putzen) durch reduzierten Verzug, Anlauffarben und Spannung
 - Minimierung von Nebenzeiten durch kürzere Wartezeiten bei Mehrlagenschweißung
 - Bis zu 20 % höheres a-Maß
 - Symmetrische Nahtausbildung durch tiefen, konzentrierten Einbrand mit sicherer Wurzelerfassung
 - Nahezu spritzerfrei
 - Minimierung von Nacharbeit, auch bei Blechen mit verzunderter oder stark verunreinigter Oberfläche

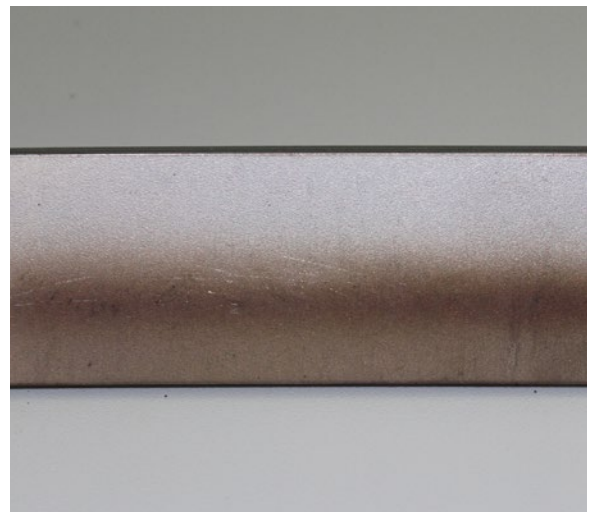
Vorderseite:

Kleinere Wärmeeinbringung bei forceArc puls® XQ, weniger Oxidation der Oberfläche, dadurch bessere Optik



Rückseite:

Geringe Wärmeeinbringung bei forceArc puls® XQ, weniger Oxidation der Oberfläche

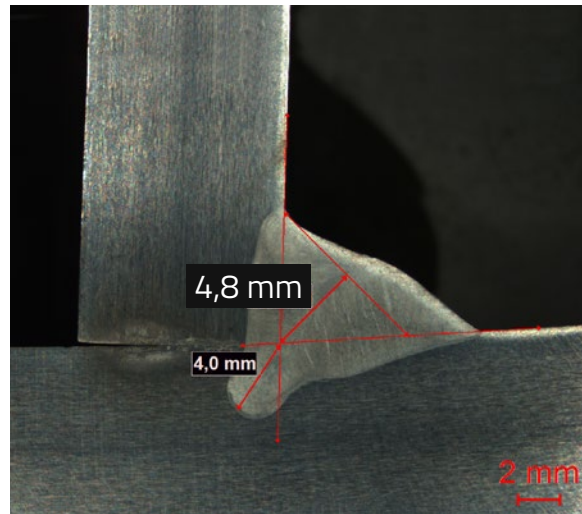
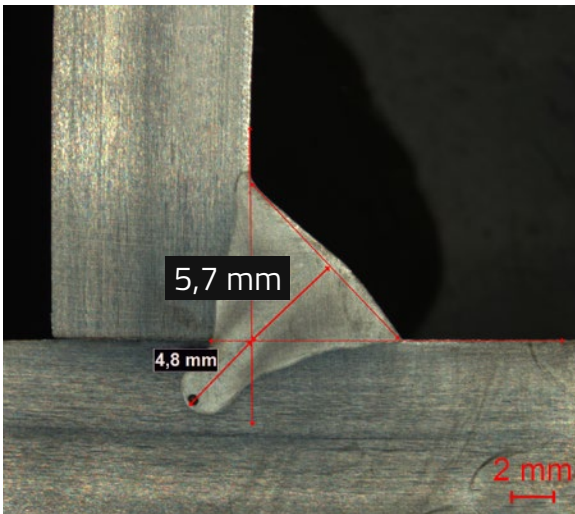


forceArc puls[®] XQ hat im oberen Leistungsbereich eine bis zu 15% niedrigere Wärmebringung im Vergleich zum Impulslichtbogen. Das führt zu weniger Anlauffarben und weniger Verzug im Bauteil.

Vorteile:

- Weniger Wärmeeinbringung
- Minimierte Streckenenergie

- Reduzierung von Verzug, Anlauffarben und Spannungen
- Weniger Nacharbeit (Richten, Schleifen, Putzen)
- Weniger Abbrand von Legierungselementen und dadurch höhere Korrosionsbeständigkeit



Prozess	DV in m/min	Streckenenergie in kJ/mm	Vs in m/min	a-Maß
forceArc puls [®] XQ	13	1,21 (-15%)	0,45	5,7 (+15%)
Impuls	13	1,44	0,45	4,8

12.11 Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen

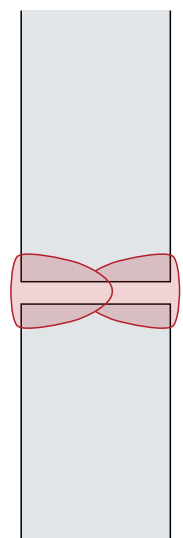
Schweißprozess:
Impulslichtbogen XQ

Vorteile:

- Schnelle und stabile Prozessregelung durch den Einsatz modernster Microprozessortechnik
- Ruhiger, stabiler Tropfenübergang, weniger Schmauch auf der Oberfläche
- Persönlich angepasste Nahtoptik durch frei einstellbare Funktion Superpuls

- Spritzerfreies Zünden durch reversierendes Drahtvorschubgerät
- Zuverlässiger Prozess schon ab 1 mm
- Schnelle digitale Regelung des Prozesses, leicht zu führen und zu kontrollieren

Beidseitiges Schweißen von Aluminium im Schiffbau



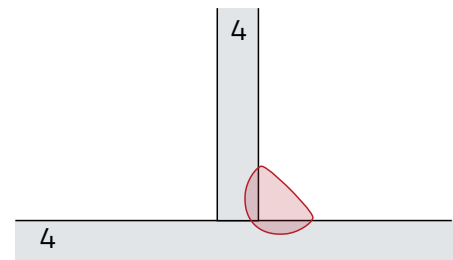
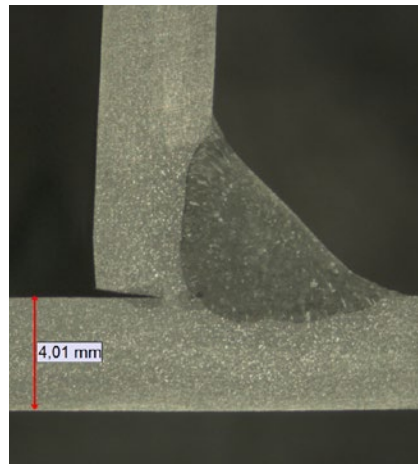
12.12 Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen in Zwangspositionen ohne Tannenbaumtechnik Schweißprozess: Positionsweld

Vorteile:

- Konzentrierter digital kontrollierter Impulslichtbogen
- Ab Werk optimal eingestellter Wechsel zwischen niedriger und hoher Schweißleistung
- Hohe Schweißgeschwindigkeiten im Vergleich zu der traditionellen Pendeltechnik

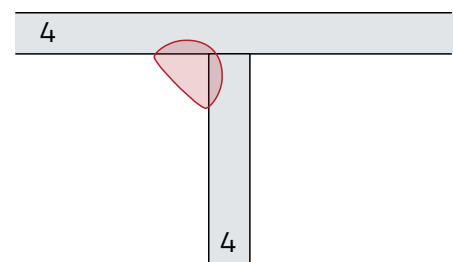
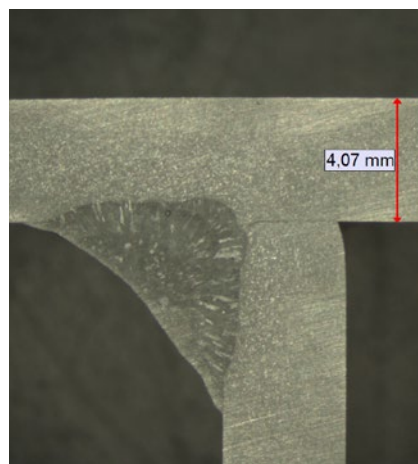
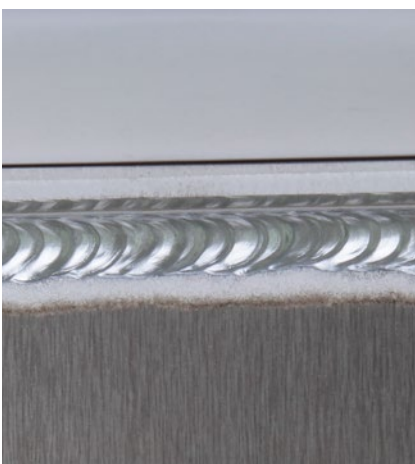
- Flache, gleichmäßig geschuppte Nahtoberfläche und nahezu spritzerfreier Prozess für weniger Nacharbeit
- Schnelle digitale Regelung des Prozesses, leicht zu führen und zu kontrollieren

Schweißen in steigender Position, einfaches Handling



AlMg5, Blechdicke 4 mm

Überkopfschweißen, einfaches Handling



AlMg5, Blechdicke 4 mm

12.13 Schweißen von Aluminium-Überlappnähten

Schweißprozess: acArc puls XQ

acArc puls XQ ist der optimale Lichtbogen zum Aluminiumschweißen im Dünoblechbereich. Der einfach zu kontrollierende Lichtbo-

gen ist hervorragend zum manuellen sowie auch zum automatisierten Schweißen geeignet. Durch die Reduzierung der Schweißrauchemissionen wird der Schweißer weniger belastet und die Schweißnähte bleiben sauber.



Vorteile:

- Saubere Schweißnähte durch stark reduzierte Magnesium-Oxide dank geringerer Tropfentemperatur
- Weniger Schweißrauchemissionen
- Stabiler Lichtbogen, auch bei großem Luftspalt
- Reduzierter Wärmeeintrag ins Blech
- Perfektes Aluminiumschweißen, auch von dünnen Blechen
- Hervorragende Luftspaltüberbrückung, auch bei automatisierten Anwendungen
- Minimierter Wärmeeintrag, kein Durchfallen des Bleches



Überlapp-Naht: Blechdicke 1,5 mm | 1,2 mm AlMg 4,5 Draht | Argon 100 % | 69 A | 15,4 V |
Schweißgeschwindigkeit 70 cm/min. | Luftspalt 1,5 mm

12.14 Schweißen von Aluminium-Kehlnähten

Schweißprozess: acArc puls XQ +
Positionweld

Mit acArc puls XQ schweißen Sie Bleche mit nur 1,0 mm Materialstärke auch manuell, dank geringer Wärmeeinbringung, ohne durchzufallen.

Vorteile:

- Minimierter Wärmeeintrag
- Höhere Schweißgeschwindigkeit

- Einfache und sichere Handhabung des Lichtbogens für manuelles und automatisiertes Schweißen
- Saubere Schweißnähte durch stark reduzierte Magnesium-Oxide
- Weniger Schweißrauchemissionen



Kehlnaht:
Blechdicke 1,0 mm | 1,2 mm AlMg 4,5 Draht |
Argon 100 % | 48 A | 14,1 V |
Schweißgeschwindigkeit 60 cm/min.

Mit Positionweld erzeugen Sie MIG-Schweißnähte in perfekter WIG-Optik. Auch das Schweißen in Zwangspositionen ist mit Positionweld ganz leicht.

Vorteile:

- MIG-Schweißen in WIG-Optik
- Einfaches Schweißen in Zwangslagen
- Hervorragend zum Verbinden unterschiedlicher Blechdicken



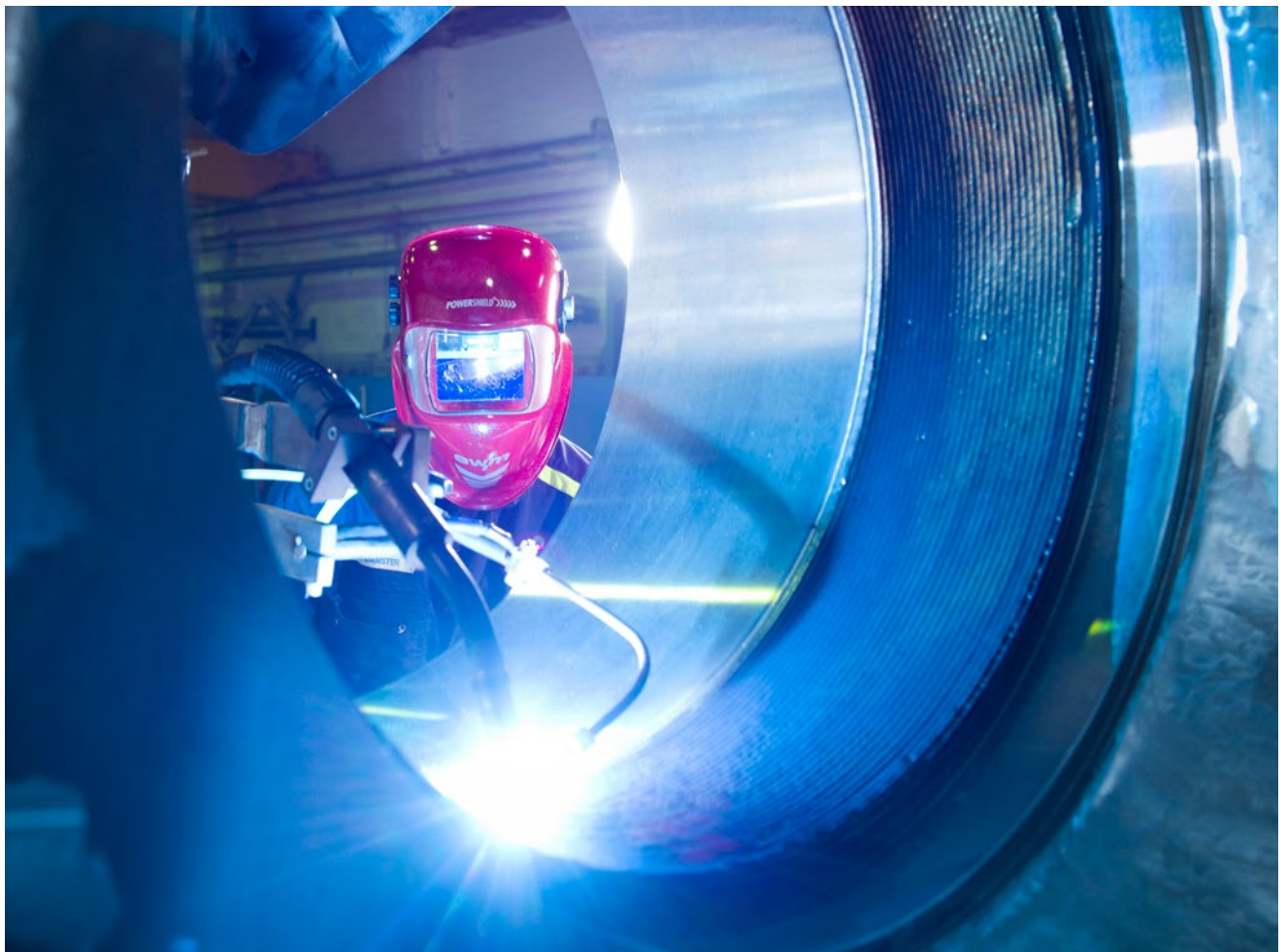
Kehlnaht:
Blechdicke 2 mm | 1,2 mm AlMg 4,5 Draht |
Argon 100 % | 73 A | 15,4 V |
Schweißgeschwindigkeit 45 cm/min.

12.15 Auftragschweißen

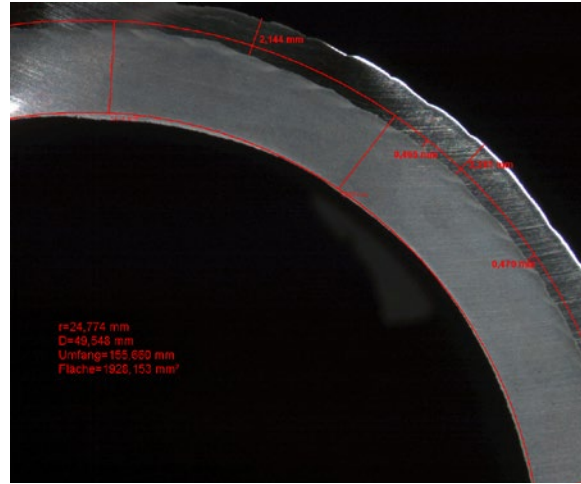
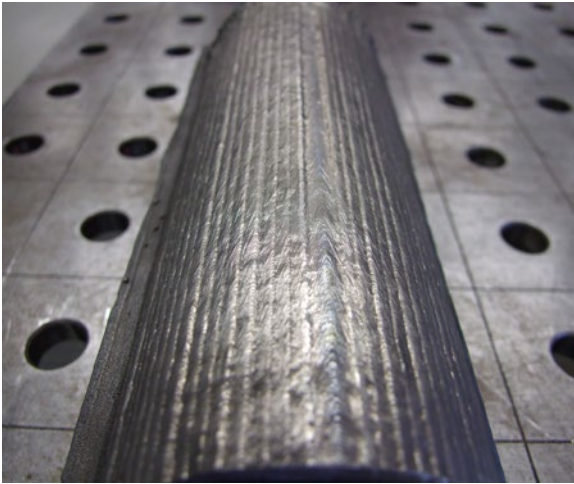
Schweißprozesse: Cladding / Hartauftragen

Vorteile:

- Geringe Aufmischung durch für das Auftragschweißen optimal eingestellte Prozesse
- Gleichmäßiger Aufbau der Auftragung, minimaler Zerspanungsaufwand
- Hohe Prozessstabilität durch digital geregelten Lichtbogen, minimierte Spritzerbildung
- Leicht zu bedienen und einzustellen



Auftragschweißen von Flossenrohrwänden



Korrosionsbeständige Auftragschweißung von Alloy 625 Ni-Basis Werkstoff

MAG + Heißdraht Auftragschweißen für höhere Abschmelzleistung

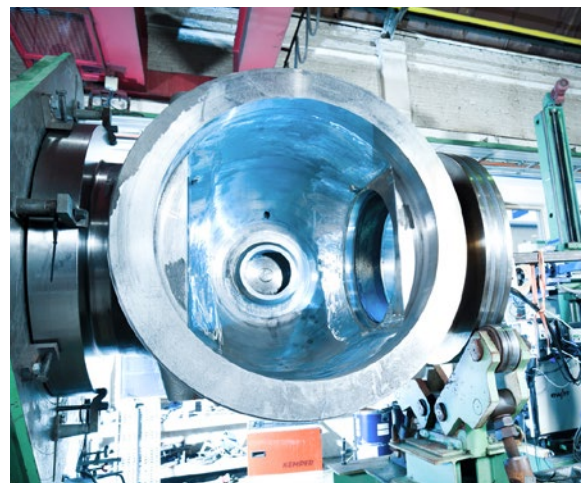
Neue Prozessvariante, Kombination eines MAG- Schweißprozesses mit einem zusätzlich zugeführten Heißdraht.

- Bis zu 13,8 kg Abschmelzleistung für eine deutlich höhere Produktivität
- Minimale Aufmischung

- Noch bessere Eigenschaften der aufgetragenen Schichten
- Einfacher Aufbau und Einstellung des Prozesses
- Geeignet zum Cladding und zum Hartauftragen (Panzern)

Weitere Informationen

www.ewm-group.com/sl/hartauftrag



13. Schrifttum

[1] R. Killing: Handbuch der Schweißverfahren, Teil 1: Lichtbogenschweißen, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 76/I, DVS-Verlag Düsseldorf 1999

[2] G. Aichele: Leistungskennwerte für Schweißen und Schneiden, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 72, DVS Verlag Düsseldorf 1994

[3] U. Reisgen, L. Stein: DVS-Fachbücher, Band 161, Grundlagen der Fügetechnik – Schweißen, Löten, Kleben

Impressum

Die MIG/MAG-Fibel, 6. Ausgabe

Aus der Schriftenreihe EWM-Wissen – rund ums Schweißen

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, verboten. Kein Teil dieser Broschüre darf ohne schriftliche Einwilligung von EWM in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© EWM AG

Dr.-Günter-Henle-Str. 8

D-56271 Mündersbach

Fon: +49 2680.181-244

Fax: +49 2680.181-0

mailto:info@ewm-group.com

http://www.ewm-group.com



WE ARE WELDING

EWM AG
Dr. Günter-Henle-Straße 8
56271 Mündersbach
Deutschland
Tel: +49 2680 181 0
Fax: +49 2680 181 244
E-Mail: info@ewm-group.com



#WEAREWELDING

Folge uns



EWM ist dein Partner für die beste Schweißtechnologie. Mit EWM schweißt du wirtschaftlicher, sicherer und hochwertiger. Innovative Anlagen, leistungsfähige Schweißverfahren, digitale Technologien und Services sowie die Beratungskompetenz von EWM unterstützen dich dabei, deine Schweißaufgaben perfekt zu verarbeiten.



www.ewm-group.com

Der Inhalt dieses Dokuments wurde sorgfältig recherchiert, überprüft und bearbeitet. Dennoch bleiben Änderungen, Schreibfehler und Irrtümer vorbehalten.